



"CONDENSADORES EN SERIE EN LINEAS DE SUB-TRANSMISION"

TESIS PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE
INGENIERO ELECTRICO CON LA ESPECIALIZACION
EN SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA.



HECTOR ENRIQUE BUSTOS LOPEZ

QUITO, NOVIEMBRE 1986

CERTIFICACION

Certifico que la presente tesis ha sido desarrollada en su totalidad por el Sr. Héctor Enrique Bustos López.



ING. VICTOR OREJUELA

Director de Tesis

AGRADECIMIENTO

Al Ing. Víctor Orejuela por la
colaboración prestada en el desarrollo
de la presente Tesis

DEDICATORIA

A mis queridos padres

y

A mi querida esposa

INDICE GENERAL

1.-	
1.1	INTRODUCCION 2
1.2	OBJETIVO 2
1.3	ALCANCE 3
2.- CRITERIOS GENERALES DE APLICACION	
2.1	CARACTERISTICAS GENERALES 6
2.1.1	Definiciones básicas 6
2.1.2	Evolución constructiva del condensador unidad 9
2.1.3	Partes constitutivas del condensador unidad 11
2.2	APLICACION DEL CONDENSADOR EN SERIE 13
2.2.1	Efectos que origina el condensador en serie en una línea eléctrica..... 13
2.2.1.1	El condensador en serie para mejorar la regulación de voltaje 14
2.2.1.2	El condensador en serie para mejorar el factor de potencia 15
2.2.1.3	El condensador en serie para aumentar la transferencia de potencia 16
2.2.2	Aplicación del condensador en serie 17
2.2.3	Motivos para el uso del condensador en serie para aumentar la transferencia de potencia de una línea 19
2.3	VENTAJAS Y DESVENTAJAS TECNICAS DE LA APLICACION DE UN CONDENSADOR EN SERIE 19
2.3.1	Ventajas técnicas del condensador en serie 19
2.3.2	Desventajas técnicas del condensador en serie 20
2.3.2.1	Resonancia sub-sincrónica de máquinas síncronas y de inducción 20
2.3.2.2	Ferroresonancia de transformadores 22
3.- LOCALIZACION DEL CONDENSADOR EN SERIE EN UNA LINEA DE SUB-TRANSMISION	
3.1	ASPECTOS GENERALES..... 24
3.1.1	Porcentaje de compensación serie de una línea 24
3.1.2	Localización de un condensador en serie en una línea 25
3.2	EFFECTOS SOBRE LAS CONSTANTES GENERALIZADAS DE UNA LINEA 25
3.2.1	Constantes generalizadas del condensador en serie: $[A_{cs} B_{cs} C_{cs} D_{cs}]$ 26
3.2.2	Constantes generalizadas equivalentes para la disposición línea- condensador en serie; con el condensador en serie ubicado en el ter- minal de envío: $[A_{eq} B_{eq} C_{eq} D_{eq}]$ 27
3.2.3	Constantes generalizadas equivalentes para la disposición línea- condensador en serie; con el condensador en serie ubicado en el terminal de recepción: $[A_{eq} B_{eq} C_{eq} D_{eq}]$ 29
3.2.4	Constantes generalizadas equivalentes para la disposición línea- condensador en serie; con el condensador en serie ubicado entre el terminal de envío y el de recepción: $[A_{eq} B_{eq} C_{eq} D_{eq}]$ 30

3.3 FORMULACION MATEMATICA PARA LA LOCALIZACION DE UN CONDENSADOR EN SERIE EN UNA LINEA.....	32
3.3.1 Fórmula de cálculo del voltaje terminal de recepción utilizando las constantes generalizadas equivalentes [A_{eq} B_{eq} C_{eq} D_{eq}]	33
3.3.2 Fórmula de cálculo de la corriente de línea (terminal de envío) utilizando las constantes generalizadas equivalentes	37
3.3.3 Programa digital para evaluar la localización de un condensador en serie en una línea	39
3.4 EL CONDENSADOR EN SERIE EN LAS DESVENTAJAS TECNICAS	
3.4.1 Predicción de resonancia sub-síncrona de máquinas síncronas	40
3.4.2 Predicción de resonancia sub-síncrona de máquinas de inducción.....	43
3.4.3 Control de resonancia sub-síncrona inestable	46
3.4.4 Predicción de ferroresonancia de transformadores	47
3.4.4.1 Formulación matemática del problema	47
3.4.4.2 Función Descriptiva Incremental	49
3.4.4.3 Predicción de ferroresonancia de transformadores	54
3.4.4.4 Control de ferroresonancia inestable	55
4.- SELECCION Y PROTECCION DEL CONDENSADOR EN SERIE	
4.1 SELECCION DEL CONDENSADOR EN SERIE	58
4.1.1 Especificaciones del condensador unidad	58
4.1.2 Características eléctricas del condensador unidad	59
4.1.3 Configuración del condensador en serie	63
4.1.4 Cálculo de la configuración del condensador en serie	64
4.2 PROTECCION DEL CONDENSADOR EN SERIE	68
4.2.1 Protección interna	68
4.2.2 Protección externa	70
4.2.2.1 Protección frente a cortocircuitos en el sistema	70
4.2.2.1.1 Espinterómetros	71
4.2.2.1.2 Distancia entre los electrodos de un espinterómetro	79
4.2.2.2 Protección frente a descargas atmosféricas	82
5.- ANALISIS TECNICO-ECONOMICO	
5.1 EVALUACION TECNICA	88
5.1.1 Principios básicos	88
5.1.2 Alternativas para suministrar reactivos a la carga	88
5.1.3 Método de evaluación técnica	90
5.1.4 Formulación matemática para la evaluación técnica de la alternativa: condensadores en serie	91
5.1.4.1 Fórmulas de cálculo del voltaje terminal de recepción y del ángulo de operación de la línea	91
5.1.4.2 Fórmula de cálculo de la corriente de línea	94
5.1.4.3 Determinación del valor del condensador en serie hasta el cual el voltaje en el terminal de recepción y la corriente de línea tienen valor real	95
5.1.5 Formulación matemática para la evaluación técnica de la alternativa: condensadores en derivación	96
5.1.5.1 Fórmulas de cálculo de la potencia reactiva en condensadores en derivación con la carga y del ángulo de operación de la línea	96
5.1.5.2 Fórmula de cálculo de la corriente de línea	101
5.1.6 Formulación matemática para la evaluación de la alternativa: líneas en paralelo	102
5.1.6.1 Fórmulas de cálculo del voltaje terminal de recepción y del ángulo de operación de la línea	104
5.1.6.2 Fórmula de cálculo de la corriente de línea	106

5.2 COMPONENTES DE COSTO	107
5.2.1 Componentes de costo de una instalación de condensadores en serie	107
5.2.2 Componentes de costo de una instalación de condensadores en derivación con la carga	110 ✓
5.2.3 Componentes de costo de la instalación: líneas en paralelo	111
5.3 EVALUACION ECONOMICA	113
5.3.1 Método de evaluación económica	113
5.3.2 Formulación matemática para la evaluación económica de las alternativas: condensadores en serie, condensadores en derivación y líneas en paralelo	114
5.3.2.1 Fórmula de cálculo del valor presente del costo de la instalación	114
5.3.2.2 Fórmula de cálculo del valor presente del costo de las pérdidas	114
6.- EJEMPLO DE APLICACION	
LINEA DE SUB-TRANSMISION AMBATO-RIOBAMBA A 69 [KV]	
6.1 OBJETIVO	119
6.2 DATOS DEL SISTEMA	119
6.2.1 Configuración y parámetros generales del sistema	120
6.2.2 Datos de la línea Ambato-Riobamba	120
6.2.3 Datos de carga del sistema Riobamba	123
6.2.4 Datos de generación del sistema Riobamba	124
6.2.5 Valores de carga neta a ser servida por la líneas Ambato-Riobamba	124
6.2.6 Factor de carga $[F_c]$, costo anual del [KW] ($[K_p]$) y costo del [KWH] ($[K_g]$)	126
6.2.7 Datos de voltaje en el terminal de envío de la línea Ambato-Riobamba	126
6.3 CARACTERISTICAS TECNICAS	127
6.3.1 Determinación del año desde el cual se requiere suministrar reactivos a la carga	128
6.4 EVALUACION TECNICA-ECONOMICA DE ALTERNATIVAS	129
6.4.1 Alternativa: Condensadores en serie	129
6.4.1.1 Evaluación técnica	129
6.4.1.1.1 Selección del porcentaje de compensación serie	
6.4.1.1.1.1 Análisis técnico	129
6.4.1.1.1.2 Análisis económico	138
6.4.1.1.1.2.1 Valor económico del 150 [%] de compensación serie	139
6.4.1.1.1.2.1.1 Tamaño del condensador en serie	139
6.4.1.1.1.2.1.2 Selección del condensador en serie	141
6.4.1.1.1.2.1.3 Cálculo del valor económico del 150 [%] de compensación serie	148
6.4.1.1.1.2.1.3.1 Cálculo del valor presente del costo de la instalación	149
6.4.1.1.1.2.1.3.2 Cálculo del valor presente del costo de las pérdidas	150
6.4.1.1.1.2.1.3.3 Valor económico del 150 [%] de compensación serie	153
6.4.1.1.1.2.2 Valor económico del 200 [%] de compensación serie	154
6.4.1.1.1.2.2.1 Tamaño del condensador en serie	154
6.4.1.1.1.2.2.2 Selección del condensador en serie	156
6.4.1.1.1.2.2.3 Cálculo del valor económico del 200 [%] de compensación serie	161
6.4.1.1.1.2.2.3.1 Cálculo del valor presente del costo de la instalación	161
6.4.1.1.1.2.2.3.2 Cálculo del valor presente del costo de las pérdidas	162

6.4.1.1.1.2.2.3.3 Valor económico del 200 [%] de compensación serie.....	164
6.4.1.1.1.2.3 Valor económico del 250 [%] de compensación serie	165
6.4.1.1.1.2.3.1 Tamaño del condensador en serie	165
6.4.1.1.1.2.3.2 Selección del condensador en serie	166
6.4.1.1.1.2.3.3 Cálculo del valor económico del 250 [%] de compensación serie	171
6.4.1.1.1.2.3.3.1 Cálculo del valor presente del costo de la instalación	171
6.4.1.1.1.2.3.3.2 Cálculo del valor presente del costo de las pérdidas	172
6.4.1.1.1.2.3.3.3 Valor económico del 250 [%] de compensación serie.....	175
6.4.1.1.1.2.4 Valor económico del 300 [%] de compensación serie	176
6.4.1.1.1.2.4.1 Tamaño del condensador en serie	176
6.4.1.1.1.2.4.2 Selección del condensador en serie	177
6.4.1.1.1.2.4.3 Cálculo del valor económico del 300 [%] de compensación serie	182
6.4.1.1.1.2.4.3.1 Cálculo del valor presente del costo de la instalación	182
6.4.1.1.1.2.4.3.2 Cálculo del valor presente del costo de las pérdidas	183
6.4.1.1.1.2.4.3.3 Valor económico del 300 [%] de compensación serie.....	186
6.4.1.1.1.2.5 Determinación del porcentaje de compensación serie	187
6.4.1.1.2 Tamaño del condensador en serie	188
6.4.1.1.3 Selección del condensador en serie	193
6.4.1.1.4 Verificación de que el condensador en serie cumple los requerimientos de la carga	199
6.4.1.1.5 Localización del condensador en serie	202
6.4.1.1.6 El condensador en serie en las desventajas técnicas	212
6.4.1.1.6.1 Resonancia sub-síncronas en máquinas sincrónicas	212
6.4.1.1.6.1.1 Predicción de resonancia sub-síncrona de máquinas sincrónicas	212
6.4.1.1.6.2 Ferrorresonancia de transformadores	213
6.4.1.1.6.2.1 Predicción de ferrorresonancia de transformadores	213
6.4.1.1.7 Protección del condensador en serie	217
6.4.1.1.7.1 Protección interna	217
6.4.1.1.7.2 Protección externa	220
6.4.1.1.7.2.1 Protección frente a cortocircuitos en el sistema	220
6.4.1.1.7.2.2 Protección frente a descargas atmosféricas	226
6.4.1.1.8 Esquema de la instalación del banco del condensador en serie	230
6.4.1.2 Evaluación económica	231
6.4.1.2.1 Cálculo del valor presente del costo de la instalación	233
6.4.1.2.2 Cálculo del valor presente del costo de las pérdidas	235
6.4.1.2.3 Valor económico de la alternativa: condensadores en serie (219[%] compensación serie)	237
6.4.2 Alternativa: condensadores en derivación con la carga	239
6.4.2.1 Evaluación técnica	239
6.4.2.1.1 Análisis técnico	239
6.4.2.1.2 Potencia reactiva en condensadores en derivación con la carga	242
6.4.2.1.2.1 Selección de los condensadores en derivación con la carga	243
6.4.2.1.3 Verificación de que la alternativa -condensadores en derivación- satisface los requerimientos de la carga	252
6.4.2.2 Evaluación económica	255
6.4.2.2.1 Cálculo del valor presente del costo de la instalación de etapa de 4.8 [MYAR]	258
6.4.2.2.2 Cálculo del valor presente del valor residual de la instalación de la etapa de 4.8 [MYAR]	260
6.4.2.2.3 Cálculo del valor presente del costo de la instalación de la primera etapa de 10.8 [MYAR]	260

6.4.2.2.4	Cálculo del valor presente del valor residual de la instalación de la primera etapa de 10.8 [MYAR]	261
6.4.2.2.5	Cálculo del valor presente del costo de la instalación de la segunda etapa de 10.8 [MYAR]	263
6.4.2.2.6	Cálculo del valor presente del valor residual de la instalación de la segunda etapa de 10.8 [MYAR]	265
6.4.2.2.7	Valor presente al año 1986 del costo de la instalación de la alternativa: condensadores en derivación	266
6.4.2.2.8	Valor presente al año 1986 del valor residual de la instalación de la alternativa: condensadores en derivación	268
6.4.2.2.9	Cálculo del valor presente del costo de las pérdidas	269
6.4.2.2.10	Valor económico de la alternativa: condensadores en derivación	271
6.4.3	Alternativa: otra línea de sub-transmisión adicional en paralelo a la ya existente	273
6.4.3.1	Evaluación técnica	273
6.4.3.1.1	Análisis técnico	273
6.4.3.1.2	Potencia reactiva en condensadores en derivación con la carga	277
6.4.3.1.2.1	Selección de los condensadores en derivación con la carga	279
6.4.3.1.3	Verificación de que la alternativa -otra L/ST adicional en paralelo a la ya existente-; además con condensadores en derivación satisface los requerimientos de la carga	282
6.4.3.2	Evaluación económica	284
6.4.3.2.1	Cálculo del valor presente del costo de la instalación de la L/ST	287
6.4.3.2.2	Cálculo del valor presente del valor residual de la instalación de la L/ST	288
6.4.3.2.3	Cálculo del valor presente de la instalación de la primera etapa de 3.6 [MYAR]	289
6.4.3.2.4	Cálculo del valor presente del valor residual de la instalación de la primera etapa de 3.6 [MYAR]	291
6.4.3.2.5	Cálculo del valor presente del costo de la instalación de la segunda etapa de 3.6 [MYAR]	292
6.4.3.2.6	Cálculo del valor presente del valor residual de la instalación de la segunda etapa de 3.6 [MYAR]	294
6.4.3.2.7	Valor presente al año 1986 del costo de la instalación de la alternativa: otra L/ST adicional en paralelo a la ya existente	295
6.4.3.2.8	Cálculo del valor presente del valor residual de la instalación de la alternativa: otra L/ST adicional en paralelo a la ya existente	297
6.4.3.2.9	Cálculo del valor presente del costo de las pérdidas	299
6.4.3.2.10	Valor económico de la alternativa: otra L/ST adicional en paralelo a la ya existente	302
6.5	COMPARACION ECONOMICA DE ALTERNATIVAS	304

7.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1	CONCLUSIONES	308
7.1.1	Conclusiones generales al tema	308
7.1.2	Conclusiones específicas al ejemplo de aplicación: L/ST Ambato-Riobamba	309
7.2	RECOMENDACIONES	312

INDICE DE APENDICES

APENDICE 3A1	315
APENDICE 3A2	317
APENDICE 3A3	320
APENDICE 3A4	327
APENDICE 4A1	335
APENDICE 6A1	346
APENDICE 6A2	351
APENDICE 6A3	358
APENDICE 6A4	369
APENDICE 6A5	375
APENDICE 6A6	381
APENDICE 6A7	387
APENDICE 6A8	405
APENDICE 6A9	412
APENDICE 6A10	419
APENDICE 6A11	439
APENDICE 6A12	445
APENDICE 6B1	449
APENDICE 6B2	454
APENDICE 6B3	457
APENDICE 6B4	466
APENDICE 6C1	470
BIBLIOGRAFIA	475

1.1 INTRODUCCION

La necesidad de transmitir grandes bloques de potencia a través de las líneas de transporte de energía eléctrica, para satisfacer los requerimientos de demanda de áreas densamente pobladas, ha venido a constituir uno de los grandes retos de la Ingeniería Eléctrica actual.

El empleo de conductores en haz, líneas o circuitos en paralelo, condensadores en serie, etc, aumentan materialmente la capacidad de transmisión de líneas de transporte de energía eléctrica.

El crecimiento continuo de la demanda y los altos costos que representan las inversiones en nuevas plantas de generación y ampliación de los circuitos de transporte de energía eléctrica mediante nuevas líneas, ha llevado a operar las líneas existentes a la mayor eficiencia posible, mediante la utilización extensiva de instalaciones de condensadores en serie, especialmente a nivel de altos voltajes del orden EHV; en países europeos, Japón, E.E.U.U., etc.

En consecuencia, debido al creciente uso que vienen teniendo en la época actual los condensadores en serie para aumentar la capacidad de transporte de potencia de las líneas, se ha visto conveniente realizar un estudio concerniente a ellos, a nivel de Sub-transmisión.

1.2 OBJETIVO

El presente trabajo tiene por objeto tratar aspectos relativos a la compensación serie como: aplicación de condensadores en serie, beneficios y desventajas técnicas que se derivan de la aplicación, localización de un condensador en serie en una línea, configuración y protección de un

condensador en serie, factibilidad técnica - económica de usar la compensación serie como un recurso válido para aumentar la transferencia de potencia de líneas de transporte de energía eléctrica, frente a otros métodos alternativos de conseguir el mismo propósito como son el muy difundido método de compensación mediante condensadores en derivación y el método de usar líneas en paralelo.

1.3 ALCANCE

El trabajo se encuentra desarrollado en 7 capítulos y los aspectos a los que se hizo mención en la sección 1.2 se abarcan enfocándoles como a continuación se describe:

Capítulo 1.- Contiene la introducción, objetivo y alcance del trabajo.

Capítulo 2.- Trata sobre características físicas constructivas y definiciones básicas inherentes a los condensadores en serie, descripción de la aplicación, ventajas y desventajas técnicas derivadas de la aplicación. En lo que respecta a las desventajas técnicas, es decir en lo concerniente a resonancia sub-sincrónica de máquinas sincrónicas e inducción y ferroresonancia de transformadores; sólo se abordan aspectos generales que se consideran importantes para el entendimiento cualitativo de aquellas, puesto que un tratamiento amplio de las desventajas técnicas involucra también un conocimiento amplio del comportamiento de las máquinas citadas, lo cual está fuera del propósito de la presente tesis.

Capítulo 3.- Se desarrollan las herramientas matemáticas para ser convenientemente usadas en un programa de computador

digital, tendiente a determinar la más adecuada ubicación dentro de una línea, de un condensador en serie. Por su parte, las herramientas matemáticas mencionadas se desarrollan modelando a la línea y al condensador en serie como cuadripolos con sus correspondientes constantes generalizadas $[ABCD]$, es decir considerando parámetros distribuidos. Además, como parte complementaria al tópico de desventajas técnicas, del capítulo 2, en el capítulo 3 se enfocan aspectos relativos a la predicción y control de las desventajas técnicas referidas.

Capítulo 4.- Se refiere a la manera de seleccionar la configuración de un condensador en serie y a los métodos que se aplican para la protección de un condensador en serie.

Capítulo 5.- Se describe el método de evaluación técnica-económica de las alternativas: condensadores en serie, condensadores en derivación y líneas en paralelo. La evaluación técnica se la hace, por un lado, modelando a los elementos del circuito de la línea y del condensador en serie como parámetros concentrados y por otro lado, tomando en consideración el hecho de que las líneas de subtransmisión son líneas cortas.

Capítulo 6.- Se desarrolla el ejemplo de aplicación "Línea de Subtransmisión Ambato-Riobamba a 69 [kV]" para las alternativas: condensadores en serie, condensadores en derivación y otra L/ST adicional en paralelo a la ya existente; en base a la teoría desarrollada en los capítulos anteriores.

Capítulo 7.- Se formulan conclusiones y recomendaciones, en base al ejemplo de aplicación desarrollado en el capítulo 6.

CAPITULO 2

2.- CRITERIOS GENERALES DE APLICACION

- 2.1 CARACTERISTICAS GENERALES
- 2.2 APLICACION DEL CONDENSADOR EN SERIE
- 2.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS TECNICAS DE LA
APLICACION DE UN CONDENSADOR EN SERIE

2.- CRITERIOS GENERALES DE APLICACION.

2.1 CARACTERISTICAS GENERALES

2.1.1 Definiciones básicas.

Condensador.- Se denomina condensador a un dispositivo compuesto por dos conductores próximos, que reciben cargas del mismo valor y de signos opuestos.

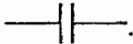
La carga neta del condensador en conjunto es nula y; cuando se habla de la carga de un condensador, se entiende la carga de cualquiera de los conductores, sin tener en cuenta el signo.

Capacitancia de un condensador.- La capacitancia [C] de un condensador se define como la razón de la carga [Q], de cualquiera de los conductores, a la diferencia de potencial [V_{ab}], que existe entre ellos:

$$C = \frac{Q}{V_{ab}} \quad [2.1]$$

La unidad de capacitancia se denomina [FARADIO]; el mismo que por definición es un [COULOMBIO] por un [VOLTIO]. Puesto que el Faradio es una unidad de capacitancia demasiado grande, se utiliza como unidad más adecuada: el [MICROFARADIO].

La capacitancia nominal de un condensador se expresa en microfaradios y es aquel valor bajo condiciones específicas de prueba (temperatura de la caja y dieléctrico de 25 [°C] a frecuencia nominal). [Ref.21].

Simbología de un condensador.- Un condensador se representa por el símbolo .

El tipo más corriente de condensador se compone de dos láminas conductoras paralelas, separadas por una distancia pequeña, comparada con las dimensiones lineales de las láminas (FIG 2.1).

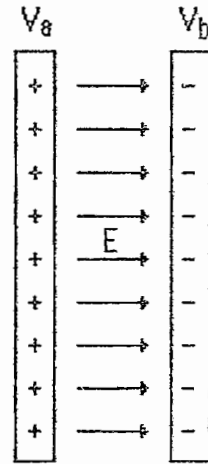


FIG 2.1 Condensador plano

El campo eléctrico [E] de este condensador está localizado en el espacio comprendido entre las láminas como se representa en la FIG 2.1, aún cuando hay una ligera dispersión del campo hacia el exterior, la misma que se hace relativamente menor a medida que se aproximan las láminas. Este dispositivo se denomina condensador de láminas paralelas o simplemente condensador plano.

La mayor parte de los condensadores llevan entre sus láminas una sustancia no conductora o dieléctrica. La función del dieléctrico colocado entre las láminas es triple:

- 1.- Resuelve el problema mecánico de mantener dos grandes láminas metálicas a distancia muy pequeña, sin contacto real alguno.
- 2.- Puesto que su rigidez dieléctrica es mayor que la del aire, aumenta la diferencia máxima de potencial que el condensador es capaz de resistir sin perforarse.
- 3.- La capacitancia de un condensador de dimensiones dadas, es varias veces mayor con un dieléctrico que separe sus láminas, que si éstas estuvieran en el vacío.

Frecuencia nominal del condensador.- Es la frecuencia a la cual está diseñado para operar el condensador. A menos que se diga otra cosa, la frecuencia será de 60 [Hz].

Corriente nominal del condensador.- Es el valor [R.M.S.] de la corriente sinusoidal a frecuencia y capacitancia nominales, para las cuales ha sido diseñado el condensador.

Voltaje nominal del condensador.- Es el valor [R.M.S.] del voltaje entre los terminales del condensador, calculado a capacitancia, corriente y frecuencia nominales.

Potencia reactiva nominal del condensador.- Es la potencia reactiva, generalmente expresada en [KVAR], calculada a capacitancia, corriente y frecuencia nominales.

Condensador elemento.- Es un dispositivo constituido de electrodos, separados por un dieléctrico.

Condensador unidad.- Es una estructura, de uno o más condensadores elemento, dentro de una sola caja, con terminales para conexión externa.

Condensador grupo.- Es una estructura, de uno o más condensadores unidad, conectados en paralelo.

Condensador en serie.- Es un dispositivo, que tiene el propósito principal de introducir reactancia capacitiva dentro de un circuito eléctrico.

Banco del condensador en serie.- Es una estructura, consistente en condensadores unidad y el equipo auxiliar asociado de protección y control que se requiere para la operación adecuada del condensador en serie.

2.1.2 Evolución constructiva del condensador unidad.

Alrededor de 1914, los condensadores conectados en paralelo se aplicaron por primera vez, para corregir el factor de potencia. Su uso fue limitado durante los 20 años siguientes por el alto costo del [KVAR].

A partir de 1932 todos los condensadores emplearon el aceite mineral como dieléctrico; sin embargo, éste tiene la tendencia a oxidarse, por lo que a partir de ese tiempo, se han realizado estudios para el desarrollo de dieléctricos líquidos sintéticos que resulten:

- 1.- Permanentes
- 2.- Inoxidables
- 3.- Incombustibles.

Los aceites clorados, de entre los cuales se puede citar al askarel, satisfacen estas condiciones. La utilización de askarel (en la actualidad está prohibido el uso de askarel por sus efectos contaminantes y cancerígenos) permitió que los condensadores unidad sean construídos con menor peso y tamaño y, es así como la sustitución de lino por láminas de papel Kraft y del aceite mineral por askarel, hizo posible la construcción de condensadores unidad de hasta 15 [KVAR] nominales. Luego, por los años 60,

se construyeron condensadores unidad de hasta 100 [KVAR] nominales, gracias a refinamiento del dieléctrico: láminas de papel Kraft/askarel. Poco después, la tendencia más acentuada al uso de láminas aislantes de plástico (propileno), permitió que por el año 1965 se diseñara condensadores unidad de 150 [KVAR] nominales, usando como dieléctrico: láminas de papel Kraft/láminas de plástico/askarel.

Posteriores mejoramientos llevaron a obtener condensadores unidad de hasta 300 [KVAR] nominales.

La aceptación de los condensadores, ha sido debido a los siguientes factores: [Ref. 38]

- 1.- Reducción del precio de venta.
- 2.- La mejora del diseño y los métodos de fabricación, que han dado como resultado tamaño y peso pequeños.
- 3.- El consumo de potencia es insignificante.
- 4.- Construcción para instalación exterior.
- 5.- Mejor entendimiento de los beneficios del sistema, acrecentados por la experiencia al usarlos.
- 6.- Reducción de fallas. Se ha alcanzado una vida media útil de alrededor de 20 [AÑOS].

La tabla 2.1 ilustra los progresos que ha experimentado el condensador unidad, en lo que se refiere a sus valores nominales, volumen, densidad y costo.

TABLA 2.1

EFECTO DE LOS MEJORAMIENTOS DEL DISEÑO DE CONDENSADORES UNIDAD				
AÑO	POTENCIA REACTIVA NOMINAL DE LA UNIDAD	VOLUMEN	DENSIDAD	COSTO
	[KVAR]	[pie ³ /KVAR]	[lb/KVAR]	[DOLARES/KVAR]
1929	10	130	8.6	18.70
1930	10	65	4.4	18.20
1931	15	43	3.2	16.00
1959	50	32	2.0	3.30
1962	100	19	1.2	1.50
1965	150	11	0.7	1.70
1977	300	10	0.6	1.70
1980	300	8	0.4	1.80

2.1.3 Partes constitutivas del condensador unidad

Cada condensador unidad está compuesto de un gran número de condensadores elemento. Un condensador elemento está constituido por dos láminas de aluminio, separados por tres láminas; las cuales en ciertos casos suelen ser de papel Kraft, o en otros casos, como se puede ver en la FIG 2.2, dos son de plástico y una de papel Kraft. Además, los condensadores elemento son envueltos dentro de cilindros con muchos pies cuadrados de dieléctrico activo por cada cilindro y comprimidos en forma rectangular para ser insertados dentro del tanque del condensador unidad.

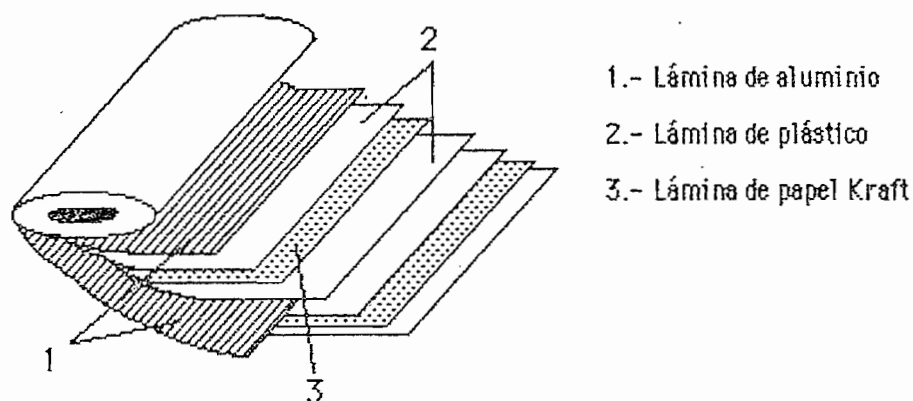


FIG 2.2 Condensador elemento

Dentro de cada condensador unidad, los condensadores elemento están conectados en combinaciones serie-paralelo, como se puede observar en la FIG 2.3.

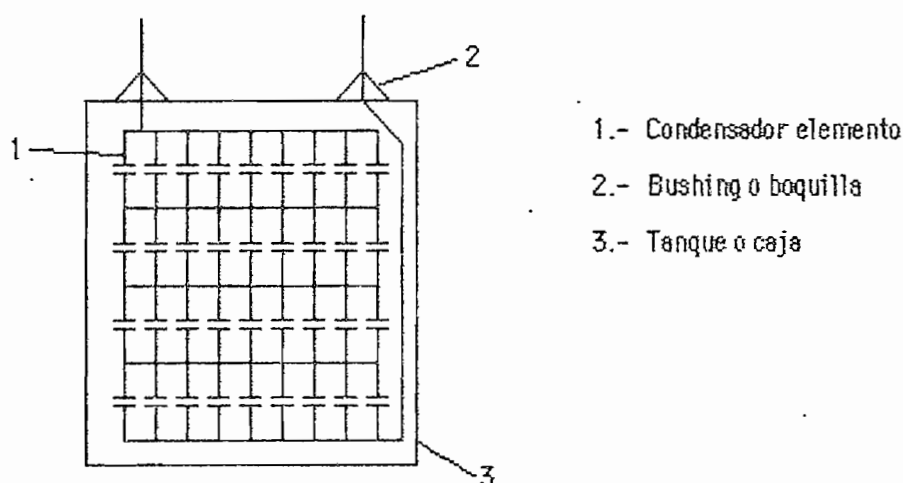


FIG 2.3 Condensador unidad formado por 36 condensadores elemento en combinaciones serie-paralelo

El montaje del condensador unidad incluye: inserción de condensadores elemento y resistor de descarga, conexiones internas, evacuación en un horno para eliminar la humedad, llenado con líquido dieléctrico impregnante, colocación de los bushings o boquillas y acabados del tanque.

La FIG 2.4 muestra la disposición y designación de las partes constitutivas de un condensador unidad.

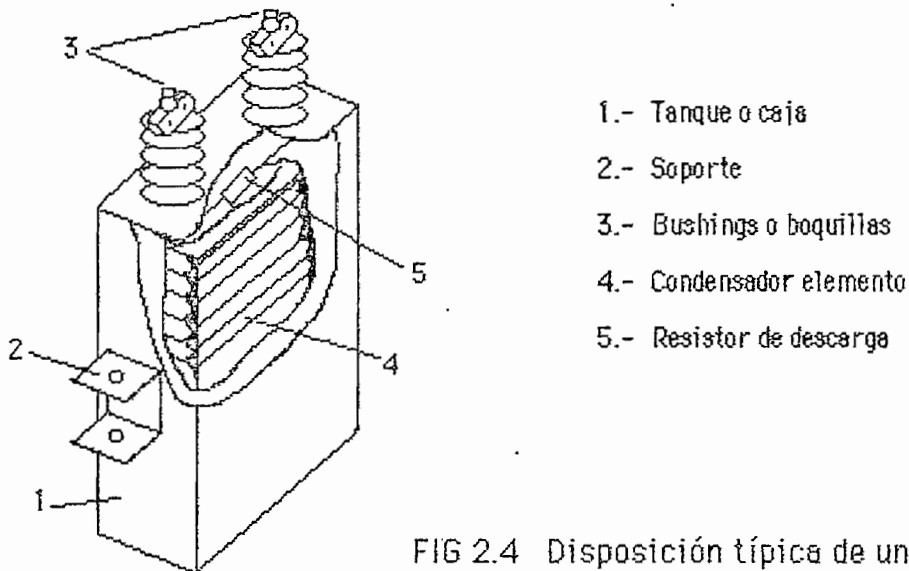


FIG 2.4 Disposición típica de un condensador unidad

2.2 APLICACION DEL CONDENSADOR EN SERIE

2.2.1 Efectos que origina el condensador en serie en una línea eléctrica.

Un condensador, conectado en serie con una línea eléctrica fundamentalmente compensa la caída de voltaje de ella. La compensación de la caída de voltaje de una línea eléctrica, debido a la aplicación de un condensador en serie con ella, a su vez trae los siguientes efectos:

- 1.- Mejora la regulación de voltaje
- 2.- Mejora el factor de potencia
- 3.- Aumento de transferencia de potencia.

2.2.1.1 El condensador en serie para mejorar la regulación de voltaje.

Un condensador en serie que está presente en cualquier línea eléctrica introduce una reactancia capacitiva (negativa), en serie con la reactancia inductiva (positiva) propia de la línea; reactancia capacitiva que por su parte lo que hace es reducir la impedancia equivalente que tiene una línea entre los terminales de envío y recepción. El condensador en serie a través de su reactancia capacitiva actúa como un generador de reactivos que permite elevar el voltaje a nivel de la carga, de tal manera que disminuye la caída de voltaje de la línea y en consecuencia mejora la regulación de voltaje de la misma.

Así, si la caída de voltaje de una línea viene dada por:

$$\Delta V = I R \cos\theta + I X_L \operatorname{sen}\theta \quad [2.2]$$

con:

$$\Delta V = e_s - e_r \quad [2.3]$$

donde:

ΔV : caída de voltaje de la línea

e_s : voltaje (en magnitud) del terminal de envío de la línea

e_r : voltaje (en magnitud) del terminal de recepción de la línea

I : corriente (en magnitud) de la línea

R : resistencia de la línea

X_L : reactancia inductiva de la línea

θ : ángulo del factor de potencia de la carga

Si en la línea insertamos un condensador en serie, su reactancia capacitiva [X_{CS}], disminuye la reactancia total de la línea y el efecto puede verse en la siguiente ecuación:

$$\Delta V = IR \cos\theta + I [X_L - X_{CS}] \sin\theta \quad [2.4]$$

donde:

X_{CS} : reactancia capacitiva del condensador en serie.

El suministro de reactivos del condensador en serie hacia la carga y por tanto la elevación del voltaje en ella es dependiente de la reactancia capacitiva del condensador en serie y de la corriente de carga que circula por el condensador debido justamente a que está en serie con ella. Se debe enfatizar que el condensador en serie no mejora o altera el voltaje en el lado de la fuente. [Ref. 2, Ref. 6]

2.2.1.2 El condensador en serie para mejorar el factor de potencia

Un condensador en serie mejora el factor de potencia del circuito visto desde el lado que da hacia la fuente o terminal de envío de la línea; lo cual se puede verificar observando la FIG 2.5 y su correspondiente diagrama fasorial.

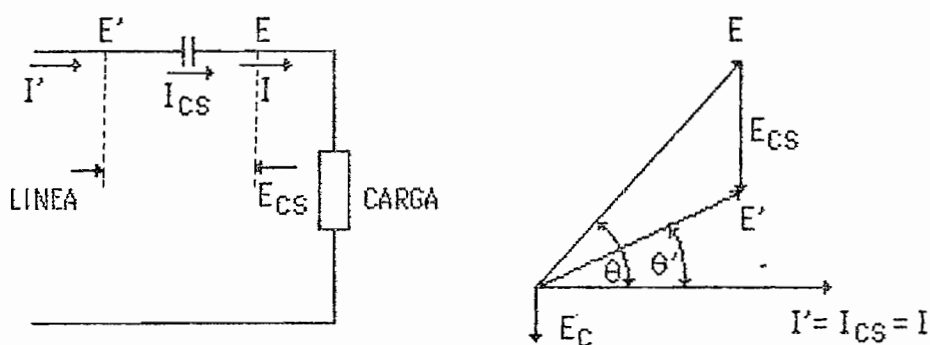


FIG 2.5 Efecto del condensador serie en el mejoramiento del factor de potencia del terminal de envío.

2.2.1.3 El condensador en serie para aumentar la transferencia de potencia.

El condensador en serie al disminuir la caída de voltaje de una línea permite aumentar la transferencia de potencia a través de ella.

Así, en una línea sin condensador en serie (no considerando la resistencia de línea), la ecuación de transferencia de potencia activa está dada por la ecuación:

$$P = \frac{e_s e_r}{X_L} \text{ sen } \Delta \quad [2.5]$$

donde:

e_s : voltaje (en magnitud) del terminal de envío de la línea

e_r : voltaje (en magnitud) del terminal de recepción de la línea

X_L : reactancia inductiva de la línea

Δ : ángulo de operación de la línea (diferencia entre el ángulo del fasor voltaje terminal de envío y el ángulo del fasor voltaje terminal de recepción)

Si un condensador en serie, es insertado en la línea, el efecto en la ecuación de transferencia de potencia activa se puede ver en la siguiente ecuación:

$$P = \frac{e_s e_r}{X_L - X_{CS}} \text{ sen } \Delta \quad [2.6]$$

donde:

X_{CS} : reactancia capacitiva del condensador en serie.

Es decir que, la presencia de un condensador en serie en una línea eléctrica, al disminuir la reactancia total de la línea y disminuir la caída de voltaje de ella, mejora la habilidad de dicha línea para transportar potencia hacia la carga.

Con esta manera de proceder se trata de que: [Ref. 3, Ref. 35]

- 1.- La línea opere dentro del rango permisible de regulación de voltaje.
- 2.- El circuito opere sin sobrepasar el valor del límite térmico.
- 3.- Se disminuyan las pérdidas de potencia activa.

2.2.2 Aplicación del condensador en serie.

En líneas de transmisión, sub-transmisión y distribución son aplicables, tanto los condensadores en derivación, como también en serie. Si bien la forma de construcción de los condensadores en serie y derivación es idéntica, los dos tipos difieren en su método de conexión. La unidad en derivación se conecta en paralelo a todo el voltaje de la línea, en tanto que la unidad en serie, se conecta en serie con el circuito y soporta toda la corriente de línea.

Mientras que el voltaje en una instalación en derivación permanece substancialmente constante, la caída de voltaje en el banco conectado en serie cambia instantáneamente, de acuerdo a la variación de la carga como cualquier circuito serie.

La característica peculiar de un condensador en serie de compensar la reactancia inductiva de una línea eléctrica, lo hace extremadamente valorable en dos aplicaciones. [Ref. 2, Ref. 5]

- 1.- A nivel de Distribución, en circuitos radiales para reducir la caída de voltaje y las rápidas oscilaciones de voltaje (efecto estroboscópico).
- 2.- A nivel de Transmisión y Sub-transmisión, para aumentar la transferencia de potencia de líneas eléctricas.

Los condensadores en serie, son particularmente útiles en los circuitos radiales de distribución, cuando se quiere contrarrestar el efecto estroboscópico, producido como consecuencia de cambios bruscos de carga, por ejemplo frecuentes arranques de motores eléctricos. [Ref. 35]

La característica de un condensador en serie, de aumentar la transferencia de potencia de la línea en la cual se halla intercalado, ha sido utilizada para efectuar un control en la distribución de potencia en circuitos paralelos de transmisión y sub-transmisión. [Ref. 11, Ref. 35].

Frecuentemente las líneas de transmisión y sub-transmisión, se refuerzan mediante un segundo circuito para operación en paralelo.

El circuito añadido no necesariamente tendrá igual impedancia que el ya existente; como consecuencia, por el circuito con menor impedancia circulará mayor corriente de carga. Un condensador en serie, se lo puede usar para compensar una porción de la reactancia de la línea que así lo requiera, de manera que la potencia total se reparta convenientemente entre los dos circuitos paralelos.

El condensador en serie mejora el factor de potencia tal como lo hace un condensador en derivación, pero en mucha menor proporción, por lo cual un condensador en serie prácticamente no se utiliza como un medio para mejorar el factor de potencia. [Ref. 1, Ref. 6].

2.2.3 Motivos para el uso del condensador en serie para aumentar la transferencia de potencia de una línea.

Una línea, es un elemento para transportar energía eléctrica, y el aumento creciente de la carga, ha llevado a los planificadores de redes eléctricas a investigar métodos para incrementar la transferencia de potencia a través de líneas de transmisión y sub-transmisión, siendo uno de ellos el de la compensación serie.

La transferencia de potencia a través de una línea puede ser mejorada por la instalación de condensadores en serie, y la aplicación de éstos ha recibido considerable atención debido a los siguientes factores: [Ref. 5, Ref.39]

- 1.- Aumento del costo de la energía.
- 2.- Crecimiento de las distancias de transmisión.
- 3.- Incremento rápido de las demandas de carga.
- 4.- Encarecimiento de los costos de construcción, conductor, etc, de nuevas líneas de transporte, frente al bajo costo por [KVAR] del condensador en serie.

2.3 **VENTAJAS Y DESVENTAJAS TECNICAS DE LA APLICACION DE UN CONDENSADOR EN SERIE**

2.3.1 Ventajas técnicas del condensador en serie.

Los condensadores en serie son dispositivos que reúnen las siguientes características: [Ref.1]

- 1.- No tienen piezas móviles.

- 2.- Libres de mantenimiento y por tanto muy confiables en su operación.
- 3.- Alta eficacia de operación, pues las pérdidas son pequeñas y proporcionales a la corriente de carga. Así por ejemplo, para condensadores de mas de 1200 [V] y a 25 [°C] las pérdidas no sobrepasan los 0.0033 [KW/KVAR].

2.3.2 Desventajas técnicas del condensador en serie.

Cualquier circuito que tiene una reactancia inductiva en serie con la reactancia capacitiva de un condensador puede formar un circuito resonante serie con una frecuencia natural o frecuencia de resonancia [f_0].

El fenómeno de resonancia aparece durante cualquier disturbio como puede ser: cambios súbitos de carga, fallas en el sistema, operación de maniobra de los circuitos, etc.

Dos son los efectos que puede provocar el fenómeno de resonancia originado por la presencia de un condensador en serie en una línea.

- 1.- Resonancia sub-sincrónica de máquinas síncronas y de inducción.
- 2.- Ferroresonancia de transformadores.

2.3.2.1 Resonancia sub-sincrónica de máquinas síncronas y de inducción.

Cuando se presenta un disturbio externo a una máquina rotativa polifásica de corriente alterna conectada a una línea con compensación serie, se establecen corrientes transitorias de frecuencia natural [f_0].

La frecuencia natural $[f_0]$ que se origina es menor que la frecuencia de la red $[f_e]$, motivo por el cual a la frecuencia natural también se le conoce como frecuencia sub-sincrónica o frecuencia sub-armónica y a la corriente transitoria de frecuencia natural $[f_0]$ se le conoce como corriente subsincrónica o sub-armónica.

Puesto que la frecuencia sub-sincrónica es menor que la frecuencia de la red, la corriente sub-sincrónica originada por ella establece un campo giratorio que se mueve a una velocidad menor $[2\pi f_0]$ que la velocidad del rotor $[2\pi f_e]$, produciendo en él un torque oscilatorio a la frecuencia $[f_0 - f_e]$. Esta diferencia de frecuencia $[f_0 - f_e]$ al coincidir con una de las frecuencias naturales torsionales del eje de la máquina, origina oscilaciones mecánicas torsionales del rotor, produciéndose el fenómeno conocido como resonancia sub-sincrónica [Ref. 9].

La resonancia sub-sincrónica es un modo o resonancia combinada eléctrica y mecánica que puede ser estable o inestable dependiendo de si las oscilaciones mecánicas del rotor originadas por ella son atenuadas o no atenuadas respectivamente por la resistencia propia de la máquina y la resistencia del sistema formado por líneas, transformadores, etc, conectados a la máquina.

Las consecuencias de la resonancia sub-sincrónica son peligrosas para la máquina pues, cuando las oscilaciones son inestables, pueden originar la rotura del eje del rotor o en su caso cuando las oscilaciones son relativamente bien atenuadas o estables pueden agotar o deterioran en forma lenta al eje.

2.3.2.2 Ferroresonancia de transformadores.

Al energizar un transformador que no tiene carga o que tiene poca carga, a través de una línea sin compensación serie, la corriente de magnetización del transformador normalmente es alta y dura sólo varios ciclos para luego reducirse a un valor bajo. Pero, al energizar un transformador con poca carga o sin ella a través de una línea con compensación serie, el condensador en serie establece una condición resonante que origina que la corriente de magnetización sea aún más alta y de una duración mayor, fenómeno que se conoce como ferroresonancia.

La ferroresonancia básicamente es un tipo de resonancia sub-armónica o sub-sincrónica en la cual, el condensador en serie actúa como una segunda fuente de voltaje que distorsiona la corriente de magnetización del transformador y dependiendo de si dicha distorsión es atenuada o no atenuada por la resistencia de la línea y del propio transformador, entonces la ferroresonancia será estable o inestable respectivamente.

CAPITULO 3

3.- LOCALIZACION DEL CONDENSADOR EN SERIE EN UNA LINEA DE SUB-TRANSMISION

- 3.1 ASPECTOS GENERALES
- 3.2 EFECTOS SOBRE LAS CONSTANTES GENERALIZADAS DE UNA LINEA
- 3.3 FORMULACION MATEMATICA PARA LA LOCALIZACION DE UN CONDENSADOR EN SERIE EN UNA LINEA
- 3.4 EL CONDENSADOR EN SERIE EN LAS DESVENTAJAS TECNICAS

3.- LOCALIZACION DEL CONDENSADOR EN SERIE EN UNA LINEA DE SUB-TRANSMISION

3.1 ASPECTOS GENERALES

La calidad del suministro de energía eléctrica al consumidor se mide en función del nivel de voltaje, y siendo el condensador en serie un dispositivo que disminuye la caída de voltaje en una línea, para establecer la localización más adecuada de dicho dispositivo dentro de una línea de sub-transmisión, se lo puede hacer considerando aquella ubicación, que para un mismo porcentaje de compensación serie, permite obtener la mínima caída de voltaje a través de la línea.

Para evaluar la localización de un condensador en serie, en una línea de sub-transmisión, se modela a la línea y al condensador en serie, como cuadripolos con sus correspondientes constantes generalizadas [ABCD], puesto que este método permite tener en cuenta los efectos de la resistencia y la capacitancia en paralelo de la línea. [Ref. 5].

3.1.1 Porcentaje de compensación serie de una línea

El porcentaje de compensación serie de una línea, está dado por: [Ref. 16, Ref. 17].

$$X_{cs}\% = \frac{X_{cs}}{X_L} 100\% \quad [3.1]$$

donde:

X_L : reactancia inductiva de la línea

X_{cs} : reactancia capacitiva del condensador en serie

3.1.2 Localización de un condensador en serie en una línea

En una línea de sub-transmisión, un condensador en serie en general puede ser colocado en cualquier sitio de ella. Para el estudio analítico de la localización se establecen tres posibles localizaciones del condensador en serie:

- 1.- Condensador en serie ubicado en el terminal de envío de la línea.
- 2.- Condensador en serie ubicado en el terminal de recepción de la línea.
- 3.- Condensador en serie ubicado entre el terminal de envío y el terminal de recepción.

3.2 EFECTOS SOBRE LAS CONSTANTES GENERALIZADAS DE UNA LINEA

Para las tres posibles localizaciones de un condensador en serie en una línea, la disposición línea-condensador en serie, se convierte en un nuevo cuadripolo con sus respectivas constantes generalizadas equivalentes $[ABCD]$, formadas a partir de las constantes generalizadas $[ABCD]$ correspondientes a la línea y al condensador en serie; es decir que, las constantes generalizadas de la línea al verse afectadas por las constantes generalizadas del condensador en serie, dan como resultado unas nuevas constantes generalizadas que son las constantes generalizadas equivalentes.



3.2.1 Constantes generalizadas del condensador en serie: $[A_{cs} B_{cs} C_{cs} D_{cs}]$.

Un condensador conectado en serie con una línea, puede ser considerado, de acuerdo al siguiente circuito.

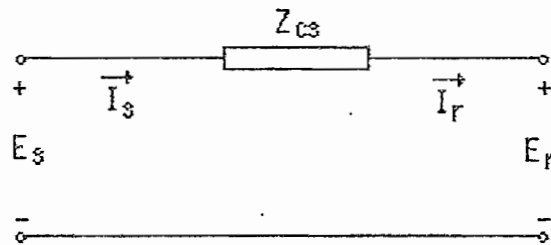


FIG 3.1. Circuito de un condensador en serie

$$\text{donde: } Z_{cs} = -j X_{cs} \quad [3.2]$$

es la impedancia del condensador en serie, siendo $[X_{cs}]$ su reactancia capacitiva.

En el cuadripolo de la FIG 3.1 se verifica que:

$$\begin{aligned} E_s &= E_r + Z_{cs} I_r \\ I_s &= I_r \end{aligned} \quad [3.3]$$

Las ecuaciones [3.3] expresadas en forma matricial se reducen a:

$$\begin{bmatrix} E_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z_{cs} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_r \\ I_r \end{bmatrix} \quad [3.4]$$

De acuerdo a la teoría de cuadripolos se cumple la siguiente ecuación matricial: [Ref. 18].

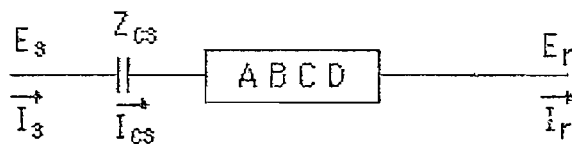
$$\begin{bmatrix} E_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{cs} & B_{cs} \\ C_{cs} & D_{cs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_r \\ I_r \end{bmatrix} \quad [3.5]$$

Igualando las ecuaciones matriciales [3.4] y [3.5] se tiene que las constantes generalizadas de un condensador en serie son:

$$\begin{aligned} A_{cs} &= 1 \\ B_{cs} &= Z_{cs} \\ C_{cs} &= 0 \\ D_{cs} &= 1 \end{aligned} \quad [3.6]$$

3.2.2 Constantes generalizadas equivalentes para la disposición línea-condensador en serie; con el condensador en serie ubicado en el terminal de envío: $[A_{eq} B_{eq} C_{eq} D_{eq}]$

El circuito formado por una línea conectada en serie con un condensador, estando dicho condensador ubicado en el terminal de envío de la línea, se representa en la siguiente figura:



I_{cs} : corriente en el condensador en serie
 A B C D : constantes generalizadas de la línea

FIG 3.2. Condensador en serie en el terminal de envío de una línea

El circuito de la FIG 3.2 se convierte en uno equivalente dado por la FIG 3.3.

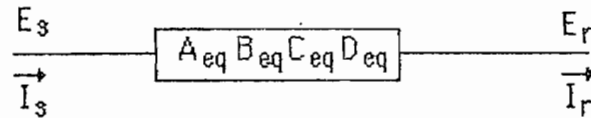


FIG 3.3. Circuito equivalente: condensador en el terminal de envío de una línea, en serie con dicha línea

De acuerdo a la teoría de cuádrupolos, las constantes generalizadas del cuádrupolo equivalente de la FIG 3.3, se obtienen mediante la ecuación matricial: [Ref. 18]

$$\begin{bmatrix} A_{eq} & B_{eq} \\ C_{eq} & D_{eq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z_{cs} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad [3.7]$$

Realizando el producto matricial se obtiene:

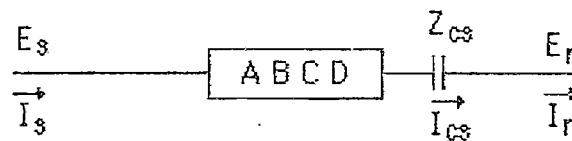
$$\begin{bmatrix} A_{eq} & B_{eq} \\ C_{eq} & D_{eq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A + Z_{cs}C & B + Z_{cs}D \\ C & D \end{bmatrix} \quad [3.8]$$

Iguando los dos miembros de la ecuación matricial [3.8], se tiene que las constantes generalizadas del cuádrupolo equivalente son:

$$\begin{aligned} A_{eq} &= A + Z_{cs}C \\ B_{eq} &= B + Z_{cs}D \\ C_{eq} &= C \\ D_{eq} &= D \end{aligned} \quad [3.9]$$

3.2.3 Constantes generalizadas equivalentes para la disposición línea-condensador en serie; con el condensador en serie ubicado en el terminal de recepción: $[A'_{eq} B'_{eq} C'_{eq} D'_{eq}]$

Un condensador ubicado en el terminal de recepción de la línea, en serie con ella se representa así:



I_{cs} : corriente en el condensador en serie
 $A B C D$: constantes generalizadas de la línea

FIG 3.4. Condensador en serie en el terminal de recepción de la línea.

El circuito de la FIG 3.4 se substituye por un cuadripolo equivalente, cuyas constantes generalizadas se obtienen así: [Ref. 16]

$$\begin{bmatrix} A'_{eq} & B'_{eq} \\ C'_{eq} & D'_{eq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & Z_{cs} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [3.10]$$

Realizando el producto matricial se obtiene:

$$\begin{bmatrix} A'_{eq} & B'_{eq} \\ C'_{eq} & D'_{eq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B + Z_{cs}A \\ C & D + Z_{cs}C \end{bmatrix} \quad [3.11]$$

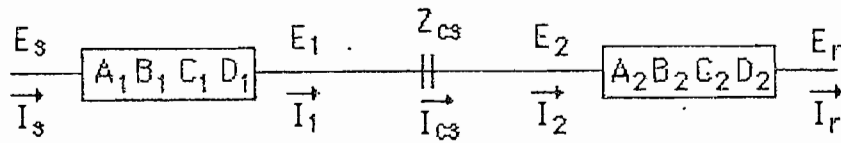
Igualando los dos miembros de la ecuación matricial [3.11], se tiene que las constantes generalizadas del cuádrupolo equivalente son:

$$\begin{aligned} A'_{eq} &= A \\ B'_{eq} &= B + Z_{cs}A \\ C'_{eq} &= C \\ D'_{eq} &= D + Z_{cs}C \end{aligned} \quad [3.12]$$

3.2.4 Constantes generalizadas equivalentes para la disposición línea-condensador en serie; con el condensador en serie ubicado entre el terminal de envío y el de recepción: $[A''_{eq} B''_{eq} C''_{eq} D''_{eq}]$

Un condensador en serie ubicado en una posición entre el terminal de envío y el de recepción de una línea, divide a ésta en 2 secciones, cada una de las cuales se representa por un cuádrupolo, con las constantes generalizadas $[A_1 B_1 C_1 D_1]$ y $[A_2 B_2 C_2 D_2]$ respectivamente.

El circuito correspondiente a esta disposición se muestra en la FIG 3.5.



I_{cs} : corriente en el condensador en serie

$A_1 B_1 C_1 D_1$: constantes generalizadas de la una sección de línea

$A_2 B_2 C_2 D_2$: constantes generalizadas de la otra sección de línea

FIG 3.5 Condensador en serie ubicado entre el terminal de envío y recepción de la línea

Aplicando la teoría de cuadripolos, el circuito de la FIG 3.5 puede ser convertido en un cuadripolo equivalente, cuyas constantes generalizadas pueden obtenerse así: [Ref. 18]

$$\begin{bmatrix} A''_{eq} & B''_{eq} \\ C''_{eq} & D''_{eq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & Z_{cs} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \quad [3.13]$$

Efectuando el producto matricial se obtiene:

$$\begin{bmatrix} A''_{eq} & B''_{eq} \\ C''_{eq} & D''_{eq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 A_2 + Z_{cs} A_1 C_2 + B_1 C_2 & A_1 B_2 + Z_{cs} A_1 D_2 + B_1 D_2 \\ C_1 A_2 + Z_{cs} C_1 C_2 + D_1 C_2 & C_1 B_2 + Z_{cs} C_1 D_2 + D_1 D_2 \end{bmatrix} \quad [3.14]$$

Igualando los dos miembros de la ecuación matricial [3.14], se tiene que las constantes generalizadas del cuadripolo equivalente son:

$$\begin{aligned}
 A''_{eq} &= A_1 A_2 + Z_{CS} A_1 C_2 + B_1 C_2 \\
 B''_{eq} &= A_1 B_2 + Z_{CS} A_1 D_2 + B_1 D_2 \\
 C''_{eq} &= C_1 A_2 + Z_{CS} C_1 C_2 + D_1 C_2 \\
 D''_{eq} &= C_1 B_2 + Z_{CS} C_1 D_2 + D_1 D_2
 \end{aligned}
 \tag{3.15}$$

En el Apéndice 3A1, se tabulan las constantes generalizadas del cuadripolo equivalente línea-condensador en serie, para las tres posibles localizaciones del condensador en serie. En el Apéndice 3A2 se encuentran las expresiones de las constantes generalizadas [ABCD] de la línea y de las secciones de la línea $[A_1 B_1 C_1 D_1]$ y $[A_2 B_2 C_2 D_2]$.

3.3 FORMULACION MATEMATICA PARA LA LOCALIZACION DE UN CONDENSADOR EN SERIE EN UNA LINEA

Los factores que se deben tomar en cuenta para la localización de un condensador en serie en una línea de sub-transmisión, son los siguientes:

- 1.- Que la línea opere dentro del rango permisible de regulación de voltaje.
- 2.- Que la línea opere, sin exceder el valor del límite térmico.

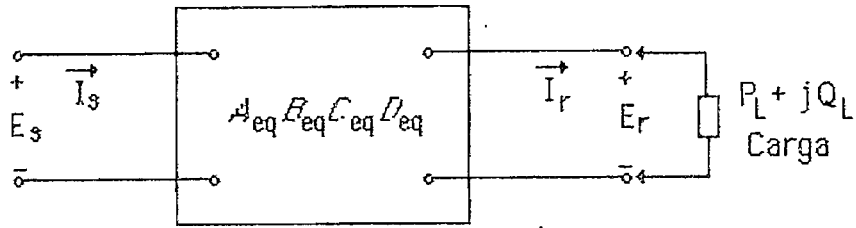
La evaluación de los factores 1.- y 2.- se puede hacer respectivamente, determinando el voltaje en el terminal de recepción y la corriente de la línea en el terminal de envío, conocidos el voltaje en el terminal de envío y la carga en el terminal de recepción, y verificando que la magnitud del voltaje en el terminal de recepción (en la carga) se halle dentro del rango permisible (± 5 [%] de la magnitud del voltaje nominal) y además verificando que la magnitud de la corriente en el terminal de envío no sea mayor que el límite térmico. Se toma la magnitud de la corriente de

línea en el terminal de envío, ya que es precisamente por ese terminal, por el cual la corriente entra en la línea.

En las secciones 3.2.2, 3.2.3 y 3.2.4, se han determinado las expresiones de las constantes generalizadas del cuadripolo equivalente línea-condensador en serie, para las tres posibles localizaciones del condensador en serie dentro de una línea: en el terminal de envío, en el terminal de recepción y entre el terminal de envío y de recepción respectivamente; y de acuerdo a como ellas estén substituídas en las expresiones del voltaje terminal de recepción y corriente del terminal de envío, que se deducirán luego, en las secciones 3.3.1 y 3.3.2, nos darán correspondientemente las expresiones del voltaje terminal de recepción y corriente en el terminal de envío para cuando el condensador en serie se encuentre en el terminal de envío, en el terminal de recepción y entre el terminal de envío y recepción.

3.3.1 Fórmula de cálculo del voltaje terminal de recepción utilizando las constantes generalizadas equivalentes: $[A_{eq} B_{eq} C_{eq} D_{eq}]$

Generalizando, para cualquier ubicación del condensador en serie en una línea, se establece un cuadripolo equivalente por fase y una carga en el terminal de recepción, como se indica en la FIG 3.6.



$$\begin{aligned}
 A_{eq} B_{eq} C_{eq} D_{eq} &\equiv A_{eq} B_{eq} C_{eq} D_{eq} \quad (\text{cond. en serie en el terminal de envío}) \\
 A'_{eq} B'_{eq} C'_{eq} D'_{eq} &\equiv A'_{eq} B'_{eq} C'_{eq} D'_{eq} \quad (\text{cond. en serie en el terminal de recepción}) \\
 A''_{eq} B''_{eq} C''_{eq} D''_{eq} &\equiv A''_{eq} B''_{eq} C''_{eq} D''_{eq} \quad (\text{cond. en serie entre el terminal de envío} \\
 &\quad \text{y el terminal de recepción})
 \end{aligned}$$

FIG 3.6. Cuadripolo equivalente línea-condensador en serie; con carga

Las constantes generalizadas equivalentes, son números complejos, y pueden escribirse como:

$$\begin{aligned}
 A_{eq} &= |A_{eq}| \angle \alpha \\
 B_{eq} &= |B_{eq}| \angle \beta \\
 C_{eq} &= |C_{eq}| \angle \gamma \\
 D_{eq} &= |D_{eq}| \angle \delta
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

De acuerdo a la teoría de cuadripolos, en la FIG 3.6 se verifica que:
[Ref. 18]

$$E_s = A_{eq} E_r + B_{eq} I_r \tag{3.17}$$

Si se toma $[E_r]$ como referencia para medir los ángulos, se tiene que:

$$\begin{aligned}
 E_s &= e_s \Delta \\
 E_r &= e_r \underline{Q} \\
 I_r &= \frac{S_r^*}{e_r} \quad [3.18]
 \end{aligned}$$

$$S_r = P_L - jQ_L$$

con:

E_s : voltaje fase-neutro, en el terminal de envío

e_s : magnitud del voltaje fase-neutro, en el terminal de envío

E_r : voltaje fase-neutro, en el terminal de recepción

e_r : magnitud del voltaje fase-neutro, en el terminal de recepción

S_r : potencia compleja, por fase, en el terminal de recepción

S_r^* : conjugada de la potencia compleja, por fase, en el terminal de recepción

P_L : potencia activa de carga, por fase, en el terminal de recepción

Q_L : potencia reactiva de carga, por fase, en el terminal de recepción

Δ : ángulo de operación de la línea.

La sustitución de las correspondientes ecuaciones de [3.16] y [3.18] en [3.17] permite obtener la siguiente:

$$e_s e_r \cos \Delta + j e_s e_r \sin \Delta = [|A_{eq}| e_r^2 \cos \alpha + |B_{eq}| P_L \cos \beta + |B_{eq}| Q_L \sin \beta] \\ + j [|A_{eq}| e_r^2 \sin \alpha - |B_{eq}| Q_L \cos \beta + |B_{eq}| P_L \sin \beta]$$

[3.19]

Igualando las partes reales del primer miembro y del segundo miembro de [3.19] se tiene:

$$\cos \Delta = \frac{|A_{eq}| e_r^2 \cos \alpha + |B_{eq}| P_L \cos \beta + |B_{eq}| Q_L \sin \beta}{e_s e_r}$$

[3.20]

Igualando las partes imaginarias del primer miembro y del segundo miembro de [3.19] se tiene:

$$\sin \Delta = \frac{|A_{eq}| e_r^2 \sin \alpha - |B_{eq}| Q_L \cos \beta + |B_{eq}| P_L \sin \beta}{e_s e_r}$$

[3.21]

Utilizando la conocida relación trigonométrica:

$$\cos^2 \Delta + \sin^2 \Delta = 1$$

[3.22]

Se tiene que:

$$|A_{eq}| e_r^4 + \{ 2 |A_{eq}| |B_{eq}| [P_L \cos(\alpha - \beta) - Q_L \sin(\alpha - \beta)] - e_s^2 \} e_r^2 \\ + |B_{eq}|^2 |S_r|^2 = 0$$

[3.23]

donde:

$$|S_r| = |P_L + j Q_L| = \sqrt{P_L^2 + Q_L^2}$$

[3.24]

con:

$|S_r|$: magnitud de la potencia compleja por fase en el terminal de recepción.

La fórmula [3.23] es una ecuación que permite evaluar la magnitud del voltaje fase-neutro en el terminal de recepción para las tres posibles localizaciones del condensador en serie en la línea, según como las constantes generalizadas equivalentes, correspondientes a cada posible localización, se substituyan en la ecuación [3.23]. Además, el ángulo de operación de la línea puede ser evaluado de las ecuaciones [3.20] o [3.21], aplicando respectivamente a esas ecuaciones las funciones trigonométricas inversas $[\cos^{-1}]$, o $[\sin^{-1}]$.

3.3.2 Fórmula de cálculo de la corriente de línea (terminal de envío) utilizando las constantes generalizadas equivalentes: $[A_{eq} B_{eq} C_{eq} D_{eq}]$

Con referencia a la FIG 3.6 se tiene que de acuerdo a la teoría de cuadripolos: [Ref. 18]

$$I_s = C_{eq} E_r + D_{eq} I_r \quad [3.25]$$

Tomando $[E_r]$ como referencia para medir los ángulos, se tiene:

$$E_r = e_r \angle 0$$

$$I_r = \frac{S_r^*}{e_r} \quad [3.26]$$

$$S_r^* = P_L - j Q_L$$

con:

E_r : voltaje fase-neutro, en el terminal de recepción.

e_r : magnitud del voltaje fase-neutro, en el terminal de recepción.

S_r^* : conjugada de la potencia compleja, por fase, en el terminal de recepción

P_L : potencia activa de carga, por fase, en el terminal de recepción.

Q_L : potencia reactiva de carga, por fase, en el terminal de recepción.

La sustitución de las ecuaciones [3.26] en la ecuación [3.25] da:

$$I_s = \frac{C_{eq} e_r^2 + D_{eq} (P_L - j Q_L)}{e_r} \quad [3.27]$$

En la ecuación [3.27] si:

$$I_s = i_s \angle \theta_{i_s} \quad [3.28]$$

con:

i_s : magnitud de la corriente de línea (en el terminal de envío).

θ_{i_s} : ángulo de la corriente de línea (en el terminal de envío).

se tiene:

$$I_s = \left| \frac{C_{eq} e_r^2 + D_{eq} (P_L - j Q_L)}{e_r} \right| \quad [3.29]$$

Finalmente, substituyendo las correspondientes ecuaciones de [3.16] en [3.29] se obtiene:

$$i_s = \sqrt{\frac{|L_{eq}|^2 e_r^4 + 2 |L_{eq}| |D_{eq}| e_r^2 [P_L \cos(\gamma - \delta) - Q_L \sin(\gamma - \delta)] + |D_{eq}|^2 |S_r|^2}{e_r^2}} \quad [3.30]$$

Donde [|S_r|], también está dado por la relación [3.24].

La fórmula [3.30] es una ecuación que permite evaluar la magnitud de la corriente de línea (en el terminal de envío) [i_s], para las tres posibles localizaciones del condensador en serie en la línea, según como las constantes generalizadas equivalentes correspondientes a cada posible localización se substituyen en la ecuación [3.30].

3.3.3 Programa digital para evaluar la localización de un condensador en serie en una línea.

A fin de evaluar la localización de un condensador en serie en las posibles ubicaciones de él, dentro de una línea, y que fueron mencionados en la sección 3.1.2, se ha realizado un programa digital que permite determinar para las citadas ubicaciones: la magnitud del voltaje entre fases en el terminal de recepción (en la carga) tanto en [KV] como en [P.U], el ángulo de operación de la línea en [GRD] y la magnitud de la corriente en el terminal de envío en [AMP]. Una descripción más detallada del programa digital se lleva a cabo en el Apéndice 6A7.

3.4 EL CONDENSADOR EN SERIE EN LAS DESVENTAJAS TECNICAS

En la sección 2.3.2 del capítulo 2, se indicaron que las desventajas técnicas de la compensación serie de una línea son:

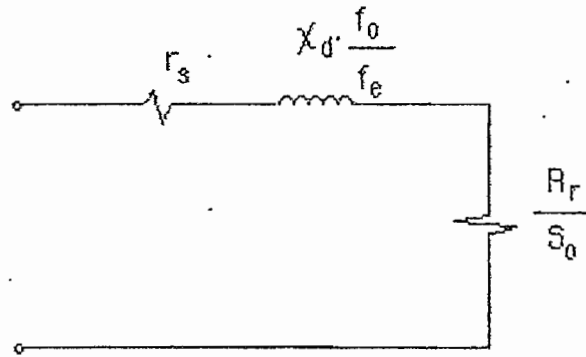
- 1.- Resonancia sub-sincrónica de máquinas sincrónicas y de inducción.
- 2.- Ferrorresonancia de transformadores.

Tanto en el caso de resonancia sub-sincrónica como en el de ferrorresonancia no ha sido necesario proveer de ningún otro medio de atenuación que el proporcionado por la resistencia propia de la línea compensada serie y de los propios transformadores, máquinas, etc, conectados en los terminales o en las proximidades de una línea compensada serie, a fin de evitar que las mencionadas desventajas técnicas llegen a niveles de convertirse en fenómenos inestables. [Ref. 9].

En las secciones 3.4.1, 3.4.2 y 3.4.4 se dan métodos para verificar la afirmación anterior para: máquinas sincrónicas, máquinas de inducción y transformadores respectivamente.

3.4.1 Predicción de resonancia sub-sincrónica de máquinas sincrónicas.

A la frecuencia natural el circuito de la máquina sincrónica es el que se muestra en la FIG 3.7. [Ref 9, Ref. 15, Ref. 40].



- r_s : resistencia del estator de la máquina sincrónica
 X_d : reactancia transitoria de la máquina sincrónica
 R_r : resistencia del rotor referida al estator
 S_0 : deslizamiento relativo

FIG 3.7. Circuito equivalente de una máquina sincrónica a la frecuencia natural $[f_0]$.

El deslizamiento relativo está dado por: [Ref. 9, Ref. 40]

$$S_0 = \frac{f_0 - f_e}{f_0} \quad [3.31]$$

donde:

f_0 : frecuencia natural (frecuencia de resonancia)

f_e : frecuencia de la red (60 [Hz]).

La frecuencia natural está dada por la ecuación siguiente: (véase Apéndice 3A3, sección 3A3.1)

$$f_0 = f_e \sqrt{\frac{X_{cs}}{X_d}} \quad [3.32]$$

donde:

X_{cs} : reactancia capacitiva del condensador en serie.

X_0 : reactancia inductiva del circuito

En la ecuación [3.32], el valor de $[X_0]$ está formado por la reactancia inductiva equivalente; a la frecuencia de la red de: la línea y de los transformadores y máquinas, etc, conectados en los terminales de la línea. Así por ejemplo, para el diagrama unifilar de la FIG 3.8, el valor de $[X_0]$ está dado por : [Ref. 40].

$$X_0 = X_d' + X_{T1} + X_L + X_{T2} \quad [3.33]$$

donde:

X_d' : reactancia transitoria del generador [G1]

X_{T1} : reactancia de dispersión del transformador [T1]

X_L : reactancia inductiva de la línea

X_{T2} : reactancia de dispersión del transformador [T2]

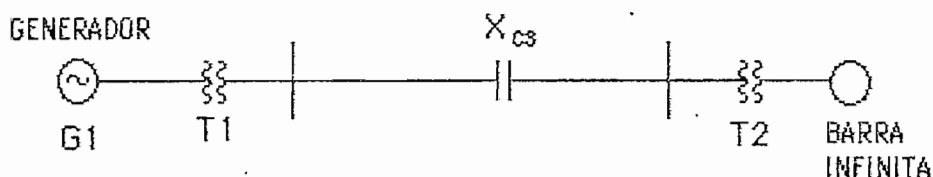


FIG 3.6. Diagrama unifilar de un sistema típico, para el cálculo de la frecuencia natural $[f_0]$

Hay que anotar que en estudios de resonancia sub-sincrónica, la reactancia de la máquina sincrónica que se utiliza es la reactancia transitoria $[X_d']$. En la ecuación [3.32], puesto que el grado de compensación $[X_{cs} / X_0]$ generalmente está en el rango del 25 [%] al 70 [%] entonces $[f_0]$ será menor que la frecuencia de la red $[f_e]$. [Ref. 9].

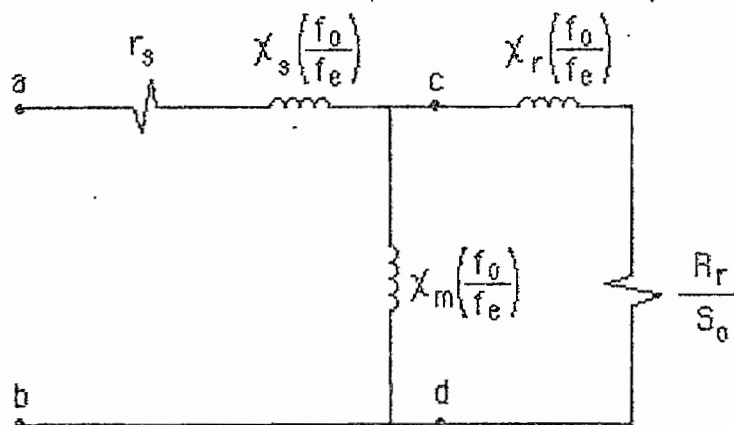
Al ser $f_0 < f_e$, significa que $[S_0]$ y $[R_r / S_0]$ son negativos. Dado que la cantidad $[R_r / S_0]$ expresa una resistencia negativa, ésta no contribuye a dar atenuación a la resonancia sub-sincrónica. La resistencia del estator y la resistencia del sistema conectado a la máquina -formado por la línea compensada serie, transformadores, etc- son cantidades positivas y por lo mismo contribuyen a dar atenuación a la resonancia sub-sincrónica. Por tanto, para una máquina sincrónica conectada a un sistema a través de una línea compensada serie, si la resistencia negativa $[R_r / S_0]$ es menor que la resistencia positiva equivalente $[R_T]$ que incluye la de la línea, de transformadores y del estator de la máquina, entonces significa que la resonancia sub-sincrónica será estable (atenuada); caso contrario se tendrá resonancia sub-sincrónica inestable (no atenuada). [Ref. 40]

Por otra parte, hay que puntualizar lo siguiente:

- 1.- Una resistencia negativa genera potencia activa y por tanto no da atenuación a la resonancia sub-sincrónica, mientras que una resistencia positiva disipa o consume potencia activa y por consiguiente contribuye a dar atenuación a la resonancia sub-sincrónica. [Ref. 40]
- 2.- Por simplicidad para determinar la resistencia positiva equivalente no se considera el efecto de las cargas en paralelo en el sistema, ya que el efecto de una carga es absorber potencia y no considerar este efecto es conservativo. [Ref. 40]

3.4.2 Predicción de resonancia sub-sincrónica de máquinas de inducción

A la frecuencia natural, el circuito de la máquina de inducción es el que se muestra en la FIG 3.9. [Ref 15, Ref. 40]



- r_s : resistencia del estator de la máquina de inducción
 X_s : reactancia del estator de la máquina de inducción
 X_m : reactancia de magnetización de la máquina de inducción referida al estator
 X_r : reactancia del rotor de la máquina de inducción referida al estator
 R_r : resistencia del rotor de la máquina de inducción referida al estator
 S_0 : deslizamiento relativo

FIG 3.9 Circuito equivalente de una máquina de inducción a la frecuencia natural $[f_0]$

El deslizamiento relativo está dado por: [Ref. 9, Ref. 40]

$$S_0 = \frac{f_0 - f_e}{f_0} \quad [3.34]$$

donde:

f_0 : frecuencia natural (frecuencia de resonancia)

f_e : frecuencia de la red (60[Hz])

La frecuencia natural se la calcula resolviendo la siguiente ecuación:
(véase Apéndice 3A4, sección 3A4.1)

$$(X_M + X_a)(X_B + X_a) f_0^4 + [(\Gamma_s + \Gamma_a)^2 - (X_M + X_B + 2X_a)X_{cs}] f_0^2 + X_{cs}^2 = 0 \quad [3.35]$$

En la ecuación [3.35] se tiene que:

- X_M : reactancia de excitación de la máquina de inducción dada por la cantidad $(X_m + X_s)$
- X_B : reactancia a rotor bloqueado de la máquina de inducción, dada por la cantidad $[X_r X_m / (X_r + X_m)]$
- X_a : reactancia equivalente del sistema conectado a los terminales del estator, es decir a los terminales ab del circuito de la FIG 3.9.
- Γ_a : resistencia equivalente del sistema conectado a los terminales del estator, es decir a los terminales ab del circuito de la FIG 3.9.
- X_{cs} : reactancia capacitiva del condensador en serie.

En la ecuación [3.35] sea que los valores de reactancias y resistencias estén dados en [OHM] o sea que estén dados en [P.U], las raíces de $[f_0]$ serán en [P.U] con relación a la frecuencia de la red $[f_e]$ que en valor [P.U] será la unidad.

La frecuencia natural será la menor de las raíces positivas de $[f_0]$ obtenidas al resolver la ecuación [3.35]. [Ref. 40]

Puesto que $f_e < f_0$ quiere decir que $[S_0]$ es negativo y por tanto $[R_r / S_0]$ es negativo. Dado que la cantidad $[R_r / S_0]$ expresa una resistencia.

negativa, ésta no contribuye a dar atenuación a la resonancia sub-sincrónica. La resistencia del estator y la resistencia del sistema conectado a la máquina de inducción -formado por la línea compensada serie, transformadores, etc- son cantidades positivas y por consiguiente dan atenuación a la resonancia sub-sincrónica. En consecuencia para una máquina de inducción conectada a un sistema por medio de una línea compensada serie si la resistencia negativa $[R_r / S_0]$ es menor que la resistencia positiva equivalente $[R_T]$ del circuito hacia el lado izquierdo de los terminales cd de la FIG 3.9, entonces significa que la resonancia sub-sincrónica será estable (atenuada), caso contrario se tendrá resonancia sub-sincrónica inestable (no atenuada). Las puntualizaciones 1.- y 2.- citadas en la sección 3.4.1 son también aplicables para el caso de predicción de resonancia sub-sincrónica de máquinas de inducción.

3.4.3 Control de resonancia sub-sincrónica inestable

Entre las medidas que sirven para evitar resonancia sub-sincrónica inestable de máquinas sincrónicas y de inducción se tienen:

- 1.- Puentear al condensador en serie, mediante el uso de relés protectivos sensibles a corrientes sub-sincrónica o corrientes sub-armónicas.
- 2.- En paralelo con la instalación del condensador en serie, emplear circuitos que tienen por objeto atenuar las corrientes sub-sincrónicas o sub-armónicas mediante el uso de resistores, inductores o combinación de ellos.

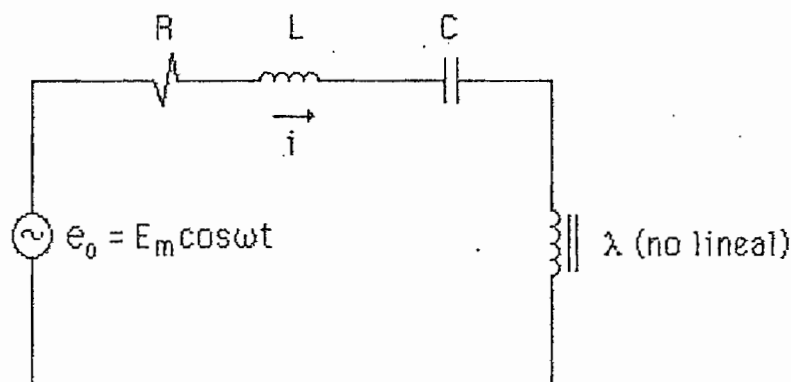
De estas dos medidas correctivas, una de las más utilizadas es la segunda pero mediante el empleo de resistores en paralelo con el condensador en serie. En el Apéndice 3A3 sección 3A3.2 y en el Apéndice

3A4 sección 3A4.2 se puede determinar el valor de la resistencia en paralelo con el condensador en serie para no tener resonancia sub-sincrónica inestable para máquinas sincrónicas y máquinas de inducción respectivamente. Pruebas experimentales han probado que el valor de la resistencia en paralelo con un condensador en serie para evitar resonancia sub-sincrónica inestable en máquinas sincrónicas y de inducción está en el orden de 10 veces la reactancia capacitiva del condensador en serie. [Ref. 13].

3.4.4 Predicción de ferroresonancia de transformadores

3.4.4.1 Formulación matemática del problema

Para determinar si un transformador con poca carga o sin ella que es energizado a través de una línea con compensación serie, presentará ferroresonancia estable (con atenuación) o ferroresonancia inestable (sin atenuación), el circuito que se utiliza es el de la FIG 3.10. [Ref. 27, Ref. 41]



- R: resistencia de la línea
- L: inductancia de la línea
- C: capacitancia del condensador en serie
- λ : enlaces de flujo del transformador

FIG 3.10. Circuito comunmente usado en estudios de ferroresonancia

En el circuito de la FIG 3.10 se verifica la siguiente ecuación:

$$e_0 = R_i + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt + \frac{d\lambda}{dt} \quad [3.36]$$

Pero, para el transformador la corriente $[i]$ es la corriente de magnetización, la cual es función de los enlaces de flujo del transformador.

$$i = f(\lambda) \quad [3.37]$$

Se ha encontrado que la corriente de magnetización $[i]$ de un transformador puede aproximarse a la siguiente ecuación no lineal: [Ref. 41]

$$i = \lambda + 4\lambda^5 \quad [3.38]$$

Usando la transformada de Laplace se tiene que las ecuaciones [3.36] y [3.38] se convierten en:

$$E_0 = RI + sLI + s\Delta \quad [3.39]$$

$$I = \Lambda + 4\Lambda^5 \quad [3.40]$$

Donde las letras mayúsculas representan las transformadas de Laplace correspondientes a las letras minúsculas de [3.36] y [3.38].

Las ecuaciones [3.39] y [3.40] dan:

$$\Lambda = G_0(s) E_0 - G(s) I \quad [3.41]$$

donde:

$$G_0(s) = 1/s \quad [3.42]$$

$$G(s) = \frac{s^2 LC + sRC + 1}{s^2 C} \quad [3.43]$$

Las ecuaciones [3.40] y [3.41] pueden representarse por el diagrama de bloques de la FIG 3.11. El bloque denominado [N] es un bloque no lineal por cuanto representa a la ecuación [3.38], la cual es no lineal.

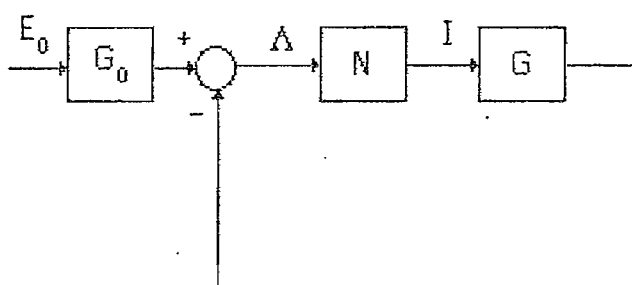


FIG 3.11. Diagrama de bloques para el circuito de la FIG 3.10.

3.4.4.2 Función Descriptiva Incremental

La teoría se basa en la Función Descriptiva Incremental de West, Douce and Livesley. [Ref. 41]

Considerando que el sistema de la FIG 3.11 está operando en condiciones de estado estable y si se supone que se produce una perturbación incremental (señal de perturbación) en los enlaces de flujo del transformador (señal principal); la expresión de los enlaces de flujo del transformador incluyendo la señal principal y la señal de perturbación es:

$$\lambda = \lambda_m \cos(\omega t + \phi) + \mu \cos \omega t \quad [3.44]$$

donde:

λ_m : valor pico de la señal principal

μ : valor pico de la señal de perturbación ($\mu \ll \lambda_m$)

ϕ : ángulo de fase entre la señal principal y la señal de perturbación

De la FIG 3.11 se puede observar que la entrada a la no linealidad [N] es la expresión [3.44] y que la salida de la no linealidad [N] es la expresión [3.38].

Reemplazando la ecuación [3.44] en la ecuación [3.38] se tiene que:

$$i = [\lambda_m \cos(\omega t + \phi) + \mu \cos \omega t] + 4[\lambda_m^5 \cos^5(\omega t + \phi) + \dots + \mu^5 \cos^5 \omega t] \quad [3.45]$$

En [3.45], usando identidades trigonométricas, omitiendo términos en $[\mu^2]$ y también de potencias mayores a [2], debido a que $\mu \ll \lambda_m$ y omitiendo términos de frecuencias de $[2\omega]$ y mayores a $[2\omega]$ debido a que $G(s)$ es esencialmente un filtro paso bajo, se obtiene: [Ref. 41]

$$i = \lambda_m \cos(\omega t + \phi) + \mu \cos \omega t + \frac{5}{2} \lambda_m^5 \cos(\omega t + \phi) + \frac{15}{2} \lambda_m^4 \mu \cos \omega t + 5 \lambda_m^4 \mu \cos(\omega t + 2\phi) \quad [3.46]$$

Es decir que, en lo que se refiere a la señal de perturbación, una entrada a la no linealidad [N], de:

$$\mu \cos \omega t \quad [3.47]$$

produce una salida de frecuencia fundamental, de la no linealidad [N] de:

$$\mu \cos \omega t + \frac{15}{2} \lambda_m^4 \mu \cos \omega t + 5 \lambda_m^4 \mu \cos(\omega t + 2\phi) \quad [3.48]$$

La Ganancia Efectiva Incremental [K] de la no linealidad [N] está dada por: [Ref. 41]

$$K = \frac{\text{salida de la señal de perturbación expresada fasorialmente}}{\text{entrada de la señal de perturbación expresada fasorialmente}} \quad [3.49]$$

Reemplazando en la ecuación [3.49], las expresiones fasoriales correspondientes de [3.47] y [3.48], se obtiene:

$$K = \frac{\mu + \frac{15}{2} \lambda_m^4 \mu + 5 \lambda_m^4 \mu e^{j2\phi}}{\mu} \quad [3.50]$$

Realizando simplificaciones en [3.50] da

$$K = A + B e^{j2\phi} \quad [3.51]$$

donde:

$$A = 1 + \frac{15}{2} \lambda_m^4 \quad [3.52]$$

$$B = 5 \lambda_m^4 \quad [3.53]$$

La Función Descriptiva Incremental $[-1/K]$ de la no linealidad $[N]$, está dada por el inverso negativo de la Ganancia Efectiva Incremental de la no linealidad $[N]$, es decir que: [Ref.41]

$$\frac{-1}{K} = \frac{-1}{A + B e^{j2\phi}} \quad [3.54]$$

Para un valor particular de $[\lambda_m]$, el lugar geométrico en el plano complejo, de la Función Descriptiva Incremental $[-1/K]$ al tiempo que varía $[\phi]$; varía describiendo un círculo, en el cual el valor del radio y las coordenadas del centro; están dadas respectivamente por:

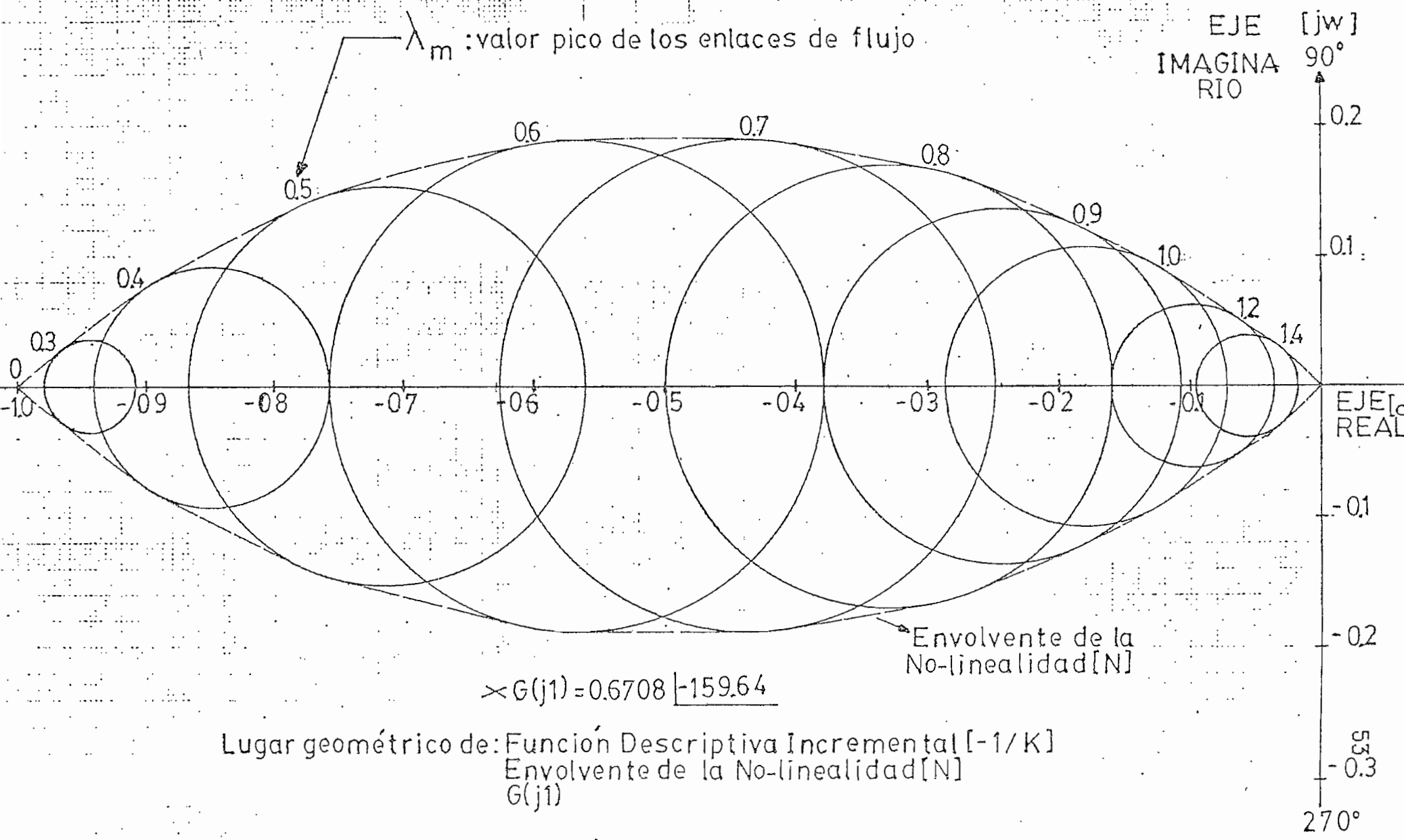
$$\text{Radio} = \frac{B}{B^2 - A^2} \quad [3.55]$$

$$\text{Centro} : \left[\frac{A}{B^2 - A^2}, 0 \right] \quad [3.56]$$

Hay que anotar, que si bien para obtener la Función Descriptiva Incremental $[-1/K]$ de la no linealidad $[N]$, se lo ha hecho considerando una perturbación incremental en los enlaces de flujo del transformador; significa que implícitamente se ha considerado una perturbación incremental en el voltaje del transformador, pues, es sabido que en un transformador el voltaje de él es directamente proporcional a los enlaces de flujo del mismo. En otras palabras, cualquier análisis de ferroresonancia en [P.U] realizado a partir de enlaces de flujo del transformador es equivalente a hacerlo a partir del voltaje en el mismo.

En la FIG 3.12 se muestran los lugares geométricos de la Función Descriptiva Incremental $[-1/K]$ de la no linealidad $[N]$ para varios valores en

FIG. 3.12



[P.U] de $[\lambda_m]$. La línea punteada corresponde al lugar geométrico de la no linealidad [N] y se le llama Envolvente de la no linealidad [N]. [Ref. 41]

3.4.4.3 Predicción de ferroresonancia de transformadores

El criterio de estabilidad de Nyquist se utiliza para predecir, si la ferroresonancia de un transformador con poca carga o sin ella es estable o inestable, cuando dicho transformador se energiza a través de una línea con compensación serie.

De acuerdo a Nyquist, el criterio de estabilidad para la FIG 3.11 establece que: [Ref. 41]

$$KG(j\omega) = -1 \quad [3.57]$$

$$\text{ó; } G(j\omega) = -1/K \quad [3.58]$$

En la ecuación [3.58] se tiene:

$-1/K$: Función Descriptiva Incremental $[-1/K]$ de la no linealidad [N], en la que [K] está dado por la ecuación [3.50]

$G(j\omega)$: Función de Transferencia $[G(s)]$; ($[G(s)]$ dada por la ecuación [3.43]) en la cual

$$s = j\omega = 2\pi f_e \quad [3.59]$$

donde:

ω : frecuencia angular de la red ([RAD/SEG]).

f_e : frecuencia de la red (60 [Hz])

Para un sistema en particular, los parámetros de [R] (resistencia de la línea), [L] (inductancia de la línea), [C] (capacitancia del condensador en

serie) y $\omega = 120\pi$ [RAD/SEG]; constituyen valores fijos y por tanto el lado izquierdo de la ecuación [3.58], es decir $[G(j\omega)]$ dada por la ecuación [3.43] para el sistema particular considerado, viene a ser un punto en el plano complejo.

La predicción del tipo de ferresonancia, a partir del criterio de estabilidad de Nyquist expresado por la ecuación [3.58] y utilizando el gráfico de la ecuación mencionada en el plano complejo, establece que para un sistema particular:

Si para los parámetros fijos de $[R]$, $[L]$, $[C]$ y $\omega = 120\pi$ [RAD/SEG] la Función de Transferencia $[G(j\omega)]$ evaluada en la ecuación [3.43], cae dentro de la Envolvente de la no linealidad $[N]$ (FIG 3.12), entonces la ferresonancia es inestable (sin atenuación), pero si cae fuera de la Envolvente de la no linealidad $[N]$ (FIG 3.12), entonces la ferresonancia será estable (con atenuación). [Ref. 41]

Cuando se realiza un análisis de ferresonancia, por medio del método en [P.U], es decir con $[R]$, $[L]$, $[C]$ y $[\lambda_m]$ expresados en [P.U], entonces $[\omega]$ se expresa como $\omega = 1$ [P.U]

3.4.4.4 Control de ferresonancia inestable

Las mismas medidas que se utilizan para evitar resonancia subsíncrona inestable y que se señalaron en la sección pertinente 3.4.3, son también aplicables para evitar ferresonancia inestable. Además, de dichas medidas, también para evitar ferresonancia inestable, la más utilizada es la que emplea resistores en paralelo con el condensador en serie.

Pruebas de laboratorio han probado que una resistencia del orden de 9 veces la reactancia capacitiva del condensador en serie, evita que la ferroresonancia sea inestable.. [Ref. 21]

Cabe mencionar que, si una máquina sincrónica o de inducción y un transformador conectados en los terminales o en las proximidades de una línea con compensación serie tienen la posibilidad de presentar resonancia sub-sincrónica inestable y ferroresonancia inestable respectivamente, entonces el mismo resistor en paralelo con el condensador en serie empleado para evitar resonancia sub-sincrónica inestable de la máquina sincrónica o de inducción, evitará también ferroresonancia inestable del transformador o viceversa. [Ref. 11]

CAPITULO 4

4.- SELECCION Y PROTECCION DEL CONDENSADOR EN SERIE

- 4.1 SELECCION DEL CONDENSADOR EN SERIE
- 4.2 PROTECCION DEL CONDENSADOR EN SERIE

4.- SELECCION Y PROTECCION DEL CONDENSADOR EN SERIE

4.1 SELECCION DEL CONDENSADOR EN SERIE

4.1.1 Especificaciones del condensador unidad

La información para la selección de un condensador unidad, debe ser determinada para cada aplicación y debe incluir los siguientes aspectos:

- 1.- Frecuencia nominal
- 2.- Capacitancia nominal
- 3.- Reactancia nominal
- 4.- Corriente nominal
- 5.- Voltaje nominal
- 6.- Potencia reactiva nominal.

En el Capítulo 2, sección 2.1.2 se definieron estos aspectos y de ellos se limitará a determinar las expresiones analíticas de los numerales 3, 5 y 6 puesto que éstos se determinan a partir de los tres restantes.

Reactancia nominal: $[X_n]$.- Es la reactancia en ohmios, determinada a partir de la capacitancia y frecuencia nominales. La reactancia nominal $[X_n]$, está dada por:

$$X_n = \frac{1}{2\pi f_e C} \times 10^6 \text{ [OHMIOS]} \quad [4.1]$$

donde:

X_n : reactancia nominal del condensador unidad, en ohmios.

f_e : frecuencia nominal (60 [Hz])

C : capacitancia nominal en microfaradios.

Voltaje nominal: $[E_n]$.- Es el voltaje obtenido con reactancia nominal y con el flujo de corriente nominal a través del condensador unidad.

El voltaje nominal $[E_n]$ se expresa en voltios y está dado por:

$$E_n = I_n X_n \quad [V] \quad [4.2]$$

donde:

E_n : voltaje nominal del condensador unidad, en voltios.

I_n : corriente nominal del condensador unidad, en amperios

X_n : reactancia nominal del condensador unidad, en ohmios.

Potencia reactiva nominal: $[Q_n]$. Se la expresa en [KVAR] y se determina a partir del voltaje nominal y de la corriente nominal, y está dada por:

$$Q_n = E_n I_n \quad [KVAR] \quad [4.3]$$

En la ecuación [4.3] se tiene que:

Q_n : potencia reactiva nominal del condensador unidad, en [KVAR]

I_n : corriente nominal del condensador unidad, en amperios

E_n : voltaje nominal del condensador unidad, en voltios.

4.1.2 Características eléctricas del condensador unidad.

Se mencionan las características eléctricas siguientes:

1.- Sobrecargas permisibles

2.- Nivel de aislamiento.

1.- Sobrecargas permisibles.- Son sobrecorrientes que un condensador unidad puede soportar, debido a ocasionales sobrecargas del sistema. Las corrientes no deberán exceder: [Ref. 23]

- 1.10 [I_n] durante 8 [HORAS] en un período de 12 [HORAS].
- 1.35 [I_n] durante 30 [MINUTOS] en un período de 6 [HORAS].
- 1.50 [I_n] durante 10 [MINUTOS] en un período de 2 [HORAS].
- La corriente promedio de un condensador unidad durante cualquier período de 24 [HORAS] no debe ser mayor que 1.10 [I_n].

Una condición normal de operación existe cuando el voltaje nominal es aplicado a los terminales del condensador unidad y bajo condiciones de operación normal los [KVAR] suministrados por un condensador unidad no deben exceder el 135[%] de los [KVAR] nominales. [Ref. 35]

2.- Nivel de aislamiento.- El nivel de aislamiento se refiere a los voltajes de prueba a la frecuencia de la red y de impulso que caracterizan la aislación de un condensador unidad con relación a su capacidad de soportar los esfuerzos eléctricos entre sus terminales y tierra. El nivel de aislamiento se determina según los dos casos siguientes:

- a.- Nivel de aislamiento para el caso de que el tanque del condensador unidad esté al potencial de tierra.
- b.- Nivel de aislamiento para el caso de que el tanque del condensador unidad no esté al potencial de tierra.

En la tabla 4.1 se tabula el nivel de aislamiento para aquellos condensadores unidad que estén comprendidos dentro del literal a.- [Ref. 23]

TABLA 4.1

MAXIMO VOLTAJE DE OPERACION NORMAL (ENTRE FASES) U_m [KV]	NIVEL DE AISLAMIENTO			VOLTAJE DE PRUEBA AL IMPULSO [KV pico]
	VOLTAJES DE PRUEBA A LA FRECUENCIA DE LA RED		VOLTAJE DE PRUEBA AL IMPULSO	
	AISLACION INTERNA	AISLACION EXTERNA		
	[KV]	[KV]		
0.6	3	6	15	
1.2	6	11	25	
2.4	11	16	35	
3.6	16	21	45	
7.2	22	27	60	
12.0	28	35	75	
17.5	38	45	95	
24.0	50	55	125	
36.0	70	75	170	
52.0	95	105	250	
72.5	140	140	325	

$$U_m = 1.05 V_{LL}$$

V_{LL} : voltaje nominal de operación del sistema (entre fases)

Para aquellos condensadores unidad que se encuentran comprendidos dentro del literal b.-, el nivel de aislamiento se determina de la siguiente manera: [Ref. 23]

- El voltaje nominal del condensador unidad se multiplica por 1.7 y el valor así obtenido se considera como el valor equivalente $[U_m]$. El valor así determinado o su valor más próximo que aparezca en la primera columna de la tabla 4.1 se utiliza para determinar los niveles de aislamiento. Sin embargo, el valor $[U_m]$ que se adopta debe ser tal que los resultantes "voltajes de prueba a la frecuencia de la red" que se indican en la tabla 4.1 no sean menores que:
 - 1.2 $[U_c]$ para condensadores en serie protegidos por espinterómetros de arco sostenido.
 - 1.4 $[U_c]$ para condensadores en serie protegidos por espinterómetros de arco repetitivo.
 - 1.3 veces el mayor de los sobrevoltajes que hay entre los terminales del condensador en serie como consecuencia de cortocircuitos en el sistema; para condensadores en serie desprovistos de protección frente a cortocircuitos en el sistema. Para condensadores en serie que se usan a nivel de Distribución, donde se espera que los sobrevoltajes entre los terminales del condensador en serie debidos a cortocircuitos en el sistema sean relativamente pequeños comparados con el voltaje nominal del condensador en serie; puede resultar más económico no usar protección frente a cortocircuitos en el sistema.

En la sección 4.2.2 correspondiente a la protección externa de un condensador en serie se trata sobre los tipos de espinterómetros y sobre el

voltaje $[U_c]$, el cual no es otra cosa que el voltaje al cual opera un espinterómetro.

4.1.3 Configuración del condensador en serie

En cada fase de una línea, un condensador en serie, está conformado de varios grupos de condensadores unidad en combinaciones serie-paralelo como se indica en la FIG 4.1.

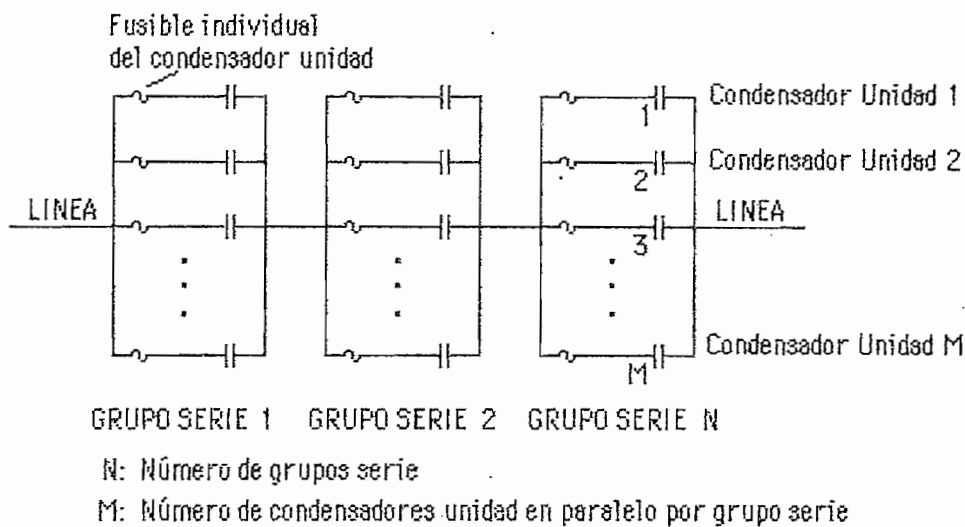


FIG 4.1. Típica configuración de un condensador en serie, en cada fase de una línea

Un condensador conectado en serie con una línea debe estar constituido por una adecuada combinación de grupos serie de condensadores, para alcanzar el voltaje nominal del banco. Por otro lado, cada grupo serie debe estar formado por un apropiado número de condensadores unidad en paralelo para alcanzar la potencia reactiva nominal del banco.

La elección del número correcto de condensadores unidad en paralelo por cada grupo serie está determinado por: [Ref. 35]

- 1.- La cantidad de condensadores unidad en paralelo en un grupo serie debe ser lo suficientemente grande, como para asegurar

que el fusible individual se funda al llevar corriente de la línea, el momento que se cortocircuite el condensador unidad al que protege. Si esta cantidad es muy pequeña, el fusible de protección no sacará de servicio al condensador unidad falloso exponiéndolo a condiciones de operación exageradas que terminarán por destruirlo. Se ha establecido que la corriente a través del fusible, cuando un condensador unidad se cortocircuita, nunca debería ser menor a 10 veces la corriente nominal del condensador unidad al que protege.

- 2.- Luego de la salida de operación de un condensador unidad falloso de un grupo serie, el voltaje aplicado a los condensadores unidad restantes en paralelo de dicho grupo serie, no debe ser mayor al 110 [%] el voltaje nominal de los condensadores unidad.

4.1.4 Cálculo de la configuración del condensador en serie

Con el fin de determinar la configuración del condensador en serie, en cada fase de la línea, se hacen las dos suposiciones siguientes: [Ref. 35]

- 1.- Todos los condensadores unidad que conforman un condensador en serie, tienen las mismas características nominales de voltaje y potencia reactiva; ello implica que para cada fase de la línea, los condensadores en serie deben ser los mismos; es decir deben tener el mismo número de grupos serie, y para cada grupo serie, el número de condensadores unidad en paralelo, también debe ser el mismo.
- 2.- La impedancia que presenta un condensador unidad cuando se cortocircuita, es despreciable.

- Número de grupos serie: [N]

$$N = \frac{E_{cs}}{E_n} \quad [4.4]$$

donde:

E_{cs} : voltaje a través del condensador en serie

E_n : voltaje nominal de los condensadores unidad.

- Corriente nominal de un condensador unidad: [I_n]

$$I_n = \frac{Q_n}{E_n} \quad [4.5]$$

donde:

Q_n : potencia reactiva nominal de cada condensador unidad.

E_n : voltaje nominal de cada condensador unidad.

- Número de condensadores unidad en paralelo, por grupo serie: [M]

$$M = \frac{I_{cs}}{I_n} \quad [4.6]$$

donde:

I_{cs} : corriente a través del condensador en serie.

I_n : corriente nominal de cada condensador unidad.

- Número de condensadores unidad que forman un condensador en serie: [q_c]

$$q_c = MN \quad [4.7]$$

Cuando un condensador unidad sale de operación de un grupo serie, el voltaje que se presenta en los condensadores unidad restantes del grupo, tomado como porcentaje del voltaje nominal del grupo serie, es $[e_f \%$] y está dado por: (véase Apéndice 4A1, sección 4A1.2)

$$e_f \% = 100 \frac{M}{M-1} \frac{i'}{i} \quad [4.8]$$

En la ecuación [4.8] se tiene que:

i' : es la solución de la siguiente ecuación:

$$|Z'|^2 (i')^4 + [2|Z'| |S_r| \cos(\epsilon - \theta') - e_s^2] (i')^2 + |S_r|^2 = 0 \quad [4.9]$$

En la ecuación [4.9] se tiene que:

$$Z' = R + j(X_L - X_{cs}') = |Z'| \angle \theta' \quad [4.10]$$

$$S_r = P_L + jQ_L = |S_r| \angle \epsilon \quad [4.11]$$

$$X_{cs}' = \frac{N(M-1) + 1}{N(M-1)} X_{cs} \quad [4.12]$$

con:

R : resistencia de la línea

X_L : reactancia inductiva de la línea

X_{cs} : reactancia capacitiva del condensador en serie

X_{cs}' : reactancia capacitiva del condensador en serie, cuando de un grupo serie ha salido un condensador unidad.

S_r : potencia compleja, por fase, en el terminal de recepción

P_L : potencia activa de carga, por fase, en el terminal de recepción

Q_L : potencia reactiva de carga, por fase, en el terminal de recepción

e_s : magnitud del voltaje fase-neutro, en el terminal de envío

Además, en la ecuación [4.8] se tiene que:

i : es la solución de la siguiente ecuación:

$$|Z|^2 i^4 + [2|Z| |S_r| \cos(\epsilon - \theta) - e_s^2] i^2 + |S_r|^2 = 0 \quad [4.13]$$

En la ecuación [4.13] se tienen los mismos símbolos y nomenclatura que en la ecuación [4.9], excepto que:

$$Z = R + j(X_L - X_{CS}) = |Z| \angle \theta \quad [4.14]$$

La corriente circulante a través del fusible de un condensador unidad falloso, en vez de la corriente nominal del condensador unidad es $[I_f]$ y está dada por la ecuación siguiente: (véase Apéndice 4A1 sección 4A1.3)

$$I_f = M \frac{i''}{i} \quad [4.15]$$

En la ecuación [4.15] se tiene que:

i'' : es la solución de la siguiente ecuación:

$$|Z''|^2 (i'')^4 + [2|Z''| |S_r| \cos(\epsilon - \theta'') - e_s^2] (i'')^2 + |S_r|^2 = 0 \quad [4.16]$$

En la ecuación [4.16] se tiene los mismos símbolos y nomenclatura que en las ecuaciones [4.9] y [4.13] excepto que:

$$Z'' = R + j(X_L - X_{CS}'') = |Z''| \angle \theta'' \quad [4.17]$$

$$X_{cs}'' = \frac{N-1}{N} X_{cs} \quad [4.18]$$

con:

X_{cs}'' : reactancia capacitiva del condensador en serie al cortocircuitarse un condensador unidad de un grupo serie.

Además en la ecuación [4.15] se tiene que:

i : es la solución de la ecuación [4.13]

4.2 PROTECCION DEL CONDENSADOR EN SERIE

La necesidad de una adecuada protección de un condensador en serie, es evidente cuando se da consideración a daños o averías producidos por:

- a.- cortocircuito de un condensador unidad
- b.- cortocircuitos en el sistema
- c.- descargas atmosféricas

La protección de un condensador en serie es enfocada en dos partes:

- 1.- protección interna
- 2.- protección externa

4.2.1 Protección interna

Se refiere a la protección de cada condensador unidad, mediante su correspondiente fusible individual. La función del fusible individual es sacar fuera de servicio al condensador unidad falloso, antes de que se

produzca la ruptura violenta de la caja de él; debido a las altas presiones producidas por los gases desarrollados durante el cortocircuito de dicho condensador unidad.

Los fusibles son del tipo de alta capacidad de ruptura (fusibles limitadores de corriente), o del tipo expulsión.

Hay varios principios fundamentales que deben ser observados en la selección de los fusibles, para su correcta aplicación: [Ref. 35, Ref. 38]

- 1.- El fusible debe ser capaz de llevar continuamente, por lo menos el 135 [%] de la corriente nominal del condensador unidad al que protege.
- 2.- Cuando se utiliza fusibles tipo expulsión, para la protección efectiva de los condensador unidad, la máxima corriente de falla a través del condensador unidad no debe exceder los siguientes valores:
 - 2i) Con unidades de 25 [KVAR], 4000 [A].
 - 2ii) Con unidades de 50 [KVAR], 4000 [A].
 - 2iii) Con unidades de 100 [KVAR], 5000 [A].
 - 2iv) Con unidades de 150 [KVAR], 6000 [A].
 - 2v) Con unidades de 200 [KVAR], 6000 [A].

Esta limitación se debe a que para corrientes de falla mayores a las indicadas, los fusibles tipo expulsión ya no desempeñan su papel de protección, pues el tiempo de despeje del fusible es mayor que el tiempo de ruptura del tanque del condensador

unidad. En estas circunstancias, los condensadores unidad deberían ser protegidos con fusibles limitadores de corriente.

- 3.- La característica tiempo-corriente de la curva del tiempo de despeje del fusible debe ser convenientemente coordinada con las curvas de probabilidad de ruptura de la caja del condensador unidad protegido.

Estas últimas curvas se encuentran normalizadas para condensadores unidad de 25 [KVAR], 50 [KVAR], 100 [KVAR], 150 [KVAR] y 200 [KVAR] nominales.

Hay dos tipos de fusibles que son los mayormente usados:

- 1.- Los de operación lenta o "T".
- 2.- Los de operación rápida o "K".

4.2.2 Protección externa

Es la protección de un condensador en serie, con el propósito de evitar excesivos daños del dieléctrico en los condensadores unidad que lo conforman, frente a disturbios en el sistema, como pueden ser: cortocircuitos en el sistema o por descargas atmosféricas.

4.2.2.1 Protección frente a cortocircuitos en el sistema

En cada fase de una línea, la protección de un condensador en serie, frente a cortocircuitos en el sistema, se lo efectúa mediante un espinterómetro conectado en paralelo a cada condensador en serie, como se muestra en la FIG 4.2.

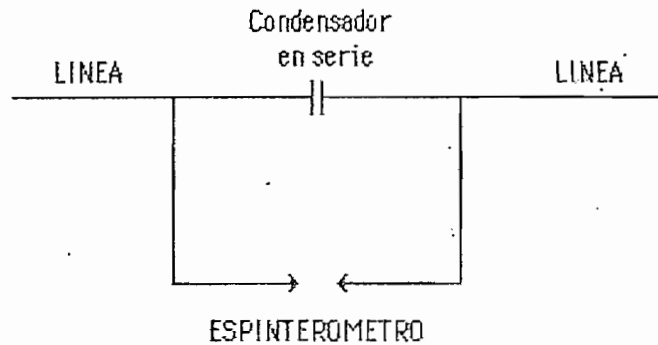


FIG 4.2. Esquema convencional de protección del condensador en serie, frente a cortocircuitos en el sistema.

La operación del espinterómetro se realiza a un voltaje pre-establecido [U_c], denominado voltaje de cebado. Los sobrevoltajes momentáneos que pueden soportar los condensadores unidad (prestando atención a lo establecido en la sección 4.1.2), son también aplicables a los condensadores en serie. Cada condensador en serie puede soportar hasta el 150 [%] de su voltaje nominal; por cuya razón los espinterómetros son calibrados para operar a un voltaje [U_c] que es el 150 [%] del voltaje nominal del condensador en serie al que protegen y además con un tiempo de disparo de 1/2 [CICLO], luego del cual cada condensador en serie es cortocircuitado hasta que la protección de línea despeje la falla. [Ref. 1].

El tiempo de disparo del espinterómetro debe ser menor que el de los relés de la protección de línea que generalmente son del orden de 3, 4, 5 y hasta 8 o 10 [CICLOS], de modo que se tenga una operación correcta de los disyuntores de protección de línea, una vez que ha sido cortocircuitado cada condensador en serie.

4.2.2.1.1 Espinterómetros

Los espinterómetros usados para proteger condensadores en serie, deben satisfacer los siguientes requerimientos: [Ref. 27].

- a.- Características de arco estable y uniforme.
- b.- Construcción robusta, con suficiente esfuerzo mecánico y de características de sobrecorriente de corta duración.
- c.- Capacidad de extinción del arco.
- d.- Requerimientos de mínimo y fácil mantenimiento.

Hay una amplia variedad de espinterómetros disponibles como son:

[Ref. 25]

- 1.- Espinterómetro con disparo -no extingible (de arco sostenido)
 - 2.- Espinterómetro sin disparo -no extingible (de arco sostenido)
 - 3.- Espinterómetro sin disparo -extingible (de arco repetitivo)
 - 4.- Espinterómetro con dispositivos electrónicos.
- 1.- Espinterómetro con disparo -no extingible.- Por disparo se entiende la acción por la cual el arco es encendido, primero en un espinterómetro auxiliar (elemento disparador) y luego es rápidamente transferido a un espinterómetro principal de electrodos más robustos y más resistentes que los del espinterómetro auxiliar.

Son no extingibles puesto que el arco permanece encendido en el espinterómetro principal hasta que la falla es despejada, por cuya razón se les conoce como de arco sostenido.

Un ejemplo de este tipo de espinterómetros, es el que se puede observar en la FIG 4.3, el cual es más comunmente conocido como espinterómetro rotativo y en el que dos espinterómetro intermedios están conectados en serie a través de resistores para formar el

elemento disparador. El arco inicialmente es encendido en el un espinterómetro, siendo la corriente limitada por los resistores, luego el arco es transferido al segundo espinterómetro, para finalmente cuando la corriente cesa de ser limitada por los resistores, el arco es transferido al espinterómetro principal. En el espinterómetro principal debido a efectos magnéticos el arco gira hasta cuando la falla es despejada por la protección de la línea. El movimiento del arco evita calentamientos localizados y excesivo daño de los electrodos del espinterómetro principal

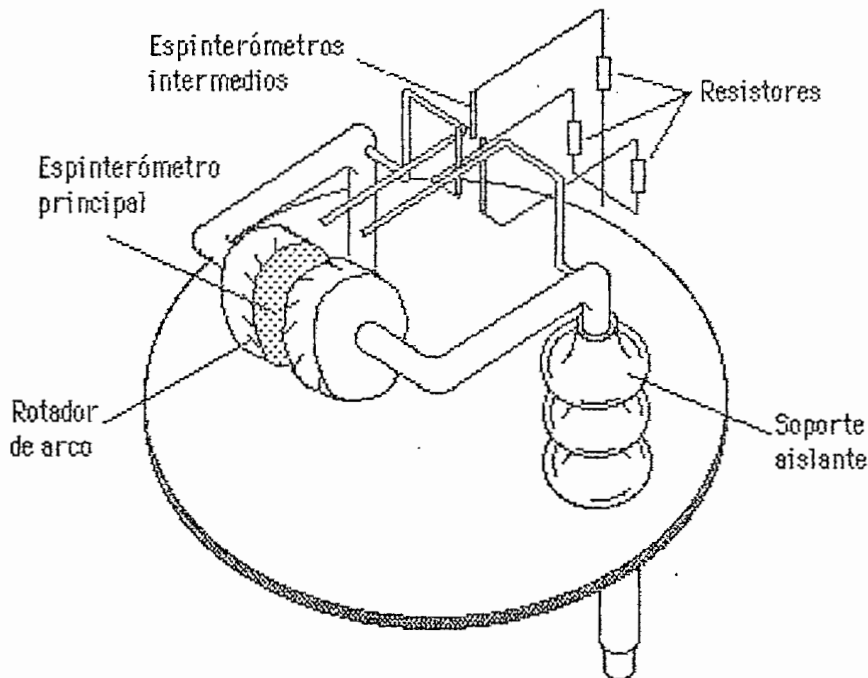


FIG 4.3 Espinterómetro rotativo. Espinterómetro con disparo no extinguido

Otro ejemplo, es el que puede ver en la FIG 4.4, en el que el arco tiene lugar a través del espinterómetro de electrodos metálicos, para luego por medio de la acción de fuerzas electromagnéticas y el flujo ascendente de aire (debido al calor generado), ser forzado a subir rápidamente al espinterómetro de electrodos de grafito. Se afirma que este diseño asegura un cebado rápido y confiable y que el voltaje de

disrupción permanece inalterable luego de varias operaciones del aparato.

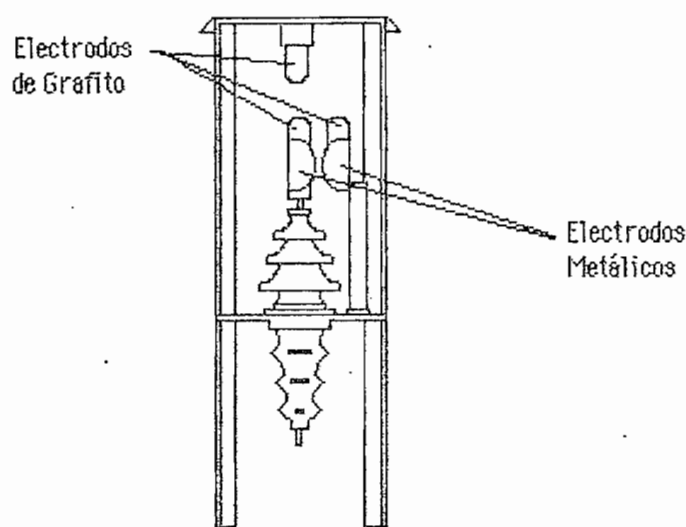


FIG 4.4. Espinterómetro con disparo -no extinguido.

Un tercer ejemplo de este tipo de espinterómetro es el que se ilustra en la FIG 4.5, en el cual el arco aparece primero en el espinterómetro [C] ubicado entre el cono [1] y la barra de cobre [2]. Luego el calor generado por el arco, ocasiona que éste suba hasta la espiral [B], donde se expande y gira, manteniéndose en esa espiral; puentenando al condensador en serie hasta que opere la protección de línea. El objetivo de la espiral [3] es aumentar la capacidad térmica del dispositivo.

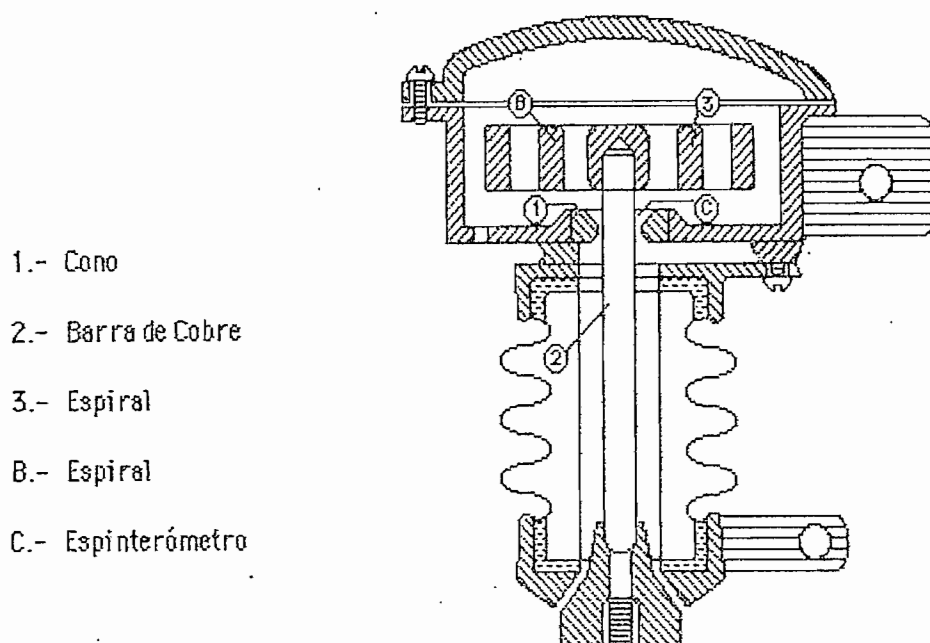


FIG 4.5. Espinterómetro con disparo -no extinguido

2.- Espinterómetro sin disparo -no extinguido.- Los electrodos de este espinterómetro son de cobre o acero inoxidable y su vida útil es aumentada por la adición de un interruptor que lo cortocircuita automáticamente, después de que ha operado dicho espinterómetro. Un ejemplo de tal espinterómetro, es el denominado tipo HH (ver FIG 4.6), que consiste de un espinterómetro conectado en paralelo con un interruptor; el mismo que cortocircuita al espinterómetro y al condensador en serie, una vez que ha sido accionado por un relé de tiempo inverso. El relé de tiempo inverso es operado por el transformador de corriente [CT] y el disparo del relé y consecuentemente el cortocircuito del espinterómetro y del condensador en serie se efectúa luego de que se ha terminado el tiempo que el espinterómetro puede soportar el arco a través de él.

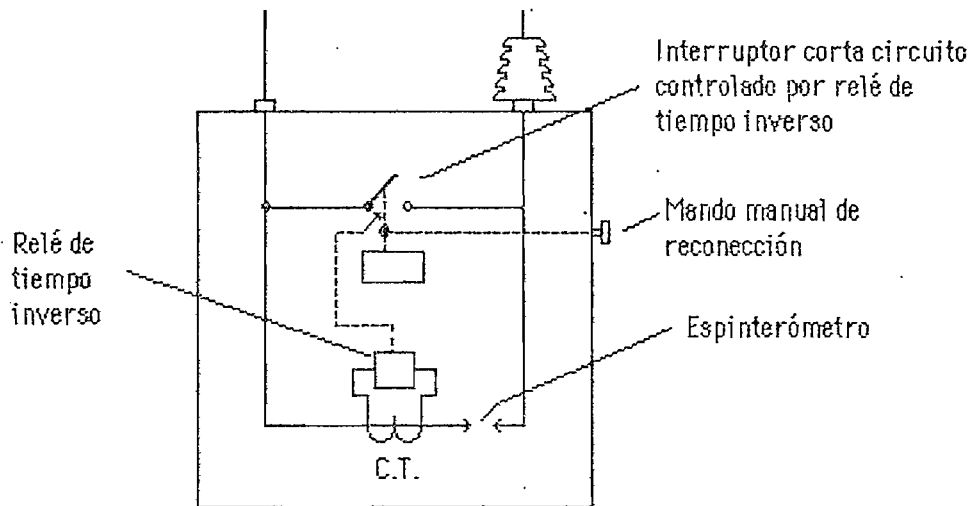


FIG 4.6. Espinterómetro tipo HH.

- 3.- Espinterómetro sin disparo -extinguible.- Cuando se produce el arco en un espinterómetro extinguido, el flujo de corriente a través de él origina la operación de válvulas de aire operadas eléctricamente y un reservorio de soplado de aire descarga una corriente de aire en el área de conducción del espinterómetro que extingue el arco, cada vez que la corriente pasa por el punto cero de su onda, para luego, durante el siguiente semiciclo de la onda de corriente, restablecer el arco. Puesto que el arco permanece encendido durante cada semiciclo de la onda de corriente, antes de que ésta alcance el punto cero de su onda, momento en el cual se extingue el arco. A estos espinterómetros se los conoce también como de arco repetitivo.

Otra característica de los espinterómetros extinguidos es que son autorestaurantes, es decir que el voltaje al que tiene lugar otra disrupción, esencialmente debe ser el mismo que el voltaje original de la primera disrupción. Existen dos tipos de espinterómetros sin disparo -extinguibles:

- 3i.- Tipo abierto

3ii.- Tipo encapsulado

3i.- Tipo abierto.- El espinterómetro sin disparo -extinguible, tipo abierto, se puede ver en la FIG 4.7, el mismo que consiste de dos electrodos concéntricos de cobre, el interior colocado en el extremo de un eje vertical de cobre. Los electrodos son coonstruídos de tal modo que el espacio entre ellos tiene la forma de un espinterómetro anular, ligeramente más grande en la cabeza que en la base. El tamaño de este espinterómetro determina su calibración, la cual es ajustada subiendo o bajando el eje. Una bobina enrollada alrededor del electrodo exterior lleva la corriente de cortocircuito. Los electrodos contornean en la base por efectos de la falla y el efecto magnético de la bobina hace girar y subir en espiral el arco hasta la cabeza de los electrodos. La ventaja de la rotación del arco y su alejamiento desde el punto en el cual ocurre la disrupción reduce la cantidad de encendidos en ese punto y ayuda a mantener el ajuste. Estos espinterómetros han soportado hasta 50 operaciones sin requerimiento de pulido o reajuste.

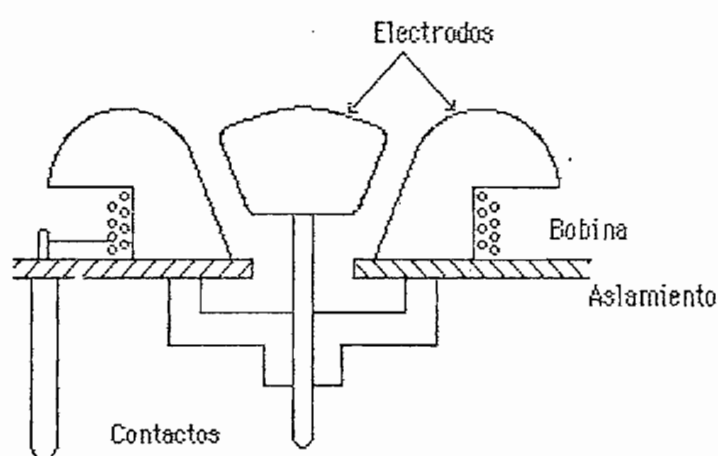


FIG 4.7. Espinterómetro sin disparo -extinguible; tipo abierto.

3ii.- Tipo encapsulado.- Un espinterómetro sin disparo -extinguible, del tipo encapsulado se ilustra en la FIG 4.8; el cual consiste de un

espinterómetro encapsulado en una envoltura de vidrio llena con hidrógeno a baja presión. El ajuste del espinterómetro es obtenido variando ya sea el espaciamiento de los electrodos o la presión del gas. Una bobina es devanada alrededor de la cápsula de vidrio y bajo condiciones de falla lleva la corriente de cortocircuito.

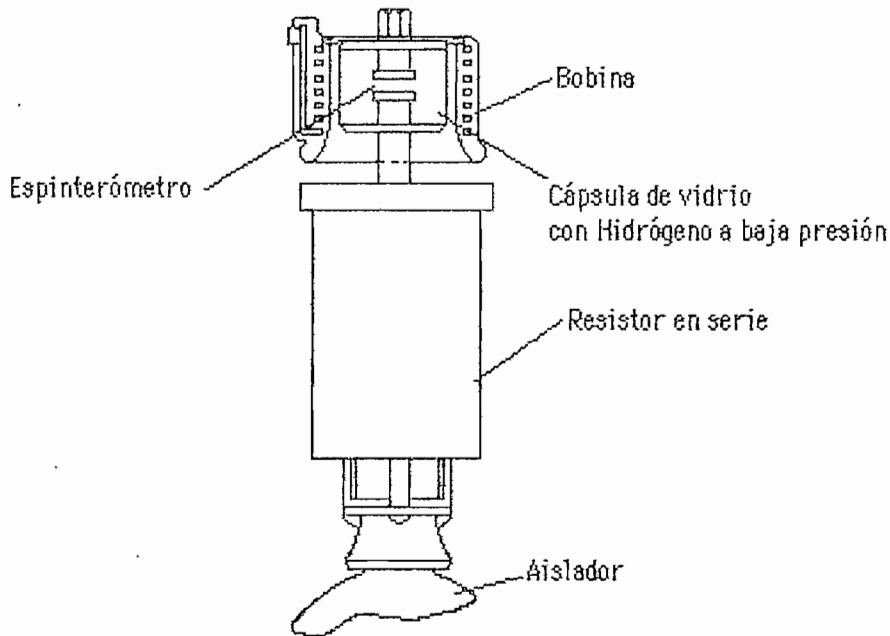


FIG 4.8. Espinterómetro sin disparo -extinguible tipo encapsulado

- 4.- Espinterómetro con dispositivos electrónicos.- El espinterómetro con dispositivos electrónicos consta en la FIG 4.9; el cual está formado del espinterómetro y dos ignitrones.

Los ignitrones están conectados en oposición a través de los terminales del condensador en serie y si ocurre una falla suficientemente severa, como para originar el cebado del espinterómetro, un pulso de corriente fluye a través del circuito de ignición del un ignitrón o del otro, dependiendo de la polaridad.

El ignitrón que opera, lleva la corriente de falla durante $1/2$ [CICLO] y la secuencia es repetida con el otro ignitrón durante el

siguiente $1/2$ [CICLO]; siendo el condensador en serie temporalmente regresado a servicio, cuando la onda de corriente pasa por el punto cero y luego del despeje de la falla, cuando la corriente pasa por el punto cero de su onda, el condensador en serie retorna a prestar un servicio permanente.

El resistor de descarga, tiene por objeto limitar el valor de la corriente de descarga llevada por los ignitrones y el resistor que se halla en el circuito de ignición sirve para limitar la corriente de ignición, del ignitrón.

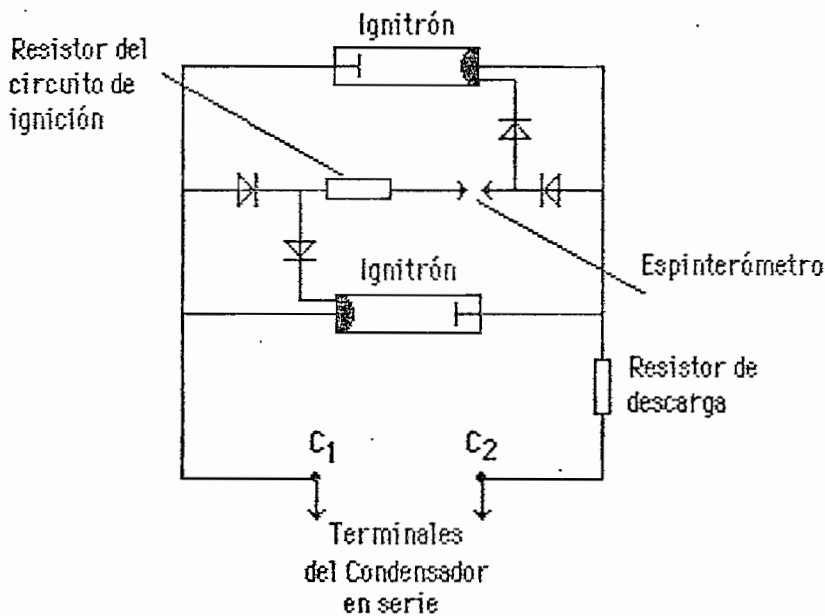


FIG 4.9. Espinterómetro con dispositivos electrónicos.

4.2.2.1.2 Distancia entre los electrodos de un espinterómetro.

El voltaje de cebado de un espinterómetro es proporcional a la densidad relativa del aire [δ] y ésta a su vez varía de acuerdo a las condiciones de presión barométrica y temperatura media ambiente existentes. Normalmente se tienen gráficos y tablas del voltaje de cebado de espinterómetros a condiciones normalizadas de presión barométrica y temperatura media ambiente (760 [mmHg] de presión barométrica y 25 [°C]

de temperatura media ambiente); pero cuando se tienen condiciones de presión barométrica y temperatura media diferentes a las normalizadas, deberá hacerse correcciones. El voltaje de cebado a condiciones de presión barométrica y temperatura media ambiente distintas a las normalizadas es igual al voltaje de cebado a condiciones normalizadas de presión barométrica y temperatura media ambiente multiplicado por el factor de corrección [k] que varía según $[\delta]$; y en la tabla 4.2 se muestran valores de [k] para las correspondientes $[\delta]$. [Ref. 42]

TABLA 4.2

DENSIDAD RELATIVA DEL AIRE	$[\delta]$	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
FACTOR DE CORRECCION	[k]	0.72	0.77	0.81	0.86	0.91	0.95	1.00

En la tabla 4.3 se muestran valores de $[\delta]$ para correspondientes valores de altitud [h] (altura sobre el nivel del mar). [Ref. 43]

TABLA 4.3

ALTITUD EN [M]	DENSIDAD RELATIVA DEL AIRE	ALTITUD EN [M]	DENSIDAD RELATIVA DEL AIRE	ALTITUD EN [M]	DENSIDAD RELATIVA DEL AIRE
[h]	[δ]	[h]	[δ]	[h]	[δ]
0.0	1.000	610.0	0.930	1525.0	0.832
30.5	0.996	640.5	0.926	1586.0	0.826
61.0	0.993	671.0	0.923	1647.0	0.820
91.5	0.989	701.5	0.920	1708.0	0.814
122.0	0.986	732.0	0.916	1769.0	0.807
152.5	0.982	762.5	0.913	1830.0	0.801
183.0	0.979	793.0	0.909	1892.5	0.786
213.5	0.975	823.5	0.906	2132.0	0.772
244.0	0.971	854.0	0.903	2287.5	0.757
274.5	0.968	884.5	0.899	2440.0	0.743
305.0	0.964	915.0	0.896	2592.5	0.729
335.5	0.961	976.0	0.890	2745.0	0.715
366.0	0.957	1037.0	0.883	2897.5	0.701
396.5	0.954	1098.0	0.877	3050.0	0.683
427.0	0.950	1159.0	0.870	4575.0	0.564
457.5	0.947	1220.0	0.864	6100.0	0.460
488.0	0.944	1280.0	0.857	7625.0	0.371
518.5	0.940	1342.0	0.851	9150.0	0.297
549.0	0.937	1403.0	0.845	10675.0	0.235
579.5	0.933	1464.0	0.838	12200.0	0.185

Existen gráficos que relacionan el voltaje de cebado de un espinterómetro en función de la distancia de separación de sus electrodos para condiciones normalizadas de presión barométrica y temperatura media

ambiente; gráficos a partir de los cuales se determina fácilmente la distancia de separación de los electrodos de un espinterómetro pero a condiciones diferentes de presión barométrica y temperatura media ambiente; de la siguiente manera:

Una vez determinado el valor del voltaje de cebado y de acuerdo a la altitud del sitio de la instalación mediante la tabla 4.3 se determina la correspondiente densidad relativa del aire y luego el factor de corrección respectivo mediante la tabla 4.4. El valor del voltaje de cebado se divide por el factor de corrección y con éste nuevo valor de voltaje de cebado se determina la distancia de separación de los electrodos del espinterómetro mediante el uso de la curva que relaciona voltaje de cebado versus distancia de separación de los electrodos del espinterómetro a condiciones normalizadas de presión barométrica y temperatura media ambiente. [Ref. 44]

4.2.2.2 Protección frente a descargas atmosféricas

La protección de un condensador en serie frente a descargas atmosféricas se la realiza mediante dos pararrayos, uno de los cuales va localizado a la entrada del condensador en serie y el otro a la salida de él, como se puede ver en la FIG 4.10. [Ref. 1]

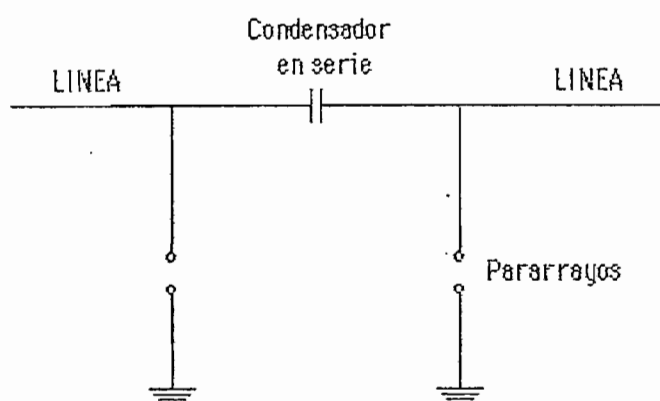


FIG 4.10. Disposición de los pararrayos para proteger al condensador en serie frente a descargas atmosféricas.

El punto de partida para la selección de un pararrayos es la determinación del máximo sobrevoltaje de baja frecuencia (60[HZ]), que puede presentarse en el punto del sistema en el que va a instalarse un pararrayos. En efecto, el voltaje nominal de un pararrayos debe ser al menos igual al máximo sobrevoltaje de baja frecuencia al que puede quedar sometido el pararrayos. Los sobrevoltajes de baja frecuencia de mayor magnitud que pueden presentarse en un sistema se deben en la mayor parte de casos a cortocircuitos monofásicos a tierra.

Partiendo del conocimiento de la magnitud de los sobrevoltajes a tierra durante un cortocircuito monofásico a tierra, o lo que es lo mismo, del valor de las relaciones $[X_0/X_1]$ y $[R_0/X_1]$ calculados en el punto de ubicación del pararrayos, se tiene una forma de seleccionar el voltaje nominal del pararrayos, siendo:

X_0 : La reactancia de secuencia cero, vista desde el punto considerado.

X_1 : La reactancia de secuencia positiva, vista desde el punto considerado.

R_0 : La resistencia de secuencia cero, vista desde el punto considerado.

Mediante el uso de la tabla 4.4 y para valores conocidos de las relaciones $[X_0/X_1]$ y $[R_0/X_1]$, se puede seleccionar el voltaje nominal de los pararrayos, tomando en consideración que $[V_{LL}]$, representa el voltaje nominal entre fases. [Ref. 28, Ref. 29, Ref. 30].

TABLA 4.4

SELECCION DEL PARARRAYOS		
X_0/X_1	R_0/X_1	VOLTAJE NOMINAL DEL PARARRAYOS
$0 < X_0/X_1 \leq 3$	$0 < R_0/X_1 \leq 1$	$0.8 U_m$
$X_0/X_1 > 3$	$R_0/X_1 > 1$	$1.0 U_m$
$-\infty < X_0/X_1 < -40$	-----	$1.1 U_m$
$-40 < X_0/X_1 < 0$	-----	-----
$U_m = 1.05 V_{LL}$		

V_{LL} : voltaje nominal de operación del sistema (entre fases)

U_m : máximo voltaje de operación normal del sistema (entre fases).

Con respecto a la tabla 4.4; para sistemas en los que se tiene que $-40 < X_0/X_1 < 0$ no es posible establecer una regla general para la determinación del voltaje nominal de un pararrayos, en cuyo caso se determinará el voltaje nominal del pararrayos a partir del máximo sobrevoltaje a tierra bajo condiciones de falla monofásica a tierra.

El máximo sobrevoltaje a tierra para la falla monofásica a tierra viene dada por la siguiente relación:

$$V_p = U_m C_e \quad [4.19]$$

con:

$$U_m = 1.05 V_{LL} \quad [4.20]$$

donde:

V_p : máximo sobrevoltaje a tierra para la falla monofásica a tierra.

V_{LL} : voltaje nominal de operación del sistema (entre fases)

U_m : máximo voltaje de operación normal del sistema (entre fases)

C_e : coeficiente de puesta a tierra.

El coeficiente de puesta a tierra se define como la relación entre el valor más alto de los voltajes que se presentan en las fases que no han fallado, durante una falla monofásica a tierra, respecto al voltaje fase-fase que se presenta una vez removida la falla.

En la tabla 4.5 se indican las expresiones analíticas que permiten calcular los voltajes fase-tierra para una falla monofásica a tierra. [Ref. 11].

TABLA 4.5

VOLTAJES FASE-TIERRA
BAJO CONDICIONES DE FALLA

TIPO DE FALLA	EXPRESION VECTORIAL
$\phi - T$	$*E_g = 0$ $E_b = -\frac{\sqrt{3}}{2} E_g \left[\frac{\sqrt{3} Z_0 + j(Z_0 + 2 Z_2)}{Z_0 + Z_1 + Z_2} \right]$ $E_c = -\frac{\sqrt{3}}{2} E_g \left[\frac{\sqrt{3} Z_0 - j(Z_0 + 2 Z_2)}{Z_0 + Z_1 + Z_2} \right]$

* : indica la fase fallada

E_g : voltaje fase-tierra de pre-falla en el punto considerado.

Z_1, Z_2, Z_0 : impedancias de secuencia vistas desde el punto considerado.

CAPITULO 5

5.- ANALISIS TECNICO-ECONOMICO

- 5.1 EVALUACION TECNICA
- 5.2 COMPONENTES DE COSTO
- 5.3 EVALUACION ECONOMICA

5.- ANALISIS TECNICO - ECONOMICO

5.1 EVALUACION TECNICA

5.1.1 Principios básicos

El aumento cada vez mayor de la carga puede ocasionar problemas de excesiva caída de voltaje en las líneas de sub-transmisión, lo cual no permite transferir mayor potencia a través de ellas, manteniendo magnitudes adecuadas de voltaje. En algunos casos el aumento de la carga puede haber determinado que la línea se encuentre operando en su régimen térmico, lo cual también impide transferir más potencia por dicha línea. Es conocido que la magnitud de voltaje en un sitio del sistema está íntimamente relacionado con la presencia de reactivos en ese punto y que existen varias alternativas para suministrar reactivos a la carga con el objeto de mantener magnitudes de voltaje en ella que se encuentren dentro del rango permisible.

5.1.2 Alternativas para suministrar reactivos a la carga

El suministro de los reactivos necesarios a la carga puede ser hecho, entre otras, por el uso de cualquiera de las siguientes alternativas:

- 1.- Condensadores en serie
- 2.- Condensadores en derivación
- 3.- Líneas en paralelo
- 4.- Generadores.

1.- Condensadores en serie

La generación de potencia reactiva por parte de un condensador en serie se caracteriza por ser autoajutable o automática, ya que varía de acuerdo a las variaciones que sufre la corriente que lo atraviesa.

2.- Condensadores en derivación

El principal propósito de los condensadores en derivación, es el de suministrar potencia reactiva, lo bastante cerca de la carga, como sea posible.

3.- Líneas en paralelo

La capacitancia en paralelo de una línea, se constituye también en un medio por el cual se suministran reactivos a la carga, y el aumento del número de líneas, las cuales se conectan en paralelo, a través de sus correspondientes capacitancias permiten incrementar el suministro de reactivos a la carga. Por otra parte, la configuración de líneas en paralelo disminuye la impedancia equivalente que hay entre el terminal de envío y de recepción, lo cual reduce la caída de voltaje y permite aumentar la magnitud de voltaje a nivel de la carga.

4.- Generadores

En principio, la energía reactiva requerida podría suministrarse desde las plantas generadoras hasta los centros de consumo; por ser lo más viable de realizar, particularmente al tratarse de un sistema pequeño y cargas livianas; pero cuando en un sistema aumentan las cargas y las distancias, se tratará de suministrar los reactivos necesarios desde un sitio tan próximo a la carga, como sea posible. Generalmente, lo que se hace es generar sólo parte de los

requerimientos de potencia reactiva desde las plantas generadoras; generando la otra parte por medio de métodos de suministro de potencia reactiva, situados localmente cerca de las cargas.

5.1.3 Método de evaluación técnica

La evaluación técnica, de la aplicación de cualquier método de suministro de reactivos a la carga, con el propósito de aumentar la transferencia de potencia a través de una línea de sub-transmisión, por una mejora del nivel de voltaje en la carga, comprende la consideración de los siguientes factores, ya señalados en la sección 3.3:

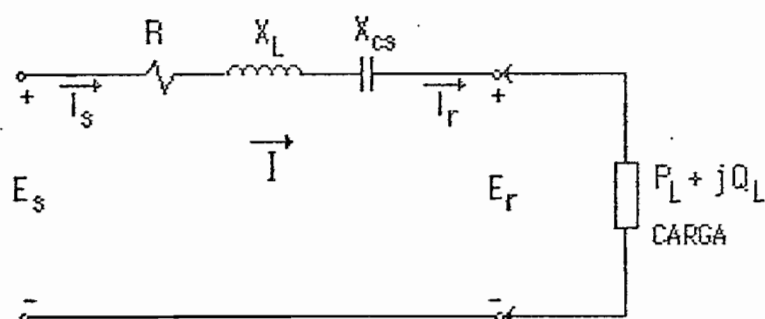
- 1.- Que la línea opere dentro del rango permisible de regulación de voltaje.
- 2.- Que la línea opere, sin exceder el valor del límite térmico.

Al igual de lo que se señaló en la sección 3.3, la evaluación de los factores 1.- y 2.-, también se lo puede hacer determinando el voltaje en el terminal de recepción y la corriente de línea en el terminal de envío respectivamente, conocidos el voltaje en el terminal de envío y la carga en el terminal de recepción; y, comprobando que la magnitud del voltaje en el terminal de recepción (en la carga), se encuentre dentro del rango permisible (± 5 [%] de la magnitud del voltaje nominal) y a la vez comprobando que la magnitud de la corriente en el terminal de envío no exceda del límite térmico.

5.1.4 Formulación matemática para la evaluación técnica de la alternativa: condensadores en serie

5.1.4.1 Fórmulas de cálculo del voltaje terminal de recepción y del ángulo de operación de la línea

Para determinar la fórmula que permita calcular el voltaje terminal de recepción, se usa el circuito de la FIG 5.1.



- R : Resistencia de la línea
- X_L : Reactancia inductiva de la línea
- X_{cs} : Reactancia capacitiva del condensador en serie

FIG 5.1 Circuito de una carga alimentada a través de una línea con compensación serie.

De acuerdo al circuito de la FIG 5.1 se puede ver que la corriente en el terminal de envío de la línea [I_s] es la misma que la corriente en el terminal de recepción [I_r], es decir, se cumple que:

$$I_s = I_r = I \quad [5.1]$$

En la FIG 5.1 también se cumplen las siguientes ecuaciones:

$$E_s = E_r + I [R + j(X_L - X_{cs})] \quad [5.2]$$

$$I = \frac{S_r^*}{E_r^*} \quad [5.3]$$

$$S_r^* = P_L - j Q_L \quad [5.4]$$

con:

E_s : voltaje fase-neutro, en el terminal de envío

E_r : voltaje fase-neutro, en el terminal de recepción

E_r^* : conjugada del voltaje fase-neutro, en el terminal de recepción

S_r : potencia compleja, por fase, en el terminal de recepción

S_r^* : conjugada de la potencia compleja, por fase, en el terminal de recepción

P_L : potencia activa de carga, por fase, en el terminal de recepción

Q_L : potencia reactiva de carga, por fase, en el terminal de recepción

La substitución de las ecuaciones [5.3] y [5.4] en la ecuación [5.2] hace que ésta se convierta en:

$$E_s E_r^* = E_r E_r^* + (P_L - j Q_L)(R + j(X_L - X_{CS})) \quad [5.5]$$

Tomando [E_s] como referencia se tiene que:

$$E_s = e_s |0 \quad [5.6]$$

$$E_r = e_r |-\Delta \quad [5.7]$$

con:

e_s : magnitud del voltaje fase-neutro, en el terminal de envío

e_r : magnitud del voltaje fase-neutro, en el terminal de recepción.

Δ : ángulo de operación de la línea

En la ecuación [5.7], $[E_r]$ se descompone en sus componentes real e imaginaria, según la siguiente expresión:

$$E_r = e_{rx} + j e_{ry} \quad [5.8]$$

El reemplazo de [5.6] y [5.8] en [5.5] da:

$$\begin{aligned} [e_s e_{rx} - e_{rx}^2 - e_{ry}^2] - j e_s e_{ry} = [RP_L + (X_L - X_{CS})Q_L] \\ - j [RQ_L - (X_L - X_{CS})P_L] \end{aligned} \quad [5.9]$$

Igualando los términos imaginarios del primer y segundo miembros de la ecuación [5.9] se tiene que:

$$e_{ry} = \frac{RQ_L - (X_L - X_{CS})P_L}{e_s} \quad [5.10]$$

Igualando las partes reales del primer y segundo miembros de la ecuación [5.9] se tiene que:

$$e_{rx} = \frac{e_s \pm \sqrt{e_s^2 - 4[e_{ry}^2 + RP_L + (X_L - X_{CS})Q_L]}}{2} \quad [5.11]$$

La magnitud del voltaje fase-neutro en el terminal de recepción $[e_r]$ se determina por la siguiente relación:

$$e_r = \sqrt{e_{ry}^2 + e_{rx}^2} \quad [5.12]$$

evaluando previamente las expresiones de $[e_{ry}]$ y $[e_{rx}]$ en las ecuaciones [5.10] y [5.11] respectivamente.

Por otro lado, el ángulo de operación de la línea $[\Delta]$ se evalúa de acuerdo a la siguiente relación:

$$\Delta = -\operatorname{tg}^{-1} \frac{e_{ry}}{e_{rx}} \quad [5.13]$$

Con $[e_{ry}]$ y $[e_{rx}]$ evaluados de acuerdo a las ecuaciones [5.10] y [5.11] respectivamente. Hay que señalar que el signo negativo en el segundo miembro de la ecuación [5.13], se debe a la convención adoptada en la ecuación [5.7].

5.1.4.2 Fórmula de cálculo de la corriente de línea

Para el circuito de la FIG 5.1, la corriente de líneas en el terminal de envío es la misma que en el terminal de recepción y al igual que la ecuación [5.1] se tiene que:

$$I_s = I_r = I \quad [5.14]$$

I , puede escribirse como:

$$I = i \angle \theta_i \quad [5.15]$$

con:

I : corriente de línea

i : magnitud de la corriente de línea

θ_i : ángulo de la corriente de línea.

La magnitud de la corriente de línea $[i]$ está dada por la relación:

$$i = \frac{|S_r|}{e_r} \quad [5.16]$$

con:

$$|S_r| = |P_L + j Q_L| = \sqrt{P_L^2 + Q_L^2} \quad [5.17]$$

$|S_r|$: magnitud de la potencia compleja, por fase, en el terminal de recepción.

En la ecuación [5.16], $[e_r]$ se determina a partir de la ecuación [5.12].

5.1.43 Determinación del valor del condensador en serie hasta el cual el voltaje en el terminal de recepción y la corriente de línea tienen valor real

De la ecuación [5.16] se desprende que la magnitud de la corriente de línea $[i]$, es función de la magnitud del voltaje fase-neutro en el terminal de recepción $[e_r]$ y por tanto $[i]$ tendrá valor real cuando $[e_r]$ tenga también valor real.

Puesto que $[e_r]$ es función de $[e_{rx}]$ como se puede ver de la ecuación [5.12], para que $[e_r]$ tenga valor real es necesario que $[e_{rx}]$ tenga también valor real. Para que $[e_{rx}]$ tenga valor real es necesario que el valor del radical del segundo miembro de la ecuación [5.11] sea mayor o igual a cero. Para determinar el valor del condensador en serie hasta el cual las magnitudes del voltaje fase-neutro en el terminal de recepción y de la corriente de línea tienen valor real, el valor del radical del segundo miembro de la ecuación [5.11] tiene que ser igual a cero, es decir:

$$e_s^2 - 4[e_{ry}^2 + R P_L + (X_L - X_{cs}) Q_L] = 0 \quad [5.18]$$

En la ecuación [5.18], si:

$$X_{\phi} = (X_L - X_{cs}) \quad [5.19]$$

y $[e_{ry}]$ se substituye de acuerdo a la ecuación [5.10], se tiene que despejando $[X_{\chi}]$ da:

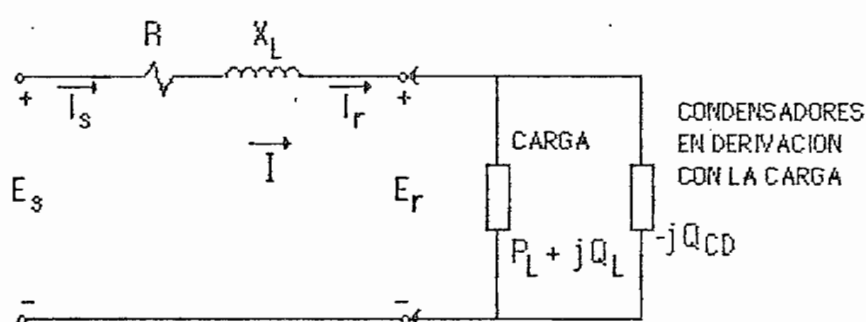
$$X_{\chi} = \frac{Q_L (2RP_L - e_s^2) \pm \sqrt{[-Q_L (2RP_L - e_s^2)]^2 + P_L^2 e_s^2 (e_s^2 - 4RP_L)}}{2 P_L^2} \quad [5.20]$$

La utilización de las ecuaciones [5.20] primero y luego la [5.19] para determinar el valor del condensador en serie hasta el cual tanto $[e_r]$ como $[i]$ tienen valores reales, es de gran interés ya que para un valor dado de condensador en serie, antes de proceder a evaluar $[e_r]$ e $[i]$ a partir de sus correspondientes ecuaciones, previamente se debe verificar que el valor dado de condensador en serie sea menor o igual al que se tiene mediante la aplicación de las ecuaciones [5.20] y [5.19] con el fin de garantizar con seguridad que los valores de $[e_r]$ e $[i]$ serán reales.

5.1.5 Formulación matemática para la evaluación técnica de la alternativa: condensadores en derivación.

5.1.5.1 Fórmulas de cálculo de la potencia reactiva en condensadores en derivación con la carga y del ángulo de operación de la línea.

El circuito que se utiliza es el de la FIG 5.2.



- R : Resistencia de la línea
 X_L : Reactancia inductiva de la línea
 Q_{CD} : Potencia reactiva en condensadores en derivación con la carga.

FIG 5.2 Circuito de una línea, con condensadores en derivación con la carga.

En el circuito de la FIG 5.2, como en el de la FIG 5.1, se puede observar que la corriente en el terminal de envío de la línea [I_s] es la misma que la corriente en el terminal de recepción [I_r] o sea que se verifica que:

$$I_s = I_r = I \quad [5.21]$$

En el circuito de la FIG 5.2 también se cumplen las siguientes ecuaciones:

$$E_s = E_r + I(R + jX_L) \quad [5.22]$$

$$I = \frac{S_r^*}{E_r^*} \quad [5.23]$$

$$S_r^* = [P_L + j(Q_L - Q_{CD})]^* = P_L - j(Q_L - Q_{CD}) \quad [5.24]$$

con:

E_s : voltaje fase-neutro, en el terminal de envío

E_r : voltaje fase-neutro, en el terminal de recepción

E_r^* : conjugada del voltaje fase-neutro, en el terminal de recepción

S_r : potencia compleja, por fase, en el terminal de recepción

S_r^* : conjugada de la potencia compleja, por fase, en el terminal de recepción

P_L : potencia activa de carga, por fase, en el terminal de recepción

Q_L : potencia reactiva de carga, por fase, en el terminal de recepción

Q_{CD} : potencia reactiva, por fase, de condensadores en derivación

Tomando $[E_r]$ como referencia se tiene que:

$$E_s = e_s \angle \Delta \quad [5.25]$$

$$E_r = e_r \angle 0 \quad [5.26]$$

con:

e_s : magnitud del voltaje fase-neutro, en el terminal de envío

e_r : magnitud del voltaje fase-neutro, en el terminal de recepción

Δ : ángulo de operación de la línea

De acuerdo a las ecuaciones [5.25] y [5.26] se tiene que la ecuación [5.22] se convierte en:

$$E_s = \frac{e_r^2 + RP_L + X_L(Q_L - Q_{CD}) - j[R(Q_L - Q_{CD}) - X_L P_L]}{e_r} \quad [5.27]$$

De la ecuación [5.27], se deduce la ecuación siguiente:

$$e_s = \frac{\sqrt{[e_r^2 + RP_L + X_L(Q_L - Q_{CD})]^2 + [R(Q_L - Q_{CD}) - X_L P_L]^2}}{e_r} \quad [5.28]$$

En la ecuación [5.28] si:

$$Q_r = Q_L - Q_{CD} \quad [5.29]$$

y despejando $[Q_r]$ da:

$$Q_r = \frac{-2e_r^2 X_L \pm \sqrt{(2e_r^2 X_L)^2 - 4(R^2 + X_L^2)[e_r^2(e_r^2 - e_s^2 + 2RP_L) + (R^2 + X_L^2)P_L^2]}}{2(R^2 + X_L^2)} \quad [5.30]$$

donde:

Q_r : potencia reactiva, por fase, en el terminal de recepción

De la solución de la ecuación [5.30] se obtiene $[Q_r]$ y por tanto se obtiene también de la ecuación [5.29] que:

$$Q_{CD} = Q_L - Q_r \quad [5.31]$$

con:

Q_{CD} : potencia reactiva, por fase, de condensadores en derivación.

Por otra parte, en la ecuación [5.25], $[E_s]$ al descomponerse en sus componentes real e imaginaria, se obtiene la siguiente expresión:

$$E_s = e_{sx} + j e_{sy} \quad [5.32]$$

Igualando el primero y el segundo miembro de la ecuación [5.32] a sus correspondientes de la ecuación [5.27] se obtiene:

$$e_{sx} = \frac{e_r^2 + R P_L + X_L (Q_L - Q_{CD})}{e_r} \quad [5.33]$$

$$e_{sy} = - \frac{R (Q_L - Q_{CD}) - X_L P_L}{e_r} \quad [5.34]$$

Reemplazando la ecuación [5.29] en las ecuaciones [5.33] y [5.34] se tiene que:

$$e_{sx} = \frac{e_r^2 + R P_L + X_L Q_r}{e_r} \quad [5.35]$$

$$e_{sy} = - \frac{R Q_r - X_L P_L}{e_r} \quad [5.36]$$

El ángulo de operación de la línea $[\Delta]$, se evalúa según la siguiente relación:

$$\Delta = \operatorname{tg}^{-1} \frac{e_{sy}}{e_{sx}} \quad [5.37]$$

Con $[e_{sx}]$ y $[e_{sy}]$ evaluados respectivamente en las ecuaciones [5.35] y [5.36]. Hay que anotar que la solución de $[Q_r]$, obtenida a partir de la ecuación [5.30] debe ser utilizada en la evaluación de $[e_{sx}]$ y $[e_{sy}]$ a partir de

las correspondientes ecuaciones [5.35] y [5.36] previo a la evaluación del ángulo de operación de la línea $[\Delta]$ mediante la ecuación [5.37].

5.1.5.2 Fórmula de cálculo de la corriente de línea

De la FIG 5.2 se puede ver que la corriente en el terminal de envío es la misma que en el terminal de recepción, por lo cual, en forma similar a la ecuación [5.21] se tiene que:

$$I_s = I_r = I \quad [5.38]$$

I , puede escribirse como:

$$I = i \angle \theta_i \quad [5.39]$$

con:

I : corriente de línea

i : magnitud de la corriente de línea

θ_i : ángulo de la corriente de línea.

La magnitud de la corriente de línea $[i]$ está dada por la relación:

$$i = \frac{|S_r|}{e_r} \quad [5.40]$$

con:

$$|S_r| = |P_L + j(Q_L - Q_{CD})| = \sqrt{P_L^2 + (Q_L - Q_{CD})^2} \quad [5.41]$$

$|S_r|$: magnitud de la potencia compleja, por fase, en el terminal de recepción.

O lo que es lo mismo, reemplazando la ecuación [5.29], en la ecuación [5.41]:

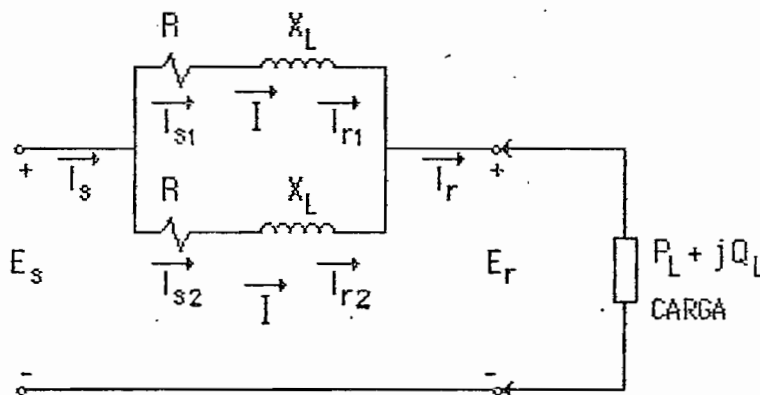
$$|S_r| = |P_L + j Q_r| = \sqrt{P_L^2 + Q_r^2} \quad [5.42]$$

donde:

Q_r : potencia reactiva, por fase, en el terminal de recepción, evaluada según la ecuación [5.30]

5.1.6 Formulación matemática para la evaluación técnica de la alternativa: líneas en paralelo.

El poner en paralelo una nueva línea a una ya existente, de tal manera que las dos líneas tengan las mismas características, establece un circuito de la forma como se señala en la FIG 5.3.



R : Resistencia de la línea
 X_L : Reactancia inductiva de la línea

FIG 5.3 Circuito de dos líneas en paralelo y con carga

El circuito de la FIG 5.3, se reduce al circuito de la FIG 5.4

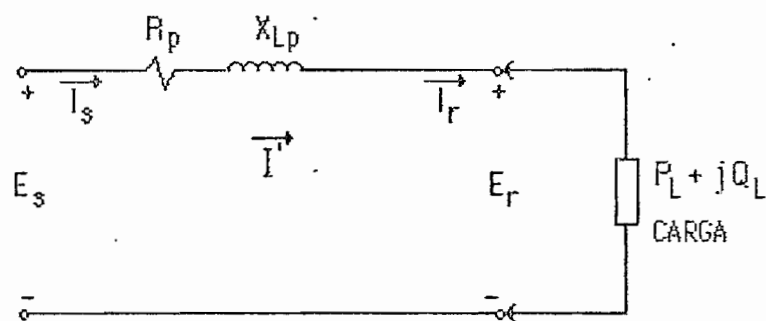


FIG 5.4 Circuito equivalente de dos líneas en paralelo y con carga.

En el circuito de la FIG 5.4 se tiene que:

$$R_p = R/2 \quad [5.43]$$

$$X_{Lp} = X_L/2 \quad [5.44]$$

En las FIG 5.3 y FIG 5.4 se tiene que:

$$I_{s1} = I_{r1} = I \quad [5.45]$$

$$I_{s2} = I_{r2} = I \quad [5.46]$$

$$I_{s1} = I_{r1} = I_{s2} = I_{r2} = I \quad [5.47]$$

$$I_s = I_r = I' \quad [5.48]$$

$$I = I'/2 \quad [5.49]$$

siendo:

I : corriente de cada línea

5.1.6.1 Fórmulas de cálculo del voltaje terminal de recepción y del ángulo de operación de la línea

En la FIG 5.4 se cumplen las siguientes ecuaciones:

$$E_s = E_r + I'(R_p + jX_{Lp}) \quad [5.50]$$

$$I' = \frac{S_r^*}{E_r^*} \quad [5.51]$$

$$S_r^* = P_L - jQ_L \quad [5.52]$$

con:

R_p : resistencia equivalente del paralelo de las dos líneas de sub-transmisión

X_{Lp} : reactancia inductiva equivalente del paralelo de las dos líneas de sub-transmisión

E_s : voltaje fase-neutro, en el terminal de envío

E_r : voltaje fase-neutro, en el terminal de recepción

E_r^* : conjugada del voltaje fase-neutro, en el terminal de recepción

S_r : potencia compleja, por fase, en el terminal de recepción

S_r^* : conjugada de la potencia compleja, por fase, en el terminal de recepción

P_L : potencia activa de carga, por fase, en el terminal de recepción

Q_L : potencia reactiva de carga, por fase, en el terminal de recepción

La substitución de las ecuaciones [5.51] y [5.52] en la ecuación [5.50] determina que ésta se convierta en:

$$E_s E_r^* = E_r E_r^* + (P_L - j Q_L)(R_p + j X_{Lp}) \quad [5.53]$$

Tomando $[E_s]$ como referencia se tiene que:

$$E_s = e_s \angle 0 \quad [5.54]$$

$$E_r = e_r \angle -\Delta \quad [5.55]$$

con:

e_s : magnitud del voltaje fase-neutro, en el terminal de envío

e_r : magnitud del voltaje fase-neutro, en el terminal de recepción

Δ : ángulo de operación de la línea

En la ecuación [5.55], $[E_r]$ se descompone en sus componentes real e imaginaria, según la siguiente expresión:

$$E_r = e_{rx} + j e_{ry} \quad [5.56]$$

El reemplazo de [5.54] y [5.56] en [5.53] da:

$$\begin{aligned} [e_s e_{rx} - e_{rx}^2 - e_{ry}^2] - j e_s e_{ry} &= [R_p P_L + X_{Lp} Q_L] \\ &\quad - j [R_p Q_L - X_{Lp} P_L] \end{aligned} \quad [5.57]$$

Igualando los términos imaginarios del primer y segundo miembros de la ecuación [5.57] se tiene que:

$$e_{ry} = \frac{R_p Q_L - X_{Lp} P_L}{e_s} \quad [5.58]$$

Igualando las partes reales del primer y segundo miembros de la ecuación [5.57] se tiene que:

$$e_{rx} = \frac{e_s \pm \sqrt{e_s^2 - 4[e_{ry}^2 + R_p P_L + X_{Lp} Q_L]}}{2} \quad [5.59]$$

La magnitud del voltaje fase-neutro en el terminal de recepción se determina por la siguiente relación:

$$e_r = \sqrt{e_{ry}^2 + e_{rx}^2} \quad [5.60]$$

evaluando previamente las expresiones de $[e_{ry}]$ y $[e_{rx}]$ en las ecuaciones [5.58] y [5.59] respectivamente.

Por otro parte, el ángulo de operación de la línea $[\Delta]$ se evalúa de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\Delta = -\operatorname{tg}^{-1} \frac{e_{ry}}{e_{rx}} \quad [5.61]$$

Con $[e_{ry}]$ y $[e_{rx}]$ evaluados según las ecuaciones [5.58] y [5.59] respectivamente. Hay que recalcar que el signo negativo en el segundo miembro de la ecuación [5.61], se debe a la convención adoptada en la ecuación [5.55].

5.1.6.2 Fórmula de cálculo de la corriente de línea

De acuerdo a la FIG 5.3 se puede ver que en cada línea de sub-transmisión la corriente en el terminal de envío es igual a la corriente en el

terminal de recepción y además es fácil también desprender que dado que las dos líneas de sub-transmisión son de similares características, las mencionadas corrientes también son similares para las dos líneas, todo lo cual está matemáticamente representado en las ecuaciones [5.45], [5.46], [5.47], [5.48] y [5.49].

La corriente [I] de cada línea puede escribirse como:

$$I = i \angle \theta_i \quad [5.62]$$

con:

I : corriente de cada línea

i : magnitud de la corriente de cada línea

θ_i : ángulo de la corriente de cada línea.

La magnitud de la corriente para cada línea [i] está dada por:

$$i = \frac{|S_r|}{2e_r} \quad [5.63]$$

con:

$$|S_r| = |P_L + j Q_L| = \sqrt{P_L^2 + Q_L^2} \quad [5.64]$$

En la ecuación [5.63], $[e_r]$ se calcula según la ecuación [5.60]

5.2 COMPONENTES DE COSTO

5.2.1 Componentes de costo de una instalación de condensadores en serie

En la sección 2.1.1 del capítulo 2 se definió lo que es el banco del condensador en serie. En una fase de la línea el banco del condensador en

serie normalmente comprende los siguientes dispositivos; dispuestos tal como se muestra en la FIG 5.5. [Ref. 1]

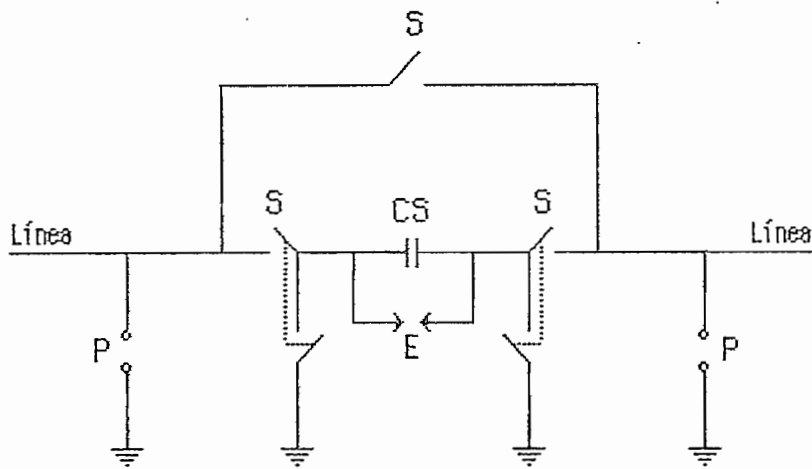


FIG 5.5. Instalación del banco del condensador en serie, en una fase de la línea.

Con referencia a la FIG 5.5, en la tabla 5.1 se encuentra una descripción de los dispositivos que constituyen el banco del condensador en serie, en una fase de la línea.

TABLA 5.1

SIMBOLO	DESIGNACION	FUNCION QUE REALIZA
CS	Condensador en serie en cada fase de la línea (formado por grupos serie-paralelo de condensadores unidad, y cada condensador unidad con su fusible individual; como se indica en la FIG 4.1 de la sección 4.1.3, Capítulo 4)	Compensa la reactancia inductiva de la línea
E	Espinterómetro	Cortocircuita al condensador en serie por la presencia de sobrevoltajes en él, debidos a fallas en el sistema
P	Pararrayos	Protege al condensador en serie frente a descargas atmosféricas
S	Seccionador	Maniobras para operación y mantenimiento

El costo del banco del condensador en serie en una fase de la línea, está constituido por los dos componentes de costo siguientes:

- 1.- Costo [FOB]
- 2.- Costos adicionales u otros costos

Dentro de los costos adicionales, éstos son tomados como porcentaje del costo [FOB], y son los siguientes: [Ref. 32]

- 2i.- Flete marítimo (15 [%])
- 2ii.- Nacionalización y transporte interno (10 [%])

- 2iii.- Equipo auxiliar (8 [%])
- 2iv.- Obras civiles (8 [%])
- 2v.- Montaje y supervisión del montaje (8 [%])
- 2vi.- Ingeniería y administración (23 [%])
- 2vii.- Impuestos y seguros (15 [%])

Una instalación de condensadores en serie, está formada por un banco trifásico de condensadores en serie, es decir por tres bancos de condensadores en serie tal que en cada fase se halla un banco, por todo lo cual, el costo de una instalación de condensadores en serie será tres veces el costo del banco del condensador en serie en una fase de la línea.

5.2.2 Componentes de costo de una instalación de condensadores en derivación con la carga

Una instalación de condensadores en derivación con la carga está conformada por un banco trifásico de condensadores en derivación con la carga.

Un banco trifásico de condensadores en derivación con la carga, está formado por los siguientes dispositivos:

- a.- Condensadores unidad dispuestos en grupos serie-paralelo y cada condensador unidad con su respectivo fusible individual.
- b.- Protección y control
- c.- Seccionadores para efectuar maniobras de operación y mantenimiento.

El costo de un instalación de condensadores en derivación con la carga está formado por los dos componentes de costo siguientes:

- 1.- Costo [FOB]
- 2.- Costos adicionales u otros costos

Dentro de los costos adicionales, éstos son tomados como porcentaje del costo [FOB], y son los siguientes: [Ref. 32]

- 2i.- Flete marítimo (15 [%])
- 2ii.- Nacionalización y transporte interno (10 [%])
- 2iii.- Equipo auxiliar (6 [%])
- 2iv.- Obras civiles (8 [%])
- 2v.- Montaje y supervisión del montaje (8 [%])
- 2vi.- Ingeniería y administración (23 [%])
- 2vii.- Impuestos y seguros (15 [%])

5.2.3 Componentes de costo de la instalación: líneas en paralelo

La alternativa de poner una nueva línea en paralelo a una ya existente involucra una instalación que comprende los siguientes dispositivos:

- a.- Línea.
- b.- Posición en el terminal de envío de la línea.
- c.- Posición en el terminal de recepción de la línea.

La línea está constituida por el siguiente equipo: conductor, torres, aisladores, herrajes, cable de guardia, etc.

Una posición está formada por el equipo terminal siguiente: disyuntor, relés, transformadores de corriente, etc.

El costo de una instalación de una nueva línea está formada por los dos componentes de costo siguientes:

- 1.- Costo [FOB].
- 2.- Costos adicionales u otros costos.

En la tabla 5.2 se encuentran tabulados los costos (costo [FOB] más costos adicionales u otros costos) en dólares por [KM] de línea, para varias líneas a 69 [KV] de acuerdo al calibre de conductor ACSR utilizado en las fases de las líneas, y para el año 1986. [Ref. 34]

TABLA 5.2

COSTO POR [KM] DE LINEAS A 69 [KV]	
CALIBRE DE CONDUCTOR ACSR EN LAS FASES	[DOLARES]
2/0 [AWG]	32 262
266.8 [MCM]	40 461
477 [MCM]	52 181

En la tabla 5.3 se encuentra tabulado el costo (costo [FOB] más costos adicionales u otros costos) en dólares para el año de 1986, de una posición a 69 [KV]. [Ref. 34]

TABLA 5.3

COSTO DE UNA POSICION A 69 [KV]
[DOLARES]
273989

La utilización de las tablas 5.2 y 5.3 permitirá determinar el costo de una instalación, de una nueva línea que se ponga en paralelo a otra que ya existía.

5.3 EVALUACION ECONOMICA

Varias alternativas técnicamente factibles de proporcionar reactivos a la carga, deben compararse económicamente entre sí, a fin de que de dicha comparación se pueda seleccionar aquella alternativa que por ser más económica, proporciona el servicio previsto al menor costo.

5.3.1 Método de evaluación económica

La evaluación económica de una alternativa técnicamente factible de suministrar reactivos a la carga, se lo puede hacer mediante la determinación del valor presente de costos, obtenido como resultado de los dos siguientes:

- 1.- Valor Presente del costo de la instalación.
- 2.- Valor Presente del costo de las pérdidas.

5.3.2 Formulación matemática para la evaluación económica de las alternativas: condensadores en serie, condensadores en derivación y líneas en paralelo

5.3.2.1 Fórmula de cálculo del valor presente del costo de la instalación

Para determinar el valor presente del costo de una instalación, se utiliza la ecuación siguiente:

$$VP(C) = \frac{C}{(1 + i)^n} \quad [5.65]$$

donde:

VP(C) : valor presente del costo de la instalación.

C : costo de la instalación.

i : tasa de rentabilidad.

n : número de años entre el año en el que se ejecuta la instalación y el año para el cual se quiere traer a valor presente el costo de la instalación.

En las secciones 5.2.1, 5.2.2 y 5.2.3 se describió el método para determinar el costo de la instalación [C] para las alternativas de condensadores en serie, condensadores en derivación con la carga y líneas en paralelo respectivamente.

5.3.2.2 Fórmula de cálculo del valor presente del costo de las pérdidas

La potencia activa perdida por fase se calcula mediante la relación siguiente:

$$P_p = P_3 - P_L \quad [5.66]$$

con:

$$P_3 = \frac{e_3^2 \cos \theta}{|Z|} - \frac{e_3 e_r}{|Z|} \cos(\Delta + \theta) \quad [5.67]$$

$$Z = |Z| \underline{\theta} \quad [5.68]$$

En las ecuaciones [5.66], [5.67] y [5.68] se tiene que:

P_p : potencia activa perdida, por fase.

P_3 : potencia activa, por fase, en el terminal de envío.

P_L : potencia activa de carga, por fase, en el terminal de recepción.

e_3 : magnitud del voltaje fase-neutro, en el terminal de envío.

e_r : magnitud del voltaje fase-neutro, en el terminal de recepción.

Δ : ángulo de operación de la línea

θ : ángulo de la impedancia que hay entre el terminal de envío y el de recepción.

Z : impedancia entre el terminal de envío y de recepción.

$|Z|$: magnitud de la impedancia entre el terminal de envío y de recepción.

El costo de las pérdidas, por fase, a su vez es el resultado de los dos siguientes:

- 1.- Costo de pérdidas de potencia, por fase.
- 2.- Costo de pérdidas de energía, por fase.

En forma matemática el costo de las pérdidas, por fase, viene dado por:

$$C_{PP} = K_p P_p + 8760 F_p P_p K_e \quad [5.69]$$

donde:

C_{PP} : costo de las pérdidas, por fase.

K_p : costo anual del [KW]

P_p : potencia activa perdida, por fase, bajo demanda máxima.
 $[P_p]$ se calcula con la ecuación [5.66], ecuación en la cual $[P_s]$ y $[P_L]$ deben estar dados para condiciones de demanda máxima.

8760 : número de horas en un año.

F_p : factor de pérdidas.

K_e : costo del [KWH]

En el segundo miembro de la ecuación [5.69], el primer término es el costo de pérdidas de potencia, por fase y el segundo término es el costo de pérdidas de energía, por fase.

El factor de pérdidas $[F_p]$ está dado por la relación: [Ref. 11, Ref. 38].

$$F_p = 0.3F_c + 0.7F_c^2 \quad [5.70]$$

donde:

F_c : factor de carga.

El costo de las pérdidas viene a ser, tres veces el costo de las pérdidas por fase, es decir que:

$$C_{pp} = 3 C_{pp} \quad [5.71]$$

$$o ; \quad C_{pp} = 3 P_p [K_p + 8760 F_p K_e] \quad [5.72]$$

donde:

C_{pp} : costo de las pérdidas.

Finalmente, el valor presente del costo de las pérdidas está dado por:

$$VP(C_{pp}) = \frac{C_{pp}}{(1+i)^n} \quad [5.73]$$

donde:

$VP(C_{pp})$: valor presente del costo de las pérdidas.

C_{pp} : costo de las pérdidas

i : tasa de rentabilidad.

n : número de años entre el año en el que se tiene el costo de las pérdidas [C_{pp}] y el año para el cual se quiere traer a valor presente el costo de las pérdidas [C_{pp}].

CAPITULO 6

6.- EJEMPLO DE APLICACION: LINEA DE SUBTRANSMISION AMBATO-RIOBAMBA A 69 [KV]

- 6.1 OBJETIVO
- 6.2 DATOS DEL SISTEMA
- 6.3 CARACTERISTICAS TECNICAS
- 6.4 EVALUACION TECNICA-ECONOMICA DE ALTERNATIVAS
- 6.5 COMPARACION ECONOMICA DE ALTERNATIVAS

6.- EJEMPLO DE APLICACION:

LINEA DE SUB-TRANSMISION AMBATO-RIOBAMBA A 69 [KV]

6.1 OBJETIVO

El ejemplo de aplicación tomando la línea Ambato-Riobamba como referencia para su realización está encaminado a efectuar un análisis técnico-económico de las tres alternativas siguientes, utilizadas como medios para efectuar una mayor transferencia de potencia hacia la carga.

- 1.- Condensadores en serie.
- 2.- Condensadores en derivación.
- 3.- Otra línea de sub-transmisión adicional; en paralelo a la ya existente.

De suerte que, de la comparación de estas alternativas mencionadas, se pueda seleccionar la más adecuada.

6.2 DATOS DEL SISTEMA

Los datos que se requieren son los que se citan a continuación:

- 1.- Configuración y parámetros generales del sistema.
- 2.- Datos de la línea Ambato-Riobamba.
- 3.- Datos de carga del sistema Riobamba.
- 4.- Datos de generación del sistema Riobamba.
- 5.- Valores de carga neta a ser servida por la línea Ambato-Riobamba.
- 6.- Factor de carga [F_c], costo anual del [KW] ($[K_p]$), y costo del [KWH] ($[K_e]$).

- 7.- Datos de voltaje en el terminal de envío de la línea Ambato-Riobamba.

6.2.1 Configuración y parámetros generales del sistema.

La línea Ambato-Riobamba forma parte del Sistema Nacional Interconectado y corresponde al denominado Sistema Centro Norte. En la FIG 6.1 se muestra un diagrama unifilar de la configuración del sistema que se empleará para realizar el ejemplo de aplicación. Además, en las tablas 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 y 6.5 se encuentran tabulados los parámetros generales de los elementos del sistema de la FIG 6.1.

6.2.2 Datos de la línea Ambato-Riobamba.

La línea Ambato-Riobamba, cuyo terminal de envío se encuentra en la Sub-estación Oriente de la ciudad de Ambato y cuyo terminal de recepción se halla en la Sub-estación 1 de la ciudad de Riobamba; es una línea que tiene los siguientes datos más importantes: [Ref. 33]

- | | | |
|-----|----------------------------------|----------------|
| 1.- | Voltaje nominal entre fases: | 69 [KV] |
| 2.- | Número de fases: | 3 |
| 3.- | Material del conductor: | ACSR |
| 4.- | Calibre del conductor: | 266.8 [MCM] |
| 5.- | Límite térmico del conductor: | 356 [Amperios] |
| 6.- | Cable de guardia: | 5/16" de acero |
| 7.- | Longitud: | 52 [KM] |
| 8.- | Tipo de estructura: | Metálica |
| 9.- | Número de aisladores en cadenas: | 6 |

TABLA 6.1*


DATOS GENERALES DE GENERADORES								
GENERADOR (ALAO)	NUMERO	KVA NOMINAL	KV NOMINAL	CONEXION	REACTANCIAS Y R EN PROPIA BASE			
					X_d (%)	X_d' (%)	X_0 (%)	R (%)
G	4	3280	2.4		91.1	40.8	20	68.33

TABLA 6.2*

DATOS GENERALES DE TRANSFORMADORES								
TRANSFOR- MADOR	NUMERO	KVA NOMINAL	CONEXIONES Y VOLTAJES			REACTANCIAS EN PROPIA BASE		
			DEV	CONEXION	KV	DEV'S	X_1 (%)	X_0 (%)
T1	1	5000	P S	Y Δ	69 13.8	P-S	7.35	7.35
T2	1	6560	P S T	Y_{\perp} Y_{\perp} Δ	69 44 4.8	P S T	5.3792 -1.64 9.315	5.3792 -1.64 9.315
T3	2	3280	P S	Δ Y_{\perp}	2.4 44	P-S	7.3	7.3
T4	2	3280	P S	Δ Y_{\perp}	2.4 69	P-S	6.0	6.0

TABLA 6.3*

DATOS GENERALES DE LA LINEA AMBATO-RIOBAMBA							
LINEA	KM	KV NOM.	REACTANCIAS Y RESISTENCIAS				
			$R = R_1$ [OHM/FASE]	$X_L = X_1$ [OHM/FASE]	X_C [OHM $\times 10^6$ /FASE]	R_0 [OHM/FASE]	X_0 [OHM/FASE]
L1	52	69	11.11	23.59	0.005327	25.81	91.07

* : Datos tomados de: [Ref. 33]

TABLA 6.4*

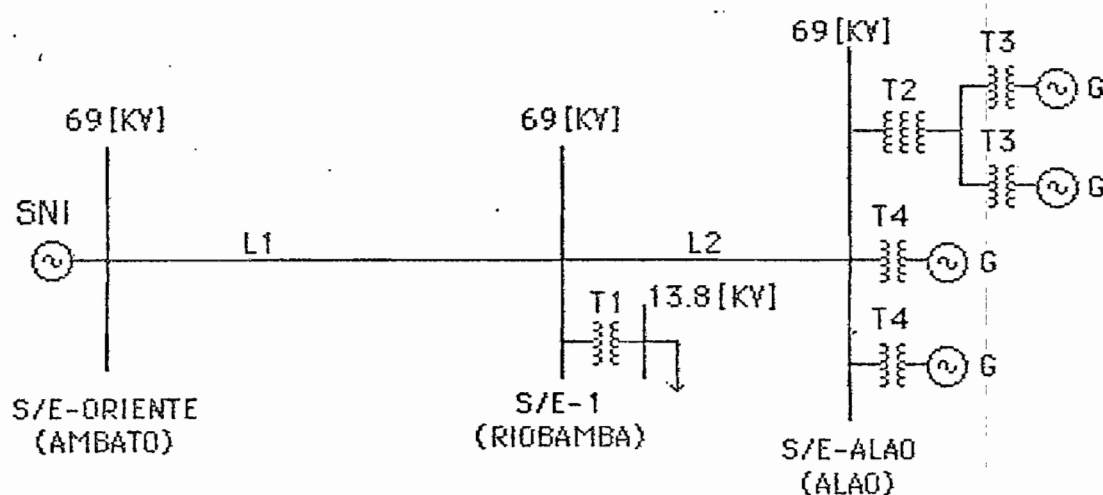
DATOS GENERALES DE LA LINEA RIOBAMBA - ALAO						
LINEA	KM	KY NOM.	REACTANCIAS Y RESISTENCIAS			
			$R = R_1$ [OHM/FASE]	$X_L = X_1$ [OHM/FASE]	R_o [OHM/FASE]	X_o [OHM/FASE]
L2	17	69	7.33	9.58	11.41	30.91

TABLA 6.5*

EQUIVALENTE DEL SNI EN LA S/E-ORIENTE
EN UNA BASE 69 [KY_B] Y 100 [MVA_B]

Z_1 [P.U]	Z_o [P.U]
0.4856 87.92	0.2285 85.18

* : Datos tomados de: [Ref. 33]



SNI: Sistema Nacional Interconectado.

FIG 6.1.* Configuración del sistema del ejemplo de aplicación.

6.2.3 Datos de carga del sistema Riobamba.

Para el ejemplo de aplicación se considera como carga del sistema Riobamba, a la carga de la ciudad de Riobamba más la carga de la ciudad de Guaranda.

En la tabla 6.6 se encuentran tabulados los valores de carga bajo demanda máxima del sistema Riobamba, para los años de 1986 a 1996.

TABLA 6.6

AÑO	DEMANDA MAXIMA DEL SISTEMA RIOBAMBA		
	[MW]	[MYAR]	[MVA]
1986	31.1	13.3	33.8
1987	32.8	14.0	35.7
1988	44.8	19.2	48.7
1989	47.0	20.1	51.1
1990	49.1	21.0	53.4
1991	51.5	22.0	56.0
1992	53.1	22.7	57.7
1993	55.9	23.9	60.8
1994	59.0	25.2	64.2
1995	64.7	27.7	70.4
1996	66.8	28.6	72.7

6.2.4 Datos de generación del sistema Riobamba

La generación del sistema Riobamba que se toma en cuenta para el presente estudio es únicamente la generación hidráulica. En la tabla 6.7 se encuentra tabulado el valor de generación hidráulica bajo demanda máxima del sistema Riobamba, para el año 1986. [Ref. 34]

TABLA 6.7

GENERACION HIDRAULICA (BAJO DEMANDA MAXIMA)		
[MW]	[MVAR]	[MVA]
14.0	10.9	17.7

Para efectos de realizar el ejemplo de aplicación, se asume que el valor de generación hidráulica que se muestra en la tabla 6.7 se mantiene también para las demandas máximas posteriores al año de 1986.

6.2.5 Valores de carga neta a ser servida por la línea Ambato-Riobamba.

En la tabla 6.8 se encuentran tabulados los valores de carga neta máxima, los cuales no son otra cosa que la diferencia entre el valor de carga bajo demanda máxima del sistema Riobamba (tabla 6.6) y el de generación hidráulica bajo demanda máxima (tabla 6.7); para cada año en cuestión.

TABLA 6.8

AÑO	CARGA NETA MAXIMA		
	P_L	Q_L	$ S_L $
	[MW]	[MVAR]	[MVA]
1986	17.1	2.4	17.3
1987	18.8	3.1	19.1
1988	30.8	8.3	31.9
1989	33.0	9.2	34.3
1990	35.1	10.1	36.5
1991	37.5	11.1	39.1
1992	39.1	11.8	40.8
1993	41.9	13.0	43.9
1994	45.0	14.3	47.2
1995	50.7	16.8	53.4
1996	52.8	17.7	55.7

Para cada año en particular la carga neta media, y la carga neta mínima se obtienen como: [Ref. 35]

$$\text{CARGA NETA MEDIA} = 2/3 (\text{CARGA NETA MAXIMA}) \quad [6.1]$$

$$\text{CARGA NETA MINIMA} = 1/3 (\text{CARGA NETA MAXIMA}) \quad [6.2]$$

6.2.6 Factor de carga [F_c], costo anual del [KW] (K_p), y costo del [KWH] (K_e).

El factor de carga [F_c], costo anual del [KW] (K_p), y el costo del [KWH] (K_e), para el año de 1986 son: [Ref. 34]

$$F_c = 0.48 \quad [6.3]$$

$$K_p = 38.41 \text{ [DOLARES/KW]} \quad [6.4]$$

$$K_e = 0.00969 \text{ [DOLARES/KWH]} \quad [6.5]$$

Para los años posteriores al año 1986 se asume que se tendrán también los valores dados por [6.3], [6.4] y [6.5].

6.2.7 Datos de voltaje en el terminal de envío de la línea Ambato-Riobamba.

El voltaje en el terminal de envío de la línea, constituye un dato básico para poder determinar el voltaje en el terminal de recepción y la corriente que circula a través de la línea, de tal manera que se puedan hacer las verificaciones o comprobaciones mencionadas en las secciones 3.3 del capítulo 3 y 5.1.3 del capítulo 5.

Para el año 1986, bajo condiciones de demanda máxima del sistema Riobamba, la corrida de flujo del Sistema Nacional Interconectado, arroja los siguientes valores de voltaje de la línea Ambato-Riobamba, en una base de 69 [KV]: [Ref. 34]

$$\text{Terminal de envío: } E_s = 1.016 \underline{[-41.1]} \text{ [P.U.]} \quad [6.6]$$

(S/E-Oriente)

$$\text{Terminal de recepción: } E_r = 0.96 \underline{[-46]} \text{ [P.U.]} \quad [6.7]$$

(S/E-1)

De [6.6] se puede ver que para las condiciones de demanda máxima que tiene el sistema Riobamba, en el año 1986, la magnitud del voltaje entre fases en el terminal de envío de la línea Ambato-Riobamba es:

$$e_3 = 70.104 \text{ [KV]} \quad [6.8]$$

Para las demandas máximas del sistema Riobamba de los años posteriores al año 1986, se asume que en el terminal de envío de la línea Ambato-Riobamba se tendrá la misma magnitud del voltaje entre fases que se tuvo para el año 1986, es decir el valor dado por [6.8].

Para las condiciones de demanda media y demanda mínima del sistema Riobamba, del año 1986, no se disponen de las respectivas corridas de flujo. En lo concerniente a la magnitud del voltaje entre fases en el terminal de envío de la línea Ambato-Riobamba tanto para demandas medias como para demandas mínimas se asumirá que para el año 1986 y los posteriores a él, están dados por [6.8].

6.3 CARACTERISTICAS TECNICAS

De [6.7] se puede observar que la magnitud del voltaje entre fases en el terminal de recepción de la línea Ambato-Riobamba bajo condiciones de demanda máxima del año 1986, es de 0.96 [P.U], lo cual permite deducir que dado el crecimiento de la carga, luego de pocos años esta línea tendrá problemas en cuanto a mantener magnitudes aceptables de voltaje en el terminal de recepción.

Por tanto dentro de pocos años se verá la necesidad de suministrar reactivos a la carga de modo que las magnitudes de voltaje en el terminal de recepción se encuentren dentro del rango permisible.

6.3.1 Determinación del año desde el cual se requiere suministrar reactivos a la carga.

Para determinar el año a partir del cual se necesita suministrar reactivos a la carga, se lo hace bajo condiciones de demanda máxima, para lo cual la carga en el terminal de recepción de la línea es la carga neta máxima que se encuentra tabulada en la tabla 6.8.

En la tabla 6.9 se tabulan los valores de: carga neta máxima, magnitud de voltaje en el terminal de recepción (entre fases), ángulo de operación de la línea y magnitud de la corriente de línea, para cada año, desde el año 1986 al año 1988.

TABLA 6.9

		$e_s = 1.016$ [P.U] $e_s = 70.104$ [KV]				
		CARGA NETA MAXIMA		LINEA DE SUB-TRANSMISION EXISTENTE		
AÑO	POTENCIA ACTIVA	POTENCIA REACTIVA	VOLTAJE TERMINAL DE RECEPCION	ANGULO DE OPERACION DE LA LINEA	CORRIENTE DE LA LINEA	
	P_L [MW]	Q_L [MYAR]	e_r [KV]	e_r [P.U]	Δ [°]	i [A]
1986	17.1	2.4	66.144	0.960	4.7	150.727
1987	18.8	3.1	65.521	0.950	5.109	167.897
1988	30.8	8.3	60.407	0.875	8.615	304.878

La confección de la tabla 6.9 se hace siguiendo el procedimiento de cálculo señalado en el Apéndice 6A1, en el cual se hace la ilustración para el caso del año 1986.

De la tabla 6.9 se puede ver que en el año 1988, si bien la línea no presenta problemas en cuanto a que la magnitud de la corriente de línea supere el límite térmico, en cambio presenta problemas de regulación de voltaje ya que la magnitud del voltaje de recepción (entre fases) se encuentra fuera del rango permisible. En consecuencia, desde el año 1988, se tendrá que suministrar reactivos a la carga, con el propósito de que las magnitudes de voltaje en el terminal de recepción (entre fases) cumplan índices de calidad aceptables.

6.4 EVALUACION TECNICA-ECONOMICA DE ALTERNATIVAS

6.4.1 Alternativa: Condensadores en serie.

6.4.1.1 Evaluación técnica

6.4.1.1.1 Selección del porcentaje de compensación serie.

6.4.1.1.1.1 Análisis técnico.

Dadas las características de respuesta autoajutable a las fluctuaciones de carga, que tiene el condensador en serie; la selección del porcentaje de compensación serie se lo hace para valores de carga neta máxima.

La determinación de la carga neta máxima a ser considerada se la calcula así:

$$|S_L| = \sqrt{3} (69)(356) \quad [6.9]$$

$$\text{ó; } |S_L| = 42.55 \text{ [MVA]} \quad [6.10]$$

Es decir considerando una carga que tenga voltaje nominal (69 [KV] entre fases) y que origine que la línea opere sin sobrepasar el valor del límite térmico (356 [A]).

De la tabla 6.8 de la sección 6.2.5 la carga que más se aproxima al valor dado por [6.10] es la carga neta máxima del año 1992, o sea 40.8 [MVA].

Para la carga neta máxima del año 1992; en la tabla 6.10 se encuentran tabulados los valores de: la magnitud del voltaje terminal de recepción (entre fases), ángulo de operación de la línea y magnitud de la corriente de línea; para los porcentajes de compensación que van desde el 0 [%] al 389 [%] (valor tope del porcentaje de compensación serie) y en pasos de 25 [%] de compensación serie.

En el Apéndice 6A2 se señala el procedimiento de cálculo seguido para la confección de la tabla 6.10, ilustrándose los cálculos para la determinación del valor tope del porcentaje de compensación serie, así como los cálculos concernientes al caso del 25 [%] de compensación serie.

En la FIG 6.2 se encuentra el gráfico de la magnitud del voltaje terminal de recepción en función del porcentaje de compensación serie y en la FIG 6.3 está el gráfico de la magnitud de la corriente de línea en función del porcentaje de compensación serie; tomando los valores pertinentes de la tabla 6.10.

De la FIG 6.2 se puede observar que si bien la magnitud del voltaje terminal de recepción se encuentra dentro del rango permisible para los porcentajes de compensación serie que se hallan comprendidos en el intervalo del 175 [%] al 225 [%] de compensación serie, en cambio la magnitud de la corriente de línea sobrepasa el valor del límite térmico para

TABLA 6.10

CARGA NETA MAXIMA (AÑO 1992)			PORCENTAJE DE COMPENSACION SERIE	VOLTAJE TERMINAL DE RECEPCION		ANGULO DE OPERACION DE LA LINEA	CORRIENTE DE LA LINEA
POTENCIA ACTIVA	POTENCIA REACTIVA	POTENCIA APARENTE		e_r	e_r	Δ	i
P_L	Q_L	$ S_r $		e_r	e_r	Δ	i
[MW]	[MYAR]	[MYA]	[%]	[KV]	[P.U]	[°]	[A]
			0	55.913	0.810	11.646	421.727
			25	58.435	0.847	7.871	403.113
			50	60.393	0.875	4.472	390.443
			75	61.950	0.898	1.313	380.630
			100	63.200	0.916	-1.696	373.101
			125	64.194	0.930	-4.610	367.324
			150	64.964	0.942	-7.472	362.970
			175	65.527	0.950	-10.319	359.852
39.1	11.8	40.8	200	65.888	0.955	-13.184	357.880
			225	66.045	0.957	-16.101	357.029
			250	65.984	0.956	-19.114	357.359
			275	65.675	0.952	-22.276	359.041
			300	65.066	0.943	-25.668	362.401
			325	64.053	0.928	-29.430	368.133
			350	62.413	0.905	-33.847	377.806
			375	59.410	0.861	-39.829	396.903
			389	53.902	0.781	-47.904	437.461

FIG. 6.2

e_r vs % comp. serie

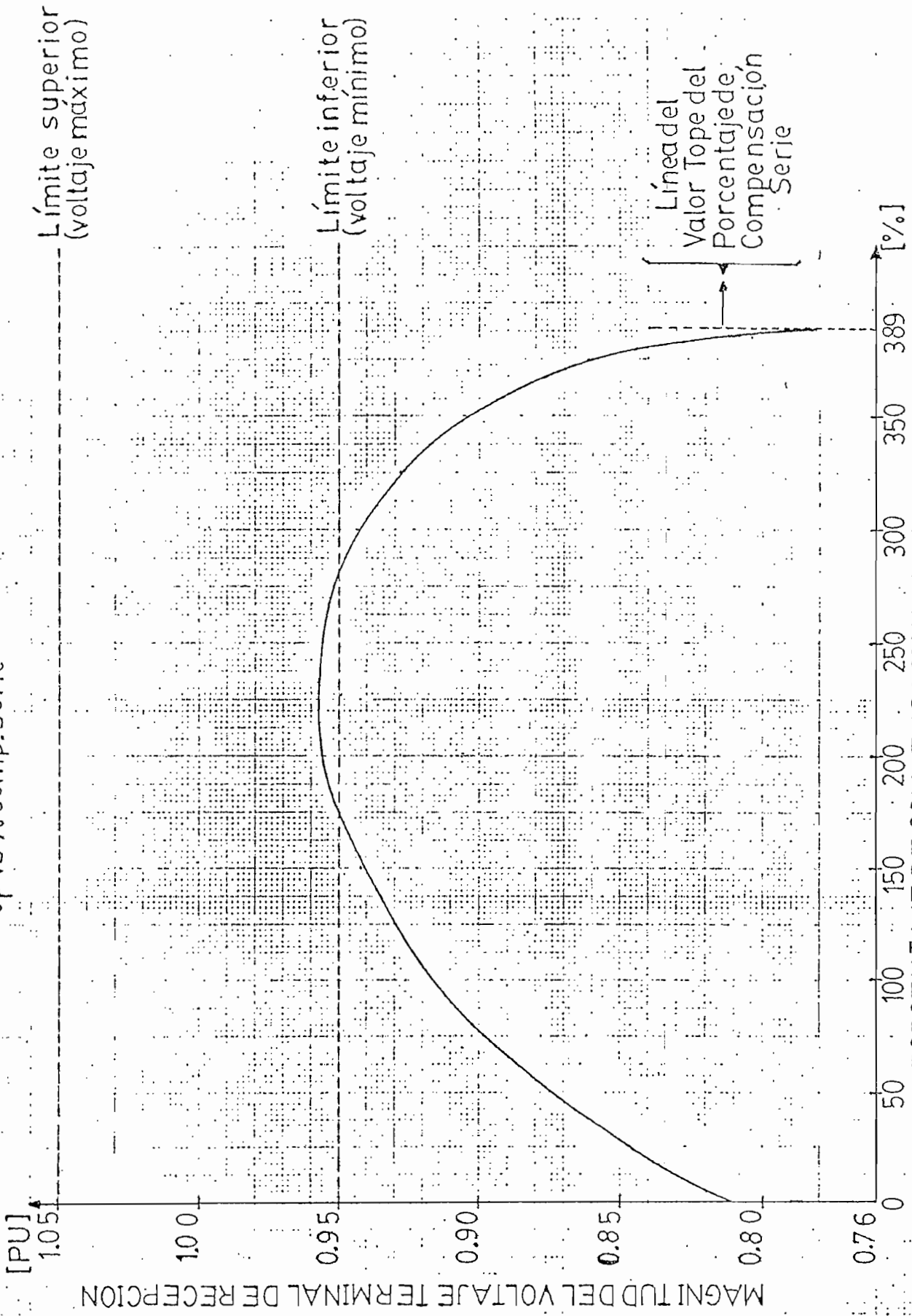
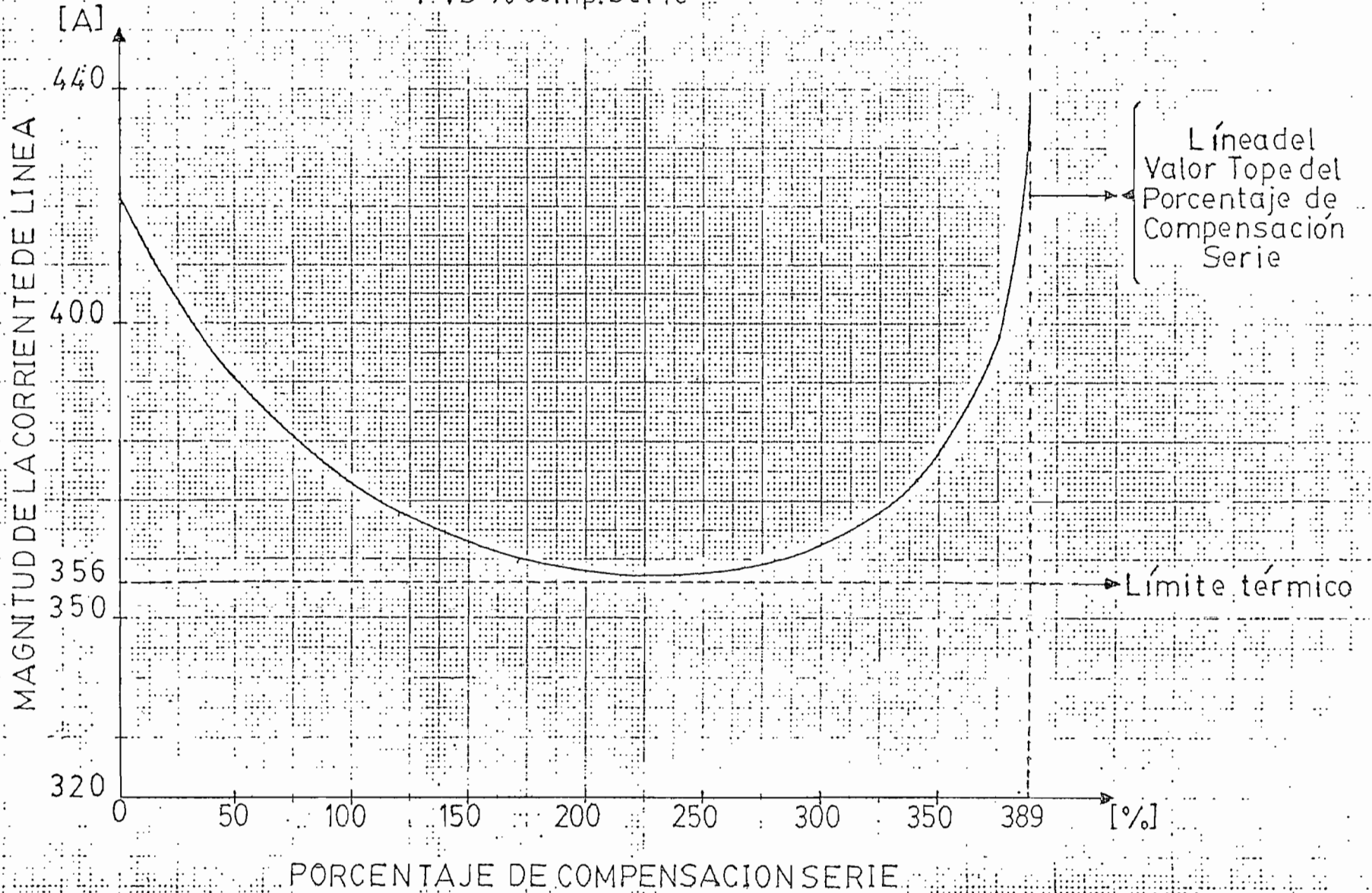


FIG. 6.3

i vs % comp. serie



los porcentajes de compensación serie que están dentro del intervalo de compensación serie antes mencionado; como se puede ver de la FIG 6.3.

En consecuencia, para la carga neta máxima del año 1992 la compensación serie no satisface los requerimientos técnicos señalados en los numerales 1.- y 2.- de la sección 5.1.3; por cuya razón se tendrá que probar con la carga neta máxima de un año anterior al año 1992, es decir con la carga neta máxima del año 1991. Para la carga neta máxima del año 1991, en la tabla 6.11 se hallan tabulados los valores de la magnitud del voltaje terminal de recepción (entre fases), ángulo de operación de la línea y magnitud de la corriente de línea para los porcentajes de compensación serie que van desde el 0 [%] al 403 [%] (valor tope del porcentaje de compensación serie) y en pasos de 25[%] de compensación serie.

La tabla 6.11 se elabora siguiendo el mismo procedimiento de cálculo que se usa para la estructuración de la tabla 6.10, es decir siguiendo el proceso señalado en el Apéndice 6A2 pero como es natural, utilizando los datos correspondientes.

En la FIG 6.4 se grafiza la magnitud del voltaje terminal de recepción versus el porcentaje de compensación serie y en la FIG 6.5 se grafiza la magnitud de la corriente de línea versus el porcentaje de compensación serie; tomando los valores pertenecientes de la tabla 6.11

De las FIG 6.4 y 6.5 se puede establecer que para la carga neta máxima del año 1991; para los porcentajes de compensación serie encerrados aproximadamente en el intervalo del 150 [%] al 300 [%] de compensación serie, se cumplen los requerimientos técnicos recalcados en los numerales 1.- y 2.- de la sección 5.1.3. Por consiguiente, cualquier porcentaje de compensación serie comprendido en el intervalo del 150 [%] al 300 [%] es una solución técnicamente factible de proporcionar reactivos a la carga.

TABLA 6.11

CARGA NETA MAXIMA (AÑO 1991)			PORCENTAJE DE COMPENSACION SERIE	YOLTAJE TERMINAL DE RECEPCION		ANGULO DE OPERACION DE LA LINEA	CORRIENTE DE LA LINEA
POTENCIA ACTIVA	POTENCIA REACTIVA	POTENCIA APARENTE		e_r	e_r	Δ	i
[MW]	[MYAR]	[MYA]	[%]	[KV]	[P.U]	[°]	[A]
			0	56.888	0.824	11.004	396.906
			25	59.141	0.857	7.486	381.786
			50	60.920	0.883	4.284	370.637
			75	62.355	0.904	1.282	362.107
			100	63.518	0.921	-1.587	355.477
			125	64.451	0.934	-4.372	350.331
			150	65.182	0.945	-7.111	346.402
			175	65.723	0.953	-9.832	343.551
37.5	11.1	39.1	200	66.082	0.958	-12.567	341.684
			225	66.257	0.960	-15.344	340.782
			250	66.237	0.960	-18.199	340.885
			275	66.001	0.957	-21.176	342.104
			300	65.509	0.949	-24.337	344.673
			325	64.691	0.938	-27.780	349.031
			350	63.407	0.919	-31.686	356.099
			375	61.310	0.889	-36.491	368.279
			400	56.554	0.820	-44.467	399.250
			403	54.813	0.794	-46.857	411.931

FIG.6.4

e_r vs % comp. serie

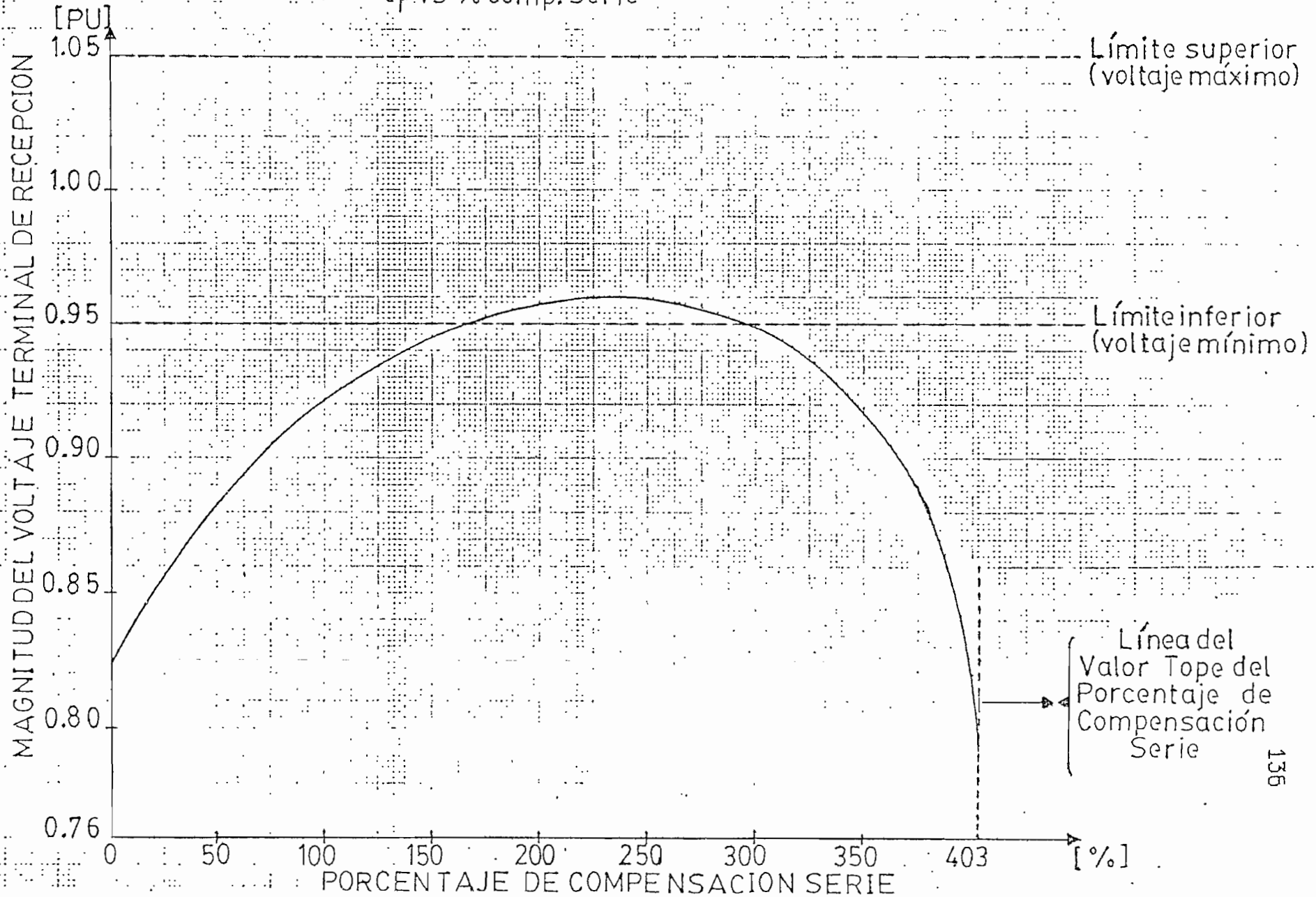
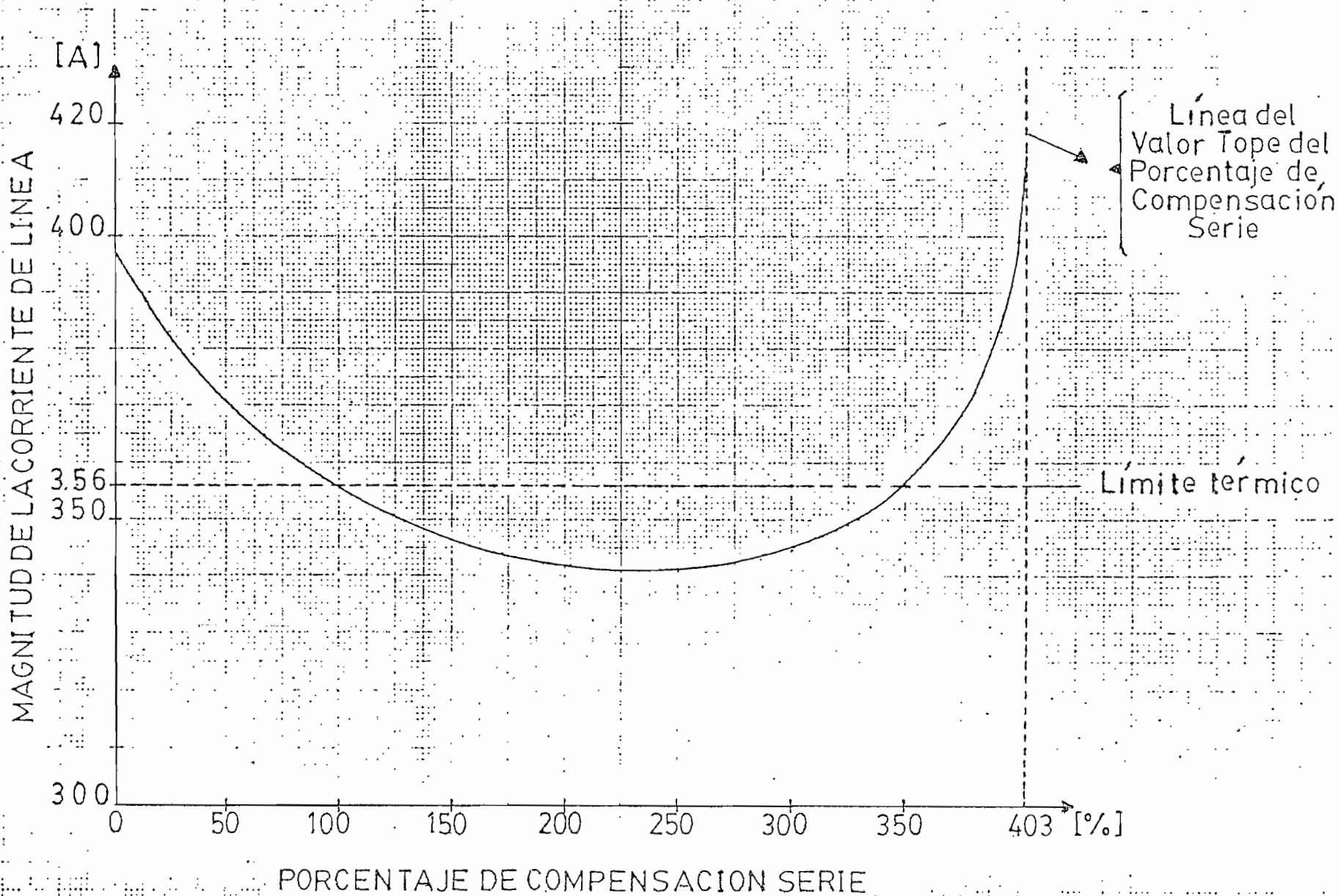


FIG. 6.5
i vs % comp. serie



6.4.1.1.1.2 Análisis económico

Con el propósito de seleccionar el porcentaje de compensación serie más adecuado es necesario disponer de una curva que represente el valor económico de la compensación serie en función del porcentaje de compensación serie, pero circunscribiendo el análisis económico al intervalo técnicamente factible de compensación serie, es decir al intervalo entre el 150 [%] y el 300 [%].

De la curva que representa el valor económico de la compensación serie en función del porcentaje de compensación serie, se seleccionará como el porcentaje de compensación serie más adecuado, aquel que lógicamente determine el menor valor económico. La elaboración de la curva del valor económico de la compensación serie requiere disponer de varios puntos, por lo cual, se hará el análisis económico sujeto a las siguientes consideraciones:

- 1.- Se determinará el valor económico para los porcentajes de compensación serie del: 150 [%], 200 [%], 250 [%] y 300 [%].
- 2.- El valor económico de cada porcentaje de compensación serie estará formado por los dos rubros siguientes:
 - 2i.- Valor presente al año 1986 del costo de la instalación; pero circuscrito sólo al costo [FOB] de los condensadores unidad necesarios.
 - 2ii.- Valor presente al año 1986 del costo de las pérdidas.

El procedimiento de cálculo del valor económico de la compensación serie se lo hará sólo para el 150 [%] de compensación serie, anotando que

para los otros porcentajes de compensación serie el proceso a seguir será el mismo que el del 150 [%]; usando los datos correspondientes a cada caso.

6.4.1.1.1.2.1 Valor económico del 150 [%] de compensación serie.

6.4.1.1.1.2.1.1 Tamaño del condensador en serie.

El 150 [%] de compensación serie corresponde a un condensador en serie que en cada fase de la línea, tiene el valor óhmico que es el 150 [%] de la reactancia inductiva de la línea ($X_L = 23.59$ [OHM]); con lo que la reactancia capacitiva del condensador en serie es, de acuerdo a la ecuación [3.1] de la sección 3.1.1:

$$X_{cs} = 1.5 (23.59) \quad [6.11]$$

$$\text{ó; } X_{cs} = 35.385 \text{ [OHM]} \quad [6.12]$$

La corriente a través del condensador en serie [I_{cs}], es la misma que la corriente de línea [i]; pues el condensador está en serie con la línea, por tanto, de la tabla 6.11 para el 150 [%] de compensación serie se tiene que

$$I_{cs} = 346.402 \text{ [A]} \quad [6.13]$$

El voltaje a través del condensador en serie [E_{cs}] se calcula mediante la relación:

$$E_{cs} = I_{cs} X_{cs} \quad [6.14]$$

En la ecuación [6.14], reemplazando los valores de [X_{cs}] y de [I_{cs}] dados por [6.12] y [6.13] respectivamente, se tiene que el voltaje a través del condensador en serie es:

$$E_{cs} = 346.402 (35.385) \quad [6.15]$$

$$\text{ó; } E_{cs} = 12257.43 \text{ [V]} \quad [6.16]$$

En cada fase de la línea, el tamaño del condensador en serie se determina por la relación siguiente:

$$Q_{cs} = E_{cs} I_{cs} \quad [6.17]$$

En la ecuación [6.17], reemplazando los valores de $[I_{cs}]$ y de $[E_{cs}]$ dados por [6.13] y [6.16] respectivamente, se tiene que el tamaño del condensador en serie en cada fase de la línea es:

$$Q_{cs} = \frac{12257.43 (346.402)}{1\,000\,000} \quad [6.18]$$

$$\text{ó; } Q_{cs} = 4.25 \text{ [MVAR]} \quad [6.19]$$

En la tabla 6.12 se resumen las características que en cada fase de la línea debe tener el condensador en serie correspondiente al 150 [%] de compensación serie.

TABLA 6.12

150 [%] COMPENSACION SERIE			
CARACTERISTICAS DEL CONDENSADOR EN SERIE (VALORES ANALITICOS)			
X_{cs} [OHM]	I_{cs} [A]	E_{cs} [V]	Q_{cs} [MVAR]
35.385	346.402	12257.43	4.25

6.4.1.1.2.1.2 Selección del condensador en serie.

Para determinar la disposición serie-paralelo de condensadores unidad, más conveniente para conformar el condensador en serie de cada fase de la línea se consideran los siguientes aspectos:

- 1.- Número mínimo de condensadores unidad en paralelo por grupo serie, de acuerdo a las consideraciones establecidas en los numerales 1.- y 2.- de la sección 4.1.3 del capítulo 4.
- 2.- Que el voltaje aplicado a los condensadores unidad, sea o esté lo más cerca posible de algún voltaje nominal establecido para dichos condensadores unidad.
- 3.- Se escoge la disposición serie-paralelo más económica.

En la tabla 6.13 se tiene información del número mínimo recomendado de condensadores unidad en paralelo por grupo serie que debe haber de acuerdo al número de grupos serie de que esté provisto el condensador en serie en cada fase de la línea, de modo de satisfacer las consideraciones 1.- y 2.- de la sección 4.1.3 del capítulo 4.

La elaboración de la tabla 6.13 se la hace siguiendo el procedimiento de cálculo indicado en el Apéndice 6A3, en el cual se hace la ilustración correspondiente al caso de que el condensador en serie, en cada fase de la línea tenga un sólo grupo serie, es decir para $N=1$.

De la tabla 6.13 se establece que:

- 4.- El número mínimo de condensadores unidad en paralelo por grupo serie de tal modo de satisfacer lo dicho en los numerales 1.- y 2.- de la sección 4.1.3, es el mismo para cualquier número de grupos serie.

TABLA 6.13

150 [%] COMPENSACION SERIE			
NUMERO DE GRUPOS SERIE POR FASE	NUMERO MINIMO DE CONDENSADORES UNIDAD EN PARALELO POR GRUPO SERIE	CORRIENTE DE CORTOCIR- CUITO A TRAYES DEL FUSIBLE EN YECES LA CORRIENTE NOMINAL DEL CONDENSADOR UNIDAD	VOLTAJE EN LAS UNI- DADES RESTANTES DEL GRUPO SERIE, AL SALIR UN CONDENSA- DOR DE DICHO GRUPO
N	M	I_f	$e_f\%$ [%]
1	11	12.604	109.418
2	11	11.499	109.694
3	11	11.288	109.793
4	11	11.201	109.844
5	11	11.154	109.874
6	11	11.125	109.895
7	11	11.105	109.910
8	11	11.090	109.921
9	11	11.079	109.930
10	11	11.070	109.937
11	11	11.063	109.942
12	11	11.058	109.947
13	11	11.053	109.951
14	11	11.049	109.955
15	11	11.045	109.957

TABLA 6.13a

150 [%] COMPENSACION SERIE $i = 346.402$ [A]		
NUMERO DE GRUPOS SERIE POR FASE	NUMERO MINIMO DE CONDENSADORES UNIDAD EN PARALELO POR GRUPO SERIE	CORRIENTE A TRAYES DEL CONDENSADOR EN SERIE CUANDO DE UN GRU- PO SERIE HA SALIDO UN CONDENSADOR UNIDAD
N	M	i' [A]
1	11	344.569
2	11	345.438
3	11	345.750
4	11	345.911
5	11	346.005
6	11	346.071
7	11	346.119
8	11	346.153
9	11	346.181
10	11	346.204
11	11	346.219
12	11	346.235
13	11	346.248
14	11	346.260
15	11	346.266

Lo anotado se debe a que la salida de una unidad capacitiva de un grupo serie de tal modo que $e_f\% \leq 110 [\%]$, prácticamente no altera la reactancia capacitiva del condensador en serie, por lo que la corriente cuando ha salido una unidad de un grupo serie $[i']$ es prácticamente la misma que la que hay cuando el condensador en serie está con todas las unidades, como puede observarse de la tabla 6.13a. Los valores de $[i]$ e $[i']$ son valores previos que se obtienen para la confección de la tabla 6.13 por lo que sólo con fines de ilustración se hacen constar en la tabla 6.13a.

En la tabla 6.14 se muestran varias disposiciones serie-paralelo de condensadores unidad al utilizar unidades de 50 [KVAR], 100 [KVAR], 150 [KVAR] y 200 [KVAR] nominales.

La manera como se confecciona la tabla 6.14 se menciona en el Apéndice 6A4, en el cual se hace la ilustración para el caso de utilizar unidades de 50 [KVAR] y 2400 [V] nominales.

Varias disposiciones serie-paralelo técnicamente apropiadas deben ser comparadas en lo concerniente a su costo, de modo que de esa comparación, se elija la disposición serie-paralelo más económica. Las disposiciones serie-paralelo técnicamente apropiadas son aquellas cuya tolerancia en la reactancia capacitiva del condensador en serie $[\xi]$, no exceda los siguientes rangos de tolerancia: [Ref. 23].

- a.- $\pm 5 [\%]$ para condensadores en serie con menos de 10 [MVAR] nominales, en cada fase de la línea.
- b.- $\pm 3 [\%]$ para condensadores en serie con 10 [MVAR] nominales o más, en cada fase de la línea.

TABLA 6.14

150 [%]
COMPENSACION SERIE

KYARs NOMINALES POR UNIDAD	GRUPOS SERIE POR FASE	UNIDADES EN PARALE- LO POR GRUPO SERIE	CANTIDAD DE UNIDADES POR FASE	MYARs POR FASE		VOLTAJE DE LAS UNIDADES		VOLTAJE A TRAYES DEL CONDENSADOR EN SERIE		CORRIENTE A TRAYES DEL CONDENSADOR EN SERIE		REACTANCIA CAPACITIVA DEL CONDENSADOR EN SERIE		TOLERANCIA EN LA REACT. CAPACITIVA DEL CONDEN. EN SERIE
				VALOR ANALITICO	VALOR NOMINAL	VALOR ANALITICO	VALOR NOMINAL	VALOR ANALITICO	VALOR NOMINAL	VALOR ANALITICO	VALOR NOMINAL	VALOR ANALITICO	VALOR NOMINAL	
Q_n [KYAR]	N	M	q_c MN	Q_{cs} [MYAR]	Q_{cs} [MYAR]	E_n [V]	E_n [V]	E_{cs} [V]	E_{cs} [V]	I_{cs} [A]	I_{cs} [A]	X_{cs} [OHM]	X_{cs} [OHM]	ξ [%]
50	6	17	102		5.10	2042.91	2400		14400		354.17		40.66	12.97
	3	29	87		4.35	4085.81	4160		12480		348.56		35.80	1.16*
	2	46	92	4.25	4.60	6128.72	6640	12257.43	13280	346.402	346.40	35.385	38.34	7.71
	1	87	87		4.35	12257.43	12470		12470		348.84		35.75	1.02*
100	3	15	45		4.50	4085.81	4160		12480		360.58		34.61	-2.24*
	2	23	46	4.25	4.60	6128.72	6640	12257.43	13280	346.402	346.40	35.385	38.34	7.71
	1	44	44		4.40	12257.43	12470		12470		352.85		35.34	-0.13*
150	2	16	32		4.80	6128.72	6640		13280		361.45		36.74	3.69*
	1	29	29	4.25	4.35	12257.43	12470	12257.43	12470	346.402	348.84	35.385	35.75	1.02*
200	2	12	24		4.80	6128.72	6640		13280		361.45		36.74	3.69*
	1	22	22	4.25	4.40	12257.43	12470	12257.43	12470	346.402	352.85	35.385	35.34	0.13*

*: Disposición serie-paralelo técnicamente factible

En el Apéndice 6A4 se ve lo que significa y como se la calcula, la tolerancia en la reactancia capacitiva del condensador en serie.

Con fines de selección del condensador en serie; el costo de una disposición serie-paralelo técnicamente apropiada, se circunscribirá sólo al obtenido tomando en cuenta el costo [FOB] de los condensadores unidad que forman dicha disposición, y es así como en la tabla 6.15 se tabulan las disposiciones serie-paralelo técnicamente factibles con los valores nominales correspondientes a cada una de ellas que han sido tomadas de la tabla 6.14, así como también se tabulan el costo [FOB] de las unidades y el costo [FOB] de cada disposición. El costo [FOB] de las unidades es el que se tiene para el año 1986 y ha sido tomado a partir del uso de catálogos de la Westinghouse.

De la tabla 6.15 se establece que:

- c.- Para una potencia reactiva nominal dada de condensador unidad, aquellas unidades de más alto voltaje nominal originan disposiciones serie-paralelo más baratas.
- d.- Las unidades de 200 [KVAR] nominales producen las disposiciones serie-paralelo más baratas.
- e.- La disposición serie-paralelo más conveniente es aquella que utiliza en cada fase de la línea: condensadores unidad de 200 [KVAR] nominales y 8320 [V] nominales, 1 grupo serie por fase, 22 condensadores unidad en paralelo por grupo serie y 22 condensadores unidad por fase, puesto que para esta disposición se obtiene el menor costo con relación al de las otras disposiciones.

TABLA 6.15

150 [%]
COMPENSACION SERIE

KVARs NOMINALES POR UNIDAD	VOLTAJE NOMINAL DE LA UNIDAD	GRUPOS SERIE POR FASE	UNIDADES EN PARALE- LO POR GRUPO SERIE	CANTIDAD DE UNIDADES POR FASE	VALORES NOMINALES DEL CONDENSADOR EN SERIE				COSTO POR UNIDAD	COSTO DEL CONDENSADOR EN SERIE
					REACTANCIA NOMINAL	CORRIENTE NOMINAL	VOLTAJE NOMINAL	MVARs NOMINAL		
Q_n [KVAR]	E_n [V]	N	M	q_c MN	X_{CS} [OHM]	I_{CS} [A]	E_{CS} [V]	Q_{CS} [MVAR]	[DOLARES]	[DOLARES]
50	4160	3	29	87	35.80	348.56	12480	4.35	750	65250
	12470	1	87	87	35.75	348.84	12470	4.35	750	65250
100	4160	3	15	45	34.61	360.58	12480	4.50	967	43515
	12470	1	44	44	35.34	352.85	12470	4.40	967	42548
150	6640	2	16	32	36.74	361.45	13280	4.80	1106	35392
	12470	1	29	29	35.75	348.84	12470	4.35	1106	32074
200	6640	2	12	24	36.74	361.45	13280	4.80	1271	30504
	12470	1	22	22	35.34	352.85	12470	4.40	1271	27962*

* : Disposición serie-paralelo más económica.

De la tabla 6.15 se extraen y tabulan en la tabla 6.16 los valores nominales que en cada fase de la línea tiene el condensador en serie correspondiente a la disposición serie-paralelo más conveniente.

TABLA 6.16

150 [%] COMPENSACION SERIE			
CARACTERISTICAS DEL CONDENSADOR EN SERIE (VALORES NOMINALES)			
REACTANCIA NOMINAL	CORRIENTE NOMINAL	VOLTAJE NOMINAL	MVARs NOMINAL
X_{cs} [OHM]	I_{cs} [A]	E_{cs} [V]	Q_{cs} [MVAR]
35.34	352.85	12470	4.4

6.4.1.1.1.2.1.3 Cálculo del valor económico del 150 [%] de compensación serie.

Para efectuar el cálculo del valor económico del 150 [%] de compensación serie se realizan las siguientes consideraciones:

- 1.- Se asume que el costo [FOB] de las unidades y por tanto el de la disposición serie-paralelo que se tienen para el año 1986, no varían para los años siguientes al año 1986.
- 2.- Se asume que los datos para el año 1986 de: factor de carga [F_c], costo anual del [KW]([K_p]) y costo del [KWH]([K_e]) que se encuentran en la sección 6.2.6, también no varían para los años posteriores al año 1986.

- 3.- El valor económico del 150 [%] de compensación serie se lo determina para el año 1986 y para la tasa de rentabilidad $i = 8 [\%]$.

6.4.1.1.1.2.1.3.1 Cálculo del valor presente del costo de la instalación.

Puesto que la instalación de compensación serie es tal que en cada fase se halla un condensador en serie, el costo de la instalación deducido de la disposición serie-paralelo más conveniente obtenida a partir de la tabla 6.15 de la sección anterior 6.4.1.1.1.2.1.2 es:

$$C = 3 (27962) \quad [6.20]$$

$$\text{ó; } C = 83886 \text{ [DOLARES]} \quad [6.21]$$

Transcribiendo la ecuación [5.65] de la sección 5.3.2.1 se tiene que:

$$VP(C) = \frac{C}{(1+i)^n} \quad [6.22]$$

En la ecuación [6.22] se hace que:

$$C = 83886 \text{ [DOLARES]} \quad [6.23]$$

$$i = 8 [\%] \quad [6.24]$$

$$n = 2 \text{ [AÑOS]} \quad [6.25]$$

En [6.25] el valor de $[n]$ es 2 ya que es la diferencia en años entre 1988 y 1986 pues en la sección 6.3.1 se estableció que desde el año 1988 se requiere la instalación de suministro de reactivos a la carga.

Efectuando cálculos en [6.22] se tiene que el costo de la instalación traído a valor presente al año 1986 es:

$$VP(C) = \frac{83886}{(1 + 0.08)^2} \quad [6.26]$$

$$\text{ó; } VP(C) = 71919 \text{ [DOLARES]} \quad [6.27]$$

6.4.1.1.1.2.1.3.2 Cálculo del valor presente del costo de las pérdidas.

Para determinar el valor presente del costo de las pérdidas se considera que:

- 1.- Los costos de las pérdidas y consecuentemente el valor presente al año 1986 de cada uno de ellos se los calcula durante el período de 20 [AÑOS] (1988,.....,2007), tiempo que se considera como la vida media útil de la compensación serie.

El período de 20 [AÑOS] constituye la vida media útil de los condensadores unidad. [Ref. 38].

- 2.- De la sección 6.4.1.1.1 y más concretamente de la tabla 6.11 de dicha sección se establece que el 150 [%] de compensación serie satisface la carga neta máxima hasta el año 1991. Se asume que para los años posteriores a 1991 es incierta la implementación de alguna alternativa de suministro de reactivos para satisfacer los crecientes requerimientos de la carga; por cuya razón para el cálculo de los costos de las pérdidas y del valor presente al año 1986 de cada uno de ellos, se mantienen constantes las pérdidas desde el año 1991 hasta el año 2007, año este último en el cual termina el período de vida media útil de la compensación serie.

Tomando de la tabla 6.8 sólo aquellas cargas netas máximas que corresponden a cada año en cuestión de tal manera de tener en cuenta las

consideraciones anotadas en esta sección, en la tabla 6.17 se tabulan los respectivos valores de: la magnitud del voltaje terminal de recepción (entre fases), ángulo de operación de la línea, magnitud de la corriente de línea, potencia activa de envío y potencia activa de pérdidas.

La manera como se elabora la tabla 6.17 es siguiendo el procedimiento de cálculo señalado en el Apéndice 6A5, en el cual se detallan los cálculos para el año 1988 con la acotación de que en lo concerniente a la reactancia capacitiva del condensador en serie que se usa es la reactancia nominal dada en la tabla 6.16.

Para el período de la vida media útil de la compensación serie de 20 [AÑOS] y usando los valores de potencia activa perdida proporcionados por la tabla 6.17, en la tabla 6.18 se tabulan el costo de las pérdidas, el valor presente al año 1986 del costo de las pérdidas, así como el total de los valores presentes al año 1986 de los costos de las pérdidas.

En el Apéndice 6A6, se señala el procedimiento para la elaboración de la tabla 6.18.

TABLA 6.17

$$e_s = 1.016 \text{ [P.U]}$$

$$e_s = 70.104 \text{ [KV]}$$

AÑO	CARGA NETA MAXIMA		150 [%] COMPENSACION SERIE					
	POTENCIA ACTIVA	POTENCIA REACTIVA	VOLTAJE TERMINAL DE RECEPCION	ANGULO DE OPERACION DE LA LINEA	CORRIENTE DE LA LINEA	POTENCIA ACTIVA DE ENVIIO	POTENCIA ACTIVA PERDIDA	
	P_L [MW]	Q_L [MVAR]	e_r [KV]	e_r [P.U]	Δ [°]	i [A]	P_s [MW]	$P_p = P_s - P_L$ [MW]
1988	30.8	8.3	66.062	0.957	-5.627	278.791	33.389	2.589
1989	33.0	9.2	65.777	0.953	-6.099	300.700	36.011	3.011
1990	35.1	10.1	65.503	0.949	-6.560	321.928	38.554	3.454
1991	37.5	11.1	65.177	0.945	-7.090	346.429	41.501	4.001

TABLA 6.18

150 [%] COMPENSACION SERIE			
AÑO	POTENCIA ACTIVA PERDIDA	COSTO DE LAS PERDIDAS	VALOR PRESENTE AL AÑO 1986 DEL COSTO DE LAS PERDIDAS
	P_p [MW]	$C_{pp} = 63875 P_p$ [DOLARES]	$VP (C_{pp})$ [DOLARES]
1988	2.589	165372	141780
1989	3.011	192328	152676
1990	3.454	220624	162165
1991,...,2007	4.001	255564	1'713474
TOTAL DE LOS VALORES PRESENTES AL AÑO 1986 DE LOS COSTOS DE LAS PERDIDAS		$\sum_{j=1988}^{2007} VP(C_{ppj})$	[DOLARES] 2'170095

6.4.1.1.2.1.3.3 Valor económico del 150 [%] de compensación serie.

En la tabla 6.19 se tabulan los rubros de:

- 1.- Valor presente al año 1986 del costo de la instalación, tomado de [6.27].
- 2.- Total de los valores presentes al año 1986 de todos los costos de las pérdidas, tomado de la tabla 6.18.
- 3.- Valor económico del 150 [%] de compensación serie, formado por la suma de los rubros mencionados en los numerales 1.- y 2.-.

TABLA 6.19

150 [%] COMPENSACION SERIE		
VALOR PRESENTE AL AÑO 1986 DEL COSTO DE LA INSTALACION	TOTAL DE LOS VALORES PRE- SENTES AL AÑO 1986 DE LOS COSTOS DE LAS PERDIDAS	VALOR ECONOMICO
[DOLARES]	[DOLARES]	[DOLARES]
71919	2'170095	2'242014

6.4.1.1.1.2.2 Valor económico del 200 [%] de compensación serie.

6.4.1.1.1.2.2.1 Tamaño del condensador en serie.

De acuerdo a la ecuación [3.1] de la sección 3.1.1, con una reactancia inductiva de la línea de $X_L = 23.59$ [OHM], la reactancia capacitiva del condensador en serie en cada fase de la línea, que corresponde al 200 [%] de compensación serie es:

$$X_{cs} = 2 (23.59) \quad [6.28]$$

$$\text{ó; } X_{cs} = 47.180 \text{ [OHM]} \quad [6.29]$$

De la tabla 6.11 y para el 200 [%] de compensación serie se tiene que la corriente a través del condensador en serie es:

$$I_{cs} = 341.684 \text{ [A]} \quad [6.30]$$

Reemplazando en la ecuación [6.14] los valores de $[X_{cs}]$ y de $[I_{cs}]$ dados respectivamente por [6.29] y [6.30]; el voltaje a través del condensador en serie es:

$$E_{cs} = 341.684 (47.180) \quad [6.31]$$

$$\acute{o}; E_{cs} = 16120.65 [V] \quad [6.32]$$

En la ecuación [6.17], reemplazando los valores de $[I_{cs}]$ y $[E_{cs}]$ dados respectivamente por [6.30] y [6.32], el tamaño del condensador en serie en cada fase de la línea es:

$$Q_{cs} = \frac{16120.65 (341.684)}{1000000} \quad [6.33]$$

$$\acute{o}; Q_{cs} = 5.51 [MVAR] \quad [6.34]$$

En la tabla 6.20 se resumen las características que en cada fase de la línea, debe tener el condensador en serie correspondiente al 200 [%] de compensación serie.

TABLA 6.20

200 [%] COMPENSACION SERIE			
CARACTERISTICAS DEL CONDENSADOR EN SERIE (VALORES ANALITICOS)			
X_{cs} [OHM]	I_{cs} [A]	E_{cs} [V]	Q_{cs} [MVAR]
47.180	341.684	16120.65	5.51

6.4.1.1.1.2.2 Selección del condensador en serie.

La disposición serie-paralelo más conveniente se la determina siguiendo las mismas consideraciones de los numerales 1.-, 2.- y 3.- de la sección 6.4.1.1.1.2.1.2.

En la tabla 6.21 se tiene información del número mínimo recomendado de condensadores unidad en paralelo por grupo serie que debe existir de acuerdo al número de grupos serie de que esté provisto el condensador en serie de suerte de cumplir las consideraciones 1.- y 2.- de la sección 4.1.3. La confección de la tabla 6.21 se hace siguiendo un procedimiento análogo al de la tabla 6.13.

De la tabla 6.21 se establece también lo indicado en el numeral 4.- de la sección 6.4.1.1.1.2.1.2.

Siguiendo un procedimiento análogo al que sirvió para elaborar la tabla 6.14 de la sección 6.4.1.1.1.2.1.2; se confecciona la tabla 6.22, tabla esta en la cual también se muestran varias disposiciones serie-paralelo de condensadores unidad al utilizar unidades de 50 [KVAR], 100 [KVAR], 150 [KVAR] y 200 [KVAR] nominales.

Prestando atención a las consideraciones a.- o b.- de la sección 6.4.1.1.1.2.1.2; en la tabla 6.23 se tabulan las disposiciones serie-paralelo técnicamente factibles y los valores nominales correspondientes a cada una de ellas que se han tomado de la tabla 6.22, a la vez que se tabulan el costo de las unidades y el costo de cada disposición de acuerdo al costo que para el año 1986 se ha obtenido mediante el uso de catálogos de la Westinghouse.

TABLA 6.21

**200 [%]
COMPENSACION SERIE**

NUMERO DE GRUPOS SERIE POR FASE	NUMERO MINIMO DE CONDENSADORES UNIDAD EN PARALELO POR GRUPO SERIE	CORRIENTE DE CORTOCIR- CUITO A TRAYES DEL FUSIBLE EN VECES LA CORRIENTE NOMINAL DEL CONDENSADOR UNIDAD	VOLTAJE EN LAS UNI- DADES RESTANTES DEL GRUPO SERIE, AL SALIR UN CONDENSA- DOR DE DICHO GRUPO
N	M	I_f	e_f % [%]
1	11	12.778	109.741
2	11	11.444	109.845
3	11	11.232	109.891
4	11	11.152	109.916
5	11	11.111	109.932
6	11	11.087	109.942
7	11	11.071	109.950
8	11	11.060	109.956
9	11	11.052	109.961
10	11	11.045	109.964
11	11	11.040	109.967
12	11	11.036	109.970
13	11	11.033	109.972
14	11	11.030	109.974
15	11	11.028	109.976

TABLA 6.22

200 [%]
COMPENSACION SERIE

KYARs NOMINALES POR UNIDAD	GRUPOS SERIE POR FASE	UNIDADES EN PARALE- LO POR GRUPO SERIE	CANTIDAD DE UNIDADES POR FASE	MVARs POR FASE		VOLTAJE DE LAS UNIDADES		VOLTAJE A TRAVES DEL CONDENSADOR EN SERIE		CORRIENTE A TRAVES DEL CONDENSADOR EN SERIE		REACTANCIA CAPACITIVA DEL CONDENSADOR EN SERIE		TOLERANCIA EN LA REACT. CAPACITIVA DEL CGNDEN. EN SERIE
				VALOR ANALITICO	VALOR NOMINAL	VALOR ANALITICO	VALOR NOMINAL	VALOR ANALITICO	VALOR NOMINAL	VALOR ANALITICO	VALOR NOMINAL	VALOR ANALITICO	VALOR NOMINAL	
Q_n [KYAR]	N	M	q_c MN	Q_{cs} [MVAR]	Q_{cs} [MVAR]	E_n [V]	E_n [V]	E_{cs} [V]	E_{cs} [V]	I_{cs} [A]	I_{cs} [A]	X_{cs} [OHM]	X_{cs} [OHM]	F [%]
50	7	17	119		5.95	2302.95	2400		16800		354.17		47.44	0.55*
	4	29	116	5.51	5.80	4030.16	4160	16120.65	16640	341.684	348.56	47.180	47.74	1.17*
	3	46	138		6.90	5373.55	6640		19920		346.59		57.51	17.96
	2	57	114		5.70	8060.33	8320		16640		342.55		48.58	2.89*
100	4	15	60		6.00	4030.16	4160		16640		360.58		46.15	-2.23*
	3	23	69	5.51	6.90	5373.55	6640	16120.65	19920	341.684	346.39	47.180	57.51	17.96
	2	29	58		5.80	8060.33	8320		16640		348.56		47.74	1.17*
	1	59	59		5.90	16120.65	17200		17200		343.02		50.14	5.90
150	3	16	48		7.20	5373.55	6640		19920		361.45		55.11	14.39
	2	19	38	5.51	5.70	8060.33	8320	16120.65	16640	341.684	342.55	47.180	48.58	2.89*
	1	40	40		6.00	16120.65	17200		17200		348.84		49.31	4.32*
200	3	12	36		7.20	5373.55	6640		19920		361.45		55.11	14.39
	2	15	30	5.51	6.00	8060.33	8320	16120.65	16640	341.684	360.58	47.180	46.15	-2.23*
	1	30	30		6.00	16120.65	17200		17200		348.84		49.31	4.32*

* : Disposición serie-paralelo técnicamente factible

TABLA 6.23

200 [%]
COMPENSACION SERIE

KVARs NOMINALES POR UNIDAD	VOLTAJE NOMINAL DE LA UNIDAD	GRUPOS SERIE POR FASE	UNIDADES EN PARALE- LO POR GRUPO SERIE	CANTIDAD DE UNIDADES POR FASE	VALORES NOMINALES DEL CONDENSADOR EN SERIE				COSTO POR UNIDAD	COSTO DEL CONDENSADOR EN SERIE
					REACTANCIA NOMINAL	CORRIENTE NOMINAL	VOLTAJE NOMINAL	MVARs NOMINAL		
Q_n [KVAR]	E_n [V]	N	M	q_c MN	X_{cs} [OHM]	I_{cs} [A]	E_{cs} [V]	Q_{cs} [MVAR]	[DOLARES]	[DOLARES]
50	2400	7	17	119	47.44	354.17	16800	5.95	750	89250
	4160	4	29	116	47.74	348.56	16640	5.80	750	87000
	8320	2	57	114	48.58	342.55	16640	5.70	750	85500
100	4160	4	15	60	46.15	360.58	16640	6.00	967	58020
	8320	2	29	58	47.74	348.56	16640	5.80	967	56086
150	8320	2	19	38	48.58	342.55	16640	5.70	1106	42028
	17200	1	40	40	49.31	348.84	17200	6.00	1145	45800
200	8320	2	15	30	46.15	360.58	16640	6.00	1271	38130*
	17200	1	30	30	49.31	348.84	17200	6.00	1323	39690

* : Disposición serie-paralelo más económica.

De la tabla 6.23 se establece que:

- 1.- Lo que se indicó en los literales c.- y d.- de la sección 6.4.1.1.1.2.1.2.
- 2.- La disposición serie-paralelo más conveniente es aquella que utiliza en cada fase de la línea: condensadores unidad de 200 [KVAR] nominales y 8320 [V] nominales, 2 grupos serie por fase, 15 condensadores unidad en paralelo por grupo serie y 30 condensadores unidad por fase, puesto que para esta disposición se obtiene el menor costo con relación al de las otras disposiciones.

De la tabla 6.23 se extraen y se tabulan en la tabla 6.24 los valores nominales que en cada fase de la línea tiene el condensador en serie correspondiente a la disposición serie-paralelo más conveniente.

TABLA 6.24

200 [%] COMPENSACION SERIE			
CARACTERISTICAS DEL CONDENSADOR EN SERIE (VALORES NOMINALES)			
REACTANCIA NOMINAL	CORRIENTE NOMINAL	VOLTAJE NOMINAL	MVARs NOMINAL
X_{cs} [OHM]	I_{cs} [A]	E_{cs} [V]	Q_{cs} [MVAR]
46.15	360.58	16640	6.00

6.4.1.1.2.2.3 Cálculo del valor económico del 200 [%] de compensación serie.

Para llevar a cabo el cálculo del valor económico del 200 [%] de compensación serie se efectúan las mismas consideraciones enunciadas en los numerales 1.-, 2.- y 3.- de la sección 6.4.1.1.2.1.3.

6.4.1.1.2.2.3.1 Cálculo del valor presente del costo de la instalación.

La instalación de compensación serie es tal que en cada fase se encuentra un condensador en serie, por lo cual el costo de la instalación deducido de la disposición serie-paralelo más conveniente obtenida a partir de la tabla 6.23 de la sección anterior 6.4.1.1.2.2.2 es:

$$C = 3 (38130) \quad [6.35]$$

$$\text{ó; } C = 114390 \text{ [DOLARES]} \quad [6.36]$$

Transcribiendo la ecuación [5.65] de la sección 5.3.2.1 se tiene que:

$$VP(C) = \frac{C}{(1+i)^n} \quad [6.37]$$

En la ecuación [6.37] se hace que:

$$C = 114390 \text{ [DOLARES]} \quad [6.38]$$

$$i = 8 \text{ [%]} \quad [6.39]$$

$$n = 2 \text{ [AÑOS]} \quad [6.40]$$

Efectuando cálculos en [6.37] se tiene que el costo de la instalación traído a valor presente al año 1986 es:

$$VP(C) = \frac{114390}{(1+0.08)^2} \quad [6.41]$$

ó; VP(C) = 98071 [DOLARES]

[6.42]

6.4.1.1.1.2.2.3.2 Cálculo del valor presente del costo de las pérdidas.

La determinación del valor presente del costo de las pérdidas se la hace tomando en cuenta las mismas consideraciones 1.- y 2.- de la sección 6.4.1.1.1.2.1.3.2.

En la tabla 6.25 se tabulan para las cargas netas máximas correspondientes los valores de: la magnitud del voltaje terminal de recepción (entre fases), ángulo de operación de la línea, magnitud de la corriente de línea, potencia activa de envío y potencia activa de pérdidas. La tabla 6.25 se elabora en forma similar a la tabla 6.17, es decir siguiendo el procedimiento de cálculo señalado en el Apéndice 6A5, pero como es obvio utilizando los datos pertinentes, y con la acotación de que la reactancia capacitiva del condensador en serie que se usa es la reactancia nominal dada en la tabla 6.24.

Para el lapso de la vida media útil de la compensación serie de 20 [AÑOS] y usando los valores de potencia activa perdida proporcionados por la tabla 6.25, en la tabla 6.26 se tabulan: el costo de las pérdidas, el valor presente al año 1986 del costo de las pérdidas, así como el total de los valores presentes al año 1986 de los costos de las pérdidas. La confección de la tabla 6.26 es similar a la de la tabla 6.18, o sea siguiendo el procedimiento de cálculo del Apéndice 6A6.

TABLA 6.25

		$e_s = 1.016$ [P.U] $e_s = 70.104$ [KV]						
		CARGA NETA MAXIMA		200 [%] COMPENSACION SERIE				
AÑO	POTENCIA ACTIVA	POTENCIA REACTIVA	VOLTAJE TERMINAL DE RECEPCION	ANGULO DE OPERACION DE LA LINEA	CORRIENTE DE LA LINEA	POTENCIA ACTIVA DE ENVIO	POTENCIA ACTIVA PERDIDA	
	P_L [MW]	Q_L [MVAR]	e_r [KV]	e_r [P.U]	Δ [°]	i [A]	P_s [MW]	$P_p = P_s - P_L$ [MW]
1988	30.8	8.3	66.786	0.968	-9.678	275.758	33.336	2.536
1989	33.0	9.2	66.549	0.964	-10.456	297.211	35.944	2.944
1990	35.1	10.1	66.322	0.961	-11.212	317.953	38.468	3.368
1991	37.5	11.1	66.033	0.957	-12.087	341.938	41.397	3.897

TABLA 6.26

200 [%] COMPENSACION SERIE			
AÑO	POTENCIA ACTIVA PERDIDA	COSTO DE LAS PERDIDAS	VALOR PRESENTE AL AÑO 1986 DEL COSTO DE LAS PERDIDAS
	P_p	$C_{pp} = 63875 P_p$	VP (C_{pp})
	[MW]	[DOLARES]	[DOLARES]
1988	2.536	161987	138878
1989	2.944	188048	149279
1990	3.368	215131	158128
1991,...,2007	3.897	248921	1'668935
TOTAL DE LOS VALORES PRESENTES AL AÑO 1986 DE LOS COSTOS DE LAS PERDIDAS		$\sum_{j=1988}^{2007} VP(C_{ppj})$	[DOLARES] 2'115220

6.4.1.1.1.2.2.3.3 Valor económico del 200 [%] de compensación serie.

En la tabla 6.27 se tabulan los siguientes rubros:

- 1.- Valor presente al año 1986 del costo de la instalación, tomado de [6.42].
- 2.- Total de los valores presentes al año 1986 de todos los costos de las pérdidas, tomado de la tabla 6.26.
- 3.- Valor económico del 200 [%] de compensación serie, formado por la suma de los rubros mencionados en los numerales 1.- y 2.-.

TABLA 6.27

200 [%] COMPENSACION SERIE		
VALOR PRESENTE AL AÑO 1986 DEL COSTO DE LA INSTALACION	TOTAL DE LOS VALORES PRE- SENTES AL AÑO 1986 DE LOS COSTOS DE LAS PERDIDAS	VALOR ECONOMICO
[DOLARES]	[DOLARES]	[DOLARES]
98071	2'115220	2'213291

6.4.1.1.1.2.3 Valor económico del 250 [%] de compensación serie.

6.4.1.1.1.2.3.1 Tamaño del condensador en serie.

De acuerdo a la ecuación [3.1] de la sección 3.1.1, con una reactancia inductiva de la línea de $X_L = 23.59$ [OHM], la reactancia capacitiva del condensador en serie en cada fase de la línea, que corresponde al 250 [%] de compensación serie es:

$$X_{cs} = 2.5 (23.59) \quad [6.43]$$

$$\text{ó; } X_{cs} = 58.975 \text{ [OHM]} \quad [6.44]$$

De la tabla 6.11 y para el 250 [%] de compensación serie se tiene que la corriente a través del condensador en serie es:

$$I_{cs} = 340.885 \text{ [A]} \quad [6.45]$$

Reemplazando en la ecuación [6.14] los valores de $[X_{cs}]$ y de $[I_{cs}]$ dados respectivamente por [6.44] y [6.45]; el voltaje a través del condensador en serie es:

$$E_{cs} = 340.885 (58.975) \quad [6.46]$$

$$\text{ó; } E_{cs} = 20103.69 [V] \quad [6.47]$$

En la ecuación [6.17], reemplazando los valores de $[I_{cs}]$ y $[E_{cs}]$ dados respectivamente por [6.45] y [6.47], el tamaño del condensador en serie en cada fase de la línea es:

$$Q_{cs} = \frac{20103.69 (340.885)}{1000000} \quad [6.48]$$

$$\text{ó; } Q_{cs} = 6.85 [MVAR] \quad [6.49]$$

En la tabla 6.28 se resumen las características que en cada fase de la línea, debe tener el condensador en serie correspondiente al 250 [%] de compensación serie.

TABLA 6.28

250 [%] COMPENSACION SERIE			
CARACTERISTICAS DEL CONDENSADOR EN SERIE (VALORES ANALITICOS)			
X_{cs} [OHM]	I_{cs} [A]	E_{cs} [V]	Q_{cs} [MVAR]
58.975	340.885	20103.69	6.85

6.4.1.1.2.3.2. Selección del condensador en serie.

La disposición serie-paralelo más conveniente se la determina siguiendo las mismas consideraciones de los numerales 1.-, 2.- y 3.- de la sección 6.4.1.1.2.1.2.

En la tabla 6.29 se tiene información del número mínimo recomendado de condensadores unidad en paralelo por grupo serie que debe existir de acuerdo al número de grupos serie de que esté provisto el condensador en serie de suerte de cumplir las consideraciones 1.- y 2.- de la sección 4.1.3. La confección de la tabla 6.29 se hace siguiendo un procedimiento análogo al de la tabla 6.13.

De la tabla 6.29 se establece también lo indicado en el numeral 4.- de la sección 6.4.1.1.2.1.2.

Siguiendo un procedimiento análogo al que sirvió para elaborar la tabla 6.14 de la sección 6.4.1.1.2.1.2; se confecciona la tabla 6.30, tabla esta en la cual también se muestran varias disposiciones serie-paralelo de condensadores unidad al utilizar unidades de 50 [KVAR], 100 [KVAR], 150 [KVAR] y 200 [KVAR] nominales.

Prestando atención a las consideraciones a.- o b.- de la sección 6.4.1.1.2.1.2; en la tabla 6.31 se tabulan las disposiciones serie-paralelo técnicamente factibles y los valores nominales correspondientes a cada una de ellas que se han tomado de la tabla 6.30, a la vez que se tabulan el costo de las unidades y el costo de cada disposición de acuerdo al costo que para el año 1986 se ha obtenido mediante el uso de catálogos de la Westinghouse.

De la tabla 6.31 se establece que:

- 1.- Lo que se dijo en los literales c.- y d.- de la sección 6.4.1.1.2.1.2.
- 2.- La disposición serie-paralelo más conveniente es aquella que utiliza en cada fase de la línea: condensadores unidad de 200 [KVAR] nominales y 20800 [V] nominales, 1 grupo serie por fase, 36 condensadores unidad en paralelo por grupo serie y 36

TABLA 6.29

**250 [%]
COMPENSACION SERIE**

NUMERO DE GRUPOS SERIE POR FASE	NUMERO MINIMO DE CONDENSADORES UNIDAD EN PARALELO POR GRUPO SERIE	CORRIENTE DE CORTOCIR- CUITO A TRAVES DEL FUSIBLE EN VECES LA CORRIENTE NOMINAL DEL CONDENSADOR UNIDAD	VOLTAJE EN LAS UNI- DADES RESTANTES DEL GRUPO SERIE, AL SALIR UN CONDENSA- DOR DE DICHO GRUPO
N	M	I_f	$e_f\%$ [%]
1	12	13.972	109.429
2	12	12.332	109.220
3	12	12.123	109.168
4	12	12.057	109.145
5	12	12.028	109.133
6	12	12.013	109.124
7	12	12.006	109.119
8	12	12.001	109.115
9	12	11.998	109.112
10	12	11.996	109.110
11	12	11.995	109.108
12	12	11.994	109.107
13	12	11.994	109.105
14	12	11.994	109.104
15	12	11.993	109.103

TABLA 6.30

250 [%]
CÓMPENSACION SERIE

KYARs NOMINALES POR UNIDAD	GRUPOS SERIE POR FASE	UNIDADES EN PARALE- LO POR GRUPO SERIE	CANTIDAD DE UNIDADES POR FASE	MYARs POR FASE		VOLTAJE DE LAS UNIDADES		VOLTAJE A TRAYES DEL CONDENSADOR EN SERIE		CORRIENTE A TRAYES DEL CONDENSADOR EN SERIE		REACTANCIA CAPACITIVA DEL CONDENSADOR EN SERIE		TOLERANCIA EN LA REACT. CAPACITIVA DEL CONDEN. EN SERIE
				VALOR ANALITICO	VALOR NOMINAL	VALOR ANALITICO	VALOR NOMINAL	VALOR ANALITICO	VALOR NOMINAL	VALOR ANALITICO	VALOR NOMINAL	VALOR ANALITICO	VALOR NOMINAL	
Q_n [KYAR]	N	M	q_c MN	Q_{cs} [MYAR]	Q_{cs} [MYAR]	E_n [V]	E_n [V]	E_{cs} [V]	E_{cs} [V]	I_{cs} [A]	I_{cs} [A]	X_{cs} [OHM]	X_{cs} [OHM]	ξ [%]
50	9	17	153	6.85	7.65	2233.74	2400	20103.69	21600	340.865	354.17	58.975	60.99	3.30*
	5	29	145		7.25	4020.74	4160		20800		348.56		59.67	1.16*
	4	46	184		9.20	5025.92	6640		26560		346.39		76.68	23.09
	3	50	150		7.50	6701.23	7200		21600		347.22		62.21	5.20
	2	78	156		7.80	10051.85	11400		22800		342.11		66.65	11.52
100	5	15	75	6.85	7.50	4020.74	4160	20103.69	20800	340.865	360.58	58.975	57.69	-2.23*
	4	23	92		9.20	5025.92	6640		26560		346.39		76.68	23.09
	3	25	75		7.50	6701.23	7200		21600		347.22		62.21	5.20
	2	39	78		7.80	10051.85	11400		22800		342.11		66.65	11.52
	1	71	71		7.10	20103.69	20800		20800		341.35		60.94	3.22*
150	4	16	64	6.85	9.60	5025.92	6640	20103.69	26560	340.865	361.45	58.975	73.48	19.74
	3	17	51		7.65	6701.23	7200		21600		354.17		60.99	3.30*
	2	26	52		7.80	10051.85	11400		22800		342.11		66.65	11.52
	1	48	48		7.20	20103.69	20800		20800		346.15		60.09	1.86*
200	3	13	39	6.85	7.80	6701.23	7200	20103.69	21600	340.865	361.11	58.975	59.82	1.41*
	2	20	40		8.00	10051.85	11400		22800		350.88		64.98	9.24
	1	36	36		7.20	20103.69	20800		20800		346.15		60.09	1.86*

* : Disposición serie-paralelo técnicamente factible

TABLA 6.31

250 [%]
COMPENSACION SERIE

KVARs NOMINALES POR UNIDAD	VOLTAJE NOMINAL DE LA UNIDAD	GRUPOS SERIE POR FASE	UNIDADES EN PARALE- LO POR GRUPO SERIE	CANTIDAD DE UNIDADES POR FASE	VALORES NOMINALES DEL CONDENSADOR EN SERIE				COSTO POR UNIDAD	COSTO DEL CONDENSADOR EN SERIE
					REACTANCIA NOMINAL	CORRIENTE NOMINAL	VOLTAJE NOMINAL	MVARs NOMINAL		
Q	E	N	M	q	X	I	E	Q	[DOLARES]	[DOLARES]
[KVAR]	[V]			MN	[OHM]	[A]	[V]	[MVAR]		
50	2400	9	17	153	60.99	354.17	21600	7.65	750	114750
	4160	5	29	145	59.67	348.56	20800	7.25	750	108750
100	4160	5	15	75	57.69	360.58	20800	7.50	967	72525
	20800	1	71	71	60.94	341.35	20800	7.10	993	70503
150	7200	3	17	51	60.99	354.17	21600	7.65	1106	56406
	20800	1	48	48	60.09	346.15	20800	7.20	1145	54960
200	7200	3	13	39	59.82	361.11	21600	7.80	1271	49569
	20800	1	36	36	60.09	346.15	20800	7.20	1323	47628*

* : Disposición serie-paralelo más económica.

condensadores unidad por fase, dado que para esta disposición se obtiene el menor costo con respecto al de las otras disposiciones.

De la tabla 6.31 se extraen y se tabulan en la tabla 6.32 los valores nominales que en cada fase de la línea tiene el condensador en serie correspondiente a la disposición serie-paralelo más conveniente.

TABLA 6.32

250 [%] COMPENSACION SERIE			
CARACTERÍSTICAS DEL CONDENSADOR EN SERIE (VALORES NOMINALES)			
REACTANCIA NOMINAL	CORRIENTE NOMINAL	VOLTAJE NOMINAL	MVARs NOMINAL
X_{cs} [OHM]	I_{cs} [A]	E_{cs} [V]	Q_{cs} [MVAR]
60.09	346.15	20800	7.20

6.4.1.1.1.2.3.3 Cálculo del valor económico del 250 [%] de compensación serie.

Para llevar a cabo el cálculo del valor económico del 250 [%] de compensación serie se efectúan las mismas consideraciones enunciadas en los numerales 1.-, 2.- y 3.- de la sección 6.4.1.1.1.2.1.3.

6.4.1.1.1.2.3.3.1 Cálculo del valor presente del costo de la instalación.

La instalación de compensación serie es tal que en cada fase se encuentra un condensador en serie, por lo cual el costo de la instalación

deducido de la disposición serie-paralelo más conveniente obtenida a partir de la tabla 6.31 de la sección anterior 6.4.1.1.2.3.2 es:

$$C = 3 (47628) \quad [6.50]$$

$$\text{ó; } C = 142884 \text{ [DOLARES]} \quad [6.51]$$

Transcribiendo la ecuación [5.65] de la sección 5.3.2.1 se tiene que:

$$VP(C) = \frac{C}{(1+i)^n} \quad [6.52]$$

En la ecuación [6.52] se hace que:

$$C = 142884 \text{ [DOLARES]} \quad [6.53]$$

$$i = 8 \text{ [\%]} \quad [6.54]$$

$$n = 2 \text{ [AÑOS]} \quad [6.55]$$

Efectuando cálculos en [6.52] se tiene que el costo de la instalación traído a valor presente al año 1986 es:

$$VP(C) = \frac{142884}{(1+0.08)^2} \quad [6.56]$$

$$\text{ó; } VP(C) = 122500 \text{ [DOLARES]} \quad [6.57]$$

6.4.1.1.2.3.3.2 Cálculo del valor presente del costo de las pérdidas.

La determinación del valor presente del costo de las pérdidas se la hace tomando en cuenta las mismas consideraciones 1.- y 2.- de la sección 6.4.1.1.2.1.3.2.

En la tabla 6.33 se tabulan para las cargas netas máximas correspondientes los valores de: la magnitud del voltaje terminal de

recepción (entre fases), ángulo de operación de la línea, magnitud de la corriente de línea, potencia activa de envío y potencia activa de pérdidas.

La tabla 6.33 se elabora en forma similar a la tabla 6.17, es decir siguiendo el procedimiento de cálculo dado en el Apéndice 6A5, pero como es obvio utilizando los datos pertinentes y con la acotación de que la reactancia capacitiva del condensador en serie que se usa es la reactancia nominal dada en la tabla 6.32.

Para el lapso de la vida media útil de la compensación serie de 20 [AÑOS] y usando los valores de potencia activa perdida proporcionados por la tabla 6.33, en la tabla 6.34 se tabulan: el costo de las pérdidas, el valor presente al año 1986 del costo de las pérdidas, así como el total de los valores presentes al año 1986 de los costos de las pérdidas. La confección de la tabla 6.34 es similar a la de la tabla 6.18, o sea siguiendo el procedimiento de cálculo del Apéndice 6A6.

TABLA 6.33

CARGA NETA MAXIMA		250 [%] COMPENSACION SERIE						
AÑO	POTENCIA ACTIVA	POTENCIA REACTIVA	VOLTAJE TERMINAL DE RECEPCION		ANGULO DE OPERACION DE LA LINEA	CORRIENTE DE LA LINEA	POTENCIA ACTIVA DE ENVIO	POTENCIA ACTIVA PERDIDA
	P_L [MW]	Q_L [MYAR]	e_r [KV]	e_r [P.U]	Δ [°]	i [A]	P_s [MW]	$P_p = P_s - P_L$ [MW]
1988	30.8	8.3	67.138	0.973	-14.978	274.312	33.308	2.508
1989	33.0	9.2	66.864	0.969	-16.187	295.811	35.917	2.917
1990	35.1	10.1	66.588	0.965	-17.367	316.683	38.447	3.343
1991	37.5	11.1	66.210	0.960	-18.751	341.024	41.376	3.876

$$e_s = 1.016 \text{ [P.U]}$$

$$e_s = 70.104 \text{ [KV]}$$

TABLA 6.34

250 [%] COMPENSACION SERIE			
AÑO	POTENCIA ACTIVA PERDIDA	COSTO DE LAS PERDIDAS	VALOR PRESENTE AL AÑO 1986 DEL COSTO DE LAS PERDIDAS
	P_p	$C_{pp} = 63875 P_p$	VP (C_{pp})
	[MW]	[DOLARES]	[DOLARES]
1988	2.508	160199	137345
1989	2.917	186323	147909
1990	3.343	213534	156954
1991,...,2007	3.876	247580	1'659944
TOTAL DE LOS VALORES PRESENTES AL AÑO 1986 DE LOS COSTOS DE LAS PERDIDAS		$\sum_{j=1988}^{2007} VP(C_{ppj})$	[DOLARES] 2'102152

6.4.1.1.1.2.3.3.3 Valor económico del 250 [%] de compensación serie.

En la tabla 6.35 se tabulan los siguientes rubros:

- 1.- Valor presente al año 1986 del costo de la instalación, tomado de [6.57].
- 2.- Total de los valores presentes al año 1986 de todos los costos de las pérdidas, tomado de la tabla 6.34.
- 3.- Valor económico del 250 [%] de compensación serie, formado por la suma de los rubros mencionados en los numerales 1.- y 2.-.

TABLA 6.35

250 [%] COMPENSACION SERIE		
VALOR PRESENTE AL AÑO 1986 DEL COSTO DE LA INSTALACION	TOTAL DE LOS VALORES PRE- SENTES AL AÑO 1986 DE LOS COSTOS DE LAS PERDIDAS	VALOR ECONOMICO
[DOLARES]	[DOLARES]	[DOLARES]
122500	2'102152	2'224652

6.4.1.1.1.2.4 Valor económico del 300 [%] de compensación serie.

6.4.1.1.1.2.4.1 Tamaño del condensador en serie.

De acuerdo a la ecuación [3.1] de la sección 3.1.1, con una reactancia inductiva de la línea de $X_L = 23.59$ [OHM], la reactancia capacitiva del condensador en serie en cada fase de la línea, que corresponde al 300 [%] de compensación serie es:

$$X_{CS} = 3 (23.59) \quad [6.58]$$

$$\acute{o}; X_{CS} = 70.770 \text{ [OHM]} \quad [6.59]$$

De la tabla 6.11 y para el 300 [%] de compensación serie se tiene que la corriente a través del condensador en serie es:

$$I_{CS} = 344.673 \text{ [A]} \quad [6.60]$$

Reemplazando en la ecuación [6.14] los valores de $[X_{CS}]$ y de $[I_{CS}]$ dados respectivamente por [6.59] y [6.60]; el voltaje a través del condensador en serie es:

$$E_{cs} = 344.673 (70.770) \quad [6.61]$$

$$\text{ó; } E_{cs} = 24392.51 [V] \quad [6.62]$$

En la ecuación [6.17], reemplazando los valores de $[I_{cs}]$ y $[E_{cs}]$ dados respectivamente por [6.60] y [6.62], el tamaño del condensador en serie en cada fase de la línea es:

$$Q_{cs} = \frac{24392.51 (344.673)}{1000000} \quad [6.63]$$

$$\text{ó; } Q_{cs} = 8.41 [MVAR] \quad [6.64]$$

En la tabla 6.36 se resumen las características que en cada fase de la línea, debe tener el condensador en serie correspondiente al 300 [%] de compensación serie.

TABLA 6.36

300 [%] COMPENSACION SERIE			
CARACTERISTICAS DEL CONDENSADOR EN SERIE (VALORES ANALITICOS)			
X_{cs} [OHM]	I_{cs} [A]	E_{cs} [V]	Q_{cs} [MVAR]
70.770	344.673	24392.51	8.41

6.4.1.1.2.4.2 Selección del condensador en serie.

La disposición serie-paralelo más conveniente se la determina siguiendo las mismas consideraciones de los numerales 1.-, 2.- y 3.- de la sección 6.4.1.1.2.1.2.

En la tabla 6.37 se tiene información del número mínimo recomendado de condensadores unidad en paralelo por grupo serie que debe existir de acuerdo al número de grupos serie de que esté provisto el condensador en serie, de suerte de cumplir las consideraciones 1.- y 2.- de la sección 4.1.3. La confección de la tabla 6.37 se hace siguiendo un procedimiento análogo al de la tabla 6.13.

De la tabla 6.37 se establece también lo indicado en el numeral 4.- de la sección 6.4.1.1.2.1.2.

Siguiendo un procedimiento análogo al que sirvió para elaborar la tabla 6.14 de la sección 6.4.1.1.2.1.2; se confecciona la tabla 6.38, tabla esta en la cual se muestran varias disposiciones serie-paralelo de condensadores unidad al utilizar unidades de 50 [KVAR], 100 [KVAR], 150 [KVAR] y 200 [KVAR] nominales.

Prestando atención a las consideraciones a.- ó b.- de la sección 6.4.1.1.2.1.2; en la tabla 6.39 se tabulan las disposiciones serie-paralelo técnicamente factibles y los valores nominales correspondientes a cada una de ellas, que se han tomado de la tabla 6.38, a la vez que se tabulan el costo de las unidades y el costo de cada disposición de acuerdo al costo que para el año 1986 se ha obtenido mediante el uso de catálogos de la Westinghouse.

De la tabla 6.39 se establece que:

- 1.- Lo que se dijo en los literales c.- y d.- de la sección 6.4.1.1.2.1.2.
- 2.- La disposición serie-paralelo más conveniente es aquella que utiliza en cada fase de la línea: condensadores unidad de 200 [KVAR] nominales y 12470 [V] nominales, 2 grupos serie por fase, 22 condensadores unidad en paralelo por grupo serie y 44

TABLA 6.37

**300 [%]
COMPENSACION SERIE**

NUMERO DE GRUPOS SERIE POR FASE	NUMERO MINIMO DE CONDENSADORES UNIDAD EN PARALELO POR GRUPO SERIE	CORRIENTE DE CORTOCIR- CUITO A TRAYES DEL FUSIBLE EN YECES LA CORRIENTE NOMINAL DEL CONDENSADOR UNIDAD	VOLTAJE EN LAS UNI- DADES RESTANTES DEL GRUPO SERIE, AL SALIR UN CONDENSA- DOR DE DICHO GRUPO
N	M	I_f	$e_f\%$ [%]
1	12	13.818	110
2	12	12.060	109.759
3	12	11.896	109.516
4	12	11.864	109.402
5	12	11.862	109.336
6	12	11.868	109.293
7	12	11.876	109.263
8	12	11.884	109.240
9	12	11.892	109.223
10	12	11.898	109.209
11	12	11.905	109.198
12	12	11.910	109.189
13	12	11.915	109.181
14	12	11.920	109.175
15	12	11.924	109.169

TABLA 6.38

300 [%] COMPENSACION SERIE															
KYARs NOMINALES POR UNIDAD	GRUPOS SERIE POR FASE	UNIDADES EN PARALE- LO POR GRUPO SERIE	CANTIDAD DE UNIDADES POR FASE	MYARs POR FASE		VOLTAJE DE LAS UNIDADES		VOLTAJE A TRAVES DEL CONDENSADOR EN SERIE		CORRIENTE A TRAVES DEL CONDENSADOR EN SERIE		REACTANCIA CAPACITIVA DEL CONDENSADOR EN SERIE		TOLERANCIA EN LA REACT. CAPACITIVA DEL CONDEN. EN SERIE	
				VALOR ANALITICO	VALOR NOMINAL	VALOR ANALITICO	VALOR NOMINAL	VALOR ANALITICO	VALOR NOMINAL	VALOR ANALITICO	VALOR NOMINAL	VALOR ANALITICO	VALOR NOMINAL		
Q_n [KYAR]	N	M	q_c MN	Q_{cs} [MYAR]	Q_{cs} [MYAR]	E_n [V]	E_n [V]	E_{cs} [V]	E_{cs} [V]	I_{cs} [A]	I_{cs} [A]	X_{cs} [OHM]	X_{cs} [OHM]	ϵ [%]	
50	11	17	187	8.41	9.35	2217.50	2400	24392.51	26400	344.763	354.17	70.77	74.54	5.06	
	6	29	174		8.70	4065.42	4160		24960		348.56		71.61	1.17*	
	4	46	184		9.20	6098.13	6640		26560		346.39		76.68	7.71	
	3	58	174		8.70	8130.84	8320		24960		348.56		71.61	1.17*	
	2	86	172		8.60	12196.26	12470		24940		344.83		72.33	2.16*	
100	6	15	90	8.41	9.00	4065.42	4160	24392.51	24960	344.763	360.58	70.77	69.22	-2.24*	
	4	23	92		9.20	6098.13	6640		26560		346.59		76.68	7.71	
	3	29	87		8.70	8130.84	8320		24960		348.56		71.61	1.17*	
	2	43	86		8.60	12196.26	12470		24940		344.83		72.33	2.16*	
	1	86	86		8.60	24392.51	24940		24940		344.83		72.33	2.16*	
150	4	16	64	8.41	9.60	6098.13	6640	24392.51	26560	344.763	361.45	70.77	73.48	3.69*	
	3	20	60		9.00	8130.84	8320		24960		360.58		69.22	-2.24*	
	2	29	58		8.70	12196.26	12470		24940		348.84		71.49	1.01*	
	1	58	58		8.70	24392.51	24940		24940		348.84		71.49	1.01*	
200	4	12	48	8.41	9.60	6098.13	6640	24392.51	26560	344.763	361.45	70.77	73.48	3.69*	
	3	15	45		9.00	8130.84	8320		24960		360.58		69.22	-2.24*	
	2	22	44		8.80	12196.26	12470		24940		352.85		70.68	-0.13*	
	1	43	43	8.60	24392.51	24940	24940	344.83	72.33	2.16*					

* : Disposición serie-paralelo técnicamente factible

TABLA 6.39

300 [%]
COMPENSACION SERIE

KVARs NOMINALES POR UNIDAD	VOLTAJE NOMINAL DE LA UNIDAD	GRUPOS SERIE POR FASE	UNIDADES EN PARALE- LO POR GRUPO SERIE	CANTIDAD DE UNIDADES POR FASE	VALORES NOMINALES DEL CONDENSADOR EN SERIE				COSTO POR UNIDAD	COSTO DEL CONDENSADOR EN SERIE
					REACTANCIA NOMINAL	CORRIENTE NOMINAL	VOLTAJE NOMINAL	MVARs NOMINAL		
Q_n [KVAR]	E_n [V]	N	M	q_c MN	X_{CS} [OHM]	I_{CS} [A]	E_{CS} [V]	Q_{CS} [MVAR]	[DOLARES]	[DOLARES]
50	4160	6	29	174	71.61	348.56	24960	8.70	750	130500
	8320	3	58	174	71.61	348.56	24960	8.70	750	130500
	12470	2	86	172	72.33	344.83	24940	8.60	750	129000
100	4160	6	15	90	69.22	360.58	24960	9.00	967	87030
	8320	3	29	87	71.61	348.56	24960	8.70	967	84129
	12470	2	43	86	72.33	344.83	24940	8.60	967	83162
	24940	1	86	86	72.33	344.83	24940	8.60	993	85398
150	6640	4	16	64	73.48	361.45	26560	9.60	1106	70784
	8320	3	20	60	69.22	360.58	24960	9.00	1106	66360
	12470	2	29	58	71.49	348.84	24940	8.70	1106	64148
	24940	1	58	58	71.49	348.84	24940	8.70	1145	66410
200	6640	4	12	48	73.48	361.45	26560	9.60	1271	61008
	8320	3	15	45	69.22	360.58	24960	9.00	1271	57195
	12470	2	22	44	70.68	352.85	24940	8.80	1271	55924*
	24940	1	43	43	72.33	344.83	24940	8.60	1323	56889

* : Disposición serie-paralelo más económica.

condensadores unidad por fase, dado que para esta disposición se obtiene el menor costo con respecto al de las otras disposiciones.

De la tabla 6.39 se extraen y se tabulan en la tabla 6.40 los valores nominales que en cada fase de la línea tiene el condensador en serie correspondiente a la disposición serie-paralelo más conveniente.

TABLA 6.40

300 [%] COMPENSACION SERIE			
CARACTERISTICAS DEL CONDENSADOR EN SERIE (VALORES NOMINALES)			
REACTANCIA NOMINAL	CORRIENTE NOMINAL	VOLTAJE NOMINAL	MVARs NOMINAL
X_{cs} [OHM]	I_{cs} [A]	E_{cs} [V]	Q_{cs} [MVAR]
70.68	352.85	24940	8.80

6.4.1.1.2.4.3 Cálculo del valor económico del 300 [%] de compensación serie.

Para llevar a cabo el cálculo del valor económico del 300 [%] de compensación serie se efectúan las mismas consideraciones enunciadas en los numerales 1.-, 2.- y 3.- de la sección 6.4.1.1.2.1.3.

6.4.1.1.2.4.3.1 Cálculo del valor presente del costo de la instalación.

La instalación de compensación serie es tal que en cada fase se encuentra un condensador en serie, por lo cual el costo de la instalación

deducido de la disposición serie-paralelo más conveniente, obtenida a partir de la tabla 6.39 de la sección anterior 6.4.1.1.1.2.4.2 es:

$$C = 3 (55924) \quad [6.65]$$

$$\text{ó; } C = 167772 \text{ [DOLARES]} \quad [6.66]$$

Transcribiendo la ecuación [5.65] de la sección 5.3.2.1 se tiene que:

$$VP(C) = \frac{C}{(1+i)^n} \quad [6.67]$$

En la ecuación [6.67] se hace que:

$$C = 167772 \text{ [DOLARES]} \quad [6.68]$$

$$i = 8 \text{ [\%]} \quad [6.69]$$

$$n = 2 \text{ [AÑOS]} \quad [6.70]$$

Efectuando cálculos en [6.67] se tiene que el costo de la instalación traído a valor presente al año 1986 es:

$$VP(C) = \frac{167772}{(1+0.08)^2} \quad [6.71]$$

$$\text{ó; } VP(C) = 143837 \text{ [DOLARES]} \quad [6.72]$$

6.4.1.1.1.2.4.3.2 Cálculo del valor presente del costo de las pérdidas.

La determinación del valor presente del costo de las pérdidas se lo hace tomando en cuenta las mismas consideraciones 1.- y 2.- de la sección 6.4.1.1.1.2.1.3.2.

En la tabla 6.41 se tabulan para las cargas netas máximas correspondientes los valores de la magnitud del voltaje terminal de

TABLA 6.41

		$e_s = 1.016$ [P.U] $e_s = 70.104$ [KY]						
		CARGA NETA MAXIMA		300 [%] COMPENSACION SERIE				
AÑO	POTENCIA ACTIVA	POTENCIA REACTIVA	VOLTAJE TERMINAL DE RECEPCION		ANGULO DE OPERACION DE LA LINEA	CORRIENTE DE LA LINEA	POTENCIA ACTIVA DE ENVIO	POTENCIA ACTIVA PERDIDA
	P_L	Q_L	e_r	e_r	Δ	i	P_s	$P_p = P_s - P_L$
	[MW]	[MYAR]	[KY]	[P.U]	[°]	[A]	[MW]	[MW]
1988	30.8	8.3	66.935	0.970	-19.192	275.144	33.323	2.523
1989	33.0	9.2	66.537	0.964	-20.797	297.265	35.945	2.945
1990	35.1	10.1	66.117	0.958	-22.384	318.939	38.491	3.391
1991	37.5	11.1	65.518	0.950	-24.287	344.626	41.458	3.958

recepción (entre fases), ángulo de operación de la línea, magnitud de la corriente de línea, potencia activa de envío y potencia activa de pérdidas.

La tabla 6.41 se elabora en forma similar a la tabla 6.17, es decir siguiendo el procedimiento de cálculo dado en el Apéndice 6A5, pero como es obvio utilizando los datos pertinentes y con la acotación de que la reactancia capacitiva del condensador en serie que se usa es la reactancia nominal dada en la tabla 6.40.

Para el lapso de la vida media útil de la compensación serie de 20 [AÑOS] y usando los valores de potencia activa perdida proporcionados por la tabla 6.41, en la tabla 6.42 se tabulan: el costo de las pérdidas, el valor presente al año 1986 del costo de las pérdidas, así como el total de los valores presentes al año 1986 de los costos de las pérdidas. La confección de la tabla 6.42 es similar a la de la tabla 6.18, o sea siguiendo el procedimiento de cálculo del Apéndice 6A6.

TABLA 6.42

300 [%] COMPENSACION SERIE			
AÑO	POTENCIA ACTIVA PERDIDA	COSTO DE LAS PERDIDAS	VALOR PRESENTE AL AÑO 1986 DEL COSTO DE LAS PERDIDAS
	P_p	$C_{pp} = 63875 P_p$	VP (C_{pp})
	[MW]	[DOLARES]	[DOLARES]
1988	2.523	161157	138166
1989	2.945	188112	149329
1990	3.391	216600	159207
1991, ..., 2007	3.958	252817	1'695056
TOTAL DE LOS VALORES PRESENTES AL AÑO 1986 DE LOS COSTOS DE LAS PERDIDAS		$\sum_{j=1988}^{2007} VP(C_{ppj})$	[DOLARES] 2'141758

6.4.1.1.1.2.4.3.3 Valor económico del 300 [%] de compensación serie.

En la tabla 6.43 se tabulan los siguientes rubros:

- 1.- Valor presente al año 1986 del costo de la instalación, tomado de [6.72].
- 2.- Total de los valores presentes al año 1986 de todos los costos de las pérdidas, tomado de la tabla 6.42.
- 3.- Valor económico del 300 [%] de compensación serie, formado por la suma de los rubros mencionados en los numerales 1.- y 2.-.

TABLA 6.43

300 [%] COMPENSACION SERIE		
VALOR PRESENTE AL AÑO 1986 DEL COSTO DE LA INSTALACION	TOTAL DE LOS VALORES PRE- SENTES AL AÑO 1986 DE LOS COSTOS DE LAS PERDIDAS	VALOR ECONOMICO
[DOLARES]	[DOLARES]	[DOLARES]
143837	2'141758	2'285595

6.4.1.1.1.2.5 Determinación del porcentaje de compensación serie.

En la tabla 6.44 se tabulan los rubros de: valor presente al año 1986 del costo de la instalación, total de los valores presentes al año 1986 de los costos de las pérdidas y valor económico; para los porcentajes de compensación serie del 150 [%], 200 [%], 250 [%] y 300 [%], que se han tomado respectivamente de las tablas 6.19, 6.27, 6.35 y 6.43.

TABLA 6.44

PORCENTAJE DE COMPENSACION SERIE	VALOR PRESENTE AL AÑO 1986 DEL COSTO DE LA INSTALACION	TOTAL DE LOS VALORES PRESENTES AL AÑO 1986 DE LOS COSTOS DE LAS PERDIDAS	VALOR ECONOMICO
[%]	[DOLARES]	[DOLARES]	[DOLARES]
150	71919	2'170095	2'242014
200	98071	2'115220	2'213291
250	122500	2'102152	2'224652
300	143837	2'141758	2'285595

Para los valores de la tabla 6.44; en las FIG 6.6, FIG 6.7 y FIG 6.8 respectivamente se trazan las curvas de: valor presente al año 1986 del costo de la instalación versus porcentaje de compensación serie, total de los valores presentes al año 1986 de los costos de las pérdidas versus porcentaje de compensación serie y valor económico versus porcentaje de compensación serie.

De la FIG 6.8 se puede determinar que para el 219 [%] de compensación serie se tiene el menor valor económico que con otros porcentajes de compensación serie, motivo por el cual se selecciona el 219 [%] de compensación serie.

6.4.1.1.2 Tamaño del condensador en serie.

Para la carga neta máxima del año 1991 en la tabla 6.45 se encuentran tabulados los valores de la magnitud del voltaje terminal de recepción (entre fases), ángulo de operación de la línea y magnitud de la corriente de línea para el porcentaje de compensación serie seleccionado del 219 [%].

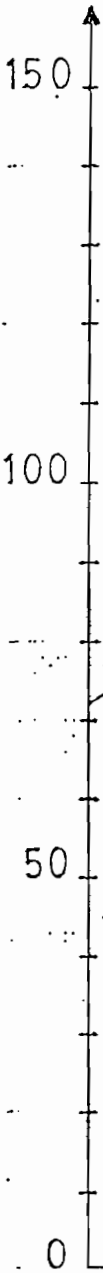
TABLA 6.45

CARGA NETA MAXIMA		219 [%] COMPENSACION SERIE				
AÑO	POTENCIA ACTIVA	POTENCIA REACTIVA	VOLTAJE TERMINAL DE RECEPCION	ANGULO DE OPERACION DE LA LINEA	CORRIENTE DE LA LINEA	
	P_L [MW]	Q_L [MYAR]	e_r [KV]	e_r [P.U]	Δ [°]	i [A]
1991	37.5	11.1	66.232	0.960	-14.672	340.911

FIG.6.6
valor presente al año 1986 del costo de la instalación
vs
% comp. serie

VALOR PRESENTE AL AÑO 1986 DEL COSTO DE LA INSTALACION
(costo de la instalación restringido al costo FOB de las unidades cpctvas)

[\$] × 10³



PORCENTAJE DE COMPENSACION SERIE [%]

FIG.6.7

total de los valores presentes al año 1986 de los costos de las pérdidas

vs

190

% comp. serie

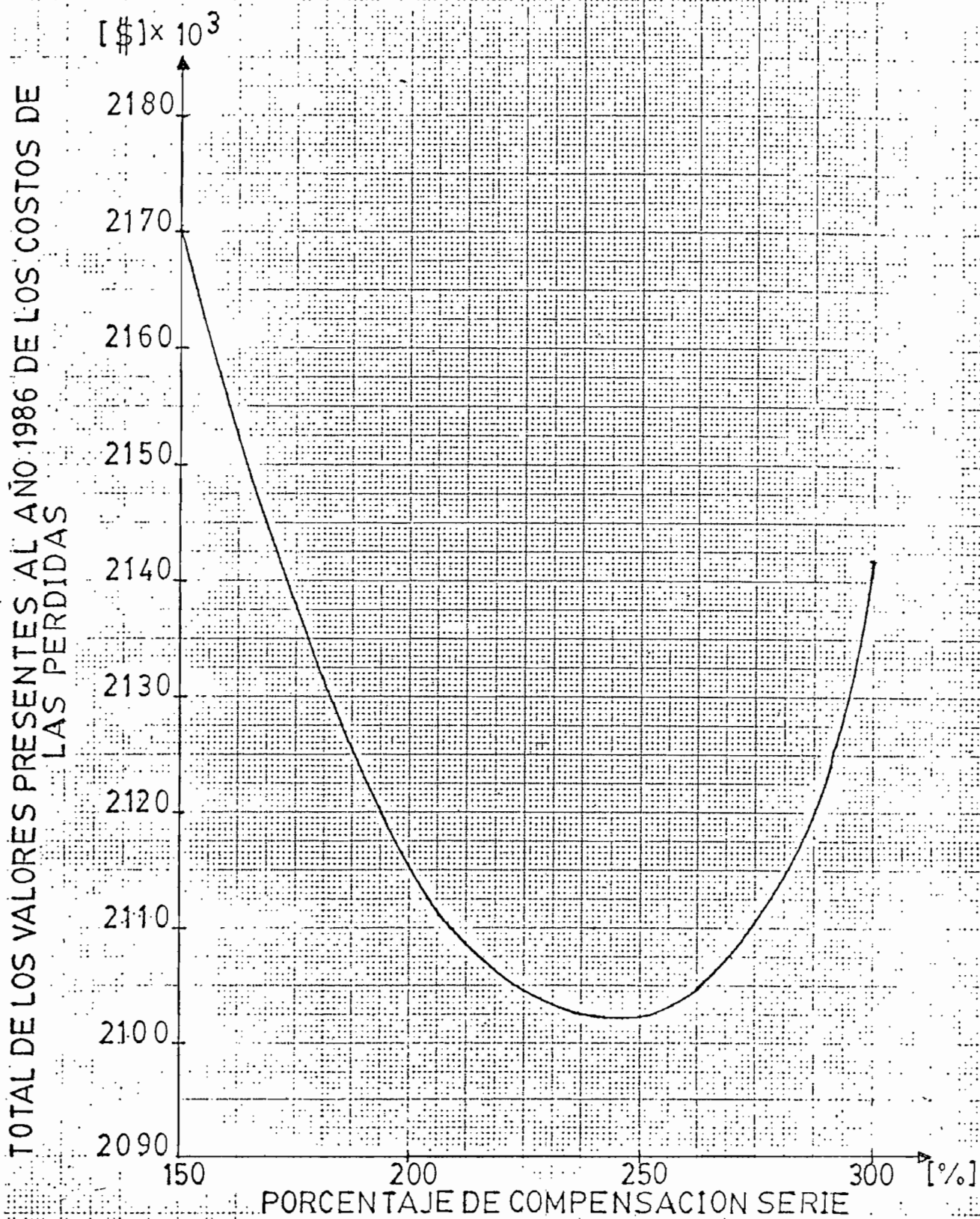
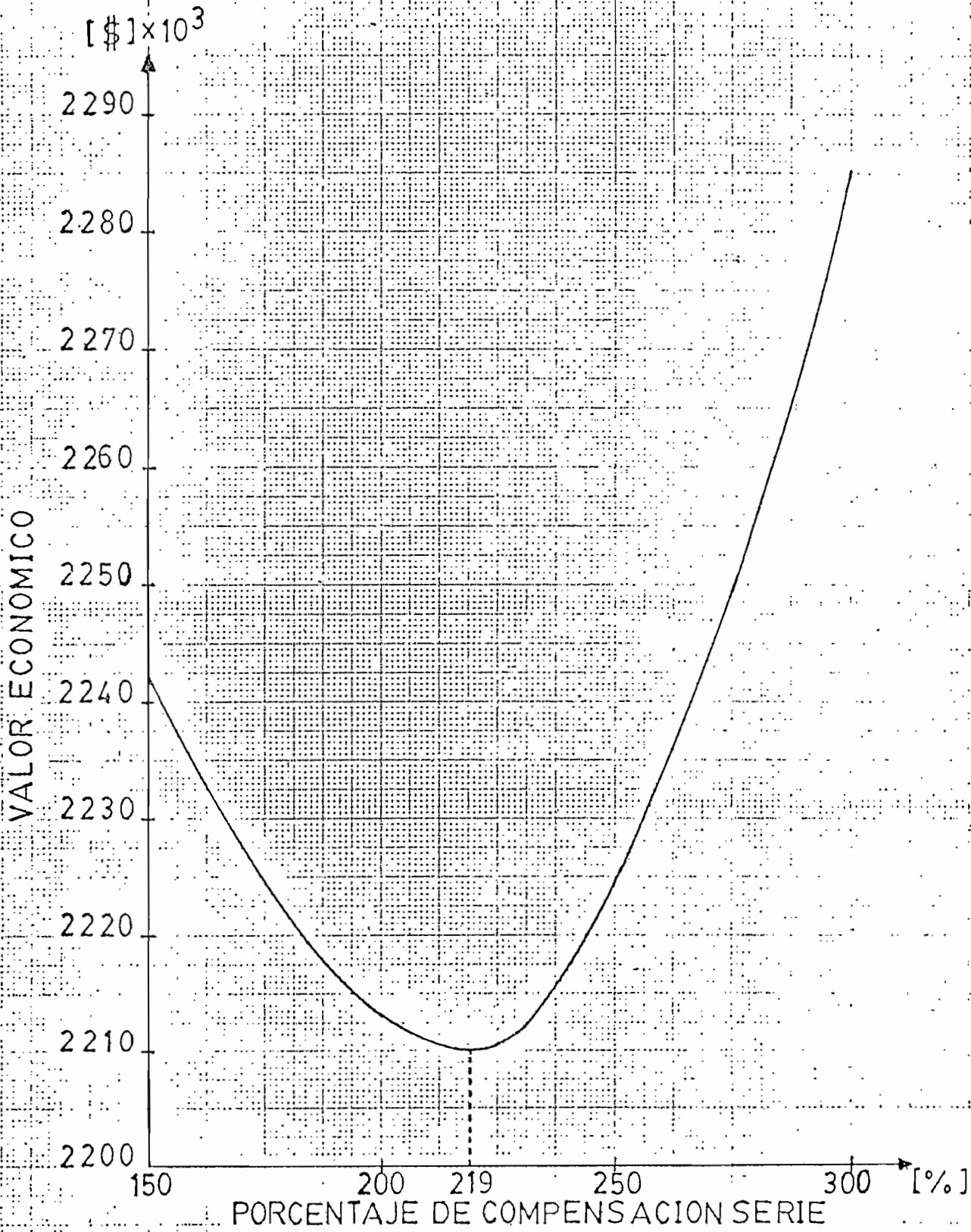


FIG.6.8

valor económico vs % comp.serie



La tabla 6.45 es una tabla confeccionada siguiendo el mismo procedimiento de cálculo que se usa para la conformación de la tabla 6.10, es decir, siguiendo el proceso señalado en la sección 6A2.3 del Apéndice 6A2, lógicamente utilizando los datos pertinentes.

El 219 [%] de compensación serie corresponde a un condensador en serie que en cada fase de la línea, tiene un valor óhmico que es el 219 [%] de la reactancia inductiva de la línea ($X_L = 23.59$ [OHM]), con lo que la reactancia capacitiva del condensador en serie es, de acuerdo a la ecuación [3.1] de la sección 3.11.

$$X_{cs} = 2.19 (23.59) \quad [6.73]$$

$$\text{ó; } X_{cs} = 51.662 \text{ [OHM]} \quad [6.74]$$

La corriente a través del condensador en serie [I_{cs}], es la misma que la corriente de línea [i], pues, el condensador está en serie con la línea, por tanto, de la tabla 6.45 se tiene que:

$$I_{cs} = 340.911 \text{ [A]} \quad [6.75]$$

Reemplazando en la ecuación [6.14] los valores de [X_{cs}] y de [I_{cs}] dados respectivamente por [6.74] y [6.75]; el voltaje a través del condensador en serie es:

$$E_{cs} = 340.911 (51.662) \quad [6.76]$$

$$\text{ó; } E_{cs} = 17612.14 \text{ [V]} \quad [6.77]$$

En la ecuación [6.17], reemplazando los valores de [I_{cs}] y [E_{cs}] dados respectivamente por [6.75] y [6.77], el tamaño del condensador en serie en cada fase de la línea es:

$$Q_{cs} = \frac{17612.14 (340.911)}{1\,000\,000} \quad [6.78]$$

$$\text{ó; } Q_{cs} = 6.00 \text{ [MVAR]} \quad [6.79]$$

En la tabla 6.45 se resumen las características que en cada fase de la línea, debe tener el condensador en serie correspondiente al 219 [%] de compensación serie.

TABLA 6.46

219 [%] COMPENSACION SERIE			
CARACTERISTICAS DEL CONDENSADOR EN SERIE (VALORES ANALITICOS)			
X_{cs} [OHM]	I_{cs} [A]	E_{cs} [V]	Q_{cs} [MVAR]
51.662	340.911	17612.14	6.00

6.4.1.1.3 Selección del condensador en serie.

La disposición serie-paralelo más conveniente se la determina siguiendo las mismas consideraciones de los numerales 1.-, 2.- y 3.- de la sección 6.4.1.1.2.1.2..

En la tabla 6.47 se tiene información del número mínimo recomendado de condensadores unidad en paralelo por grupo serie que debe existir de acuerdo al número de grupos serie de que esté provisto el condensador en serie de suerte de cumplir las consideraciones 1.- y 2.- de la sección 4.1.3.

TABLA 6.47

**219 [%]
COMPENSACION SERIE**

NUMERO DE GRUPOS SERIE POR FASE	NUMERO MINIMO DE CONDENSADORES UNIDAD EN PARALELO POR GRUPO SERIE	CORRIENTE DE CORTOCIR- CUITO A TRAVES DEL FUSIBLE EN YECES LA CORRIENTE NOMINAL DEL CONDENSADOR UNIDAD	VOLTAJE EN LAS UNI- DADES RESTANTES DEL GRUPO SERIE, AL SALIR UN CONDENSA- DOR DE DICHO GRUPO
N	M	I_f	e_f % [%]
1	11	12.807	109.939
2	11	11.402	109.937
3	11	11.195	109.950
4	11	11.121	109.960
5	11	11.084	109.967
6	11	11.064	109.971
7	11	11.050	109.975
8	11	11.041	109.977
9	11	11.035	109.980
10	11	11.030	109.981
11	11	11.026	109.983
12	11	11.023	109.984
13	11	11.021	109.985
14	11	11.019	109.986
15	11	11.017	109.987

La confección de la tabla 6.47 se hace siguiendo un procedimiento análogo al de la tabla 6.13.

De la tabla 6.47 se establece también lo indicado en el numeral 4.- de la sección 6.4.1.1.2.1.2.

Siguiendo un procedimiento análogo al que sirvió para elaborar la tabla 6.14 de la sección 6.4.1.1.2.1.2; se confecciona la tabla 6.48, tabla esta en la cual se muestran varias disposiciones serie-paralelo de condensadores unidad, al utilizar unidades de 50 [KVAR], 100 [KVAR], 150 [KVAR] y 200 [KVAR] nominales.

Con fines de selección del condensador en serie, el costo de una disposición serie-paralelo técnicamente apropiada se circunscribe al obtenido solamente tomando en cuenta el costo [FOB] de los condensadores unidad que forman dicha disposición y es así como prestando atención a las consideraciones a.- ó b.- de la sección 6.4.1.1.2.1.2; en la tabla 6.49 se tabulan las disposiciones serie-paralelo técnicamente factibles y los valores nominales correspondientes a cada una de ellas, que se han tomado de la tabla 6.48; a la vez que se tabulan el costo de las unidades y el costo de cada disposición de acuerdo al costo que para el año 1986 se ha obtenido mediante el uso de catálogos de la Westinghouse.

De la tabla 6.49 se establece que:

- 1.- Lo que se dijo en el literal d.- de la sección 6.4.1.1.2.1.2.
- 2.- La disposición serie-paralelo más conveniente es aquella que utiliza en cada fase de la línea: condensadores unidad de 200 [KVAR] nominales y 9540 [V] nominales, 2 grupos serie por fase, 17 condensadores unidad en paralelo por grupo serie y 34

TABLA 6.48

219 [%]
COMPENSACION SERIE

KYARs NOMINALES POR UNIDAD	GRUPOS SERIE POR FASE	UNIDADES EN PARALE- LO POR GRUPO SERIE	CANTIDAD DE UNIDADES POR FASE	MYARs POR FASE		VOLTAJE DE LAS UNIDADES		VOLTAJE A TRAVES DEL CONDENSADOR EN SERIE		CORRIENTE A TRAVES DEL CONDENSADOR EN SERIE		REACTANCIA CAPACITIVA DEL CONDENSADOR EN SERIE		TOLERANCIA EN LA REACT. CAPACITIVA DEL CONDEN. EN SERIE
				VALOR ANALITICO	VALOR NOMINAL	VALOR ANALITICO	VALOR NOMINAL	VALOR ANALITICO	VALOR NOMINAL	VALOR ANALITICO	VALOR NOMINAL	VALOR ANALITICO	VALOR NOMINAL	
Q_n [KYAR]	N	M	q MN	Q_{cs} [MYAR]	Q_{cs} [MYAR]	E_n [V]	E_n [V]	E_{cs} [V]	E_{cs} [V]	I_{cs} [A]	I_{cs} [A]	X_{cs} [OHM]	X_{cs} [OHM]	ϵ [%]
50	8	17	136	6.00	6.80	2201.52	2400	17612.14	19200	340.911	354.17	51.662	54.21	4.70*
	5	29	145		7.25	3522.43	4160		20800		348.56		59.67	13.42
	4	33	132		6.60	4403.04	4800		19200		343.75		55.85	7.50
	3	46	138		6.90	5870.71	6640		19920		346.39		57.51	10.17
	2	66	132		6.60	8806.07	9540		19080		345.91		55.16	6.34
100	5	15	75	6.00	7.50	3522.43	4160	17612.14	20800	340.911	360.58	51.662	57.69	10.45
	4	17	68		6.80	4403.04	4800		19200		354.17		54.21	4.70*
	3	23	69		6.90	5870.71	6640		19920		346.39		57.51	10.17
	2	33	66		6.60	8806.07	9540		19080		345.91		55.16	6.34
	1	68	68		6.80	17612.14	19920		19920		341.37		58.35	11.46
150	4	12	48	6.00	7.20	4403.04	4800	17612.14	19200	340.911	375.00	51.662	51.20	-0.90*
	3	16	48		7.20	5870.71	6640		19920		361.45		55.11	6.26
	2	22	44		6.60	8806.07	9540		19080		345.91		55.16	6.34
	1	46	46		6.90	17612.14	19920		19920		346.39		57.51	10.17
200	3	12	36	6.00	7.20	5870.71	6640	17612.14	19920	340.911	361.45	51.662	55.11	6.26
	2	17	34		6.80	8806.07	9540		19080		356.39		53.53	3.49*
	1	34	34		6.80	17612.14	19920		19920		341.37		58.35	11.46

*: Disposición serie-paralelo técnicamente factible

TABLA 6.49

219 [%]
COMPENSACION SERIE

KVARs NOMINALES POR UNIDAD	VOLTAJE NOMINAL DE LA UNIDAD	GRUPOS SERIE POR FASE	UNIDADES EN PARALE- LO POR GRUPO SERIE	CANTIDAD DE UNIDADES POR FASE	VALORES NOMINALES DEL CONDENSADOR EN SERIE				COSTO PÓR UNIDAD	COSTO DEL CONDENSADOR EN SERIE
					REACTANCIA NOMINAL	CORRIENTE NOMINAL	VOLTAJE NOMINAL	MVARs NOMINAL		
Q_n [KVAR]	E_n [V]	N	M	q_c MN	X_{CS} [OHM]	I_{CS} [A]	E_{CS} [V]	Q_{CS} [MVAR]	[DOLARES].	[DOLARES]
50	2400	8	17	136	54.21	354.17	19200	6.80	750	102000
100	4800	4	17	68	54.21	354.17	19200	6.80	967	65756
150	4800	4	12	48	51.20	375.00	19200	7.20	1106	53088
200	9540	2	17	34	53.53	356.39	19080	6.80	1271	43214*

* : Disposición serie-paralelo más económica.

condensadores unidad por fase, ya que para esta disposición se obtiene el menor costo que con otras disposiciones.

De la tabla 6.49 se extraen y se tabulan en la tabla 6.50 los valores nominales que en cada fase de la línea tiene el condensador en serie correspondiente a la disposición serie-paralelo más conveniente.

TABLA 6.50

219 [Ø] COMPENSACION SERIE			
CARACTERISTICAS DEL CONDENSADOR EN SERIE (VALORES NOMINALES)			
REACTANCIA NOMINAL	CORRIENTE NOMINAL	VOLTAJE NOMINAL	MVARs NOMINAL
X_{cs} [OHM]	I_{cs} [A]	E_{cs} [V]	Q_{cs} [MVAR]
53.53	356.39	19080	6.80

Los valores nominales de cada condensador unidad son:

- Voltaje nominal [E_n]: 9540 [V]
- Potencia reactiva nominal [Q_n]: 200 [KVAR]
- Frecuencia nominal [f_e]: 60 [HZ]

Dado que la línea Ambato-Riobamba tiene un voltaje nominal entre fases de $V_{LL} = 69$ [KV] significa que el voltaje máximo de operación (entre fases) es $U_m = 1.05 [V_{LL}]$ ó $U_m = 72.5$ [KV], por lo que de acuerdo a la tabla 4.1 de la sección 4.1.2, considerando que el tanque de los condensadores unidad está al potencial de tierra, se tiene que el nivel de aislamiento para los condensadores unidad es:

Voltajes de prueba a la frecuencia de la red

- Aislación interna: 140 [KV]
- Aislación externa: 140 [KV]

Voltaje de prueba al impulso

- Prueba al impulso: 325 [KV pico]

6.4.1.1.4 Verificación de que el condensador en serie cumple los requerimientos de la carga.

Habiéndose seleccionado el condensador en serie en base a la carga neta máxima del año 1991, con el propósito de verificar que el condensador en serie seleccionado satisface los requerimientos enunciados en los numerales 1.- y 2.- de la sección 5.1.3, es suficiente efectuar la verificación para las cargas que se tienen para los años 1988 y 1991, ya que si se cumplen para las cargas de estos dos años, obviamente también se cumplirán para las cargas de los años intermedios entre 1988 y 1991.

En las tablas 6.51, 6.52 y 6.53 se tabulan los valores de: la magnitud del voltaje terminal de recepción (entre fases), ángulo de operación de la línea y magnitud de la corriente de línea respectivamente para las condiciones de: carga neta máxima, carga neta media y carga neta mínima de los años 1988 y 1991.

TABLA 6.51

		$e_s = 1.016$ [P.U] $e_s = 70.104$ [KV]				
		219 [%] COMPENSACION SERIE				
CARGA NETA MAXIMA						
AÑO	POTENCIA ACTIVA	POTENCIA REACTIVA	VOLTAJE TERMINAL DE RECEPCION		ANGULO DE OPERACION DE LA LINEA	CORRIENTE DE LA LINEA
	P_L [MW]	Q_L [MYAR]	e_r [KV]	e_r [P.U]	Δ [°]	i [A]
1988	30.8	8.3	67.055	0.972	-12.462	274.651
1991	37.5	11.1	66.263	0.960	-15.560	340.751

TABLA 6.52

		$e_s = 1.016$ [P.U] $e_s = 70.104$ [KV]				
		219 [%] COMPENSACION SERIE				
CARGA NETA MEDIA						
AÑO	POTENCIA ACTIVA	POTENCIA REACTIVA	VOLTAJE TERMINAL DE RECEPCION		ANGULO DE OPERACION DE LA LINEA	CORRIENTE DE LA LINEA
	P_L [MW]	Q_L [MYAR]	e_r [KV]	e_r [P.U]	Δ [°]	i [A]
1988	20.53	5.53	68.493	0.993	-8.095	179.222
1991	25.00	7.40	68.214	0.989	-10.004	220.670

TABLA 6.53

		$e_s = 1.016$ [P.U] $e_s = 70:104$ [KV]				
		219 [%] COMPENSACION SERIE				
CARGA NETA MINIMA						
AÑO	POTENCIA ACTIVA	POTENCIA REACTIVA	VOLTAJE TERMINAL DE RECEPCION		ANGULO DE OPERACION DE LA LINEA	CORRIENTE DE LA LINEA
	P_L [MW]	Q_L [MYAR]	e_r [KV]	e_r [P.U]	Δ [°]	i [A]
1988	10.27	2.77	69.486	1.007	-3.982	88.381
1991	12.5	3.7	69.444	1.006	-4.894	108.380

Las tablas 6.51, 6.52 y 6.53 se han confeccionado siguiendo el mismo procedimiento de cálculo que se usa para la conformación de la tabla 6.10, es decir siguiendo el procedimiento señalado en la sección 6A2.3 del Apéndice 6A2, lógicamente usando los datos pertinentes, con la acotación de que la reactancia capacitiva del condensador en serie que se ha utilizado es la reactancia nominal dada en la tabla 6.50.

De las tablas 6.51, 6.52 y 6.53 se puede confirmar que el condensador en serie seleccionado satisface los requerimientos técnicos recalcados en los numerales 1.- y 2.- de la sección 5.1.3 para las condiciones de cargas netas: máxima, media y mínima; pues se puede observar que la magnitud del voltaje terminal de recepción (entre fases) se encuentra dentro del rango permisible y además la magnitud de la corriente de línea no sobrepasa el valor del límite térmico.

6.4.1.1.5 Localización del condensador en serie.

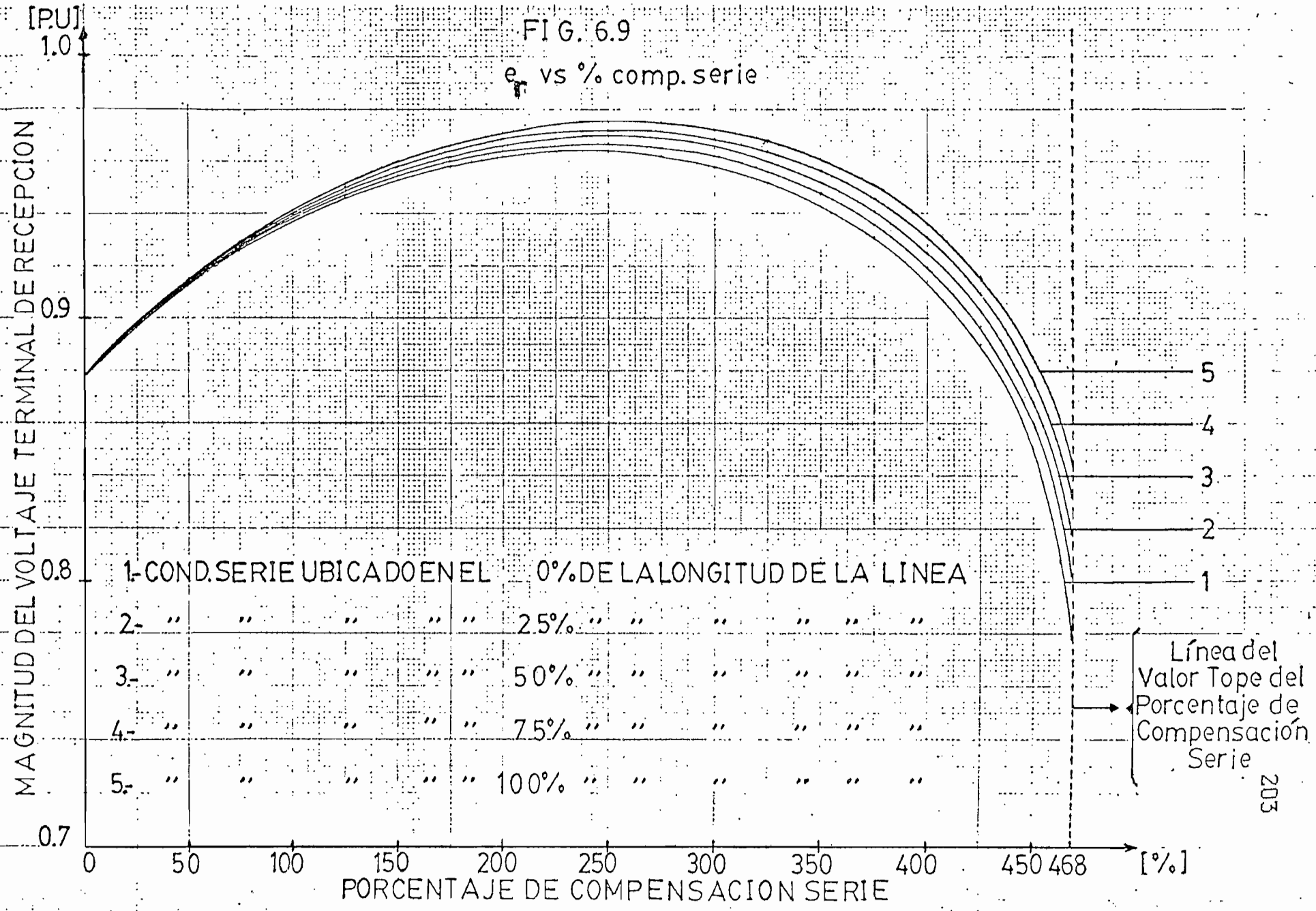
Los requerimientos técnicos recalcados en los numerales 1.- y 2.- de la sección 5.1.3 son correspondientemente los mismos que con fines de localización del condensador en serie, se enunciaron en los numerales 1.- y 2.- de la sección 3.3 y habiéndose establecido en la sección anterior 6.4.1.1.5 que el condensador seleccionado satisface los requerimientos técnicos de los numerales 1.- y 2.- de la sección 5.1.3 para las condiciones de carga neta máxima, media y mínima de los años que van desde el año 1988 al año 1991, se deduce fácilmente, que para establecer la localización más adecuada del condensador en serie seleccionado, de suerte de cumplir con los requerimientos 1.- y 2.- de la sección 3.3, es suficiente tomar cualquier carga neta máxima, media o mínima de cualquiera de los años que van desde el año 1988 al año 1991 y precisar para que localización de las tres posibles que se indicaron en la sección 3.1.2 se tienen los mejores niveles de voltaje en el terminal de recepción.

El programa digital al que se hizo alusión en la sección 3.3.3 y cuya descripción más detallada se encuentra en el Apéndice 6A7; se usa para establecer la ubicación más adecuada de un condensador en serie. La ubicación del condensador en serie se la establecerá en base a la carga neta máxima del año 1988 y en el Apéndice 6A8 se ilustra la salida que para dicha carga proporciona la corrida del programa digital.

Tomando los valores proporcionados por la corrida del programa digital para la carga neta máxima del año 1988 en las FIG 6.9, FIG 6.10 y FIG 6.11 se grafizan respectivamente las curvas de: magnitud del voltaje terminal de recepción (entre fases), magnitud de la corriente de línea (en el terminal de envío) y ángulo de operación de la línea versus el porcentaje de compensación serie. En las FIG 6.9, FIG 6.10 y FIG 6.11 la llamada línea del

FIG. 6.9

e_r vs % comp. serie



PORCENTAJE DE COMPENSACION SERIE

FIG. 6.10

i_s vs % comp. serie

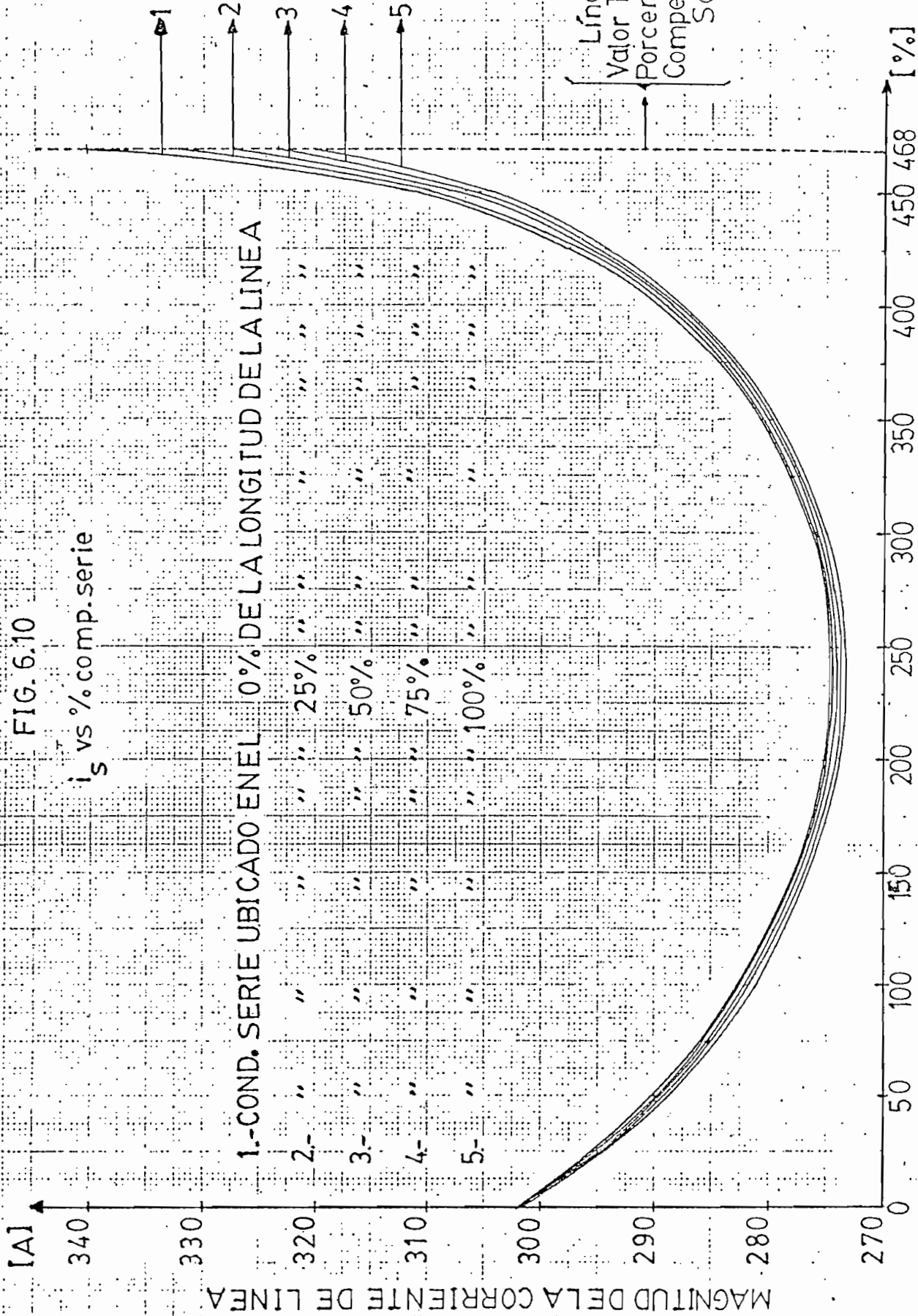
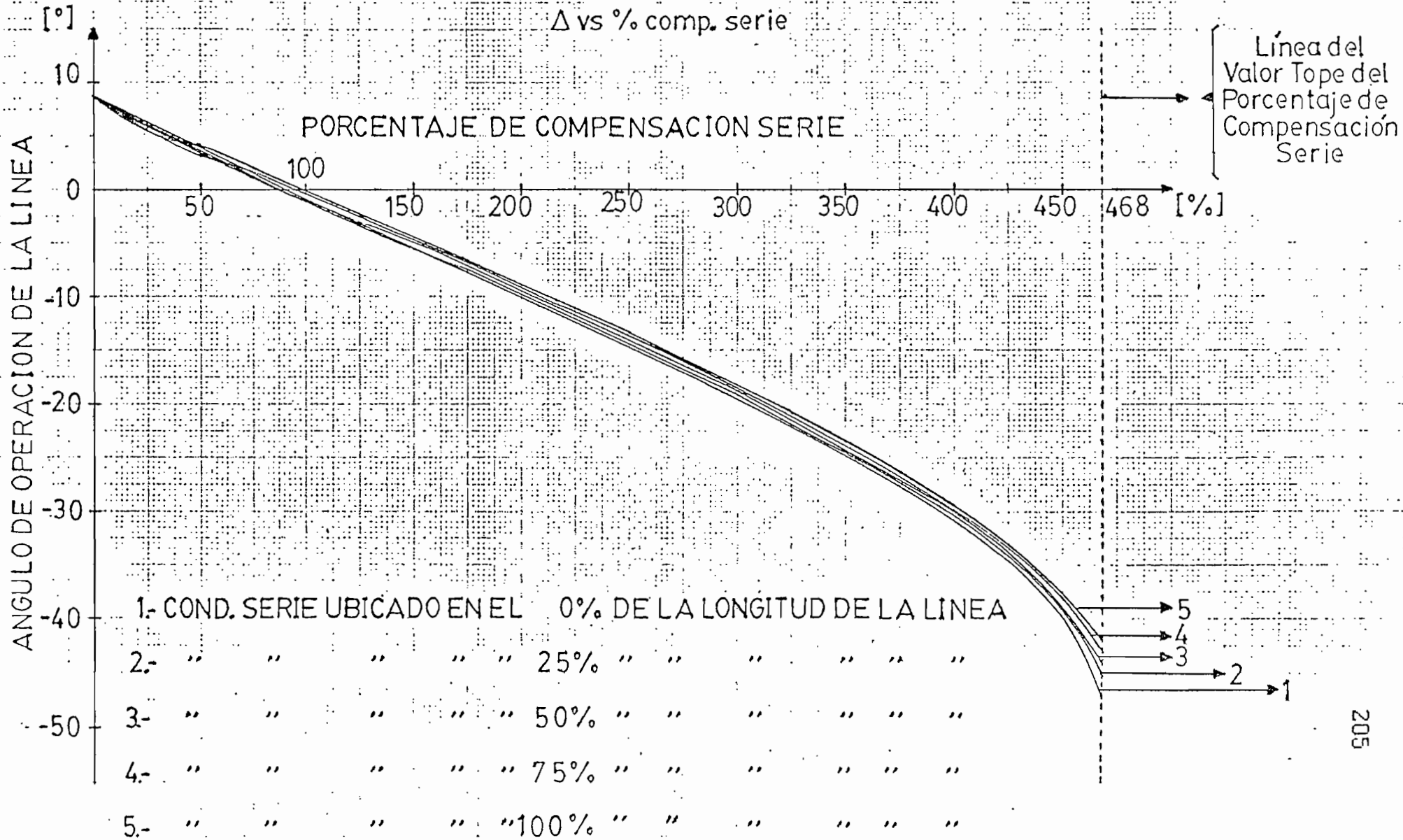


FIG. 6.11

Δ vs % comp. serie



valor tope del porcentaje de compensación serie no es más que una recta paralela al eje de las ordenadas que pasa por el valor tope del porcentaje de compensación serie.

De las FIG 6.9, FIG 6.10 y FIG 6.11 se establece lo siguiente:

- 1.- De la Fig 6.11 se desprende que:
 - 1.a.- Para cualquier porcentaje de compensación serie, exceptuando el 0 [%], a medida que la localización del condensador en serie se acerca al terminal de recepción, el ángulo de operación de la línea va disminuyendo.
 - 1.b.- Para cualquier localización del condensador en serie, a medida que va aumentando el porcentaje de compensación serie, el ángulo de operación de la línea va disminuyendo.
- 2.- De la FIG 6.10, se desprende que para cualquier porcentaje de compensación serie exceptuando el 0 [%], que a medida que la localización del condensador en serie se acerca al terminal de recepción, la magnitud de la corriente de línea va disminuyendo.
- 3.- De la FIG 6.9 se desprende que para cualquier porcentaje de compensación serie, exceptuando el 0 [%], que a medida que la localización del condensador en serie se acerca al terminal de recepción van mejorando los niveles de voltaje en el terminal de recepción, por lo que en general para cualquier porcentaje de compensación serie y en particular para el 219 [%], la localización más adecuada del condensador en serie seleccionado, es en el terminal de recepción.

Es interesante observar la analogía existente de las curvas de la FIG 6.9 con la curva de la FIG 6.2 y con la curva de la FIG 6.4, como también de

las curvas de la FIG 6.10 con la curva de la FIG 6.3 y con la curva de la FIG 6.5.

En la FIG 6.12 se muestra el diagrama fasorial para varios porcentajes de compensación serie que van desde el 0 [%] al 468 [%] (valor tope del porcentaje de compensación serie), que se ha confeccionado tomando valores de $[i_s]$, $[e_r]$, $[\Delta]$ y $[e_s]$ correspondientes a la ubicación del condensador en serie en el terminal de recepción dados por la corrida del programa digital para la carga neta máxima del año 1988. La elaboración del diagrama fasorial de la FIG 6.12 presupone como es obvio que $i = i_s$, es decir que la corriente de línea es la misma en cualquier punto de ella y que el ángulo de desfase $[\theta_i]$ de $[i]$ con respecto a $[e_r]$ no es otra cosa que el ángulo del factor de potencia de la carga neta máxima del año 1988 es decir;

$$\theta_i = \operatorname{tg}^{-1} \frac{8.3}{30.8} = 15.08 [^\circ]$$

Hay que destacar que en la FIG 6.12 se encuentran resumidas en forma fasorial las FIG 6.9, FIG 6.10 y FIG 6.11, pues si bien la FIG 6.12 representa el diagrama fasorial aplicado al caso del condensador en serie localizado en el terminal de recepción, el diagrama fasorial para la localización del condensador en serie para otra ubicación también tendrá la misma tendencia que el diagrama fasorial de la FIG 6.12 puesto que se puede ver que las curvas de la FIG 6.9 tienen la misma tendencia, como también las curvas de la FIG 6.10 y las curvas de la FIG 6.11.

Un aspecto importante que se puede desprender del diagrama fasorial de la FIG 6.12 es lo relacionado al efecto del condensador en serie en el factor de potencia en el terminal de envío; es decir el desfase que va tomando $[i]$ con respecto a $[e_s]$ de acuerdo a como va aumentando el porcentaje de compensación serie. En la FIG 6.13 se traza un gráfico del

Eje Imaginario

10

-10

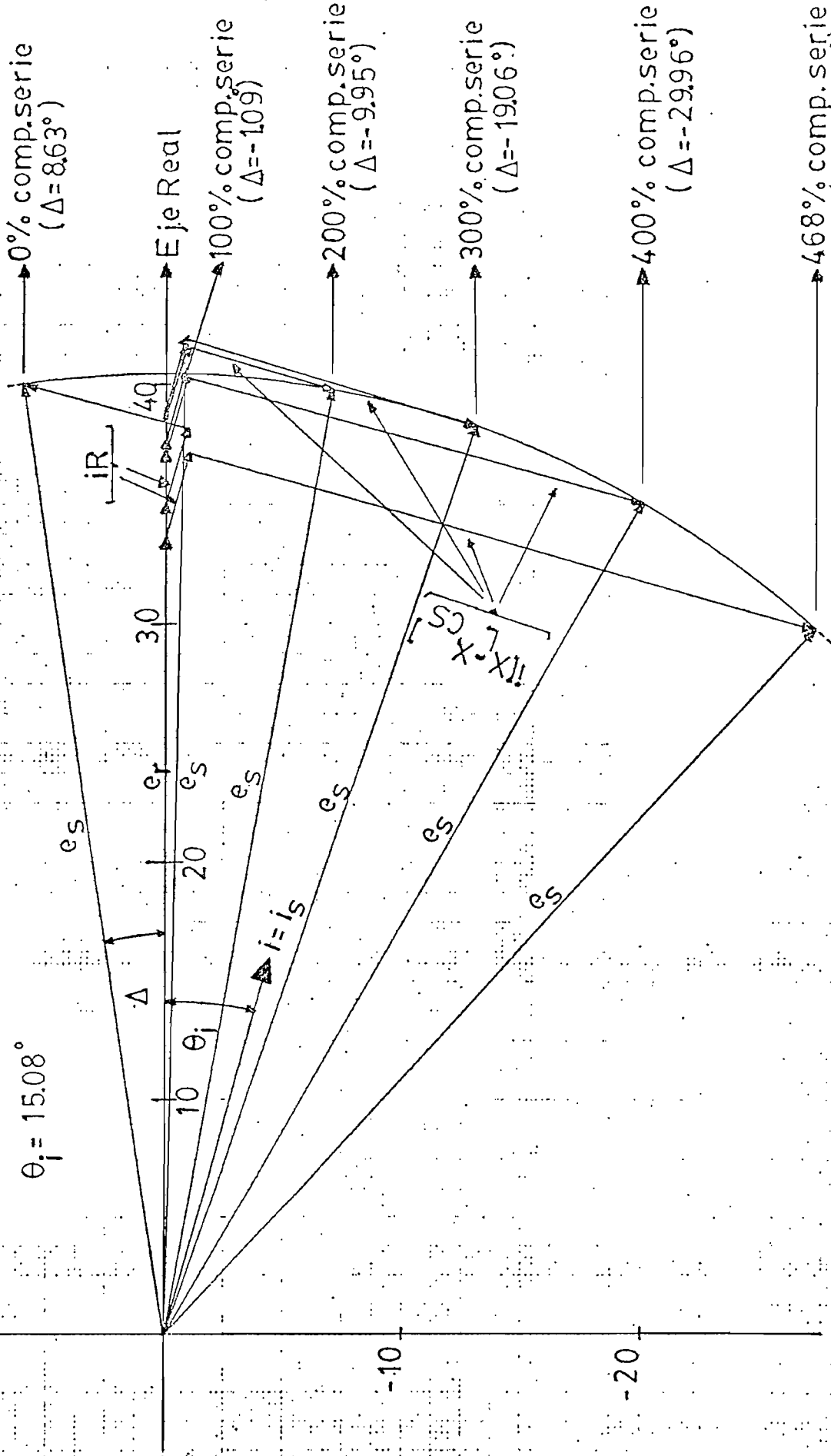
-20

FIG. 6.12

Diagrama fasorial de la línea para el caso: Condensador en serie ubicado en el 100% de la longitud de la línea (e_s, e_r : voltajes fase neutro)

$\theta_j = 15.08^\circ$

Círculo de radio $e_s = \frac{70.104}{\sqrt{3}}$ [KV]



factor de potencia en el terminal de envío en función del porcentaje de compensación serie para la carga neta máxima del año 1988, que ha sido elaborado en base a la FIG 6.12. Observando la FIG 6.13 se puede extraer importantes aspectos.

4.- De la FIG 6.13 se establece lo siguiente:

4.a.- El condensador en serie afecta al factor de potencia en el terminal de envío de una manera tal que a medida que aumenta el porcentaje de compensación serie el factor de potencia en el terminal de envío va tornándose más inductivo o lo que es equivalente, va haciéndose menos capacitivo.

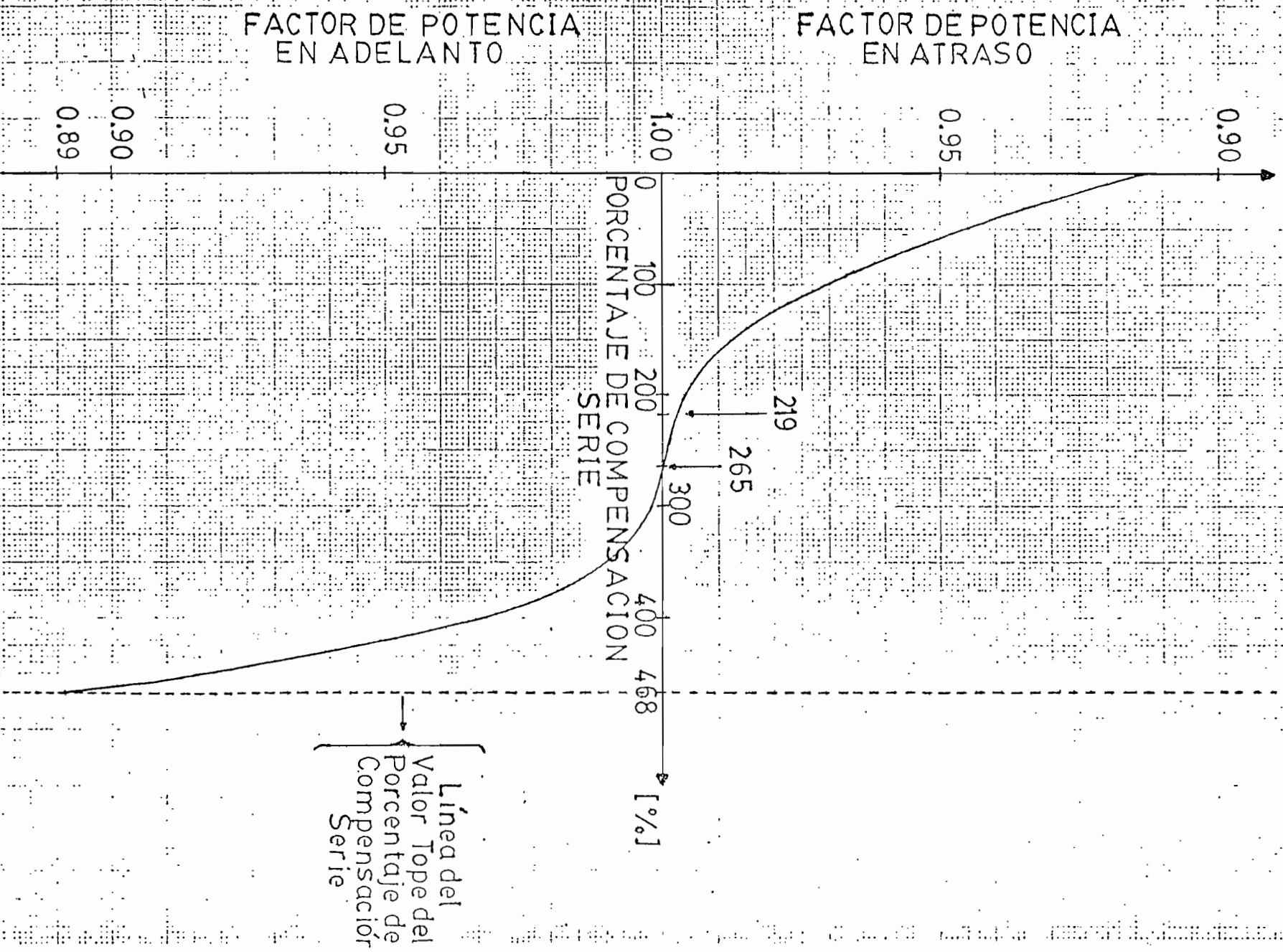
4.b.- El condensador en serie mejora el factor de potencia del terminal de envío pero sólo hasta que el porcentaje de compensación serie ha aumentado hasta alcanzar cierto valor; luego del cual, el aumento del porcentaje de compensación tiene el efecto opuesto al de la mejora del factor de potencia del terminal de envío.

4.c.- Para la carga neta máxima del año 1988 el factor de potencia en el terminal de envío es:

- 1, con el 265 [%] de compensación serie.
- 0.9135 inductivo, con el 0 [%] de compensación serie (es decir sin condensadores en serie)
- 0.9975 inductivo, con el 219 [%] de compensación serie (es decir con el porcentaje de compensación serie seleccionado).

Por otra parte, el programa digital a la vez que se utiliza para determinar la ubicación del condensador en serie se puede también utilizar para efectuar el análisis técnico de la sección 6.4.1.1.1, ya que la corrida

factor de potencia en el terminal de envío
VS
% compensación serie 210



Línea del
Valor Tope del
Porcentaje de
Compensación
Serie

del programa para una carga dada proporciona en forma tabulada los valores de: la magnitud del voltaje terminal de recepción (entre fases), ángulo de operación de la línea y magnitud de la corriente de línea (en el terminal de envío) en pasos de 25 [%] de compensación serie desde el 0 [%] al valor tope del porcentaje de compensación serie, ubicando al condensador en serie en intervalos de 25 [%] de longitud de línea tomados desde el terminal de envío hasta llegar al terminal de recepción. En el Apéndice 6A9 se ilustra la salida que para la carga neta máxima del año 1992 suministra la corrida del programa digital. Confrontando los valores tabulados de la tabla 6.10 que se elaboraron siguiendo el procedimiento de cálculo señalado en el Apéndice 6A2 y los valores tabulados que constan en el Apéndice 6A9 se establece lo siguiente:

- 5.- El valor tope del porcentaje de compensación serie que se tiene para elaborar la tabla 6.10 (389 [%]) es diferente del que se tiene que utilizar para obtener la salida del programa digital que se ilustra en el Apéndice 6A9 (385 [%]), lo cual se debe a que para la conformación de la tabla 6.10 se utilizan parámetros concentrados, en tanto que la ejecución del programa digital se realiza bajo la forma de constantes generalizadas (parámetros distribuidos).
- 6.- Los valores de la tabla 6.10 se aproximan más a los del Apéndice 6A9 en lo concerniente a la ubicación del condensador en serie en el terminal de recepción de la línea, de donde se puede desprender que el procedimiento seguido para la elaboración de la tabla 6.10 mediante parámetros concentrados ofrece una alternativa aceptable para llevar a cabo un análisis técnico de compensación serie.

6.4.1.1.6 El condensador en serie en las desventajas técnicas

6.4.1.1.6.1 Resonancia sub-sincrónica de máquinas sincrónicas.

6.4.1.1.6.1.1 Predicción de resonancia sub-sincrónica de máquinas sincrónicas.

En la FIG 6.1 de la sección 6.2.1 en la S/E-Alao están representados cuatro generadores sincrónicos de iguales características. En la FIG 6.14 se muestra la FIG 6.1 pero con aquellas partes del circuito que se utilizan para realizar el estudio de predicción de resonancia sub-sincrónica para los generadores de Alao y adicionalmente representando al condensador en serie seleccionado y designando a dos de los generadores con $[G_a]$ y a los otros dos con $[G_b]$. A dos de los generadores de Alao se los llama $[G_a]$ y a los otros dos con $[G_b]$ para identificar los efectos que las posibles combinaciones en la operación de los generadores tiene lugar en los resultados de la predicción de resonancia sub-sincrónica.

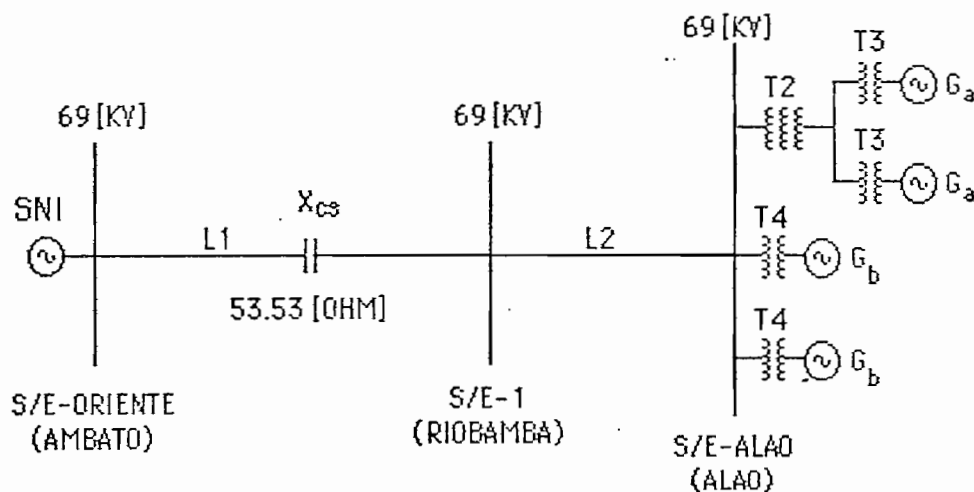


FIG 6.14 Configuración del sistema del ejemplo de aplicación, para la predicción de resonancia sub-sincrónica.

En la tabla 6.54 se muestran los resultados obtenidos para el estudio de predicción de resonancia sub-sincrónica para las posibles combinaciones en la operación de los generadores.

En el Apéndice 6A10 se encuentran los datos utilizados en el diagrama circuital, y el proceso mismo de confección de la tabla 6.54.

De la tabla 6.54 se desprende que para los generadores de Alao, cualquiera sea el número de generadores que esté en operación, no hay posibilidad de que se produzca el fenómeno de resonancia sub-sincrónica inestable y por consiguiente no se requiere otro medio de atenuación o amortiguación adicional al dado por $[R_T]$, siendo $[R_T]$ la resistencia equivalente positiva y $[R_r/S_0]$ una resistencia negativa.

6.4.1.1.6.2 Ferroresonancia de transformadores

6.4.1.1.6.2.1 Predicción de ferroresonancia de transformadores

En la FIG 6.15 se muestra la FIG 6.1 de la sección 6.2.1 pero mostrando adicionalmente al condensador en serie seleccionado.

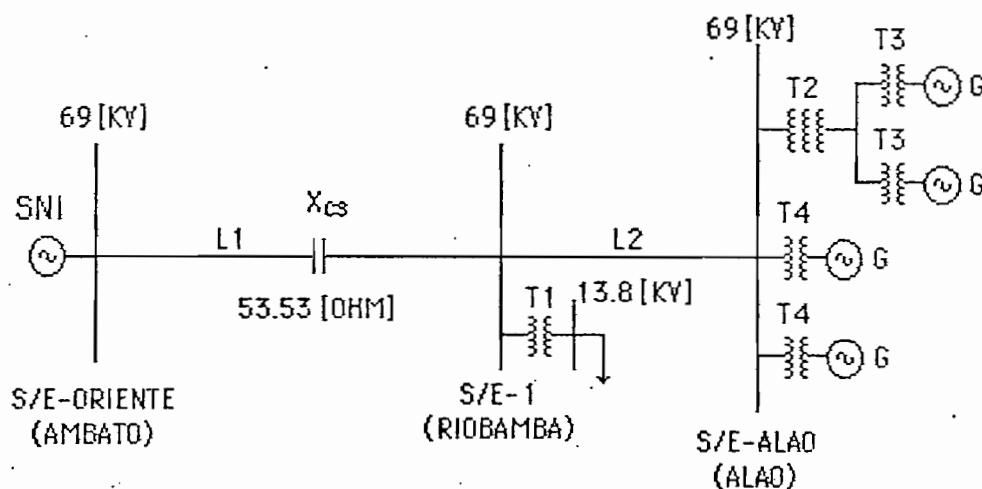


FIG 6.15 FIG 6.1 de la sección 6.2.3 pero representando al condensador en serie seleccionado.

TABLA 6.54

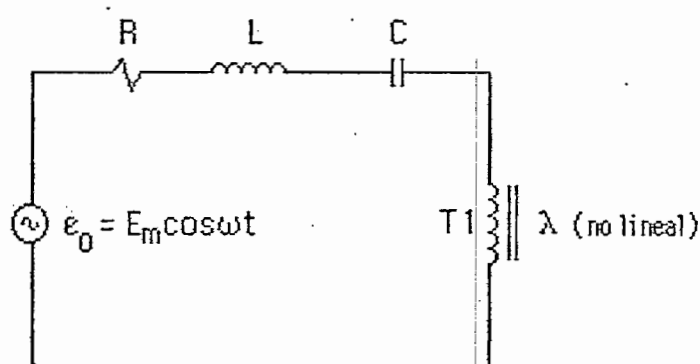
NUMERO DE GENERADORES EN OPERACION	GENERADORES SINCRONICOS EN OPERACION				FRECUENCIA DE RESONANCIA	DESLIZAMIENTO RELATIVO	RELACION RESISTENCIA DEL ROTOR A DELIZAMIENTO RELATIVO	RESISTENCIA EQUIVALENTE DEL SISTEMA	δ $R_T > (R_r / S_o)$?	δ RESONANCIA SUB-SINCRONICA ATENUADA ?
	G	G	G	G						
1	X				15.70	-2.82	-0.1513	0.4965	SI	SI
		X								
			X							
2	X	X			21.11	-1.84	-0.116	0.4507	SI	SI
			X	X	22.06	-1.72	-0.1241	0.4507	SI	SI
	X		X		21.76	-1.76	-0.1213	0.4507	SI	SI
	X			X						
		X	X							
3		X		X	25.41	-1.36	-0.1046	0.4355	SI	SI
	X	X		X						
		X	X	X						
4	X	X	X	X	28.65	-1.09	-0.0979	0.4279	SI	SI

X: significa generador en operación

R_T y R_r referidos a una base $69[KV_B]$ y $100[MVA_B]$

Observando la FIG 6.15 se puede notar que los transformadores [T2], [T3] y [T4] se energizan a través de los generadores [G], en tanto que el transformador [T1] de la S/E-1 de Riobamba es el único que puede ser energizado a través de la línea con compensación serie. Por tanto la predicción de ferroresonancia se debe realizar únicamente para el transformador [T1] de la S/E-1 de Riobamba.

En la FIG 6.16 se indica el circuito que se utiliza para la predicción de ferroresonancia del transformador [T1].



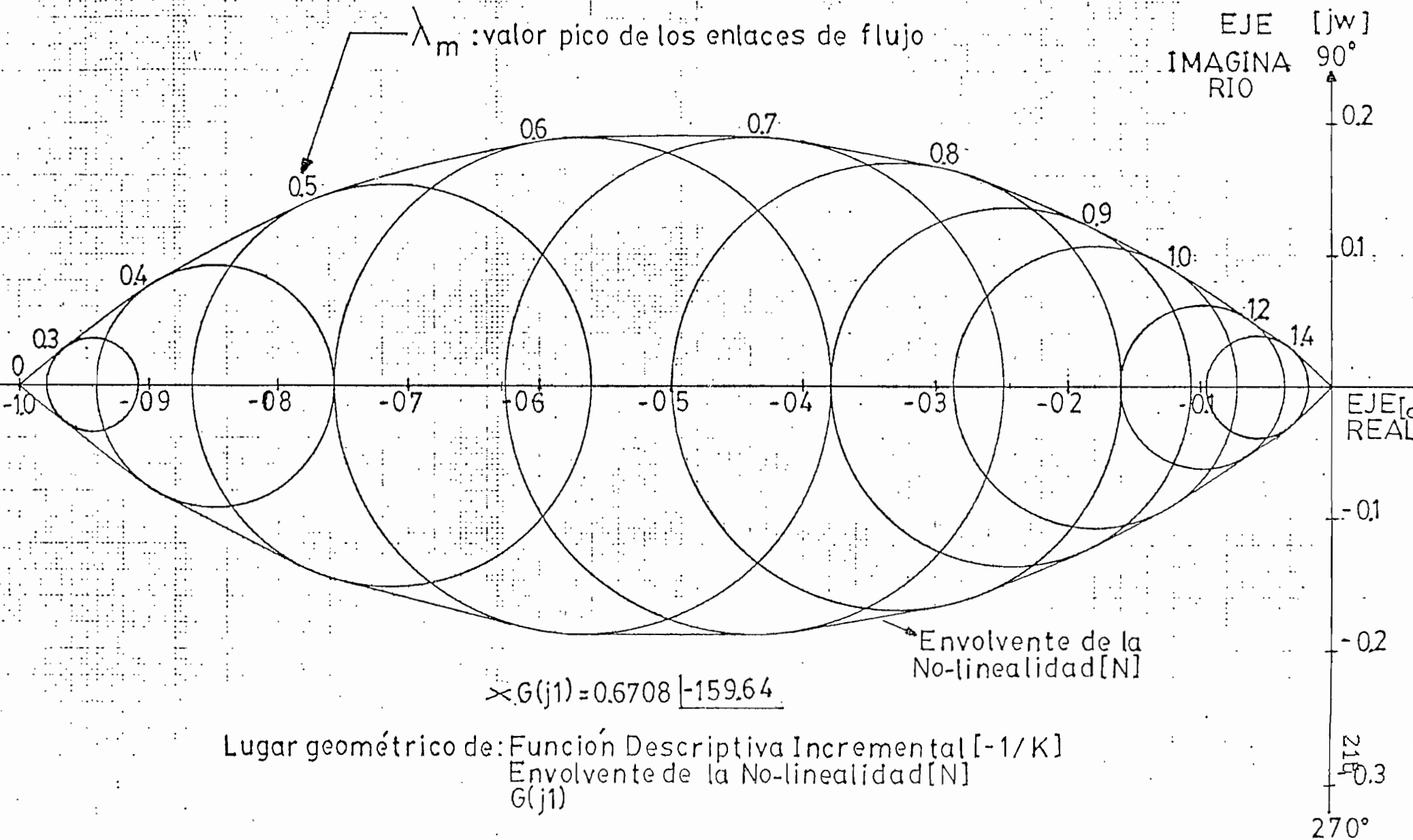
- R : resistencia de la línea [L1] Ambato-Riobamba
- L : inductancia de la línea [L1] Ambato-Riobamba
- C : capacitancia del condensador en serie seleccionado [λ_{CS}]
- λ : enlaces de flujo del transformador [T1] de la S/E-1 de Riobamba.

FIG 6.16 Circuito usado para predecir ferroresonancia del transformador [T1] de la S/E-1 de Riobamba.

Para el circuito de la FIG 6.16 en la FIG 6.17 se muestra en el plano complejo el lugar geométrico de la Función Descriptiva Incremental $[-1/K]$ para varios valores de $[\lambda_m]$ en [P.U], el lugar geométrico de la no linealidad [N] con su correspondiente envolvente y también el lugar geométrico $[G(j\omega)]$ con la frecuencia angular de la red $[\omega]$ en [P.U] es decir $\omega = 1$ [P.U].

En el Apéndice 6A11 se detallan los cálculos necesarios para la elaboración de la FIG 6.17.

FIG. 6.17



De la FIG 6.17 se deduce que dado que $[G(j1)]$ es un punto que cae fuera de la envolvente $[N]$ entonces de acuerdo al criterio de estabilidad de Nyquist para el transformador $[T1]$ de la S/E-1 de Riobamba se establece que hay ferresonancia estable (con atenuación) y por consecuencia no habrá necesidad de proporcionar medio alguno de atenuación o amortiguación.

6.4.1.1.7 Protección del condensador en serie

6.4.1.1.7.1 Protección interna.

En la sección 6.4.1.1.3 se determinó que la configuración del condensador en serie en cada fase de la línea era a base de condensadores unidad de 200 [KVAR] nominales y 9540 [V] nominales, dispuestos en forma tal que conformen 2 grupos serie con 17 condensadores unidad en paralelo por grupo serie, o sea que se tiene que:

$$Q_n = 200 \text{ [KVAR]} \quad [6.80]$$

$$E_n = 9540 \text{ [V]} \quad [6.81]$$

$$N = 2 \quad [6.82]$$

$$M = 17 \quad [6.83]$$

Substituyendo los valores dados por [6.80] y [6.81] en la ecuación [4.5] de la sección 4.1.4 se tiene que la corriente nominal de cada condensador unidad es:

$$I_n = \frac{200 \times 1000}{9540} \quad [6.84]$$

$$\text{ó; } I_n = 20.96 \text{ [A]} \quad [6.85]$$

La corriente que el fusible debe ser capaz de llevar continuamente es por lo menos el 135 [%] de la corriente nominal del condensador unidad al que protege; es decir:

$$I_{\text{cont.}} = 1.35 (20.96) \quad [6.86]$$

$$\text{ó; } I_{\text{cont.}} = 28.30 \text{ [A]} \quad [6.87]$$

De acuerdo al valor dado por [6.87] la protección interna es realizada por medio de fusibles tipo expulsión 20K, cuya característica tiempo-corriente de la curva del tiempo de despeje coordina convenientemente con las curvas de probabilidad de ruptura del tanque de los condensadores unidad de 200 [KVAR].

La corriente circulante a través del fusible de un condensador unidad falloso es (véase Apéndice 6A12):

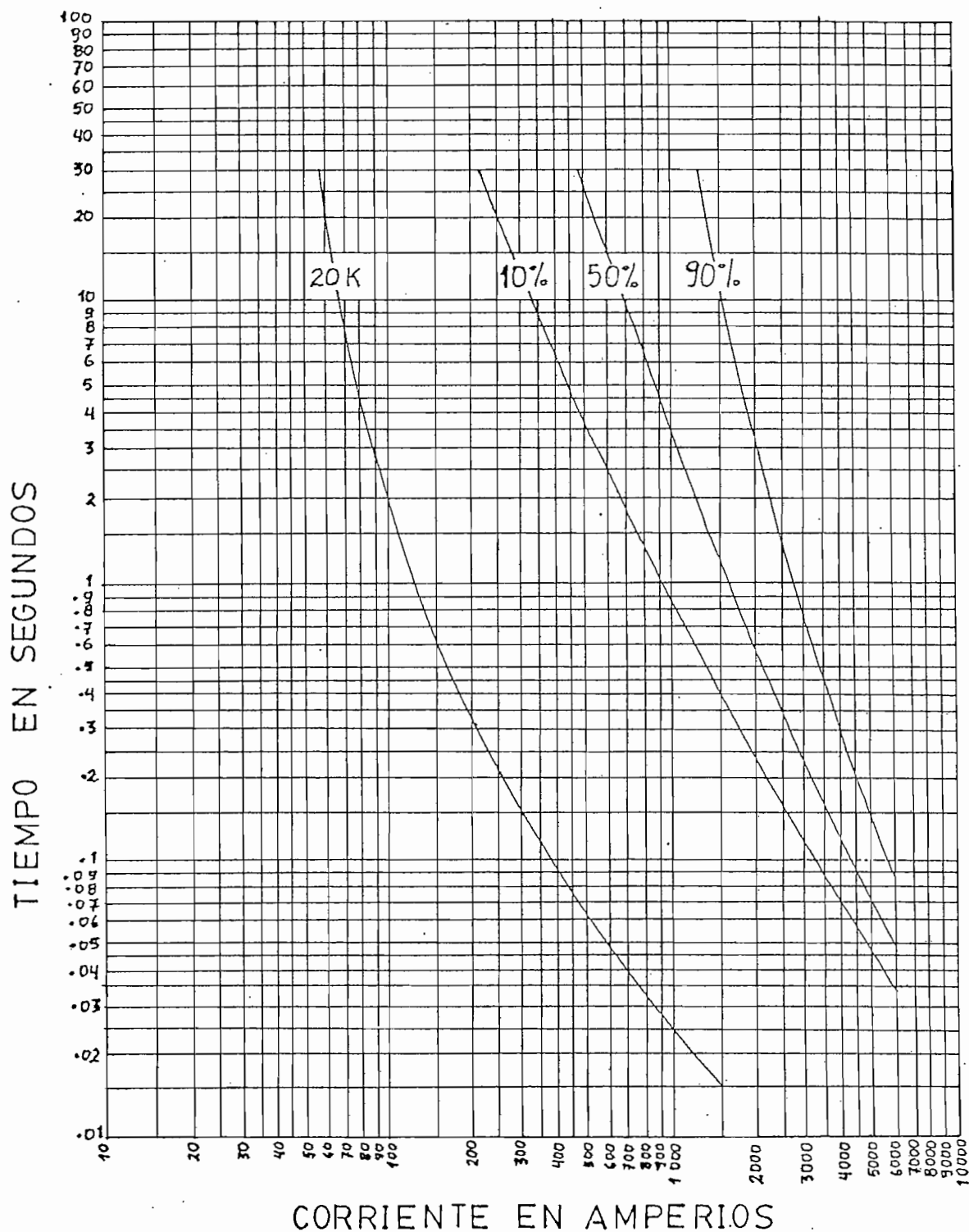
$$i'' = 352.54 \text{ [A]} \quad [6.88]$$

En la FIG 6.18 se muestran conjuntamente las curvas de probabilidad de ruptura del tanque para condensadores unidad de 200 [KVAR] nominales y la característica tiempo-corriente de la curva del tiempo de despeje de un fusible tipo expulsión 20K. De la FIG 6.18 se comprueba la labor protectora que realiza el fusible 20K en el momento de la falla (352.54[A]). Los fusibles 20K escogidos cumplen con el propósito fundamental mencionado en la sección 4.2.1, pues la corriente que continuamente puede llevar el fusible 20 K es 30 [A], la misma que es mayor que el 135 [%] de la corriente nominal del condensador unidad, es decir mayor que 28.30 [A].

Las características del fusible 20 K son:

- corriente nominal: 20 [A]
- voltaje nominal: 15.5 [KV]

FIG. 6.18



Curvas de probabilidad del 10%, 50% y 90%; de ruptura del tanque para condensadores unidad de 200[KVAR] nominales y curva característica del tiempo de despeje de un fusible tipo 20K

- corriente nominal máxima de interrupción: 2.8 [KA]
- frecuencia nominal: 60 [KZ]
- BIL: 350 [KV]

6.4.1.1.7.2 Protección externa

6.4.1.1.7.2.1 Protección frente a cortocircuitos en el sistema.

El espinterómetro protectorio debe proteger al condensador en serie contra elevadas corrientes que se producen debido a fallas en el sistema.

En la FIG 6.19 se muestra la FIG 6.1 de la sección 6.2.1 pero adicionalmente representado al condensador en serie seleccionado [X_{cs}] con su localización en el terminal de recepción de la línea Ambato-Riobamba representada por [L1].

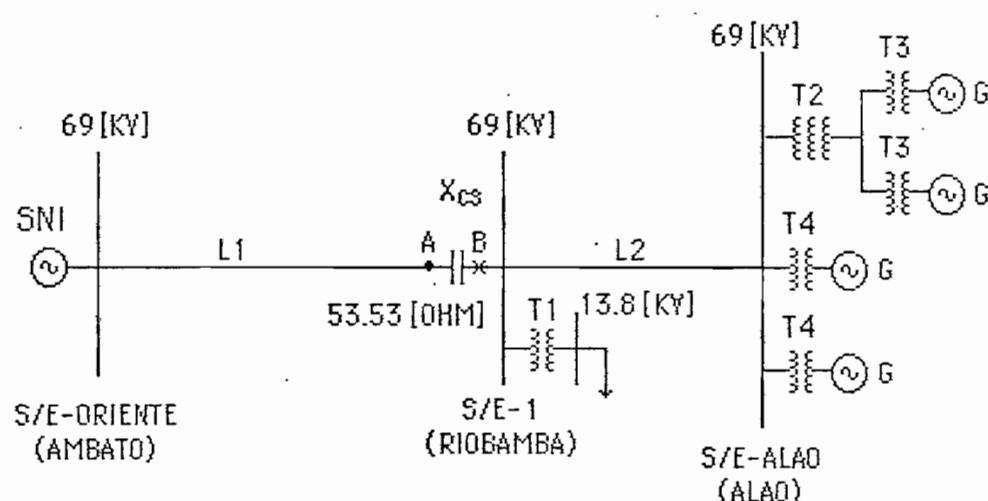


FIG 6.19 Configuración del sistema del ejemplo de aplicación, representando al condensador en serie seleccionado con su ubicación dentro de la línea Ambato-Riobamba [L1].

El sitio donde se encuentra el condensador en serie, es decir el punto B o lo que es lo mismo la barra de la S/E-1 en Riobamba es donde se tienen las corrientes de falla de mayor magnitud.

Para fallas en la S/E-1 de Riobamba, en la tabla 6.55 se tabulan las magnitudes de: corriente en el punto de falla, corriente y voltaje a través del condensador en serie.

TABLA 6.55.

TIPO DE FALLA EN LA S/E-1 DE RIOBAMBA	219 [%] COMPENSACION SERIE		
	CORRIENTE EN LA S/E-1 DE RIOBAMBA [A]	CORRIENTE A TRAVES DEL CONDENSADOR EN SERIE [A]	VOLTAJE A TRAVES DEL CONDENSADOR EN SERIE [V]
3ϕ	2802.83	2894.37	154935.63
ϕ -T	3116.52	2682.59	143599.04
ϕ - ϕ	2427.38	2506.71	134184.19
ϕ - ϕ -T	3455.15	3210.23	171843.61

En la FIG 6.20 se encuentran los diagramas de secuencia para el circuito de la FIG 6.19. Los datos de las tablas 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 y 6.5 de la sección 6.2.1 se han utilizado para la elaboración de los diagramas de secuencia de la FIG 6.20. Los valores de: corriente en la S/E-1 de Riobamba; corriente y voltaje a través del condensador en serie seleccionado, tabulados en la tabla 6.55 se han obtenido utilizando los diagramas de secuencia indicados en la FIG 6.20.

Puesto que un condensador en serie puede soportar voltajes momentáneos de hasta el 150 [%] de su voltaje nominal, el espinterómetro protectorio se calibra para ser cebado a un voltaje de:

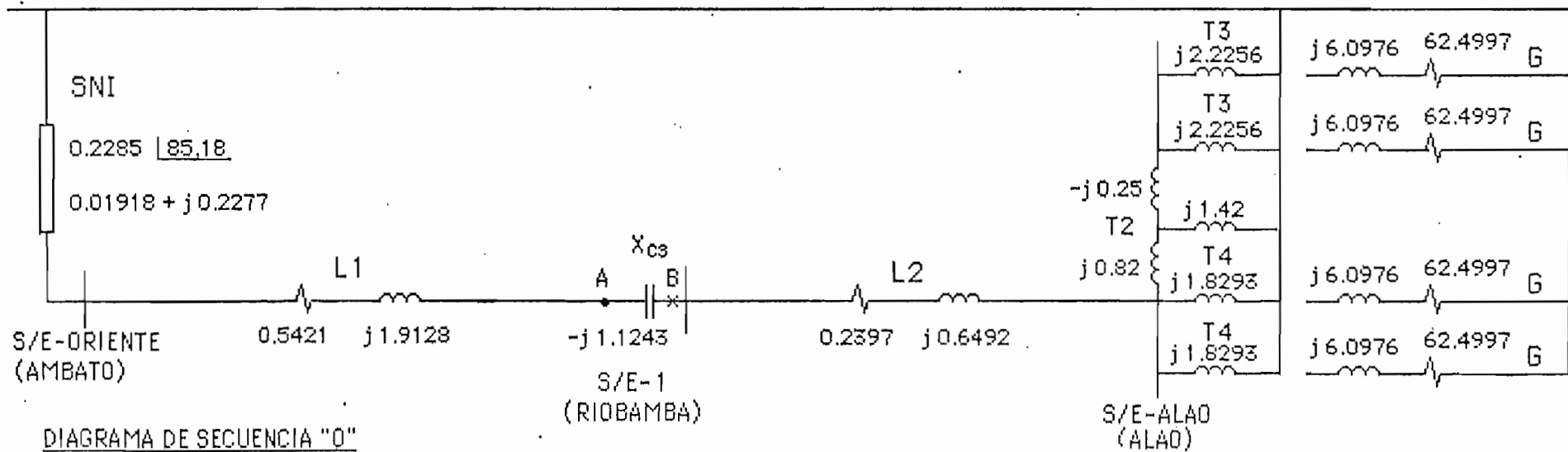
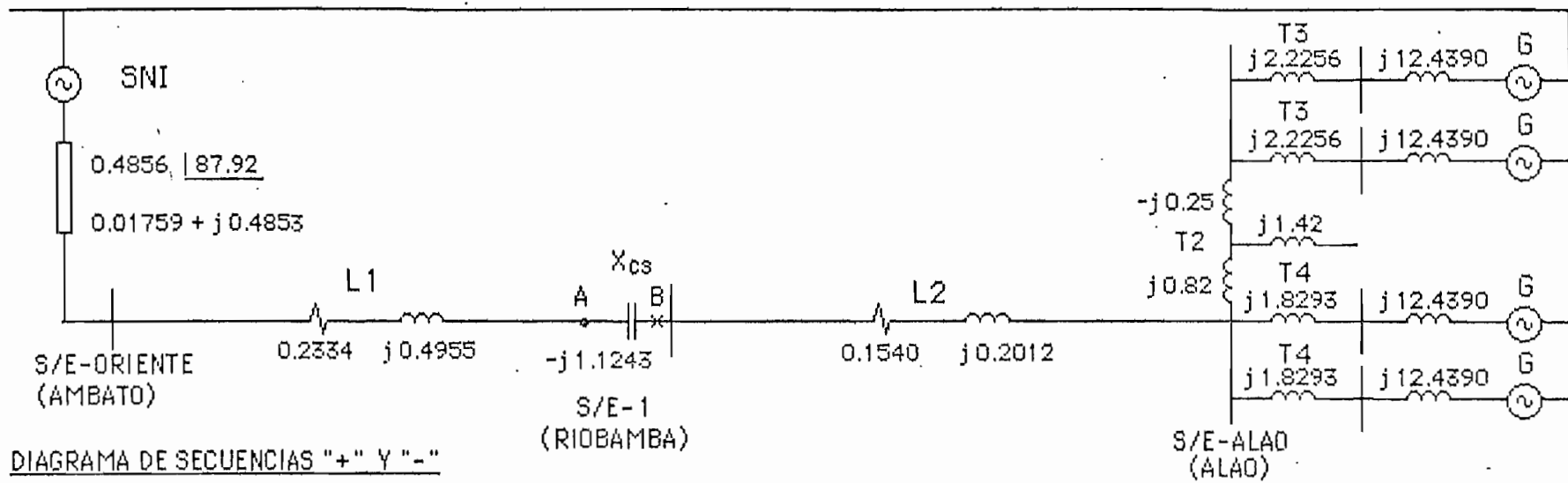


FIG 6.20 Diagramas de secuencia en [P.U] para el circuito de la FIG 6.19 tomando una base $69 [KV_B]$ y $100 [MVA_B]$ en la línea Ambato-Riobamba representada por [L1]

$$U_c = \frac{150}{100} (19080) \quad [6.89]$$

$$\text{ó; } U_c = 28620 \text{ [V]} \quad [6.90]$$

[El voltaje nominal del condensador en serie (19080 [V]), se encuentra tabulado en la tabla 6.50 en la sección 6.4.1.1.3]

El tiempo de disparo del espinterómetro protectorio es de 1/2 [CICLO], tiempo que es lo bastante rápido. Puesto que el voltaje de cebado del espinterómetro protectorio (28620 [V]), es menor que los sobrevoltajes a través del condensador en serie que se producen bajo fallas en la barra de la S/E-1 de Riobamba; entonces el calibrado del espinterómetro protectorio ofrece una adecuada protección al condensador en serie seleccionado.

TABLA 6.56

TIPO DE FALLA EN LA S/E-1 DE RIOBAMBA	CORRIENTE EN LA S/E-1 DE RIOBAMBA	CORRIENTE A TRAVÉS DEL ESPINTEROMETRO PROTECTORIO
	[A]	[A]
3 ϕ	1034.38	826.53
ϕ -T	1044.00	679.77
ϕ - ϕ	895.81	715.83
ϕ - ϕ -T	1042.66	762.10

Al operar el espinterómetro protectorio, éste puentea al condensador en serie y en este instante ya sin los condensadores en la línea, las magnitudes de las corrientes en la S/E-1 de Riobamba y a través del espinterómetro para fallas en la S/E-1 de Riobamba, se tabulan en la tabla

6.56. Los valores dados en la tabla 6.56 se han obtenido resolviendo para los diagramas de secuencia de la FIG 6.20 pero obviamente puenteando al condensador en serie. El espinterómetro protectorio deberá estar en capacidad de soportar las corrientes tabuladas en la tercera columna de la tabla 6.56, en tanto la protección de línea opera y despeja la falla.

Dado que tanto los condensadores en serie como los espinterómetros protectorios deben ir localizados en el terminal de recepción de la línea Ambato-Riobamba, es decir en Riobamba, se tiene que determinar la distancia de separación de los electrodos para las condiciones de presión barométrica y temperatura media ambiente de Riobamba. Riobamba se encuentra a 2754 metros sobre el nivel del mar y para esta altitud se tiene una densidad relativa del aire de $\delta = 0.715$ (ver tabla 4.3 de la sección 4.2.2.1.2) y un factor de corrección de $k = 0.735$ (ver tabla 4.2 de la sección 4.2.2.1.2).

El voltaje de cebado dado por [6.90] dividido por el factor de corrección $k = 0.735$ da un voltaje de cebado de:

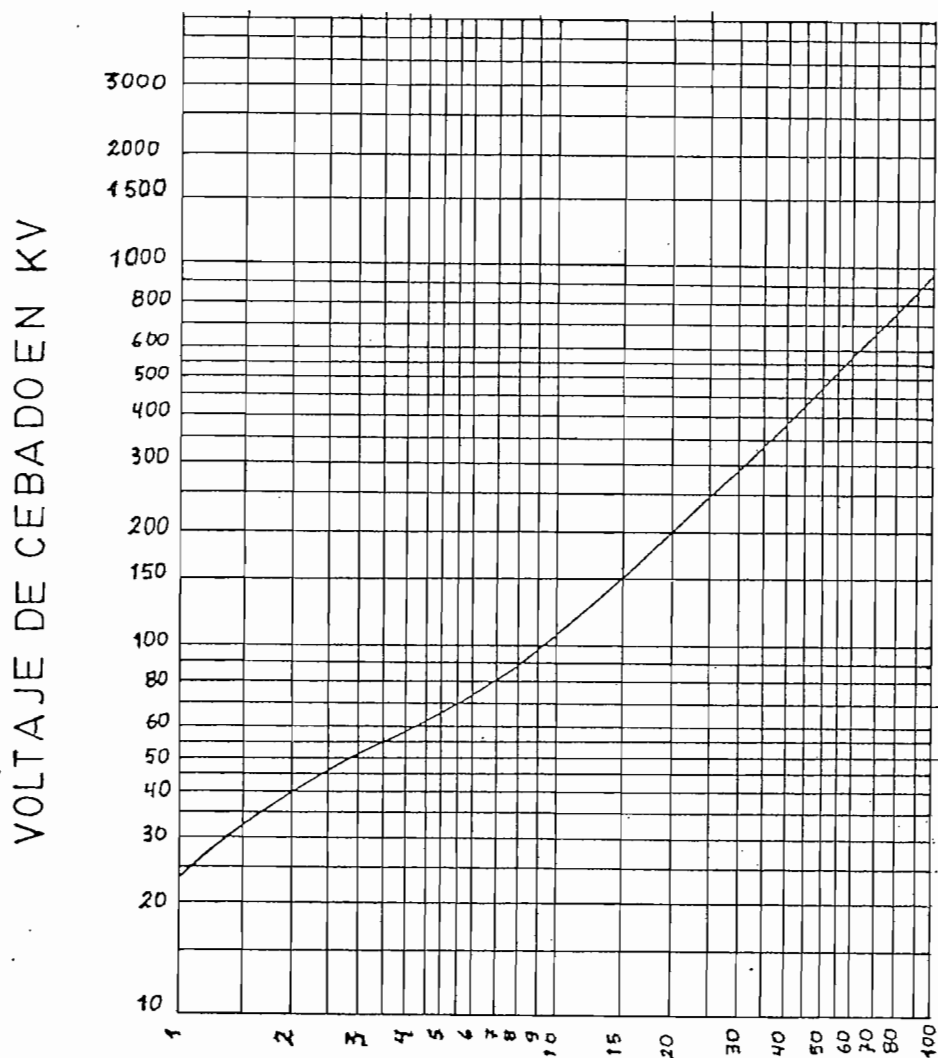
$$U_c = \frac{28620}{0.735} \quad [6.91]$$

$$\text{ó; } U_c = 38939 \text{ [V]} \quad [6.92]$$

En la FIG 6.21 [Ref. 45] se tiene la curva que relaciona el voltaje de cebado en función de la distancia de separación de los electrodos para un espinterómetro cuyos electrodos son varillas cuadradas de acero de sección 1/2 pulgada cuadrada (dimensiones: $1/\sqrt{2} \times 1/\sqrt{2}$ [PULGADA]) a condiciones normalizadas de presión barométrica y temperatura media ambiente.

De la FIG 6.21 se tiene que para el valor de voltaje de cebado dado por [6.92] la distancia de separación de los electrodos del espinterómetro será:

FIG.6.21



DISTANCIA ENTRE ELECTRODOS EN PULGADAS

Voltaje de cebado (60HZ) - vs - distancia entre electrodos para un espinterómetro con electrodos de varillas cuadradas de acero de sección $1/2$ pulgada cuadrada (Dimensiones: $1/\sqrt{2} \times 1/\sqrt{2}$ pulgadas).

A 760 mm Hg de presión barométrica, 25°C de temperatura media ambiente - densidad relativa del aire = 1

$$d = 1.9 \text{ [PULGADAS]} \quad [6.93]$$

Las características del espinterómetro protectivo son:

- espinterómetro sin disparo de arco repetitivo
- electrodos de varillas cuadradas de acero, sección 0.5 pulgadas cuadradas (dimensiones: $1/\sqrt{2} \times 1/\sqrt{2}$ [PULGADA])
- voltaje de cebado (60 [HZ]): 28620 [V]
- voltaje de cebado a la onda 1.5 x 40[μ seg]: 59 [KV_{pico}]
- voltaje de cebado a la onda 2[μ seg]: 59 [KV_{pico}]
- distancia de separación de los electrodos: 1.9 [PULGADAS]
- corriente máxima: 827 [A]
- frecuencia nominal: 60 [HZ]
- B I L: 350 [KV]

Se ha preferido un espinterómetro de arco repetitivo frente a uno de arco sostenido por cuanto con el espinterómetro de arco repetitivo es posible minimizar la corrosión debida al arco entre los electrodos.

Por otra parte, comparando las corrientes de falla de la tabla 6.55 y de la tabla 6.56 es decir los valores de corriente de la primera columna de la tabla 6.55 con los valores de corriente de la primera columna de la tabla 6.56 se puede establecer que la presencia del condensador en serie aumenta la magnitud de las corrientes de falla en la S/E-1 de Riobamba.

6.4.1.1.7.2.2 Protección frente a descargas atmosféricas.

En los puntos designados A y B de la FIG 6.18, sección 6.4.1.1.7.2.1 deben ir localizados los pararrayos. En la tabla 6.57 se tabulan los valores de las relaciones $[X_0/X_1]$ y $[R_0/X_1]$ calculadas en el punto de localización de los pararrayos.

TABLA 6.57

PUNTO A		PUNTO B	
$\frac{X_0}{X_1}$	$\frac{R_0}{X_1}$	$\frac{X_0}{X_1}$	$\frac{R_0}{X_1}$
[P.U]	[P.U]	[P.U]	[P.U]
0.1188	0.2978	-4.3234	-1.6031

Los valores tabulados en la tabla 6.57 se han obtenido mediante la utilización de los diagramas de secuencia indicados en la FIG 6.20 sección 6.4.1.1.7.2.1 y determinando la impedancia equivalente Thevenin vista desde los puntos A y B.

De acuerdo a los valores de la tabla 6.57, sólo para el pararrayos localizado en el punto A se puede aplicar la tabla 4.5 de la sección 4.2.2.2. En efecto, para el punto A, puesto que se cumple que:

$$0 < \frac{X_0}{X_1} \leq 3 \quad [6.94]$$

$$0 < \frac{R_0}{X_1} \leq 1 \quad [6.95]$$

El voltaje nominal del pararrayos correspondiente se lo calcula como:

$$V_p = 0.8 (1.05)(69) \quad [6.96]$$

$$\text{ó; } V_p = 57.96 \text{ [KV]} \quad [6.97]$$

Las características del pararrayos localizado en el punto A son:

- voltaje nominal: 60 [KV]
- voltaje nominal del sistema (L-L): 69 [KV]

- voltaje mínimo de descarga a (60 [HZ]):	81 [KV]
- voltaje máximo de descarga a una onda de impulso de 1.2 x 50 [μ seg]:	144 [KV _{pico}]
- voltaje máximo de descarga para una corriente de descarga de 8 x 20 [μ seg] e igual a 20 [KA]* :	150 [KV _{pico}]
- voltaje máximo de descarga a sobrevoltajes de maniobra:	136 [KV _{pico}]
- frecuencia:	60 [HZ]
- B I L:	350 [KV]

En vista de que el valor nominal del pararrayos localizado en el punto B no se lo puede determinar mediante la aplicación de la tabla 4.5 de la sección 4.2.2.2 entonces es necesario determinarlo a partir del máximo sobrevoltaje a tierra que se presenta para la falla monofásica a tierra en el punto B.

En la tabla 6.58 se tabulan los valores de los voltajes fase-tierra para la falla monofásica a tierra en el punto B.

TABLA 6.58

TIPO DE FALLA EN EL PUNTO B	VOLTAJES LINEA-TIERRA EN EL PUNTO B		
	E_a	E_b	E_c
	[KV]	[KV]	[KV]
ϕ -T	0 *	73.86	30.18

* : indica la fase fallada

* [Ref. 30]

Los valores de la tabla 6.58 se han obtenido aplicando las fórmulas dadas en la tabla 4.6 de la sección 4.2.2.2, utilizando los diagramas de secuencia de la FIG 6.20 sección 6.4.1.1.7.2.1.

De los valores dados en la tabla 6.58 se tiene que el coeficiente de puesta a tierra [C_e] es:

$$C_e = \frac{73.86}{69} \quad [6.98]$$

$$\text{ó; } C_e = 1.0704 \quad [6.99]$$

Con $V_{LL} = 69$ [KV] y utilizando el valor dado por [6.96] en las ecuaciones [4.19] y [4.20] de la sección 4.2.2.2 se tiene que el máximo sobrevoltaje a tierra para la falla monofásica a tierra es:

$$V_p = 1.05 (69)(1.0704) \quad [6.100]$$

$$\text{ó; } V_p = 77.55 \text{ [KV]} \quad [6.101]$$

Por tanto las características del pararrayos localizado en el punto B son:

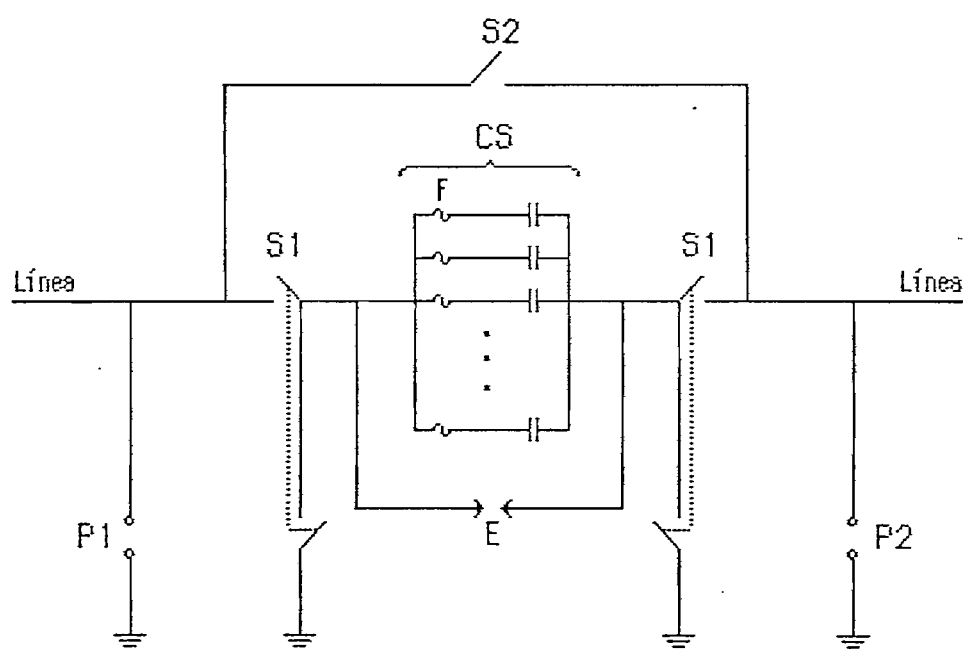
- voltaje nominal: 90 [KV]
- voltaje nominal del sistema (L-L): 69 [KV]
- voltaje mínimo de descarga a (60 [HZ]): 122 [KV]
- voltaje máximo de descarga a una onda de impulso de 1.2×50 [μ seg]: 216 [KV_{pico}]
- voltaje máximo de descarga para una corriente de descarga de 8×20 [μ seg] e igual a 20 [KA]^{*}: 225 [KV_{pico}]
- voltaje máximo de descarga a sobrevoltajes de maniobra: 203 [KV_{pico}]

* [Ref. 30]

- frecuencia: 60 [HZ]
- BIL: 350 [KV]

6.4.1.1.8 Esquema de la instalación del banco del condensador en serie.

En la FIG 6.22 se muestra el diagrama que en cada fase de la línea tiene el banco del condensador en serie.



- CS: condensador en serie
- E: espinterómetro
- P1, P2: pararrayos
- S1, S2: seccionador
- F: fusible individual

FIG 6.22 Instalación del banco del condensador en serie, en una fase de la línea.

Con el objeto de mantener la continuidad del servicio cuando se realizan operaciones de mantenimiento en el banco del condensador en serie, se proveerá de seccionadores en aire tipo cuchilla. Puesto que los condensadores en serie pueden soportar sobrecargas del 135 [%] de la corriente nominal es decir 481 [A] (1.35×356.39); siendo la corriente nominal de 356.39 [A] (véase tabla 6.50 sección 6.4.1.1.3), los seccionadores

en aire tipo cuchilla deben ser dimensionados para maniobrar corrientes de carga del orden de 481 [A]. Por otra parte los seccionadores en aire tipo cuchilla designados por [S1] también deben soportar corrientes instantáneas de los valores dados por la tercera columna de la tabla 6.55 sección 6.4.1.1.7.2.1 y el seccionador en aire tipo cuchilla designado por [S2] también debe soportar corrientes instantáneas de los valores dados por la tercera columna de la tabla 6.56 sección 6.4.1.1.7.2.1.

Por lo anotado anteriormente, los seccionadores en aire tipo cuchilla designados por [S1] y [S2] tendrán las siguientes características:

- número de polos:	3
- voltaje nominal:	69 [KV]
- voltaje máximo de diseño:	72.5 [KV]
- corriente nominal:	600 [A]
- corriente momentánea:	40 [KA]
- frecuencia nominal:	60 [HZ]
- B I L:	350 [KV]

Adicionalmente los seccionadores [S1] estarán provistos de cuchilla de puesta a tierra para propiciar la descarga a tierra del condensador en serie y por consiguiente las cuchillas de puesta a tierra tendrán las mismas características mencionadas para los seccionadores [S1].

6.4.1.2 Evaluación económica.

La evaluación económica de la alternativa condensadores en serie se la efectúa en base a los siguientes aspectos:

- 1.- El costo [FOB] de la instalación que se tiene para el año 1986, se asume que no varía para los años siguientes al año 1986.

- 2.- Se asume que los datos para el año 1986 de: factor de carga [F_c], costo anual del [KW] ($[K_p]$) y costo del [KWH] ($[K_e]$) que se encuentran dados en la sección 6.2.6 no varían para los años posteriores al año 1986.
- 3.- Los costos de las pérdidas se los calcula durante el período de 20 [AÑOS], tiempo que se considera la vida media útil de la compensación serie.
- 4.- De la sección 6.4.1.1.1 se establece que el 219 [%] de compensación serie seleccionado satisface la carga neta máxima hasta el año 1991. Se asume que para los años posteriores a 1991 es incierta la implementación de alguna alternativa de suministro de reactivos para satisfacer los crecientes requerimientos de la carga; por cuya razón no varían las pérdidas desde el año 1991 hasta el año 2007, año este último en el cual termina el período de vida media útil de la compensación serie, período que por su parte se inicia en el año 1988 de acuerdo al análisis llevado a cabo en la sección 6.3.1.
- 5.- El valor económico de la alternativa condensadores en serie es decir del 219 [%] de compensación serie seleccionado estará formado por los dos rubros siguientes:
 - 5i.- Valor presente al año 1986 del costo de la instalación para las tasas de rentabilidad $i = 8$ [%], $i = 10$ [%], $i = 12$ [%] e $i = 14$ [%].
 - 5ii.- Valor presente al año 1986 del costo de las pérdidas para las tasas de rentabilidad $i = 8$ [%], $i = 10$ [%], $i = 12$ [%] e $i = 14$ [%].

6.4.1.2.1 Cálculo del valor presente del costo de la instalación.

La inversión se la realiza al año 1988 y de acuerdo al numeral 1.- de la sección precedente 6.4.1.2 se tiene que para el año 1988:

1.- COSTOS [FOB]

Item	Descripción	Número	Costo Unitario [DOLARES]	Costo total [DOLARES]
1	Condensador en serie (el total de unidades capacitivas)	3	43214	129642
2	Espinterómetro protectorio	3	14432	43296
3	Seccionador tripolar con cuchilla de puesta a tierra	2	6217	12434
4	Seccionador tripolar sin cuchilla de puesta a tierra	1	4849	4849
5	Pararrayos (60 [KV])	3	1828	5484
6	Pararrayos (90 [KV])	3	2804	8412
7	Fusibles 20 K	102	75	<u>7650</u>
			SUBTOTAL	211767

Los costos [FOB] del equipo empleado han sido obtenidos de catálogos de fabricantes de diversas marcas.

2.- COSTOS ADICIONALES U OTROS COSTOS	[%]	[DOLARES]
- Flete marítimo	15 [%]	31765
- Nacionalización y transporte interno	10 [%]	21177
- Equipo auxiliar	8 [%]	16941
- Obras civiles	8 [%]	16941
- Montaje y supervisión del montaje	8 [%]	16941
- Ingeniería y administración	23 [%]	48706
- Impuestos y seguros	15 [%]	<u>31765</u>
	SUBTOTAL:	184236

TOTAL: 1.- + 2.-

→ C = 396003 [DOLARES]

En la tabla 6.59 se tabulan los valores presentes al año 1986 del costo de la instalación para las tasas de rentabilidad del 8 [%], 10 [%], 12 [%] y 14 [%]. Para la confección de la tabla 6.59 se ha usado la fórmula [5.65] de la sección 5.3.2.1 con:

$$C = 396003 \text{ [DOLARES]} \quad [6.102]$$

$$i = 8 \text{ [%]}, 10 \text{ [%]}, 12 \text{ [%]}, 14 \text{ [%]} \quad [6.103]$$

$$n = 2 \text{ [AÑOS]} \quad [6.104]$$

TABLA 6.59

219 [%] COMPENSACION SERIE			
VALOR PRESENTE AL AÑO 1986 DEL COSTO DE LA INSTALACION			
i = 8 [%]	i = 10 [%]	i = 12 [%]	i = 14 [%]
VP (C)	VP (C)	VP (C)	VP (C)
[DOLARES]	[DOLARES]	[DOLARES]	[DOLARES]
339509	327275	315691	304711

6.4.1.2.2 Cálculo del valor presente del costo de las pérdidas.

Tomando de la tabla 6.8 de la sección 6.2.5 sólo aquellas cargas netas máximas que corresponden a cada año en cuestión de tal modo de tener en cuenta las consideraciones anotadas en los numerales 3.- y 4.- de la sección 6.4.1.2, en la tabla 6.60 se tabulan los respectivos valores de: la magnitud del voltaje terminal de recepción (entre fases), ángulo de operación de la línea, magnitud de la corriente de línea, potencia activa de envío y potencia activa de pérdidas.

La tabla 6.60 se elabora en forma análoga a la tabla 6.17 de la sección 6.4.1.1.2.1.3.2, es decir siguiendo el procedimiento de cálculo dado en el Apéndice 6A5, pero como es obvio utilizando los datos pertinentes y con la acotación de que la reactancia capacitiva del condensador en serie que se usa es la reactancia nominal dada en la tabla 6.50 de la sección 6.4.1.1.3.

Para el lapso de la vida media útil de la compensación serie de 20 [AÑOS] y usando los valores de potencia activa perdida proporcionados por la tabla 6.60, en la tabla 6.61 se tabulan: el costo de las pérdidas, el valor

TABLA 6.60

$$e_s = 1.016 \text{ [P.U]}$$

$$e_s = 70.104 \text{ [KV]}$$

AÑO	CARGA NETA MAXIMA		219 [%] COMPENSACION SERIE					
	POTENCIA ACTIVA	POTENCIA REACTIVA	VOLTAJE TERMINAL DE RECEPCION		ANGULO DE OPERACION DE LA LINEA	CORRIENTE DE LA LINEA	POTENCIA ACTIVA DE ENVIO	POTENCIA ACTIVA PERDIDA
	P_L [MW]	Q_L [MYAR]	e_r [KV]	e_r [P.U]	Δ [°]	i [A]	P_s [MW]	$P_p = P_s - P_L$ [MW]
1988	30.8	8.3	67.055	0.972	-12.462	274.651	33.316	2.516
1989	33.0	9.2	66.814	0.968	-13.460	296.032	35.922	2.922
1990	35.1	10.1	66.577	0.965	-14.430	316.735	38.443	3.343
1991	37.5	11.1	66.263	0.960	-15.560	340.751	41.370	3.870

presente al año 1986 del costo de las pérdidas, así como el total de los valores presentes al año 1986 de los costos de las pérdidas. La confección de la tabla 6.61 es similar a la de la tabla 6.18 de la sección 6.4.1.1.2.1.3.2, o sea siguiendo el procedimiento de cálculo del Apéndice 6A6, y obviamente empleando las tasas de rentabilidad del 8 [%], 10 [%], 12 [%] y 14 [%].

TABLA 6.61

AÑO	POTENCIA ACTIVA PERDIDA P_p [MW]	COSTO DE LAS PERDIDAS C_{pp} [DOLARES]	VALOR PRESENTE AL AÑO 1986 DEL COSTO DE LAS PERDIDAS			
			219 [%] COMPENSACION SERIE			
			$i = 8[\%]$	$i = 10[\%]$	$i = 12[\%]$	$i = 14[\%]$
			$63875 P_p$ [DOLARES]	$YP(C_{pp})$ [DOLARES]	$YP(C_{pp})$ [DOLARES]	$YP(C_{pp})$ [DOLARES]
1988	2.516	160710	137783	132818	128117	123661
1989	2.922	186643	148163	140228	132849	125979
1990	3.343	213534	156954	145847	135705	126429
1991.,2007	3.870	247196	1'657369	1'354345	1'118476	932731
TOTAL DE LOS VALORES PRESENTES AL AÑO 1986 DE LOS COSTOS DE LAS PERDIDAS		$\sum_{j=1988}^{2007} C_{ppj}$	2'100269	1'773238	1'515147	1'308800

6.4.1.2.3 Valor económico de la alternativa: condensadores en serie (219 [%] compensación serie).

En la tabla 6.62 se tabulan los rubros de:

- 1.- Valor presente al año 1986 del costo de la instalación para las tasas de rentabilidad del 8 [%], 10 [%], 12 [%] y 14 [%]; según como se ha tomado de la tabla 6.59 de la sección 6.4.1.2.1.
- 2.- Total de los valores presentes al año 1986 de todos los costos de las pérdidas para las tasas de rentabilidad del 8 [%], 10 [%], 12 [%] y 14 [%] según como se ha tomado de la tabla 6.61 de la sección 6.4.1.2.2.
- 3.- Valor económico de la alternativa -condensadores en serie (219 [%] compensación serie)- para las tasas de rentabilidad del 8 [%], 10 [%], 12 [%] y 14 [%], formado por la suma de los rubros mencionados en los numerales 1.- y 2.-.

TABLA 6.62

		219 [%] COMPENSACION SERIE			
		i=8 [%]	i = 10 [%]	i = 12 [%]	i = 14 [%]
VALOR PRESENTE AL AÑO 1986 DEL COSTO DE LA INSTALACION	[DOLARES]	339509	327275	315691	304711
TOTAL DE LOS VALO- RES PRESENTES AL AÑO 1986 DE LOS COSTOS DE LAS PERDIDAS	[DOLARES]	2'100269	1'773269	1'515147	1'308800
VALOR ECONOMICO DE LA ALTERNATI- VA: CONDENSADO- RES EN SERIE (219 [%] COMPEN- SACION SERIE)	[DOLARES]	2'439778	2'100544	1'830838	1'613511

6.4.2 Alternativa: condensadores en derivación con la carga.

6.4.2.1 Evaluación técnica.

Del estudio de evaluación técnica de la alternativa -condensadores en serie- llevado a cabo en la sección 6.4.1.1 se ha establecido que el 219 [%] de compensación serie seleccionado satisface los requerimientos reactivos de la carga hasta el año 1991; motivo por el cual, la implementación de condensadores en derivación con la carga se la hará para las condiciones de carga desde el año 1988 al año 1991, asumiendo así mismo que luego del año 1991 es incierta la implementación de alguna alternativa de suministro de reactivos a la carga.

6.4.2.1.1 Análisis técnico.

En la tabla 6.63 se tabulan los valores de: carga neta máxima, magnitud del voltaje terminal de recepción (entre fases), ángulo de operación de la línea y magnitud de la corriente de línea para los años 1988 y 1991, considerando que la línea no tiene ni compensación serie ni compensación con condensadores en derivación con la carga.

TABLA 6.63

		$e_s = 1.016$ [P.U] $e_s = 70.104$ [KV]				
		CARGA NETA MAXIMA		LINEA DE SUB-TRANSMISION EXISTENTE		
AÑO	POTENCIA ACTIVA	POTENCIA REACTIVA	VOLTAJE TERMINAL DE RECEPCION	ANGULO DE OPERACION DE LA LINEA	CORRIENTE DE LA LINEA	
	P_L [MW]	Q_L [MYAR]	e_r [KV]	e_r [P.U]	Δ [°]	i [A]
1988	30.8	8.3	60.407	0.875	8.615	304.878
1991	37.5	11.1	56.888	0.824	11.005	396.906

La tabla 6.64 es una tabla similar a la tabla 6.63, sólo que está referida a condiciones de carga neta media.

TABLA 6.64

		$e_s = 1.016$ [P.U] $e_s = 70.104$ [KV]				
		CARGA NETA MEDIA		LINEA DE SUB-TRANSMISION EXISTENTE		
AÑO	POTENCIA ACTIVA	POTENCIA REACTIVA	VOLTAJE TERMINAL DE RECEPCION	ANGULO DE OPERACION DE LA LINEA	CORRIENTE DE LA LINEA	
	P_L [MW]	Q_L [MYAR]	e_r [KV]	e_r [P.U]	Δ [°]	i [A]
1988	20.53	5.53	64.210	0.931	5.390	191.177
1991	25.00	7.40	62.379	0.904	6.665	241.312

La tabla 6.65 es una tabla similar a las tablas 6.63 y 6.64, sólo que esta referida a condiciones de carga neta mínima.

TABLA 6.65

		$e_s = 1.016$ [P.U] $e_s = 70.104$ [KV]				
CARGA NETA MINIMA		LINEA DE SUB-TRANSMISION EXISTENTE				
AÑO	POTENCIA ACTIVA	POTENCIA REACTIVA	VOLTAJE TERMINAL DE RECEPCION		ANGULO DE OPERACION DE LA LINEA	CORRIENTE DE LA LINEA
	P_L [MW]	Q_L [MYAR]	e_r [KV]	e_r [P.U]	Δ [°]	i [A]
1988	10.27	2.77	67.370	0.976	2.567	91.157
1991	12.50	3.70	66.605	0.965	3.115	113.000

Las tablas 6.63, 6.64 y 6.65 se han elaborado de modo similar a la tabla 6.9 de la sección 6.3.1, es decir, siguiendo el procedimiento de cálculo señalado en el Apéndice 6A1, pero como es obvio utilizando los datos pertinentes.

De las tablas 6.63, 6.64 y 6.65 se establece que:

- 1.- Sólo para condiciones de carga neta máxima y carga neta media es necesario implementar condensadores en derivación con la carga de suerte de satisfacer los requerimientos técnicos mencionados en los numerales 1.- y 2.- de la sección 5.1.3.

6.4.2.1.2 Potencia reactiva en condensadores en derivación con la carga.

La potencia reactiva necesaria en condensadores en derivación con la carga se la determina en base a lo siguiente:

- 1.- Se considera que es suficiente determinar la potencia reactiva en condensadores en derivación con la carga, de suerte de tener un voltaje de 0.95 [P.U] en el terminal de recepción; pues, por un lado un nivel de voltaje de 0.95 [P.U] se encuentra dentro del rango permisible de voltaje y por otro lado con un nivel de voltaje de 0.95 [P.U] la potencia reactiva en condensadores en derivación con la carga es menor que con otro nivel permisible de voltaje y por tanto la inversión en condensadores en derivación con la carga será menor que con otro valor de voltaje en el terminal de recepción.

En la tabla 6.66 se tabulan los valores de: carga neta máxima, potencia reactiva en condensadores en derivación, potencia reactiva terminal de recepción, magnitud del voltaje terminal de recepción (entre

fases), ángulo de operación de la línea y magnitud de la corriente de línea para los años 1988 hasta el año 1991, tomando en cuenta la consideración 1.- ya citada.

En la tabla 6.67 se tabulan los valores de: carga neta media, potencia reactiva en condensadores en derivación, potencia reactiva terminal de recepción, magnitud del voltaje terminal de recepción (entre fases), ángulo de operación de la línea y magnitud de la corriente de línea para los años 1988 y 1991, tomando en cuenta la consideración 1.- mencionada.

En las tablas 6.66 y 6.67 el signo negativo de $[Q_r]$ significa que los condensadores en derivación también están suministrando reactivos a la línea de subtransmisión, y obviamente el signo positivo de $[Q_r]$ significará lo contrario.

Las tablas 6.66 y 6.67 se elaboran del mismo modo, usando como es lógico los datos respectivos a cada caso. En el Apéndice 6B1 se da el procedimiento de cálculo para la construcción de las tablas 6.66 y 6.67 ilustrándose el ejemplo de cálculo para la carga neta máxima del año 1988.

En base a los valores de potencia reactiva de condensadores en derivación dados por la tabla 6.66 y 6.67 se debe determinar los requerimientos reactivos que satisfaga los requerimientos de la carga a sabiendas que para condiciones de carga neta mínima no se requiere compensación reactiva en condensadores en derivación, tal como se enunció en el numeral 1.- de la sección 6.4.2.1.1.

6.4.2.1.2.1 Selección de los condensadores en derivación con la carga.

Para seleccionar los condensadores en derivación se lo hace en base a los siguientes aspectos:

TABLA 6.66

$$e_s = 1.016 \text{ [P.U]}$$

$$e_s = 70.104 \text{ [KV]}$$

AÑO	CARGA NETA MAXIMA		L/ST EXISTENTE CON CONDENSADORES EN DERIVACION CON LA CARGA NETA MAXIMA					
	POTENCIA ACTIVA	POTENCIA REACTIVA	POT. REACT. DE CON. EN DERIV. CON LA CARGA NETA MAXIMA	POTENCIA REACTIVA DE RECEPCION	VOLTAJE TERMINAL DE RECEPCION		ANGULO DE OPERACION DE LA LINEA	CORRIENTE DE LA LINEA
	P_L	Q_L	$Q_{co} = Q_L - Q_r$	Q_r	e_r	e_r	Δ	i
	[MW]	[MVAR]	[MVAR]	[MVAR]	[KV]	[P.U]	[°]	[A]
1988	30.8	8.3	12.97	-4.67	65.550	0.950	9.753	274.380
1989	33.0	9.2	15.44	-6.24	65.550	0.950	10.631	295.794
1990	35.1	10.1	17.88	-7.78	65.550	0.950	11.478	316.642
1991	37.5	11.1	20.70	-9.60	65.550	0.950	12.457	340.933

TABLA 6.67

$$e_s = 1.016 \text{ [P.U]}$$

$$e_s = 70.104 \text{ [KV]}$$

AÑO	CARGA NETA MEDIA		L/ST EXISTENTE CON CONDENSADORES EN DERIVACION CON LA CARGA NETA MEDIA					
	POTENCIA ACTIVA	POTENCIA REACTIVA	POT. REACT. DE CON. EN DERIV. CON LA CARGA NETA MEDIA	POTENCIA REACTIVA DE RECEPCION	VOLTAJE TERMINAL DE RECEPCION		ANGULO DE OPERACION DE LA LINEA	CORRIENTE DE LA LINEA
	P_L [MW]	Q_L [MVAR]	$Q_{cd} = Q_L - Q_r$ [MVAR]	Q_r [MVAR]	e_r [KV]	e_r [P.U]	Δ [°]	i [A]
1988	20.53	5.53	3.54	1.99	65.550	0.950	5.772	181.663
1991	25.00	7.40	8.18	-0.78	65.550	0.950	7.482	229.635

- 1.- Se asume que los condensadores en derivación se conectan bajo la forma de doble estrella con el neutro unido entre sí y aislado de tierra, pues de la [Ref. 35] se desprende que este tipo de conexión es más conveniente económicamente.

- 2.- Los requerimientos enunciados en los numerales 1.-, 2.- y 3.- de la sección 6.4.1.1.2.1.2 y aplicados a la selección de un condensador en serie, son también aplicables al caso de la selección de condensadores en derivación; señalando adicionalmente que es preferente utilizar condensadores unidad de más alto voltaje de modo de disminuir el número de grupos serie, pues el costo y la complejidad de la instalación aumentan con el número de grupos serie que hay en cada fase de la estrella y con el número de condensadores unidad en paralelo por cada grupo serie. [Ref. 35].
En la tabla 6.68 se tiene información del número mínimo de condensadores unidad en paralelo por grupo serie que deben tener los condensadores en derivación conectados en doble estrella con el neutro unido entre sí y aislado de tierra; de suerte que cumpla el requerimiento señalado en el numeral 1.- de la sección 6.4.1.1.2.1.2. La tabla 6.68 se transcribe de la [Ref. 35].

- 3.- La [Ref. 35] demuestra que la instalación de condensadores en derivación económicamente es más barata en el lado de bajo voltaje del transformador de una S/E. En consecuencia se asume que los condensadores en derivación van conectados en el lado de 13.8 [KV] del transformador de la S/E-1 de Riobamba (véase FIG 6.1 de la sección 6.2.1).

TABLA 6.68

CONDENSADOR EN DERIVACION CONECTADO EN DOBLE ESTRELLA CON EL NEUTRO UNIDO ENTRE SI Y AISLADO DE TIERRA			
NUMERO DE GRUPOS SERIE POR FASE Y POR ESTRELLA	NUMERO MINIMO DE CONDENSADORES UNIDAD EN PARALELO POR GRUPO SERIE	CORRIENTE DE CORTOCIR- CUITO A TRAVES DEL FUSIBLE EN VECES LA CORRIENTE NOMINAL DEL CONDENSADOR UNIDAD	VOLTAJE EN LAS UNI- DADES RESTANTES DEL GRUPO SERIE, AL SALIR UN CONDENSA- DOR DE DICHO GRUPO
N	M	I_f	e_f % [%]
1	2	12	109.1
2	7	12	109.1
3	8	11.1	109.9
4	9	11.4	109.6
5	10	12	109.1
6	10	11.6	109.4
7	10	11.4	109.7
8	10	11.2	109.8
9	10	11	110
10	11	12	109.1
11	11	11.9	109.2
12	11	11.8	109.2
13	11	11.8	109.3
14	11	11.7	109.4
15	11	11.7	109.4

- 4.- Se escoge la disposición serie-paralelo más económica deducida del costo [FOB] para el año 1986 del condensador en derivación correspondiente.

La potencia reactiva en condensadores en derivación que está tabulada en las tablas 6.66 y 6.67 de la sección 6.4.2.1.2 se ha determinado en base a un voltaje en el terminal de recepción de 0.95 [P.U] y puesto que la configuración de un condensador en derivación se la calcula para voltaje nominal del sistema (en el terminal de recepción -1 [P.U]); entonces habrá necesidad de corregir la potencia reactiva en condensadores en derivación dada por las tablas mencionadas 6.66 y 6.67. La corrección se efectúa multiplicando por $(1/0.95)^2$ los valores de potencia reactiva en condensadores en derivación dada por las tablas 6.66 y 6.67 y en la tabla 6.69 se tabulan los valores corregidos de potencia reactiva en condensadores en derivación.

TABLA 6.69

POTENCIA REACTIVA DE CONDENSADORES EN DERIVACION CON LA CARGA		
AÑO	CARGA NETA MAXIMA	CARGA NETA MEDIA
	Q_{CD} [MVAR]	Q_{CD} [MVAR]
1988	14.371	3.922
1989	17.108	—
1990	19.812	—
1991	22.936	9.064

De la tabla 6.69 se piensa que con condensadores en derivación de 4.5 [MVAR], 10.5 [MVAR] y 10.5 [MVAR] se puede suplir los requerimientos

reactivos de la carga, los cuales deberán entrar y salir de funcionamiento de acuerdo a como las condiciones de carga lo determinen.

- Selección del condensador en derivación de 4.5 [MVAR].- En la tabla 6.70 se muestran varias disposiciones serie-paralelo de condensadores unidad que cumplen los requerimientos citados en los numerales 1.-, 2.- y 3.- al utilizar respectivamente condensadores unidad de 50 [KVAR], 100 [KVAR], 150 [KVAR] y 200 [KVAR] nominales. La tabla 6.70 en lo concerniente a la determinación de una disposición serie-paralelo, se la elabora utilizando las relaciones dadas en el Apéndice 6B2, relaciones que por su parte se han extraído de la [Ref. 35]. Además en la tabla 6.70 se ha adjuntado el costo [FOB] por condensador unidad y el costo [FOB] del condensador en derivación para una respectiva disposición serie-paralelo de los condensadores unidad. El costo [FOB] de los condensadores unidad se ha tomado de catálogos de la Westinghouse.

De la tabla 6.70 se deduce que la disposición serie-paralelo más económica origina un condensador en derivación de 4.8 [MVAR] nominales con unidades de 200 [KVAR] nominales y 7960 [V] nominales, 1 grupo serie por fase y por estrella y 4 unidades en paralelo por grupo serie. Al ser las unidades de 200 [KVAR] y 7960 [V] nominales se recomienda para cada unidad el uso de fusibles individuales del tipo 30T. [Ref. 46].

- Selección del condensador en derivación de 10.5 [MVAR].- La tabla 6.71 es una tabla similar a la tabla 6.70 y que obviamente se elabora de un modo análogo al de la tabla 6.70.

De la tabla 6.71 se deduce que la disposición serie-paralelo más económica origina un condensador en derivación de 10.8 [MVAR] con unidades de 200 [KVAR] nominales y 7960 [V] nominales, 1 grupo serie por fase y por estrella y 9 unidades en paralelo por grupo serie. Siendo las unidades de

TABLA 6.70

KVARs NOMINALES POR UNIDAD	GRUPOS SERIE POR FASE Y POR ESTRELLA	UNIDADES EN PARALELO POR GRUPO SERIE	CANTIDAD TO- TAL DE UNIDA- DES DEL COND. EN DERIVACN.	MVARs NOMINALES DEL CONDEN. EN DERIVACN.	VOLTAJE APLICADO A LAS UNIDADES	VOLTAJE NOMINAL DE LAS UNIDADES	COSTO POR UNIDAD	COSTO DEL CONDEN. EN DERIVCN.
Q_n [KYAR]	N	M	q_B 6MN	[MYAR]	[V]	E_n [V]	[DOLARES]	[DOLARES]
50	2	8	96	4.8	3983.72	4160	750	72000
	1	15	90	4.5	7967.43	7960	750	67500
100	1	8	48	4.8	7967.43	7960	967	46416
150	1	5	30	4.5	7967.43	7960	1106	33180
200	1	4	24	4.8	7967.43	7960	1271	30504*

* Disposición serie-paralelo más económica

TABLA 6.71

KVARs NOMINALES POR UNIDAD	GRUPOS SERIE POR FASE Y POR ESTRELLA	UNIDADES EN PARALELO POR GRUPO SERIE	CANTIDAD TO- TAL DE UNIDA- DES DEL COND. EN DERIVACN.	MVARs NOMINALES DEL CONDEN. EN DERIVACN.	VOLTAJE APLICADO A LAS UNIDADES	VOLTAJE NOMINAL DE LAS UNIDADES	COSTO POR UNIDAD	COSTO DEL CONDEN. EN DERIVCN.
Q_n [KVAR]	N	M	q_B 6MN	[MYAR]	[V]	E_n [V]	[DOLARES]	[DOLARES]
50	2	18	216	10.8	3983.72	4160	750	162000
	1	35	210	10.5	7967.43	7960	750	157500
100	1	18	108	10.8	7967.43	7960	967	104436
150	1	12	72	10.8	7967.43	7960	1106	79632
200	1	9	54	10.8	7967.43	7960	1271	68634*

* Disposición serie-paralelo más económica

200 [KVAR] y 7960 [V] se recomienda para cada unidad el uso de fusibles individuales del tipo 30T. [Ref. 46].

En consecuencia los valores nominales de potencia reactiva de los condensadores en derivación serán correspondientemente de: una etapa de 4.8 [MYAR], una primera etapa de 10.8 [MYAR] y una segunda etapa de 10.8 [MYAR].

6.4.2.1.3 Verificación de que la alternativa -condensadores en derivación- satisface los requerimientos de la carga.

Para condiciones de carga neta máxima en la tabla 6.72 se tabulan los valores de: potencia reactiva en condensadores en derivación (en base a los valores nominales de potencia reactiva de los condensadores en derivación que se obtuvieron en la sección precedente 6.4.2.1.2.1), potencia reactiva terminal de recepción, magnitud del voltaje terminal de recepción (entre fases), ángulo de operación de la línea y magnitud de la corriente de línea.

La tabla 6.73 es una tabla similar a la tabla 6.72, sólo que está referida a condiciones de carga neta media.

Las tablas 6.72 y 6.73 se elaboran de un mismo modo; usando como es lógico los datos respectivos a cada caso. En el Apéndice 6B3 se da el procedimiento de cálculo para la estructuración de las tablas 6.72 y 6.73, ilustrándose el ejemplo de cálculo para la carga neta máxima del año 1988.

De las tablas 6.72 y 6.73 se confirma que la alternativa -condensadores en derivación- satisface los requerimientos técnicos recalcados en los numerales 1.- y 2.- de la sección 5.1.3 para las condiciones de cargas netas: máxima y media (para carga neta mínima no se requiere condensadores en derivación; sección 6.4.2.1.1); pues se puede observar que la magnitud del

TABLA 6.72

CARGA NETA MAXIMA		ALTERNATIVA: CONDENSADORES EN DERIVACION						
AÑO	POTENCIA ACTIVA	POTENCIA REACTIVA	POT. REACT. DE CON. EN DERIV. CON LA CARGA NETA MAXIMA	POTENCIA REACTIVA DE RECEPCION	VOLTAJE TERMINAL DE RECEPCION		ANGULO DE OPERACION DE LA LINEA	CORRIENTE DE LA LINEA
	P_L	Q_L	Q_{CD}	$Q_r = Q_L - Q_{CD}$	e_r	e_r	Δ	i
	[MW]	[MYAR]	[MYAR]	[MYAR]	[KY]	[P.U]	[°]	[A]
1988	30.8	8.3	4.8+10.8=15.6	-7.30	66.487	0.964	9.979	274.864
1989	33.0	9.2	10.8+10.8=21.6	-12.4	67.690	0.981	11.133	300.683
1990	35.1	10.1	10.8+10.8=21.6	-11.5	66.857	0.969	11.767	318.964
1991	37.5	11.1	4.8+10.8 + 10.8 = 25.6	-14.5	67.249	0.975	12.816	345.177

$$e_s = 1.016 \text{ [P.U]}$$

$$e_s = 70.104 \text{ [KY]}$$

TABLA 6.73

$e_S = 1.016$ [P.U]								
$e_S = 70.104$ [KV]								
CARGA NETA MEDIA			ALTERNATIVA: CONDENSADORES EN DERIVACION					
AÑO	POTENCIA	POTENCIA	POT. REACT. DE	POTENCIA	VOLTAJE		ANGULO DE	CORRIENTE
	ACTIVA	REACTIVA	CON. EN DERIV. CON LA CARGA NETA MEDIA	REACTIVA DE RECEPCION	TERMINAL DE RECEPCION		OPERACION DE LA LINEA	
	P_L	Q_L	Q_{CD}	$Q_r = Q_L - Q_{CD}$	e_r	e_r	Δ	i
	[MW]	[MYAR]	[MYAR]	[MYAR]	[KV]	[P.U]	[°]	[A]
1988	20.53	5.53	4.8	0.73	66.016	0.957	5.906	179.661
1989	22.0	6.13	10.8	-4.67	67.608	0.980	6.918	192.060
1990	23.4	6.73	10.8	-4.07	67.093	0.972	7.295	204.385
1991	25.0	7.4	10.8	-3.40	66.495	0.964	7.736	219.064

voltaje terminal de recepción (entre fases) se encuentra dentro del rango permisible y además la magnitud de la corriente de línea no sobrepasa el valor del límite térmico.

6.4.2.2 Evaluación económica.

La evaluación económica de la alternativa condensadores en derivación se la efectúa en base a los siguientes aspectos:

- 1.- El costo [FOB] de la instalación que se tiene para el año 1986 se asume que no varía para los años siguientes al año 1986.
- 2.- Dado que los condensadores unidad tienen una vida útil media de 20 [AÑOS], se considera también de 20 [AÑOS] la vida útil media de la alternativa condensadores en derivación.
- 3.- Se hace una inversión de una etapa de 4.8 [MVAR] y una primera etapa de 10.8 [MVAR] en el año 1988 y luego se hace una inversión de una segunda etapa de 10.8 [MVAR] en 1989 tal como se puede desprender de las tablas 6.72 y 6.73 de la sección precedente 6.4.2.1.3.
- 4.- Para guardar paralelismo con la alternativa -condensadores en serie- los costos de las pérdidas se los calculará durante 20 [AÑOS], contados desde el año 1988 al año 2007.
- 5.- Se asume que los datos para el año 1986 de: factor de carga [F_c], costo anual del [KW]([K_p]) y costo del [KWH]([K_e]) que se encuentran dados en la sección 6.2.6 no varían para los años posteriores al año 1986.

- 6.- En la sección 6.4.2.1 de evaluación técnica se ha llevado a cabo la implementación de condensadores en derivación hasta el año 1991 asumiendo que luego del año 1991 es incierta la implementación de alguna otra alternativa de suministro de reactivos, por cuya razón no varían las pérdidas desde el año 1991 hasta el año 2007.
- 7.- El valor económico de la alternativa condensadores en derivación se la calcula tomando en cuenta los siguientes rubros:
- 7i.- Valor presente al año 1986 del costo de la instalación para las tasas de rentabilidad $i=8$ [%], $i=10$ [%], $i=12$ [%] e $i=14$ [%].
 - 7ii.- Valor presente al año 1986 del valor residual de la instalación, si lo hubiere; para las tasas de rentabilidad $i=8$ [%], $i=10$ [%], $i=12$ [%] e $i=14$ [%]. Para determinar el valor residual se estima una depreciación lineal.
 - 7iii.- Valor presente al año 1986 del costo de las pérdidas para las tasas de rentabilidad $i=8$ [%], $i=10$ [%], $i=12$ [%] e $i=14$ [%].

En la FIG 6.23 se muestra el gráfico de la instalación de condensadores en derivación que se conectan bajo la forma de doble estrella con el neutro unido entre sí y aislado de tierra. [Ref. 35, Ref. 38].

El cálculo del costo [FOB] de la instalación de condensadores en derivación se lo hace considerando los dispositivos de la FIG 6.23 y tomando en cuenta que el nivel de voltaje al cual van conectados los condensadores en derivación es un nivel de 13.8 [KV] de la S/E-1 de Riobamba.

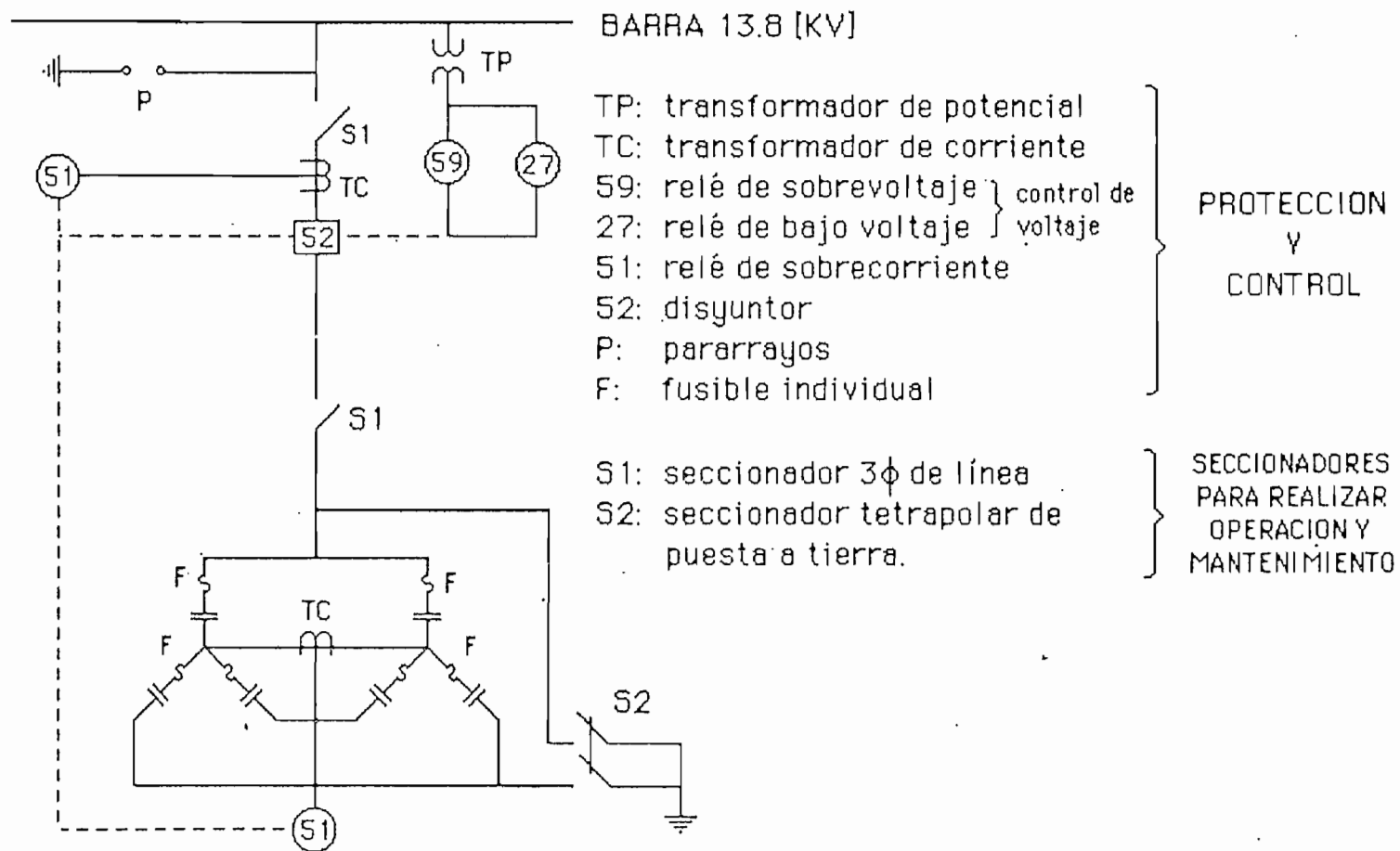


FIG 6.23. Instalación de condensador en derivación conectado bajo la forma de doble estrella con el neutro unido entre sí y aislado de tierra.

6.4.2.2.1 Cálculo del valor presente del costo de la instalación de la etapa de 4.8 [MVAR].

La inversión se la efectúa en el año 1988 y de acuerdo al numeral 1.- de la sección precedente 6.4.2.2 se tiene para el año 1988:

1.- COSTOS [FOB]

Item	Descripción	Costo total [DOLARES]
1	Condensador en derivación (el total de unidades capacitivas)	30504
2	Fusibles 30T (24 fusibles)	1800
3	Protección y control	38942
4	Seccionadores para realizar maniobras de operación y mantenimiento	<u>4107</u>
	SUBTOTAL	75353

Los costos [FOB] del equipo empleado han sido obtenidos de catálogos de fabricantes de diversas marcas y además utilizando información de [Ref. 34, Ref. 35].

2.- COSTOS ADICIONALES U OTROS COSTOS

	[%]	[DOLARES]
- Flete marítimo	15 [%]	11303
- Nacionalización y transporte interno	10 [%]	7535
- Equipo auxiliar	8 [%]	6028
- Obras civiles	8 [%]	6028
- Montaje y supervisión del montaje	8 [%]	6028
- Ingeniería y administración	23 [%]	17331
- Impuestos y seguros	15 [%]	<u>11303</u>
	SUBTOTAL:	65556

TOTAL: 1.- + 2.-

→ C = 140909 [DOLARES]

En la tabla 6.74 se tabulan los valores presentes al año 1986 del costo de la instalación para las tasas de rentabilidad del 8 [%], 10 [%], 12 [%] y 14 [%]. Para la confección de la tabla 6.74 se ha usado la fórmula [5.65] de la sección 5.3.2.1 con:

$$C = 140909 \text{ [DOLARES]} \quad [6.105]$$

$$i = 8 \text{ [%]}, 10 \text{ [%]}, 12 \text{ [%]}, 14 \text{ [%]} \quad [6.106]$$

$$n = 2 \text{ [AÑOS]} \quad [6.107]$$

TABLA 6.74

ETAPA DE 4.8 [MVAR] EN CONDENSADORES EN DERIVACION			
VALOR PRESENTE AL AÑO 1986 DEL COSTO DE LA INSTALACION			
i = 8 [%]	i = 10 [%]	i = 12 [%]	i = 14 [%]
VP (C)	VP (C)	VP (C)	VP (C)
[DOLARES]	[DOLARES]	[DOLARES]	[DOLARES]
120807	116454	112332	108425

6.4.2.2 Cálculo del valor presente del valor residual de la instalación de la etapa de 4.8 [MVAR]

Dado que la inversión de la etapa de 4.8 [MVAR] se la realiza en el año 1988 y puesto que de acuerdo al numeral 4.- de la sección 6.4.2.2 los costos de las pérdidas se los calculará durante 20 [AÑOS] contados desde 1988 a 2007, tiempo que constituye la vida media útil de la etapa de 4.8 [MVAR], significa que el valor residual del año 2007 se reduce a cero, y en consecuencia el valor presente al año 1986, de un valor residual cero al final del año 2007, para las tasas de rentabilidad del 8 [%], 10 [%], 12 [%] y 14 [%] también será cero.

6.4.2.3 Cálculo del valor presente del costo de la instalación de la primera etapa de 10.8 [MVAR].

La inversión se la efectúa en el año 1988 y de acuerdo al numeral 1.- de la sección 6.4.2.2 se tiene que para el año 1988:

1.- COSTOS [FOB]

Item	Descripción	Costo total [DOLARES]
1	Condensador en derivación (el total de unidades capacitivas)	68634
2	Fusibles 30T (54 fusibles)	4050
3	Protección y control	38942
4	Seccionadores para realizar maniobras de operación y mantenimiento	<u>4107</u>
SUBTOTAL		115733

Los costos [FOB] del equipo empleado han sido obtenidos de catálogos de fabricantes de diversas marcas y además utilizando información de [Ref. 34, Ref. 35].

2.- COSTOS ADICIONALES U OTROS COSTOS

	[%]	[DOLARES]
- Flete marítimo	15 [%]	17360
- Nacionalización y transporte interno	10 [%]	11573
- Equipo auxiliar	.8 [%]	9259
- Obras civiles	8 [%]	9259
- Montaje y supervisión del montaje	8 [%]	9259
- Ingeniería y administración	23 [%]	26619
- Impuestos y seguros	15 [%]	<u>17360</u>
SUBTOTAL:		100689

TOTAL: 1.- + 2.-

→ C = 216422 [DOLARES]

En la tabla 6.75 se tabulan los valores presentes al año 1986 del costo de la instalación para las tasas de rentabilidad del 8 [%], 10 [%], 12 [%].

y 14 [%]. Para la confección de la tabla 6.75 se ha usado la fórmula [5.65] de la sección 5.3.2.1 con:

$$C = 216422 \text{ [DOLARES]} \quad [6.108]$$

$$i = 8 \text{ [%]}, 10 \text{ [%]}, 12 \text{ [%]}, 14 \text{ [%]} \quad [6.109]$$

$$n = 2 \text{ [AÑOS]} \quad [6.110]$$

TABLA 6.75

PRIMERA ETAPA DE 10.8 [MVAR] EN CONDENSADORES EN DERIVACION			
VALOR PRESENTE AL AÑO 1986 DEL COSTO DE LA INSTALACION			
$i = 8 \text{ [%]}$	$i = 10 \text{ [%]}$	$i = 12 \text{ [%]}$	$i = 14 \text{ [%]}$
VP (C)	VP (C)	VP (C)	VP (C)
[DOLARES]	[DOLARES]	[DOLARES]	[DOLARES]
165547	178861	172530	166530

6.4.2.2.4 Cálculo del valor presente del valor residual de la instalación de la primera etapa de 10.8 [MVAR]

En razón de que la inversión de la primera etapa de 10.8 [MVAR] se la realiza en el año 1988 y dado que de acuerdo al numeral 4.- de la sección 6.4.2.2 los costos de las pérdidas se los calcula durante 20 [AÑOS] contados desde 1988 a 2007, tiempo que constituye la vida media útil de la primera etapa de 10.8 [MVAR], significa que el valor residual al final del año 2007 se reduce a cero, y en consecuencia el valor presente al año 1986, de un valor residual cero al final del año 2007, para las tasas de rentabilidad del 8 [%], 10 [%], 12 [%] y 14 [%] también será cero.

6.4.2.2.5 Cálculo del valor presente del costo de la instalación de la segunda etapa de 10.8 [MVAR].

La inversión se la efectúa en el año 1989 y de acuerdo al numeral 1.- de la sección 6.4.2.2 se tiene que para el año 1988:

1.- COSTOS [FOB]

Item	Descripción	Costo total [DOLARES]
1	Condensador en derivación (el total de unidades capacitivas)	68634
2	Fusibles 30T (54 fusibles)	4050
3	Protección y control	38942
4	Seccionadores para realizar maniobras de operación y mantenimiento	<u>4107</u>
	SUBTOTAL	115733

Los costos [FOB] del equipo empleado han sido obtenidos de catálogos de fabricantes de diversas marcas y además utilizando información de [Ref. 34, Ref. 35].

2.- COSTOS ADICIONALES U OTROS COSTOS

	[%]	[DOLARES]
- Flete marítimo	15 [%]	17360
- Nacionalización y transporte interno	10 [%]	11573
- Equipo auxiliar	8 [%]	9259
- Obras civiles	8 [%]	9259
- Montaje y supervisión del montaje	8 [%]	9259
- Ingeniería y administración	23 [%]	26619
- Impuestos y seguros	15 [%]	<u>17360</u>
	SUBTOTAL:	100689

TOTAL: 1.- + 2.-

→ C = 216422 [DOLARES]

En la tabla 6.76 se tabulan los valores presentes al año 1986 del costo de la instalación para las tasas de rentabilidad del 8 [%], 10 [%], 12 [%] y 14 [%]. Para la confección de la tabla 6.76 se ha usado la fórmula [5.65] de la sección 5.3.2.1 con:

$$C = 216422 \text{ [DOLARES]} \quad [6.111]$$

$$i = 8 \text{ [%]}, 10 \text{ [%]}, 12 \text{ [%]}, 14 \text{ [%]} \quad [6.112]$$

$$n = 3 \text{ [AÑOS]} \quad [6.113]$$

TABLA 6.76

SEGUNDA ETAPA DE 10.8 [MVAR] EN CONDENSADORES EN DERIVACION			
VALOR PRESENTE AL AÑO 1986 DEL COSTO DE LA INSTALACION			
i = 8 [%]	i = 10 [%]	i = 12 [%]	i = 14 [%]
VP (C)	VP (C)	VP (C)	VP (C)
[DOLARES]	[DOLARES]	[DOLARES]	[DOLARES]
171803	162601	154045	146079

6.4.2.2.6 Cálculo del valor presente del valor residual de la instalación de la segunda etapa de 10.8 [MVAR]

La inversión de la segunda etapa de 10.8 [MVAR] se la realiza en el año 1989 y dado que de acuerdo al numeral 4.- de la sección 6.4.2.2 los costos de las pérdidas se los calculará durante 20 [AÑOS] contados desde 1988 a 2007 quiere decir que al finalizar el año 2007 los segundos 10.8 [MVAR] vienen a tener sólo 19 [AÑOS] y no los 20 [AÑOS] que corresponden a su vida media útil; razón por la cual al finalizar el año 2007 la segunda etapa de 10.8 [MVAR] tendrá un valor residual. Para cuantificar el valor residual de la segunda etapa de 10.8 [MVAR] se estima una depreciación lineal de la alternativa de condensadores en derivación, y por consiguiente el valor residual al final del año 2007 será:

$$V_r = 216422 [1-(19/20)] \quad [6.114]$$

$$\text{ó; } V_r = 10821 [\text{DOLARES}] \quad [6.115]$$

En la tabla 6.77 se tabulan los valores presentes al año 1986 del valor residual de la instalación para las tasas de rentabilidad del 8 [%], 10 [%], 12

[%] y 14[%]. Para la confección de la tabla 6.77 se ha usado la fórmula [5.65] de la sección 5.3.2.1 con:

$$C = V_r = 10821 \text{ [DOLARES]} \quad [6.116]$$

$$i = 8 \text{ [%]}, 10 \text{ [%]}, 12 \text{ [%]}, 14 \text{ [%]} \quad [6.117]$$

$$n = 21 \text{ [AÑOS]} \quad [6.118]$$

TABLA 6.77

SEGUNDA ETAPA DE 10.8 [MVAR] EN CONDENSADORES EN DERIVACION			
VALOR PRESENTE AL AÑO 1986 DEL VALOR RESIDUAL DE LA INSTALACION			
i = 8 [%]	i = 10 [%]	i = 12 [%]	i = 14 [%]
VP (C)	VP (C)	VP (C)	VP (C)
[DOLARES]	[DOLARES]	[DOLARES]	[DOLARES]
2150	1462	1002	691

6.4.2.2.7 Valor presente al año 1986 del costo de la instalación de la alternativa: condensadores en derivación.

En la tabla 6.78 se tabulan los rubros de:

- 1.- Valor presente al año 1986 del costo de la instalación de la etapa de 4.8 [MVAR] para las tasas de rentabilidad del 8 [%], 10 [%], 12 [%] y 14 [%]; según como se ha tomado de la tabla 6.74 de la sección 6.4.2.2.1.
- 2.- Valor presente al año 1986 del costo de la instalación de la primera etapa de 10.8 [MVAR] para las tasas de rentabilidad del

8 [%], 10 [%], 12 [%] y 14 [%]; según como se ha tomado de la tabla 6.75 de la sección 6.4.2.2.3.

3.- Valor presente al año 1986 del costo de la instalación de la segunda etapa de 10.8 [MYAR] para las tasas de rentabilidad del 8 [%], 10 [%], 12 [%] y 14 [%]; según como se ha tomado de la tabla 6.76 de la sección 6.4.2.2.5.

4.- Valor presente al año 1986 del costo de la instalación de la alternativa -condensadores en derivación- para las tasas de rentabilidad del 8 [%], 10 [%], 12 [%] y 14 [%], formado por la suma de los rubros mencionados en los numerales 1.-, 2.- y 3.-.

TABLA 6.78

		ALTERNATIVA: CONDENSADORES EN DERIVACION			
		i=8 [%]	i=10 [%]	i=12 [%]	i=14 [%]
VALOR PRESENTE AL AÑO 1986 DEL COSTO DE LA INSTALACION DE LA ETAPA DE 4.8 [MYAR]	[DOLARES]	120807	116454	112332	108425
VALOR PRESENTE AL AÑO 1986 DEL COSTO DE LA INSTALACION DE LA PRIMERA ETAPA DE 10.8 [MYAR]	[DOLARES]	185547	178861	172530	166530
VALOR PRESENTE AL AÑO 1986 DEL COSTO DE LA INSTALACION DE LA SEGUNDA ETAPA DE 10.8 [MYAR]	[DOLARES]	171803	162601	154045	146079
VALOR PRESENTE AL AÑO 1986 DEL COSTO DE LA INSTALACION DE LA ALTERNATIVA: CONDEN- SADORES EN DERIVACION	[DOLARES]	478157	457916	438907	421034

6.4.2.2.8 Valor presente al año 1986 del valor residual de la instalación de la alternativa: condensadores en derivación.

En la tabla 6.79 se tabulan los rubros de:

- 1.- Valor presente al año 1986 del valor residual de la instalación de la etapa de 4.8 [MVAR] para las tasas de rentabilidad del 8 [%], 10 [%], 12 [%] y 14 [%] de acuerdo al análisis llevado a cabo en la sección 6.4.2.2.2.
- 2.- Valor presente al año 1986 del valor residual de la instalación de la primera etapa de 10.8 [MVAR] para las tasas de rentabilidad del 8 [%], 10 [%], 12 [%] y 14 [%] de acuerdo al análisis llevado a cabo en la sección 6.4.2.2.4.
- 3.- Valor presente al año 1986 del valor residual de la instalación de la segunda etapa de 10.8 [MVAR] para las tasas de rentabilidad del 8 [%], 10 [%], 12 [%] y 14 [%]; según como se ha tomado de la tabla 6.77 de la sección 6.4.2.2.6.
- 4.- Valor presente al año 1986 del valor residual de la instalación de la alternativa -condensadores en derivación- para las tasas de rentabilidad del 8 [%], 10 [%], 12 [%] y 14 [%], formado por la suma de los rubros mencionados en los numerales 1.-, 2.- y 3.-.

TABLA 6.79

		ALTERNATIVA: CONDENSADORES EN DERIVACION			
		i=8 [%]	i=10 [%]	i=12 [%]	i=14 [%]
VALOR PRESENTE AL AÑO 1986 DEL VALOR RESIDUAL DE LA INSTALACION DE LA ETAPA DE 4.8 [MYAR]	[DOLARES]	0	0	0	0
VALOR PRESENTE AL AÑO 1986 DEL VALOR RESIDUAL DE LA INSTALACION DE LA PRIMERA ETAPA DE 10.8 [MYAR]	[DOLARES]	0	0	0	0
VALOR PRESENTE AL AÑO 1986 DEL VALOR RESIDUAL DE LA INSTALACION DE LA SEGUNDA ETAPA DE 10.8 [MYAR]	[DOLARES]	2150	1462	1002	691
VALOR PRESENTE AL AÑO 1986 DEL VALOR RESIDUAL DE LA INSTALACION DE LA ALTERNATIVA: CONDEN- SADORES EN DERIVACION	[DOLARES]	2150	1462	1002	691

6.4.2.2.9 Cálculo del valor presente del costo de las pérdidas.

De modo de tener en cuenta las consideraciones anotadas en los numerales 4.- y 6.- de la sección 6.4.2.2 en la tabla 6.80 se completa la tabla 6.72 de la sección 6.4.2.1.3 mediante la tabulación de la potencia activa de envío y potencia activa de pérdidas.

En el Apéndice 6B4 se indica el procedimiento de cálculo para la confección de la tabla 6.80.

Prestando atención a la consideración del numeral 4.- de la sección 6.4.2.2 y usando los valores de potencia activa perdida proporcionados por la

TABLA 6.80

$$e_s = 1.016 \text{ [P.U]}$$

$$e_s = 70.104 \text{ [KV]}$$

AÑO	CARGA NETA MAXIMA		ALTERNATIVA CONDENSADORES EN DERIVACION							
	POTENCIA ACTIVA	POTENCIA REACTIVA	POT. REACT. DE CON. EN DERIV. CON LA CARGA NETA MAXIMA	POTENCIA REACTIVA DE RECEPCION	VOLTAJE TERMINAL DE RECEPCION		ANGULO DE OPERACION DE LA LINEA	CORRIENTE DE LA LINEA	POTENCIA ACTIVA DE ENVIO	POTENCIA ACTIVA PERDIDA
	P_L [MW]	Q_L [MYAR]	Q_{CD} [MYAR]	$Q_r = Q_L - Q_{CD}$ [MYAR]	e_r [KV]	e_r [P.U]	Δ [°]	i [A]	P_s [MW]	$P_p = P_s - P_L$ [MW]
1988	30.8	8.3	15.6	-7.3	66.487	0.964	9.979	274.864	33.319	2.519
1989	33.0	9.2	21.6	-12.4	67.690	0.981	11.133	300.683	36.014	3.014
1990	35.1	10.1	21.6	-11.5	66.857	0.969	11.767	318.964	38.491	3.391
1991	37.5	11.1	25.6	-14.5	67.249	0.975	12.816	345.177	41.472	3.972

tabla 6.80; en la tabla 6.81 se tabulan: el costo de las pérdidas, el valor presente al año 1986 del costo de las pérdidas, así como el total de los valores presentes al año 1986 de los costos de las pérdidas. La estructuración de la tabla 6.81 es similar a la de la tabla 6.18 de la sección 6.4.1.1.2.1.3.2, o sea siguiendo el procedimiento de cálculo del Apéndice 6A6, y obviamente empleando las tasas de rentabilidad del 8 [%], 10 [%], 12 [%] y 14 [%].

TABLA 6.81

ALTERNATIVA: CONDENSADORES EN DERIVACION						
AÑO	POTENCIA ACTIVA PERDIDA P_p	COSTO DE LAS PERDIDAS C_{pp}	VALOR PRESENTE AL AÑO 1986 DEL COSTO DE LAS PERDIDAS			
			$i=8$ [%]	$i=10$ [%]	$i=12$ [%]	$i=14$ [%]
		$63875 P_p$	$VP(C_{pp})$	$VP(C_{pp})$	$VP(C_{pp})$	$VP(C_{pp})$
	[MW]	[DOLARES]	[DOLARES]	[DOLARES]	[DOLARES]	[DOLARES]
1988	2.519	160901	137947	132976	128269	123808
1989	3.014	192519	152828	144642	137031	129945
1990	3.391	216600	159207	147941	137653	128245
1991... ...,2007	3.972	253712	1'701057	1'390045	1'147959	957317
TOTAL DE LOS VALORES PRESENTES AL AÑO 1986 DE LOS COSTOS DE LAS PERDIDAS		$\sum_{j=1988}^{2007} VP(C_{ppj})$	2'151039	1'815604	1'550912	1'339315

6.4.2.2.10 Valor económico de la alternativa: condensadores en derivación

En la tabla 6.82 se tabulan los rubros de:

- 1.- Valor presente al año 1986 del costo de la instalación de la alternativa condensadores en derivación, para las tasas de rentabilidad del 8 [%], 10 [%], 12 [%] y 14 [%] según como se ha tomado de la tabla 6.78 de la sección 6.4.2.2.7.
- 2.- Valor presente al año 1986 del valor residual de la instalación de la alternativa condensadores en derivación, para las tasas de rentabilidad del 8 [%], 10 [%], 12 [%] y 14 [%] según como se ha tomado de la tabla 6.79 de la sección 6.4.2.2.8.
- 3.- Total de los valores presentes al año 1986 de todos los costos de las pérdidas para las tasas de rentabilidad del 8 [%], 10 [%], 12 [%] y 14 [%]; según como se ha tomado de la tabla 6.81 de la sección 6.4.2.2.9.
- 4.- Valor económico de la de la alternativa -condensadores en derivación- para las tasas de rentabilidad del 8 [%], 10 [%], 12 [%] y 14 [%], formado por la suma de los rubros mencionados en los numerales 1.-y 3.- y luego restando el rubro mencionado en 2.-.

TABLA 6.82.

		ALTERNATIVA: CONDENSADORES EN DERIVACION			
		i=8 [%]	i=10 [%]	i=12 [%]	i=14 [%]
VALOR PRESENTE AL AÑO 1986 DEL COSTO DE LA INSTALACION	[DOLARES]	478157	457916	438907	421034
VALOR PRESENTE AL AÑO 1986 DEL VALOR RESIDUAL DE LA INSTALACION	[DOLARES]	-2150	-1462	-1002	-691
TOTAL DE LOS VALO- RES PRESENTES AL AÑO 1986 DE LOS COSTOS DE LAS PERDIDAS	[DOLARES]	2'151039	1'815604	1'550912	1'339315
VALOR ECONOMICO DE LA ALTERNATIVA: CONDENSADORES EN DERIVACION	[DOLARES]	2'627046	2'272058	1'988817	1'759658

6.4.3 Alternativa: otra línea de sub-transmisión adicional, en paralelo a la ya existente.

6.4.3.1 Evaluación técnica.

6.4.3.1.1 Análisis técnico.

En la tabla 6.83 se tabulan los valores de: carga neta máxima, magnitud del voltaje terminal de recepción (entre fases), ángulo de operación de la línea y magnitud de la corriente de línea para los años que van desde 1988 a 1991, considerando la alternativa de otra L/ST adicional conectada en paralelo a la ya existente.

TABLA 6.83

		$e_s = 1.016$ [P.U] $e_s = 70.104$ [KV]				
		CARGA NETA MAXIMA		OTRA L/ST ADICIONAL, EN PARALELO A LA YA EXISTENTE		
AÑO	POTENCIA ACTIVA	POTENCIA REACTIVA	VOLTAJE TERMINAL DE RECEPCION	ANGULO DE OPERACION DE LA LINEA	CORRIENTE DE LA LINEA	
	P_L [MW]	Q_L [MYAR]	e_r [KV]	e_r [P.U]	Δ [°]	i [A]
1988	30.8	8.3	65.854	0.954	3.939	139.830
1989	33.0	9.2	65.455	0.950	4.226	151.089
1990	35.1	10.1	65.060	0.943	4.501	162.060
1991	37.5	11.1	64.605	0.936	4.821	174.748

De la tabla 6.83 se establece que:

- 1.- La alternativa -otra L/ST adicional en paralelo- en condiciones de carga neta máxima, hasta el año 1989 satisface los requerimientos técnicos señalados en los numerales 1.- y 2.- de la sección 5.1.3; y a partir del año 1990 si bien esta alternativa no presenta problemas en cuanto a exceder el límite térmico, en cambio presenta problemas de regulación de voltaje, pues la magnitud del voltaje de recepción (entre fases) se encuentra fuera del rango permisible.

Se han verificado los requerimientos técnicos mencionados en los numerales 1.- y 2.- de la sección 5.1.3 para condiciones de carga neta máxima, pero también es necesario hacerlo para condiciones de carga neta media y carga neta mínima. Puesto que para carga neta máxima a partir del

año 1990 la alternativa otra L/ST adicional en paralelo presenta problemas en cuanto a satisfacer los requerimientos técnicos señalados en los numerales 1.- y 2.- de la sección 5.1.3, se desprende fácilmente que es suficiente verificar dichos requerimientos para cargas netas media y mínima a partir del año 1990.

La tabla 6.84 es una tabla que es similar a la tabla 6.83, con la particularidad de que la tabla 6.84 está referida a condiciones de carga neta media.

TABLA 6.84

		$e_s = 1.016$ [P.U] $e_s = 70.104$ [KV]				
		OTRA L/ST ADICIONAL, EN PARALELO A LA YA EXISTENTE				
AÑO	CARGA NETA MEDIA		VOLTAJE TERMINAL DE RECEPCION		ANGULO DE OPERACION DE LA LINEA	CORRIENTE DE LA LINEA.
	POTENCIA ACTIVA	POTENCIA REACTIVA	e_r [KV]	e_r [P.U]	Δ [°]	i [A]
	P_L [MW]	Q_L [MVAR]				
1990	23.4	6.73	66.883	0.969	2.917	105.091
1991	25.0	7.4	66.605	0.965	3.115	113.000

La tabla 6.85 es una tabla que es similar a la tabla 6.83, con la peculiaridad de que la tabla 6.85 está referida a condiciones de carga neta mínima.

TABLA 6.85

		$e_s = 1.016$ [P.U] $e_s = 70.104$ [KV]				
		OTRA L/ST ADICIONAL, EN PARALELO A LA YA EXISTENTE				
AÑO	CARGA NETA MINIMA		VOLTAJE TERMINAL DE RECEPCION		ANGULO DE OPERACION DE LA LINEA	CORRIENTE DE LA LINEA
	POTENCIA ACTIVA	POTENCIA REACTIVA	e_r [KV]	e_r [P.U]	Δ [°]	i [A]
	P_L [MW]	Q_L [MYAR]				
1990	11.7	3.37	68.555	0.994	1.422	51.270
1991	12.5	3.70	68.427	0.992	1.516	54.996

De las tablas 6.84 y 6.85 se establece que:

- 2.- La alternativa -otra L/ST adicional en paralelo- durante el período de los años que van desde 1988 a 1991 para condiciones de carga neta media y carga neta mínima satisface los requerimientos técnicos señalados en los numerales 1.- y 2.- de la sección 5.1.3.

Por otra parte, las tablas 6.83, 6.84 y 6.85 se elaboran de una manera similar y siguiendo el procedimiento de cálculo dado en el Apéndice 6C1.

De lo enunciado en los numerales 1.- y 2.- y con el propósito de que haya paralelismo con las alternativas de condensadores en serie y condensadores en derivación en lo concerniente a que estas dos alternativas citadas se equipararon en el tiempo en lo relacionado al suministro de reactivos a la carga que se lo hizo hasta el año 1991, estimando que para dichas alternativas luego del año 1991 la implementación de alguna otra

alternativa de suministros de reactivos era incierta; para la alternativa de otra L/ST adicional en paralelo se procederá de la siguiente manera:

- 3.- Se implementará condensadores en derivación con la carga, de suerte que hasta el año 1991 la alternativa -otra L/ST adicional en paralelo-satisfaga los requerimientos técnicos señalados en los numerales 1.- y 2.- de la sección 5.1.3. En consecuencia será necesario implementar condensadores en derivación a partir del año 1990 sólo para condiciones de carga neta máxima.

6.4.3.1.2 Potencia reactiva en condensadores en derivación con la carga.

Al igual que se procedió con la alternativa -condensadores en derivación con la carga- para la alternativa -otra L/ST adicional en paralelo- la potencia reactiva necesaria en condensadores en derivación se determina en base a lo que se citó en el numeral 1.- de la sección 6.4.2.1.2.

En la tabla 6.86 se tabulan los valores de: carga neta máxima, potencia reactiva en condensadores en derivación, potencia reactiva terminal de recepción, magnitud del voltaje terminal de recepción (entre fases), ángulo de operación de la línea y magnitud de la corriente de línea para los años 1990 y 1991.

La tabla 6.86 se elabora siguiendo el procedimiento de cálculo detallado en el Apéndice 6B1 utilizando los datos correspondientes y con la acotación de que:

- a.- En los cálculos se usa:

$$R = R_p = 5.555 \text{ [OHM]} \quad [6.119]$$

TABLA 6.86

$$e_s = 1.016 \text{ [P.U]}$$

$$e_s = 70.104 \text{ [KV]}$$

AÑO	CARGA NETA MAXIMA		OTRA L/ST ADICIONAL EN PARALELO A LA YA EXISTENTE Y CON CONDENSADORES EN DERIVACION CON LA CARGA NETA MAXIMA					
	POTENCIA ACTIVA	POTENCIA REACTIVA	POT. REACT. DE CON. EN DERIV. CON LA CARGA NETA MAXIMA	POTENCIA REACTIVA DE RECEPCION	VOLTAJE TERMINAL DE RECEPCION		ANGULO DE OPERACION DE LA LINEA	CORRIENTE DE LA LINEA
	P_L [MW]	Q_L [MYAR]	$Q_{CD} = Q_L - Q_r$ [MYAR]	Q_r [MYAR]	e_r [KV]	e_r [P.U]	Δ [°]	i [A]
1990	35.1	10.1	2.61	7.49	65.550	0.950	4.648	160.846
1991	37.5	11.1	5.00	6.10	65.550	0.950	5.099	172.226

$$X_L = X_{Lp} = 11.795 \text{ [OHM]} \quad [6.120]$$

valores óhmicos que resultan de dos líneas similares en paralelo; tal que cada línea tiene $R = 11.11 \text{ [OHM]}$ y $X_L = 23.59 \text{ [OHM]}$.

- b.- La magnitud de la corriente de líneas calculada con la ecuación [1] del Apéndice 6B1 se debe dividir para dos, ya que se tiene dos líneas similares en paralelo.

En base a los valores de potencia reactiva de condensadores en derivación dados por la tabla 6.86 se debe determinar los requerimientos reactivos que satisfaga los requerimientos de la carga; a sabiendas que para condiciones de carga neta media y carga neta mínima no se requiere compensación reactiva en condensadores en derivación.

6.4.3.1.2.1 Selección de los condensadores en derivación con la carga.

Para seleccionar los condensadores en derivación se lo hace también en base a los aspectos enunciados en los numerales 1.-, 2.-, 3.- y 4.- de la sección 6.4.2.1.2.1.

La potencia reactiva en condensadores en derivación que está tabulada en la tabla 6.86 de la sección 6.4.3.1.2 se ha calculado para un voltaje en el terminal de recepción de 0.95 [P.U] y puesto que la configuración de un condensador en derivación se calcula para voltaje nominal del sistema (en el terminal de recepción- 1 [P.U]); entonces habrá necesidad de corregir la potencia reactiva en condensadores en derivación dada por la tabla 6.86. La corrección se la efectúa multiplicando por $(1/0.95)^2$ los valores de potencia reactiva en condensadores en derivación dados por la tabla 6.86. En la tabla 6.87 se tabulan los valores corregidos de potencia reactiva en condensadores en derivación.

TABLA 6.87

AÑO	POTENCIA REACTIVA DE CONDENSADORES EN DERIVACION CON LA CARGA
	CARGA NETA MAXIMA
	Q_{CD} [MVAR]
1990	2.89
1991	5.54

De la tabla 6.87 se piensa que con condensadores en derivación de 3.0 [MVAR] y 3.0 [MVAR] se puede suplir los requerimientos reactivos de la carga, los cuales deberán funcionar de acuerdo a como las condiciones de carga lo determinen.

- Selección del condensador en derivación de 3.0 [MVAR]

En la tabla 6.88 se muestran varias disposiciones serie-paralelo de condensadores unidad que cumplen los requerimientos citados en los numerales 1.-, 2.- y 3.- de la sección 6.4.2.1.2.1; al utilizar respectivamente condensadores unidad de 50 [KVAR], 100 [KVAR], 150 [KVAR] y 200 [KVAR] nominales. La tabla 6.88 en lo referente a la determinación de una disposición serie-paralelo se elabora utilizando las relaciones dadas en el Apéndice 6B2. Además en la tabla 6.88 se ha adjuntado el costo [FOB] por condensador unidad y el costo [FOB] del condensador en derivación para una respectiva disposición serie-paralelo de los condensadores unidad. El costo [FOB] de los condensadores unidad se ha tomado de catálogos de la Westinghouse.

TABLA 6.88

KYARs NOMINALES POR UNIDAD	GRUPOS SERIE POR FASE Y POR ESTRELLA	UNIDADES EN PARALELO POR GRUPO SERIE	CANTIDAD TO- TAL DE UNIDA- DES DEL COND. EN DERIVACN.	MYARs NOMINALES DEL CONDEN. EN DERIVACN.	VOLTAJE APLICADO A LAS UNIDADES	VOLTAJE NOMINAL DE LAS UNIDADES	COSTO POR UNIDAD	COSTO DEL CONDEN. EN DERIVCN.
Q_n [KYAR]	N	M	q_B 6MN	[MYAR]	[V]	E_n [V]	[DOLARES]	[DOLARES]
50	2	8	96	4.8	3983.72	4160	750	72000
	1	10	60	3.0	7967.43	7960	750	45000
100	1	5	30	3.0	7967.43	7960	967	29010
150	1	4	24	3.6	7967.43	7960	1106	26544
200	1	3	18	3.6	7967.43	7960	1271	22878*

* Disposición serie-paralelo más económica

De la tabla 6.88 se deduce que la disposición serie-paralelo más económica origina un condensador en derivación de 3.6 [MYAR] nominales con unidades de 200 [KVAR] nominales y 7960 [V] nominales, 1 grupo serie por fase y por estrella y 3 unidades en paralelo por grupo serie. Al ser las unidades de 200 [KVAR] y 7960 [V] nominales se recomienda para cada unidad el uso de fusibles individuales del tipo 30T. [Ref. 46].

En consecuencia los valores nominales de potencia reactiva de los condensadores en derivación serán de una primera etapa de 3.6 [MYAR] y una segunda etapa de 3.6 [MYAR].

6.4.3.1.3 Verificación de que la alternativa -otra L/ST adicional en paralelo a la ya existente-; además con condensadores en derivación satisface los requerimientos de la carga.

Para condiciones de carga neta máxima en la tabla 6.89 se tabulan los valores de: potencia reactiva en condensadores en derivación (en base a los valores nominales de potencia reactiva de los condensadores en derivación que se obtuvieron en la sección precedente 6.4.3.1.2.1), potencia reactiva terminal de recepción, magnitud del voltaje terminal de recepción (entre fases), ángulo de operación de la línea y magnitud de la corriente de línea.

La tabla 6.89 en lo concerniente a la tabulación de los valores para los años 1988 y 1989 es una transcripción de la tabla 6.83 de la sección 6.4.3.1.1; y dado que en la sección 6.4.3.1.1 de la tabla 6.83 se dedujo que para los años 1988 y 1989 la alternativa -otra L/ST adicional en paralelo- satisfacía los requerimientos técnicos de los numerales 1.- y 2.- de la sección 5.1.3, entonces se explica el que $Q_{CD} = 0$ y $Q_r = Q_L$ para la tabla 6.89 para los años 1988 y 1989.

TABLA 6.89

$e_S = 1.016$ [P.U] $e_S = 70.104$ [KV]								
CARGA NETA MAXIMA		ALTERNATIVA: OTRA L/ST ADICIONAL EN PARALELO A LA YA EXISTENTE MAS CONDENSADORES EN DERIVACION						
AÑO	POTENCIA ACTIVA	POTENCIA REACTIVA	POT. REACT. DE CON. EN DERIV. CON LA CARGA NETA MAXIMA	POTENCIA REACTIVA DE RECEPCION	VOLTAJE TERMINAL DE RECEPCION		ANGULO DE OPERACION DE LA LINEA	CORRIENTE DE LA LINEA
	P_L	Q_L	Q_{CD}	$Q_r = Q_L - Q_{CD}$	e_r	e_r	Δ	i
	[MW]	[MVAR]	[MVAR]	[MVAR]	[KV]	[P.U]	[°]	[A]
1988	30.8	8.3	0	8.3	65.854	0.954	3.940	139.830
1989	33.0	9.2	0	9.2	65.455	0.950	4.226	151.089
1990	35.1	10.1	3.6	6.5	65.735	0.953	4.704	160.396
1991	37.5	11.1	3.6+3.6=7.2	3.9	65.958	0.956	5.220	171.163

Pero, en lo referente a los valores tabulados de los años 1990 y 1991, la tabla 6.89 se elabora siguiendo el procedimiento de cálculo detallado en el Apéndice 6B3, por supuesto usando los datos correspondiente y con la acotación de que:

- a.- En los cálculos se usa:

$$R = R_p = 5.555 \text{ [OHM]} \quad [6.121]$$

$$X_L = X_{Lp} = 11.795 \text{ [OHM]} \quad [6.122]$$

valores óhmicos que resultan de dos líneas similares en paralelo; tal que cada línea tiene $R = 11.11 \text{ [OHM]}$ y $X_L = 23.59 \text{ [OHM]}$.

- b.- La magnitud de la corriente de línea calculada con la ecuación [32] del Apéndice 6B3, se debe dividir para dos, ya que se está evaluando el caso de dos líneas similares en paralelo.

De la tabla 6.89 se confirma que la alternativa -otra L/ST adicional en paralelo a la ya existente más condensadores en derivación- satisface los requerimientos técnicos mencionados en los numerales 1.- y 2.- de la sección 5.1.3 para condiciones de carga neta máxima. Al propio tiempo, la alternativa -otra L/ST adicional en paralelo a la ya existente- sin necesidad de condensadores en derivación satisface los requerimientos técnicos mencionados en los numerales 1.- y 2.- de la sección 5.1.3, como oportunamente se señaló en el numeral 2.- de la sección 6.4.3.1.1.

6.4.3.2 Evaluación económica.

La evaluación económica de la alternativa -otra L/ST adicional en paralelo a la ya existente- se la realiza en base a los siguientes aspectos:

- 1.- El costo (costo [FOB] + costos adicionales) de una L/ST a 69 [KV] de 266.8 [MCM] y de 52 [KM] así como el costo (costo [FOB] + costos adicionales) de la posición de una línea a 69 [KV], que se tienen para el año 1986, se asume que no varían para los años siguientes al año 1986.
- 2.- El costo [FOB] de las etapas de 3.6 [MYAR] en condensadores en derivación- que se tiene para el año 1986 se asume que no varía para los años siguientes al año 1986.
- 3.- Dado que los condensadores unidad tienen una vida útil media de 20 [AÑOS], se considera también de 20 [AÑOS] la vida útil media de las etapas de condensadores en derivación.
- 4.- Adicionalmente a la inversión de una L/ST y sus dos posiciones que se la realiza en el año 1988; también se hace: una inversión de una etapa de 3.6 [MYAR] en el año 1990 y luego se hace una inversión de una segunda etapa de 3.6 [MYAR] en el año 1991, como puede verse de la tabla 6.89 de la sección 6.4.3.1.3.
- 5.- La vida media útil de una L/ST y la de una posición es de 30 [AÑOS]. [Ref. 34].
- 6.- Para guardar paralelismo con las alternativas de: condensadores en serie y condensadores en derivación analizados anteriormente; los costos de las pérdidas se los calculará durante 20 [AÑOS], contados desde el año 1988 al año 2007.
- 7.- Se asume que los datos para el año 1986 de: factor de carga [F_c], costo anual del [KW]([K_p]) y costo del [KWH]([K_e]), que se

encuentran dados en la sección 6.2.6 no varían para los años posteriores al año 1986.

- 8.- Al igual que con las alternativas de: condensadores en serie y condensadores en derivación; se estima que después del año 1991 es incierta la implementación de alguna otra alternativa de suministro de reactivos, por cuya razón no varían las pérdidas desde el año 1991 hasta el año 2007.
- 9.- El valor económico de la alternativa -otra L/ST adicional en paralelo a la ya existente- se la calcula tomando en cuenta los siguientes rubros:
 - 9i.- Valor presente al año 1986 del costo de la instalación (L/ST + dos posiciones + cond. en derivación) para las tasas de rentabilidad $i=8$ [%], $i=10$ [%], $i=12$ [%] e $i=14$ [%].
 - 9ii.- Valor presente al año 1986 del valor residual de la instalación (L/ST + dos posiciones + cond. en derivación) para las tasas de rentabilidad $i=8$ [%], $i=10$ [%], $i=12$ [%] e $i=14$ [%]. Para determinar el valor residual se estima una depreciación lineal.
 - 9iii.- Valor presente al año 1986 del costo de las pérdidas para las tasas de rentabilidad $i=8$ [%], $i=10$ [%], $i=12$ [%] e $i=14$ [%].

Como en el caso de la alternativa de condensadores en derivación, para el cálculo del costo [FOB] de la instalación de condensadores en derivación se lo hace considerando los dispositivos de la FIG 6.23 y tomando en cuenta que el nivel de voltaje al cual van conectados los condensadores en derivación es a nivel de 13.8 [KV] de la S/E-1 de Riobamba.

6.4.3.2.1 Cálculo del valor presente del costo de la instalación de la L/ST

La inversión se la efectúa en el año 1988 y de acuerdo al numeral 1.- de la sección precedente 6.4.3.2 se tiene que:

Item	Descripción	COSTO (costo [FOB] + costos adicionales) [DOLARES]
1	L/ST a 69 [KV], 266.8 [MCM], 52 [KM], conductor ACSR	2'103972
2	Posición a 69 [KV] en el terminal de envío	273989
3	Posición a 69 [KV] en el terminal de recepción	<u>273989</u>
TOTAL →		C = 2'651950

El costo (costo [FOB] + costos adicionales) del equipo empleado se lo obtiene a partir de las tablas 5.2 y 5.3 de la sección 5.2.3.

En la tabla 6.90 se tabulan los valores presentes al año 1986 del costo de la instalación de la L/ST para las tasas de rentabilidad de $i=8$ [%], $i=10$ [%], $i=12$ [%] e $i=14$ [%]. Para la confección de la tabla 6.90 se ha usado la fórmula [5.65] de la sección 5.3.2.1 con:

$$C = 2'651950 \text{ [DOLARES]} \quad [6.123]$$

$$i = 8 \text{ [%]}, 10 \text{ [%]}, 12 \text{ [%]}, 14 \text{ [%]} \quad [6.124]$$

$$n = 2 \text{ [AÑOS]} \quad [6.125]$$

TABLA 6.90

L/ST			
VALOR PRESENTE AL AÑO 1986 DEL COSTO DE LA INSTALACION			
i = 8 [%]	i = 10 [%]	i = 12 [%]	i = 14 [%]
VP (C)	VP (C)	VP (C)	VP (C)
[DOLARES]	[DOLARES]	[DOLARES]	[DOLARES]
2'273617	2'191694	2'114118	2'040589

6.4.3.2.2 Cálculo del valor presente del valor residual de la instalación de la L/ST.

La inversión de la L/ST se la realiza en el año 1988 y dado que según el numeral 6.- de la sección 6.4.3.2 los costos de las pérdidas se los calcula durante 20 [AÑOS] contados desde 1988 a 2007 quiere decir que al finalizar el año 2007 la L/ST viene a completar sólo 20 [AÑOS] y no los 30 [AÑOS] que corresponden a su vida media útil, razón por la cual al final del año 2007 la L/ST tendrá un valor residual. Para cuantificar el valor residual de la L/ST se estima una depreciación lineal y por consiguiente el valor residual al final del año 2007 será:

$$V_r = 2'651950 [1-(20/30)] \quad [6.126]$$

$$\text{ó; } V_r = 883983 \text{ [DOLARES]} \quad [6.127]$$

En la tabla 6.91 se tabulan los valores presentes al año 1986 del valor residual de la instalación para las tasas de rentabilidad del 8 [%], 10 [%], 12 [%] y 14 [%]. Para la confección de la tabla 6.91 se ha usado la fórmula [5.65] de la sección 5.3.2.1 con:

$$C = V_r = 883983 \text{ [DOLARES]} \quad [6.128]$$

$$i = 8 [\%], 10 [\%], 12 [\%], 14 [\%] \quad [6.129]$$

$$n = 21 \text{ [AÑOS]} \quad [6.130]$$

TABLA 6.91

L/ST			
VALOR PRESENTE AL AÑO 1986 DEL VALOR RESIDUAL DE LA INSTALACION			
$i = 8 [\%]$	$i = 10 [\%]$	$i = 12 [\%]$	$i = 14 [\%]$
VP (C)	VP (C)	VP (C)	VP (C)
[DOLARES]	[DOLARES]	[DOLARES]	[DOLARES]
175608	119453	81821	56421

6.4.3.2.3 Cálculo del valor presente de la instalación de la primera etapa de 3.6 [MVAR].

La inversión se la efectúa en el año 1990 y de acuerdo al numeral 2.- de la sección 6.4.3.2 se tiene que para el año 1990:

1.- COSTOS [FOB]

Item	Descripción	Costo total [DOLARES]
1	Condensador en derivación (el total de unidades capacitivas)	22878
2	Fusibles 30T (18 fusibles)	1350
3	Protección y control	38942
4	Seccionadores para realizar maniobras de operación y mantenimiento	<u>4107</u>
	SUBTOTAL	67277

Los costos [FOB] del equipo empleado han sido obtenidos de catálogos de fabricantes de diversas marcas y además utilizando información de [Ref. 34, Ref. 35].

2.- COSTOS ADICIONALES U OTROS COSTOS

	[%]	[DOLARES]
- Flete marítimo	15 [%]	10092
- Nacionalización y transporte interno	10 [%]	6728
- Equipo auxiliar	8 [%]	5382
- Obras civiles	8 [%]	5382
- Montaje y supervisión del montaje	8 [%]	5382
- Ingeniería y administración	23 [%]	15474
- Impuestos y seguros	15 [%]	<u>10092</u>
	SUBTOTAL:	58532

TOTAL: 1.- + 2.-

→ C = 125809 [DOLARES]

En la tabla 6.92 se tabulan los valores presentes al año 1986 del costo de la instalación para las tasas de rentabilidad del 8 [%], 10 [%], 12 [%]

y 14 [%]. Para la confección de la tabla 6.92 se ha usado la fórmula [5.65] de la sección 5.3.2.1 con:

$$C = 125809 \text{ [DOLARES]} \quad [6.131]$$

$$i = 8 \text{ [%]}, 10 \text{ [%]}, 12 \text{ [%]}, 14 \text{ [%]} \quad [6.132]$$

$$n = 4 \text{ [AÑOS]} \quad [6.133]$$

TABLA 6.92

PRIMERA ETAPA DE 3.6 [MVAR] EN CONDENSADORES EN DERIVACION			
VALOR PRESENTE AL AÑO 1986 DEL COSTO DE LA INSTALACION			
$i = 8 \text{ [%]}$	$i = 10 \text{ [%]}$	$i = 12 \text{ [%]}$	$i = 14 \text{ [%]}$
VP (C)	VP (C)	VP (C)	VP (C)
[DOLARES]	[DOLARES]	[DOLARES]	[DOLARES]
92473	85929	79954	74489

6.4.3.2.4 Cálculo del valor presente del valor residual de la instalación de la primera etapa de 3.6 [MVAR]

La inversión de la primera etapa de 3.6 [MVAR] se la realiza en el año 1990 y dado que según el numeral 6.- de la sección 6.4.3.2 los costos de las pérdidas se los calculará durante 20 [AÑOS] contados desde 1988 a 2007, quiere decir que al finalizar el año 2007 la primera etapa de 3.6 [MVAR] viene a completar sólo 18 [AÑOS] y no los 20 [AÑOS] que corresponden a su vida media útil, razón por la cual al final del año 2007 la primera etapa de 3.6 [MVAR] tendrá un valor residual. Para cuantificar el valor residual de la primera etapa de 3.6 [MVAR] se estima una depreciación lineal, y por consiguiente el valor residual al final del año 2007 será:

$$V_r = 125809 [1-(18/20)] \quad [6.134]$$

$$\text{ó; } V_r = 12581 \text{ [DOLARES]} \quad [6.135]$$

En la tabla 6.93 se tabulan los valores presentes al año 1986 del valor residual de la instalación para las tasas de rentabilidad del 8 [%], 10 [%], 12 [%] y 14 [%]. Para la confección de la tabla 6.93 se ha usado la fórmula [5.65] de la sección 5.3.2.1 con:

$$C = V_r = 12581 \text{ [DOLARES]} \quad [6.136]$$

$$i = 8 \text{ [%]}, 10 \text{ [%]}, 12 \text{ [%]}, 14 \text{ [%]} \quad [6.137]$$

$$n = 21 \text{ [AÑOS]} \quad [6.138]$$

TABLA 6.93

PRIMERA ETAPA DE 3.6 [MVAR] EN CONDENSADORES EN DERIVACION			
VALOR PRESENTE AL AÑO 1986 DEL VALOR RESIDUAL DE LA INSTALACION			
$i = 8 \text{ [%]}$	$i = 10 \text{ [%]}$	$i = 12 \text{ [%]}$	$i = 14 \text{ [%]}$
VP (C)	VP (C)	VP (C)	VP (C)
[DOLARES]	[DOLARES]	[DOLARES]	[DOLARES]
2499	1700	1164	803

6.4.3.2.5 Cálculo del valor presente del costo de la instalación de la segunda etapa de 3.6 [MVAR].

La inversión se la efectúa en el año 1991 y de acuerdo al numeral 2.- de la sección 6.4.3.2 se tiene que para el año 1991:

1.- COSTOS [FOB]

Item	Descripción	Costo total [DOLARES]
1	Condensador en derivación (el total de unidades capacitivas)	22878
2	Fusibles 30T (18 fusibles)	1350
3	Protección y control	38942
4	Seccionadores para realizar maniobras de operación y mantenimiento	<u>4107</u>
	SUBTOTAL	67277

Los costos [FOB] del equipo empleado han sido obtenidos de catálogos de fabricantes de diversas marcas y además utilizando información de [Ref. 34, Ref. 35].

2.- COSTOS ADICIONALES U OTROS COSTOS

	[%]	[DOLARES]
- Flete marítimo	15 [%]	10092
- Nacionalización y transporte interno	10 [%]	6728
- Equipo auxiliar	8 [%]	5382
- Obras civiles	8 [%]	5382
- Montaje y supervisión del montaje	8 [%]	5382
- Ingeniería y administración	23 [%]	15474
- Impuestos y seguros	15 [%]	<u>10092</u>
	SUBTOTAL:	58532

- TOTAL: 1.- + 2.-

→ C = 125809 [DOLARES]

En la tabla 6.94 se tabulan los valores presentes al año 1986 del costo de la instalación para las tasas de rentabilidad del 8 [%], 10 [%], 12 [%]

y 14 [%]. Para la confección de la tabla 6.94 se ha usado la fórmula [5.65] de la sección 5.3.2.1 con:

$$C = 125809 \text{ [DOLARES]} \quad [6.139]$$

$$i = 8 \text{ [%]}, 10 \text{ [%]}, 12 \text{ [%]}, 14 \text{ [%]} \quad [6.140]$$

$$n = 5 \text{ [AÑOS]} \quad [6.141]$$

TABLA 6.94

SEGUNDA ETAPA DE 3.6 [MVAR] EN CONDENSADORES EN DERIVACION			
VALOR PRESENTE AL AÑO 1986 DEL COSTO DE LA INSTALACION			
$i = 8 \text{ [%]}$	$i = 10 \text{ [%]}$	$i = 12 \text{ [%]}$	$i = 14 \text{ [%]}$
VP (C)	VP (C)	VP (C)	VP (C)
[DOLARES]	[DOLARES]	[DOLARES]	[DOLARES]
65623	78117	71387	65341

6.4.3.2.6 Cálculo del valor presente del valor residual de la instalación de la segunda etapa de 3.6 [MVAR]

La inversión de la segunda etapa de 3.6 [MVAR] se la realiza en el año 1991 y dado que según el numeral 6.- de la sección 6.4.3.2 los costos de las pérdidas se los calculará durante 20 [AÑOS] contados desde 1988 a 2007, quiere decir que al finalizar el año 2007 la segunda etapa de 3.6 [MVAR] viene a completar sólo 17 [AÑOS] y no los 20 [AÑOS] que corresponden a su vida media útil, razón por la cual al final del año 2007 la segunda etapa de 3.6 [MVAR] tendrá un valor residual. Para cuantificar el valor residual de la segunda etapa de 3.6 [MVAR] se estima una depreciación lineal, y por consiguiente el valor residual al final del año 2007 será:

$$V_r = 125809 [1-(17/20)] \quad [6.142]$$

$$\text{ó; } V_r = 18871 \text{ [DOLARES]} \quad [6.143]$$

En la tabla 6.95 se tabulan los valores presentes al año 1986 del valor residual de la instalación para las tasas de rentabilidad del 8 [%], 10 [%], 12 [%] y 14 [%]. Para la confección de la tabla 6.95 se ha usado la fórmula [5.65] de la sección 5.3.2.1 con:

$$C = V_r = 18871 \text{ [DOLARES]} \quad [6.144]$$

$$i = 8 \text{ [%]}, 10 \text{ [%]}, 12 \text{ [%]}, 14 \text{ [%]} \quad [6.145]$$

$$n = 21 \text{ [AÑOS]} \quad [6.146]$$

TABLA 6.95

SEGUNDA ETAPA DE 3.6 [MVAR] EN CONDENSADORES EN DERIVACION			
VALOR PRESENTE AL AÑO 1986 DEL VALOR RESIDUAL DE LA INSTALACION			
$i = 8 \text{ [%]}$	$i = 10 \text{ [%]}$	$i = 12 \text{ [%]}$	$i = 14 \text{ [%]}$
VP (C)	VP (C)	VP (C)	VP (C)
[DOLARES]	[DOLARES]	[DOLARES]	[DOLARES]
3749	2550	1747	1204

6.4.3.2.7 Valor presente al año 1986 del costo de la instalación de la alternativa: otra L/ST adicional en paralelo a la ya existente.

En la tabla 6.96 se tabulan los rubros de:

- 1.- Valor presente al año 1986 del costo de la instalación de la L/ST para las tasas de rentabilidad del 8 [%], 10 [%], 12 [%] y

14[%]; según como se ha tomado de la tabla 6.90 de la sección 6.4.3.2.1.

- 2.- Valor presente al año 1986 del costo de la instalación de la primera etapa de 3.6 [MVAR] para las tasas de rentabilidad del 8 [%], 10 [%], 12 [%] y 14[%]; según como se ha tomado de la tabla 6.92 de la sección 6.4.3.2.3.
- 3.- Valor presente al año 1986 del costo de la instalación de la segunda etapa de 3.6 [MVAR] para las tasas de rentabilidad del 8 [%], 10 [%], 12 [%] y 14[%]; según como se ha tomado de la tabla 6.94 de la sección 6.4.3.2.5.
- 4.- Valor presente al año 1986 del costo de la instalación de la alternativa -otra L/ST adicional en paralelo a la ya existente- para las tasas de rentabilidad del 8 [%], 10 [%], 12 [%] y 14[%], formado por la suma de los rubros mencionados en los numerales 1.-, 2.- y 3.-.

TABLA 6.96

ALTERNATIVA: OTRA L/ST ADICIONAL
EN PARALELO A LA YA EXISTENTE

		i=8 [%]	i=10 [%]	i=12 [%]	i=14 [%]
VALOR PRESENTE AL AÑO 1986 DEL COSTO DE LA INSTALACION DE LA L/ST	[DOLARES]	2'273617	2'191694	2'114118	2'040589
VALOR PRESENTE AL AÑO 1986 DEL COSTO DE LA INSTALACION DE LA PRIMERA ETAPA DE 3.6 [MYAR]	[DOLARES]	92473	85929	79954	74489
VALOR PRESENTE AL AÑO 1986 DEL COSTO DE LA INSTALACION DE LA SEGUNDA ETAPA DE 3.6 [MYAR]	[DOLARES]	85623	78117	71387	65341
VALOR PRESENTE AL AÑO 1986 DEL COSTO DE LA INSTALACION DE LA ALTERNATIVA: OTRA L/ST ADICIONAL EN PARA- LELO A LA YA EXISTENTE	[DOLARES]	2'451713	2'355740	2'265459	2'180419

6.4.3.2.8 Cálculo del valor presente del valor residual de la instalación de la alternativa: otra L/ST adicional en paralelo a la ya existente.

En la tabla 6.97 se tabulan los rubros de:

- 1.- Valor presente al año 1986 del valor residual de la instalación de la L/ST, para las tasas de rentabilidad del 8 [%], 10 [%], 12 [%] y 14 [%] según como se ha tomado de la tabla 6.91 de la sección 6.4.3.2.2.
- 2.- Valor presente al año 1986 del valor residual de la instalación de la primera etapa de 3.6 [MYAR] para las tasas de rentabilidad

del 8 [%], 10 [%], 12 [%] y 14 [%] según como se ha tomado de la tabla 6.93 de la sección 6.4.3.2.4.

- 3.- Valor presente al año 1986 del valor residual de la instalación de la segunda etapa de 3.6 [MVAR] para las tasas de rentabilidad del 8 [%], 10 [%], 12 [%] y 14 [%]; según como se ha tomado de la tabla 6.95 de la sección 6.4.3.2.6.
- 4.- Valor presente al año 1986 del valor residual de la instalación de la alternativa -otra L/ST adicional en paralelo a la ya existente- para las tasas de rentabilidad del 8 [%], 10 [%], 12 [%] y 14 [%], formado por la suma de los rubros mencionados en los numerales 1.-, 2.- y 3.-.

TABLA 6.97

		ALTERNATIVA: OTRA L/ST ADICIONAL EN PARALELO A LA YA EXISTENTE			
		i=8 [%]	i=10 [%]	i=12 [%]	i=14 [%]
VALOR PRESENTE AL AÑO 1986 DEL VALOR RESIDUAL DE LA INSTALACION DE LA L/ST	[DOLARES]	175608	119453	81821	56421
VALOR PRESENTE AL AÑO 1986 DEL VALOR RESIDUAL DE LA INSTA- LACION DE LA PRIMERA ETAPA DE 3.6 [MYAR]	[DOLARES]	2499	1700	1164	803
VALOR PRESENTE AL AÑO 1986 DEL VALOR RESIDUAL DE LA INSTA- LACION DE LA SEGUNDA ETAPA DE 3.6 [MYAR]	[DOLARES]	3749	2550	1747	1204
VALOR PRESENTE AL AÑO 1986 DEL VALOR RESIDUAL DE LA INSTALACION DE LA ALTERNATIVA: OTRA L/ST ADICIONAL EN PARALELO A LA YA EXISTENTE	[DOLARES]	181856	123703	84732	58428

6.4.3.2.9 Cálculo del valor presente del costo de las pérdidas.

De tal manera de tener en cuenta las consideraciones anotadas en los numerales 6.- y 8.- de la sección 6.4.3.2 en la tabla 6.98 se completa la tabla 6.89 de la sección 6.4.3.1.3 mediante la tabulación de la potencia activa de envío y potencia activa de pérdidas.

La tabla 6.98 en lo pertinente a la potencia activa de envío y a la potencia activa perdida se elabora siguiendo el procedimiento de cálculo detallado en el Apéndice 6B4, utilizando los datos correspondientes y con la acotación de que:

TABLA 6.98

$$e_s = 1.016 \text{ [P.U]}$$

$$e_s = 70.104 \text{ [KV]}$$

AÑO	CARGA NETA MAXIMA		ALTERNATIVA: OTRA L/ST ADICIONAL EN PARALELO A LA YA EXISTENTE MAS CONDENSADORES EN DERIVACION							
	POTENCIA ACTIVA	POTENCIA REACTIVA	POT. REACT. DE CON. EN DERIV. CON LA CARGA NETA MAXIMA	POTENCIA REACTIVA DE RECEPCION	VOLTAJE TERMINAL DE RECEPCION		ANGULO DE OPERACION DE LA LINEA	CORRIENTE DE LA LINEA	POTENCIA ACTIVA DE ENVIO	POTENCIA ACTIVA PERDIDA
	P_L [MW]	Q_L [MYAR]	Q_{CD} [MYAR]	$Q_r = Q_L - Q_{CD}$ [MYAR]	e_r [KV]	e_r [P.U]	Δ [°]	i [A]	P_s [MW]	$P_p = P_s - P_L$ [MW]
1988	30.8	8.3	0	8.3	65.854	0.954	3.940	139.830	32.105	1.305
1989	33.0	9.2	0	9.2	65.455	0.950	4.226	151.089	34.522	1.522
1990	35.1	10.1	3.6	6.5	65.735	0.953	4.704	160.396	36.741	1.641
1991	37.5	11.1	7.2	3.9	65.958	0.956	5.220	171.163	39.317	1.817

a.- En los cálculos se usa:

$$R = R_p = 5.555 \text{ [OHM]} \quad [6.147]$$

$$X_L = X_{Lp} = 11.795 \text{ [OHM]} \quad [6.148]$$

valores óhmicos que resultan de dos líneas similares en paralelo; tal que cada línea tiene $R = 11.11 \text{ [OHM]}$ y $X_L = 23.59 \text{ [OHM]}$.

Prestando atención a la consideración del numeral 6.- de la sección 6.4.3.2 y usando los valores de potencia activa perdida proporcionados por la tabla 6.98, en la tabla 6.99 se tabulan: el costo de las pérdidas, el valor presente al año 1986 del costo de las pérdidas, así como el total de los valores presentes al año 1986 de los costos de las pérdidas. La estructuración de la tabla 6.98 es similar a la de la tabla 6.18 de la sección 6.4.1.1.2.1.3.2, o sea siguiendo el procedimiento de cálculo del Apéndice 6A6, y obviamente empleando las tasas de rentabilidad del 8 [%], 10 [%], 12 [%] y 14 [%].

TABLA 6.99

ALTERNATIVA: OTRA L/ST ADICIONAL EN PARALELO A LA YA EXISTENTE MAS CONDENSADORES EN DERIVACION						
AÑO	POTENCIA ACTIVA PERDIDA	COSTO DE LAS PERDIDAS	VALOR PRESENTE AL AÑO 1986 DEL COSTO DE LAS PERDIDAS			
	P_p	C_{pp}	$i=8 [\%]$	$i=10 [\%]$	$i=12 [\%]$	$i=14 [\%]$
		$63875 P_p$	$YP(C_{pp})$	$YP(C_{pp})$	$YP(C_{pp})$	$YP(C_{pp})$
	[MW]	[DOLARES]	[DOLARES]	[DOLARES]	[DOLARES]	[DOLARES]
1988	1.305	83357	71465	68890	66452	64141
1989	1.522	97218	77175	73041	69198	65619
1990	1.641	104819	77045	71593	66614	62061
1991,... ...,2007	1.817	116061	778151	635878	525136	437927
TOTAL DE LOS VALORES PRESENTES AL AÑO 1986 DE LOS COSTOS DE LAS PERDIDAS		$\sum_{j=1988}^{2007} VP(C_{ppj})$	1'003836	849402	727400	629748

6.4.3.2.10 Valor económico de la alternativa: otra L/ST adicional en paralelo a la ya existente.

En la tabla 6.100 se tabulan los rubros de:

- 1.- Valor presente al año 1986 del costo de la instalación de la alternativa otra L/ST adicional en paralelo a la ya existente, para las tasas de rentabilidad del 8 [%], 10 [%], 12 [%] y 14 [%] según como se ha tomado de la tabla 6.96 de la sección 6.4.3.2.7.

- 2.- Valor presente al año 1986 del valor residual de la instalación de la alternativa otra L/ST adicional en paralelo a la ya existente, para las tasas de rentabilidad del 8 [%], 10 [%], 12 [%] y 14 [%] según como se ha tomado de la tabla 6.97 de la sección 6.4.3.2.8.
- 3.- Total de los valores presentes al año 1986 de todos los costos de las pérdidas para las tasas de rentabilidad del 8 [%], 10 [%], 12 [%] y 14 [%]; según como se ha tomado de la tabla 6.99 de la sección 6.4.3.2.9.
- 4.- Valor económico de la alternativa otra L/ST adicional en paralelo a la ya existente para las tasas de rentabilidad del 8 [%], 10 [%], 12 [%] y 14 [%], formado por la suma de los rubros mencionados en los numerales 1.- y 3.- y luego restando el rubro mencionado en 2.-.

TABLA 6.100

		ALTERNATIVA: OTRA L/ST ADICIONAL EN PARALELO A LA YA EXISTENTE			
		i=8 [%]	i=10 [%]	i=12 [%]	i=14 [%]
VALOR PRESENTE AL AÑO 1986 DEL COSTO DE LA INSTALACION	[DOLARES]	2'451713	2'355740	2'265459	2'180419
VALOR PRESENTE AL AÑO 1986 DEL VALOR RESIDUAL DE LA DE INSTALACION	[DOLARES]	-181856	-123703	-84732	-58428
TOTAL DE LOS VALO- RES PRESENTES AL AÑO 1986 DE LOS COSTOS DE LAS PERDIDAS	[DOLARES]	1'003836	849402	727400	629748
VALOR ECONOMICO DE LA ALTERNATIVA: OTRA L/ST ADICIONAL EN PARALELO A LA YA EXISTENTE	[DOLARES]	3'273693	3'081439	2'908127	2'751739

6.5 COMPARACION ECONOMICA DE ALTERNATIVAS

Comparando la tabla 6.62 de la sección 6.4.1.2.3, la 6.82 de la sección 6.4.2.2.10 y la 6.100 de la sección 6.4.3.2.10 se establece que:

En lo referente al costo de la instalación (incluyendo el valor residual) se tiene que:

- a.- La alternativa -condensadores en serie (219 [%] compensación serie)- tiene el menor costo en lo que a instalación se refiere.
- b.- La alternativa -otra L/ST adicional en paralelo a la ya existente- tiene el mayor costo en lo que a instalación se refiere.

- c.- La alternativa -condensadores en derivación- tiene un costo de instalación mayor que la alternativa de condensadores en serie (219 [%] compensación serie), pero menor costo que el de la alternativa de otra L/ST adicional en paralelo a la ya existente.

En lo referente al costo de las pérdidas se tiene que:

- d.- La alternativa -otra L/ST adicional en paralelo a la ya existente- proporciona el menor costo en lo que a pérdidas se refiere.
- e.- La alternativa -condensadores en derivación- proporciona el mayor costo en lo que a pérdidas se refiere.
- f.- La alternativa -condensadores en serie-(219 [%] compensación serie) proporciona un mayor costo por pérdidas que la alternativa otra L/ST adicional en paralelo a la ya existente, pero menor que la alternativa de condensadores en derivación.

En lo referente al valor económico se tiene que:

- g.- La alternativa -condensadores en serie (219 [%] compensación serie)- es la alternativa económicamente más barata.
- h.- La alternativa -otra L/ST adicional en paralelo a la ya existente- es la alternativa económicamente más cara.
- i.- La alternativa -condensadores en derivación- es una alternativa económicamente intermedia entre la alternativa -condensadores en serie (219 [%] compensación serie)- y la alternativa -otra L/ST adicional en paralelo a la ya existente-.

j.- En consecuencia, de lo dicho en los literales g.-, h.- e i.-, se desprende que desde el punto de vista económico la selección de alternativas determina que la alternativa -condensadores en serie (219 [%] compensación serie)- sea la más conveniente y que por lo mismo debe ser adoptada para su aplicación en la L/ST Ambato-Riobamba.

Para las alternativas analizadas, en la tabla 6.101 se resumen los valores económicos para las tasas de rentabilidad del 8 [%], 10 [%], 12 [%] y 14 [%], según como se han tomado respectivamente de las tablas 6.62 de la sección 6.4.1.2.3, 6.82 de la sección 6.4.2.2.10 y 6.100 de la sección 6.4.3.2.10.

TABLA 6.101

		VALOR ECONOMICO DE ALTERNATIVAS			
		i=8 [%]	i=10 [%]	i=12 [%]	i=14 [%]
ALTERNATIVA: CONDENSADORES EN SERIE (219 [%] COMPENSACION SERIE)	[DOLARES]	2'439778	2'100544	1'830838	1'613511
ALTERNATIVA: CONDENSADORES EN DERIVACION	[DOLARES]	2'627046	2'272058	1'988817	1'759658
ALTERNATIVA: OTRA L/ST ADICIO- NAL EN PARALELO A A LA YA EXISTENTE	[DOLARES]	3'273693	3'081439	2'908127	2'751739

CAPITULO 7

7.-CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

7.2 RECOMENDACIONES

7.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

7.1.1 Conclusiones generales al tema.

Se citan las siguientes conclusiones:

- 1.- Un condensador en serie con una línea genera reactivos cuya magnitud es dependiente de las variaciones de la carga.
- 2.- Los reactivos generados por un condensador en serie conllevan los siguientes beneficios técnicos.
 - a.- Mejora la regulación de voltaje, por un mejoramiento de los niveles de voltaje en la carga.
 - b.- Mejora del factor de potencia hacia el lado del terminal de envío de una línea.
 - c.- Aumento de la transferencia de potencia a través de una línea.
- 3.- Los beneficios técnicos inherentes a la utilización de un condensador en serie con una línea y que se mencionan en los literales a.-, b.- y c.- del numeral 1.-; se presentan en forma simultánea y traen mejoras en las condiciones de operación de la línea.
- 4.- Un condensador en serie al aumentar la transferencia de potencia a través de una línea, permite un aprovechamiento más eficiente de una línea, en lo que tiene que ver a la utilización de la capacidad permisible de transmisión.

- 5.- Un condensador en serie al aumentar la transferencia de potencia a través de una línea, pospone inversiones de capital en la adquisición de nuevos equipos como pueden ser: generadores, líneas, etc.

7.1.2 Conclusiones específicas al ejemplo de aplicación: L/ST Ambato-Riobamba

Se citan las siguientes conclusiones:

- 1.- Un condensador en serie aumenta la magnitud de las corrientes de falla.
- 2.- La disposición serie-paralelo más económica para la configuración de un condensador en serie se obtiene empleando unidades de 200 [KVAR] nominales y generalmente de más alto voltaje nominal.
- 3.- El número mínimo de condensadores unidad en paralelo que debe tener un grupo serie es el mismo para cualquier número de grupos serie que adopte la configuración del condensador en serie. En consecuencia será suficiente determinar el número mínimo de condensadores unidad para el caso de un sólo grupo serie, pues para un mayor número de grupos serie el número mínimo de condensadores unidad en paralelo será el mismo.
- 4.- La mejor ubicación de un condensador en serie en una línea es en el terminal de recepción ya que para esa localización, en la carga se obtienen los mejores niveles de voltaje que para cualquier otra ubicación.
- 5.- El ángulo de operación de la línea, es decir aquel ángulo por el cual el fasor de voltaje en el terminal de envió de una línea está fuera de

fase con relación al fasor de voltaje en el terminal de recepción disminuye conforme aumenta el porcentaje de compensación serie.

- 6.- El factor de potencia en el terminal de envío es mejorado por la presencia del condensador en serie seleccionado, pues con el 0 [%] de compensación serie se tiene un factor de potencia de 0.9135 inductivo para la carga neta máxima del año 1988 (31.9 [MVA]) mientras que para esa misma carga con el 219 [%] de compensación serie seleccionado se mejora el factor de potencia a 0.9975 inductivo.
- 7.- El porcentaje de compensación serie técnica y económicamente más conveniente para obtener una mayor transferencia de potencia a través de la línea desde Ambato a Riobamba es el 219 [%] de compensación serie ubicado en la ciudad de Riobamba.
- 8.- Se ha determinado que con el 219 [%] de compensación serie, no es posible que para los generadores de Alao se presente el fenómeno de resonancia sub-sincrónica inestable. En consecuencia se concluye que a nivel de Sub-transmisión no se presenta el fenómeno de resonancia sub-sincrónica inestable.
- 9.- Se ha determinado que con el 219 [%] de compensación serie, no es posible que para el transformador de la S/E-1 de Riobamba se presente el fenómeno de ferresonancia inestable. En consecuencia se concluye que a nivel de sub-transmisión no se presenta el fenómeno de ferresonancia inestable.
- 10.- En paralelo con el condensador en serie correspondiente al 219 [%] de compensación serie no es necesario utilizar circuitos de atenuación de corrientes sub-sincrónicas o sub-armónicas. En consecuencia, se concluye que a nivel de sub-transmisión, en paralelo con un

condensador en serie no se requieren circuitos de atenuación de corrientes sub-sincrónicas o sub-armónicas; como son los resistores en paralelo.

- 11.- La potencia reactiva en condensadores en serie (20.4 [MVAR]) es menor que la potencia reactiva en condensadores en derivación (26.4[MVAR]). Con la alternativa - otra L/ST adicional en paralelo a la ya existente - se requieren 7.2 [MVAR] en condensadores en derivación.
- 12.- La evaluación económica de las pérdidas determina que con la alternativa -otra L/ST adicional en paralelo a la ya existente- se tengan los menores costos, en tanto que con la alternativa -condensadores en derivación- se obtienen los mayores costos, al propio tiempo que con la alternativa -condensadores en serie (219[%] de compensación serie)- los costos están entre los de las dos primeras alternativas mencionadas.
- 13.- La evaluación económica de la instalación (incluyendo el rubro por valor residual) determina que; con la alternativa -condensadores en serie-(219[%] compensación serie) se tienen los menores costos, en tanto que con la alternativa -otra L/ST adicional en paralelo a lo ya existente- se tienen los mayores costos, al propio tiempo que con la alternativa -condensadores en derivación- los costos están entre los de las dos primeras alternativas mencionadas.
- 14.- De las alternativas analizadas para aumentar la transferencia de potencia, la alternativa -condensadores en serie (219[%] compensación serie)- es económicamente la más barata; la alternativa -otra L/ST adicional en paralelo a la ya existente- es económicamente la más cara, y la alternativa -condensadores en

derivación - económicamente se encuentra entre las dos anteriores. En consecuencia; una vez realizado el análisis técnico - económico se concluye que la alternativa - condensadores en serie (219[$\%$] compensación serie) - es la más adecuada para aumentar la transferencia de potencia a través de la L/ST Ambato - Riobamba.

7.2 RECOMENDACIONES

Se citan las siguientes recomendaciones:

- 1.- Del ejemplo de aplicación se ha probado que el condensador en serie aumenta la transferencia de potencia de una línea elevando el grado de utilización de la capacidad permisible de la misma; por consiguiente es recomendable realizar estudios de aplicación de compensación serie en otras líneas de sub-transmisión.
- 2.- Se recomienda hacer estudios; más completos de resonancia sub-sincrónica para tener un mejor conocimiento del fenómeno, pues en la presente tesis sólo se han abordado aspectos relacionados al diagnóstico y control del fenómeno.
- 3.- Se recomienda también, efectuar estudios más completos de ferresonancia, pues en la presente tesis sólo se han abordado aspectos relacionados al diagnóstico y control del fenómeno.
- 4.- Se recomienda cambiar el transformador existente [T1] de la S/E-1 de Riobamba (veáse Fig. 6.1 y tabla 6.2 en la sección 6.2.1.) por otro de una capacidad mayor, compatible con el aumento de transferencia de potencia de la L/ST Ambato-Riobamba mediante la alternativa del 219[$\%$] de compensación serie seleccionada. Por otra parte es importante enfatizar el hecho de que; el método de predicción de ferresonancia utilizado en esta tesis es independiente de la

capacidad del transformador; por cuya razón la conclusión 9 de la sección precedente 7.1 sigue siendo valedera para el transformador de mayor capacidad que se piense instalar en la S/E-1 de Riobamba.

APENDICE 3A1

3A1 CIRCUITO EQUIVALENTE Y CONSTANTES GENERALIZADAS EQUIVALENTES

- Para las 3 posibles localizaciones del condensador en serie dentro de la línea.
- Condensador en serie ubicado en el terminal de envío.
- Condensador en serie ubicado en el terminal de recepción.
- Condensador en serie ubicado entre el terminal de envío y recepción.

APENDICE 3A1

	CIRCUITO EQUIVALENTE	CONSTANTES GENERALIZADAS EQUIVALENTES			
		A_{eq}	B_{eq}	C_{eq}	D_{eq}
CONDEN. EN SERIE UBICADO EN EL TERMINAL DE ENVIO		$A + Z_c C$	$B + Z_c D$	C	D
CONDEN. EN SERIE UBICADO EN EL TERMINAL DE RECEPCION		A	$B + Z_c A$	C	$D + Z_c C$
COND. EN SERIE UBICADO ENTRE EL TERMINAL DE ENVIO Y RECEPCION		$A_1 A_2 + Z_c A_1 C_2 + B_1 C_2$	$A_1 B_2 + Z_c A_1 D_2 + B_1 D_2$	$C_1 A_2 + Z_c C_1 C_2 + D_1 C_2$	$C_1 B_2 + Z_c C_1 D_2 + D_1 D_2$

APENDICE 3A2

3A2.1 CONSTANTES GENERALIZADAS [ABCD] DE LA LINEA.

3A2.2 CONSTANTES GENERALIZADAS $[A_i; B_i; C_i; D_i]$ DE LA SECCION DE LA LINEA i ; $i = 1, 2$

APENDICE 3 A 2

3A2.1 CONSTANTES GENERALIZADAS [ABCD] DE LA LINEA

$$A = \cosh \gamma l \quad [1]$$

$$B = Z_c \sinh \gamma l \quad [2]$$

$$C = \frac{\sinh \gamma l}{Z_c} \quad [3]$$

$$D = \cosh \gamma l \quad [4]$$

$$\cosh \gamma l = \frac{e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}}{2} \quad [5]$$

$$\sinh \gamma l = \frac{e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}}{2} \quad [6]$$

$$\gamma l = \sqrt{yz} l \quad [7]$$

$$Z_c = \sqrt{z/y} \quad [8]$$

con:

Z_c : impedancia característica de la línea

l : longitud de la línea ([KM])

Z : impedancia serie de la línea ([OHM/KM])

y : admitancia paralelo de la línea ([MHO/KM])

3A2.2 CONSTANTES GENERALIZADAS [A_iB_iC_iD_i] DE LA SECCION DE LA LINEA i;

$$i = 1,2$$

$$A_i = \cosh \gamma_i l_i \quad [9]$$

$$B_i = Z_{ci} \sinh \gamma_i l_i \quad [10]$$

$$C_i = \frac{\sinh \gamma_i l_i}{Z_{ci}} \quad [11]$$

$$D_i = \cosh \gamma_i l_i \quad [12]$$

$$\cosh \gamma_i l_i = \frac{e^{\gamma_i l_i} + e^{-\gamma_i l_i}}{2} \quad [13]$$

$$\sinh \gamma_i l_i = \frac{e^{\gamma_i l_i} - e^{-\gamma_i l_i}}{2} \quad [14]$$

$$\gamma_i l_i = \sqrt{y_i z_i} l_i \quad [15]$$

con:

$$Z_{ci} = \sqrt{z_i / y_i} \quad [16]$$

Z_{ci} : impedancia característica de la sección de línea i ([OHM])

l_i : longitud de la sección de línea i ([KM])

Z_i : impedancia serie de la sección de línea i ([OHM/KM])

y_i : admitancia paralelo de la sección de línea i ([MHO/KM])

APENDICE 3A3

3A3 RESONANCIA SUB-SINCRONICA DE MAQUINAS SINCRONICAS.

3A3.1 FRECUENCIA NATURAL [f_0].

3A3.2 RESISTENCIA EN PARALELO [R_{sh}] CON EL CONDENSADOR EN SERIE PARA EVITAR RESONANCIA SUB-SINCRONICA INESTABLE DE UNA MAQUINA SINCRONICA.

APENDICE 3A3

3A3 RESONANCIA SUB-SINCRONICA DE MAQUINAS SINCRONICAS

[Ref. 9], [Ref. 15], [Ref. 40].

En la FIG 1 se muestra a la frecuencia de la red [f_e] (60[HZ]), el circuito formado por una máquina sincrónica, un condensador en serie conectados a un sistema.

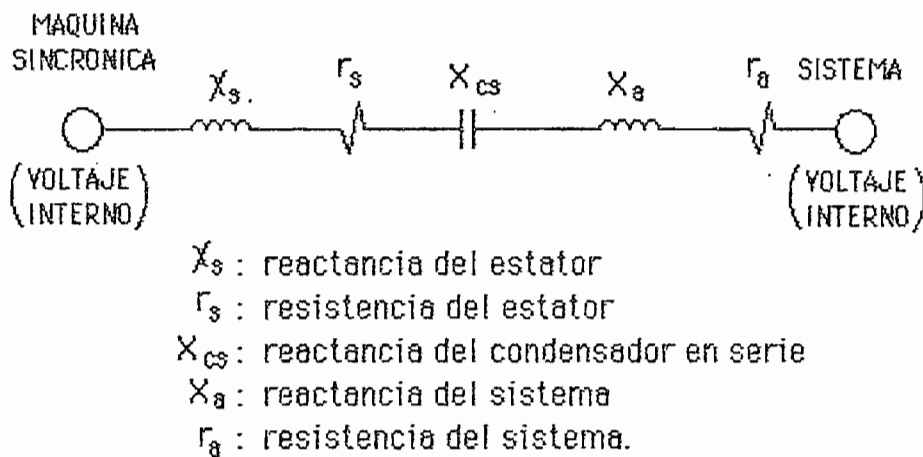
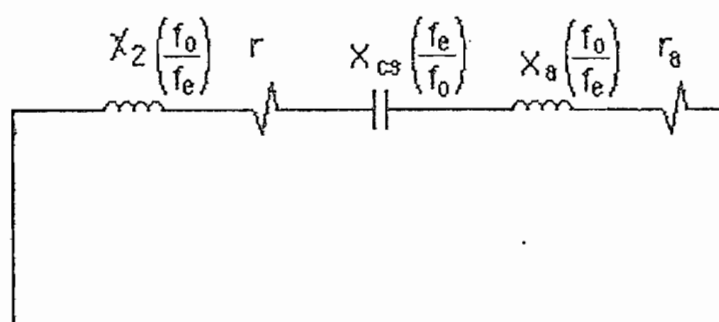


FIG 1. Circuito formado por una máquina sincrónica y un condensador en serie conectados a un sistema, a la frecuencia de la red [f_e] (60[HZ]).

En la FIG. 2 se muestra el circuito de la FIG. 1 pero a la frecuencia natural [f_0].



X_2 : reactancia de secuencia negativa de la máquina síncrona

r : resistencia neta de la máquina síncrona

f_0 : frecuencia natural

f_e : frecuencia de la red (60 [HZ])

FIG 2. Circuito de la FIG 1 pero a la frecuencia natural $[f_0]$.

Puesto que no existen f.e.m. de frecuencia natural, quiere decir que en la FIG 2 los voltajes internos del sistema y de la máquina síncrona son simplemente una línea recta.

3A3.1 FRECUENCIA NATURAL : $[f_0]$.

El circuito de la FIG 2 se utiliza para la deducción de la fórmula de la frecuencia natural $[f_0]$.

Para máquinas síncronas, la reactancia de secuencia negativa $[\chi_2]$ se estima como la reactancia transitoria $[\chi_{d'}$], es decir:

$$\chi_2 = \chi_{d'} \quad [1]$$

Haciendo uso de la ecuación [1], la impedancia equivalente del circuito de la FIG 2 es:

$$(r + r_a) + j[(\chi_{d'} + \chi_a)(f_0/f_e) - \chi_{cs}(f_e/f_0)] \quad [2]$$

Resonancia quiere decir que la reactancia inductiva de un circuito es igual a la reactancia capacitiva del mismo, o dicho en otra forma, que el término imaginario de la ecuación [2] sea igual a cero, es decir:

$$(\chi_{d'} + \chi_a)(f_0/f_e) - \chi_{cs}(f_e/f_0) = 0 \quad [3]$$

Resolviendo la ecuación [3] se tiene que la frecuencia natural $[f_0]$ está dada por la siguiente relación:

$$f_0 = f_e \sqrt{\chi_{cs}/(\chi_{d'} + \chi_a)} \quad [4]$$

En la ecuación [4] haciendo que:

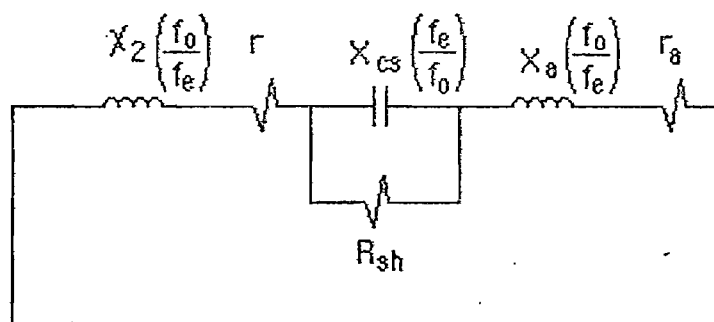
$$\chi_Q = \chi_{d'} + \chi_a \quad [5]$$

Se tiene que la frecuencia natural $[f_0]$ está dada por:

$$f_0 = f_e \sqrt{\chi_{cs}/\chi_Q} \quad [6]$$

3A3.2 RESISTENCIA EN PARALELO $[R_{sh}]$ CON EL CONDENSADOR EN SERIE PARA EVITAR RESONANCIA SUB-SINCRÓNICA INESTABLE DE UNA MAQUINA SINCRÓNICA

El circuito de la FIG 2 pero con un resistor en paralelo con el condensador en serie se muestra en la FIG 3.



R_{sh} : resistor en paralelo con el condensador en serie.

FIG 3. Circuito de la FIG 2 pero con un resistor en paralelo con el condensador en serie.

La resistencia neta de la máquina sincrónica se expresa como sigue (véase la FIG 3.7 de la sección 3.4.1).

$$r = r_s + (R_r/S_0) \quad [7]$$

donde:

r_s : resistencia del estator

R_r : resistencia del rotor

S_0 : deslizamiento relativo

La resistencia del estator [r_s] se estima como la resistencia de secuencia positiva [r_1], es decir:

$$r_s = r_1 \quad [8]$$

La resistencia del rotor se estima como:

$$R_r = 2(r_2 - r_1) \quad [9]$$

donde:

r_2 : Resistencia de secuencia negativa.

Por consiguiente, reemplazando las ecuaciones [8] y [9] en la ecuación [7], se tiene que la resistencia neta estimada de la máquina es:

$$r = r_1 + 2(r_2 - r_1)/S_0 \quad [10]$$

El deslizamiento relativo [s_0] está dado por:

$$S_0 = (f_0 - f_e)/f_0 \quad [11]$$

En la ecuación [10] substituyendo primero la ecuación [11] y luego la ecuación [4] se tiene que la resistencia neta estimada de la máquina también se expresa como:

$$r = r_1 + \frac{2(r_2 - r_1)\sqrt{X_{cs}/(X_{d'} + X_a)}}{\sqrt{X_{cs}/(X_{d'} + X_a)} - 1} \quad [12]$$

De la FIG 2 la impedancia del paralelo de $[R_{sh}]$ y $[X_{cs}]$ es:

$$\frac{R_{sh} X_{cs}^2 (f_e/f_0)^2}{R_{sh}^2 + X_{cs}^2 (f_e/f_0)^2} - j \frac{R_{sh}^2 X_{cs} (f_e/f_0)}{R_{sh}^2 + X_{cs}^2 (f_e/f_0)^2} \quad [13]$$

Una atenuación positiva de resonancia sub-sincrónica inestable se obtiene escogiendo un resistor que justamente compensa la resistencia neta $[r]$ (resistencia negativa) de la máquina, lo cual se realiza haciendo que la resistencia efectiva del paralelo del resistor y del condensador en serie, a la frecuencia natural $[f_0]$ iguale a la resistencia neta de la máquina. Con esta manera de proceder se asegura que la resistencia del sistema $[r_a]$ proporcione toda la atenuación requerida, por lo que se tiene la siguiente relación:

$$R_{sh} X_{cs}^2 (f_e/f_0)^2 = R_{sh}^2 r + r X_{cs}^2 (f_e/f_0)^2 \quad [14]$$

En aplicaciones prácticas, como generalmente es el caso $[R_{sh}]$ es alrededor de 10 veces $[X_{cs}]$, por cuya razón el segundo término del segundo miembro de [13] es pequeño frente al primer término, y por tanto la resistencia en paralelo $[R_{sh}]$ es:

$$R_{sh} = \frac{X_{cs}^2 (f_e/f_0)^2}{r} \quad [15]$$

donde:

f_0 : frecuencia natural dada por la ecuación [4]

r : resistencia neta de la máquina dada por la ecuación [10] o la ecuación [12]

Si en la ecuación [14] se substituye la ecuación [4], la resistencia en paralelo también es:

$$R_{sh} = \frac{X_{cs} (X_{d'} + X_a)}{r} \quad [16]$$

APENDICE 3A4

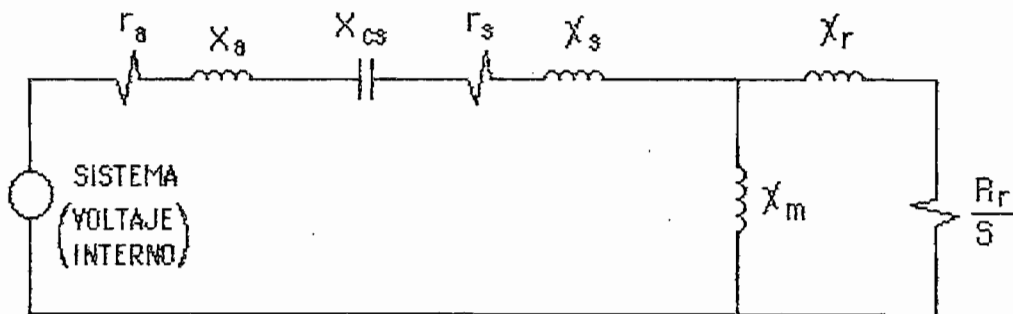
- 3A4 RESONANCIA SUB-SINCRONICA DE MAQUINAS DE INDUCCION.
- 3A4.1 FRECUENCIA NATURAL:[f_0].
- 3A4.2 RESISTENCIA EN PARALELO [R_{sh}] CON EL CONDENSADOR EN SERIE PARA EVITAR RESONANCIA SUB-SINCRONICA INESTABLE DE UNA MAQUINA DE INDUCCION.

APENDICE 3A4

3A4 RESONANCIA SUB-SINCRONICA DE MAQUINAS DE INDUCCION

[Ref. 15], [Ref. 40]

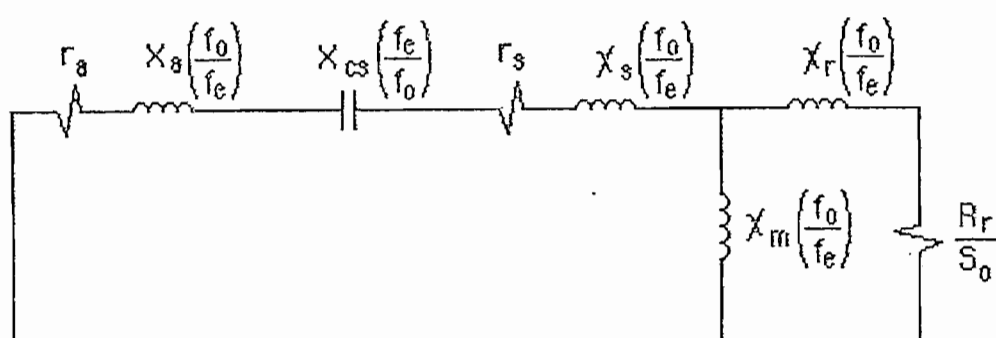
En la FIG 1 se muestra a la frecuencia de la red [f_e] (60 [HZ]) el circuito formado por una máquina de inducción y un condensador en serie conectados a un sistema.



- Γ_a : resistencia del sistema
- X_a : reactancia del sistema
- X_{cs} : reactancia capacitiva del condensador en serie
- Γ_s : resistencia del estator
- X_s : reactancia del estator
- X_m : reactancia de la rama de magnetización
- X_r : reactancia del rotor
- R_r : resistencia del rotor
- s : deslizamiento relativo {expresado como fracción de la frecuencia de la red [f_e] (60 [HZ]) }

FIG 1. Circuito formado por una máquina de inducción y un condensador en serie, conectados a un sistema, a la frecuencia de la red [f_e] (60 [HZ]).

En la FIG 2, se muestra el circuito de la FIG 1 pero a la frecuencia natural [f_0].



f_0 : frecuencia natural
 f_e : frecuencia de la red (60 [HZ])
 S_0 : deslizamiento relativo

FIG 2. Circuito de la FIG 1, pero a la frecuencia natural $[f_0]$

Puesto que no existen f.e.m. de frecuencia natural significa que en la FIG 2, el voltaje interno del sistema es simplemente una línea recta.

3A4.1 FRECUENCIA NATURAL $[f_0]$

El circuito de la FIG 2 se emplea para la deducción de la fórmula de la frecuencia natural $[f_0]$. Para mayor simplicidad en el caso de reactancias inductivas se omite la relación $[f_0/f_e]$ y para el caso de la reactancia capacitiva del condensador en serie se omite la relación $[f_e/f_0]$, pues las mencionadas relaciones se agregarán en el resultado final.

Del paralelo de $[X_m]$ con el brazo que contiene al condensador en serie y añadiendo la impedancia del rotor se tiene que la impedancia equivalente es:

$$\frac{jX_m [(r_s + r_a) + j(X_s - X_{cs} + X_a)]}{(r_s + r_a) + j(X_m + X_s - X_{cs} + X_a)} + \frac{R_r}{S_0} + jX_r \quad [1]$$

ó:

$$\frac{jX_m [(r_s + r_a) + j(X_s - X_{cs} + X_a)] [(r_s + r_a) - j(X_m + X_s - X_{cs} + X_a)]}{(r_s + r_a)^2 + (X_m + X_s - X_{cs} + X_a)^2} + \frac{R_r}{S_0} + jX_r \quad [2]$$

Resonancia significa que la reactancia inductiva de un circuito es igual a la reactancia capacitiva del mismo o dicho en otras palabras, que el término imaginario de la ecuación [2] sea igual a cero, o sea:

$$X_m (r_s + r_a)^2 + X_m (X_s - X_{cs} + X_a)(X_m + X_s - X_{cs} + X_a) + X_r (r_s + r_a)^2 + X_r (X_m + X_s - X_{cs} + X_a)^2 = 0 \quad [3]$$

Resolviendo la ecuación [3] se tiene que:

$$(r_s + r_a)^2 = -[(X_m + X_s) + X_a - X_{cs}] \left\{ \frac{X_s + (X_r X_m)/(X_r + X_m)}{X_r + X_m} \right\} + X_a - X_{cs} \quad [4]$$

La cantidad $[X_m + X_s]$ representa la reactancia de excitación de la máquina y será designada por $[X_M]$; la cantidad $[X_s + (X_r X_m)/(X_r + X_m)]$ es la reactancia a rotor bloqueado para $[R_r]$ igual a cero y será designada por $[X_B]$, es decir que:

$$X_m + X_s = X_M \quad [5]$$

$$X_s + (X_r X_m)/(X_r + X_m) = X_B \quad [6]$$

Reemplazando las ecuaciones [5] y [6] en la ecuación [4] se tiene que:

$$(r_s + r_a)^2 = -[(X_M + X_a) - X_{cs}] [(X_B + X_a) - X_{cs}] \quad [7]$$

En la ecuación [7] multiplicando las reactancias inductivas por la relación $[f_0/f_e]$ y la reactancia capacitiva del condensador en serie por la relación $[f_e/f_0]$ se tiene que:

$$(r_s + r_a)^2 = -[(X_M + X_a)(f_0/f_e) - X_{cs}(f_e/f_0)][(X_B + X_a)(f_0/f_e) - X_{cs}(f_e/f_0)] \quad [8]$$

En la ecuación [8] haciendo que la frecuencia de la red $[f_e]$ (60 [HZ]) sea tomada como la unidad se tiene que:

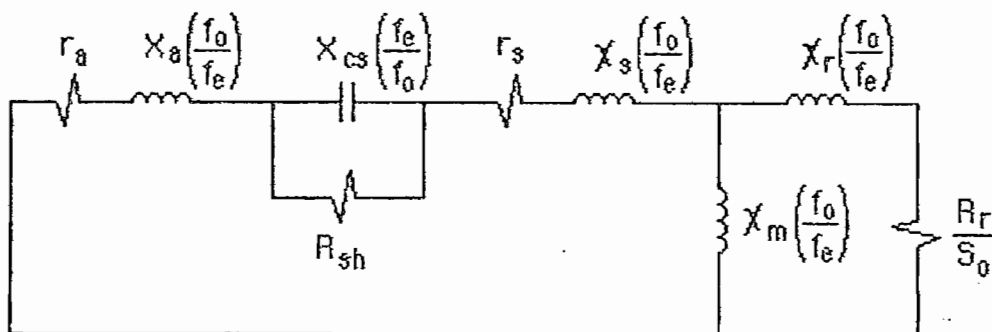
$$(r_s + r_a)^2 = -(1/f_0^2)[f_0^2(X_M + X_a) - X_{cs}][f_0^2(X_B + X_a) - X_{cs}] \quad [9]$$

Desarrollando la ecuación [9] se tiene que:

$$(X_M + X_a)(X_B + X_a)f_0^4 + [(r_s + r_a)^2 - (X_M + X_B + 2X_a)X_{cs}]f_0^2 + X_{cs}^2 = 0 \quad [10]$$

La resolución de la ecuación [10] permite obtener la frecuencia natural $[f_0]$ en veces la frecuencia de la red $[f_e]$ (60 [HZ]) sea que las resistencias y reactancias estén expresadas en [OHM] o en [P.U].

3A4.2 RESISTENCIA EN PARALELO $[R_{sh}]$ CON EL CONDENSADOR EN SERIE PARA EVITAR RESONANCIA SUB-SINCRONICA INESTABLE DE UNA MAQUINA DE INDUCCION



R_{sh} : resistor en paralelo con el condensador en serie.

FIG 3. Circuito de la FIG 2, pero con un resistor en paralelo con el condensador en serie.

El circuito de la FIG 2 pero con un resistor en paralelo con el condensador en serie se muestra en la FIG 3.

Para la deducción de la fórmula del resistor en paralelo $[R_{sh}]$, en el caso de las reactancias inductivas se omite la relación $[f_o/f_e]$ y para el caso de la reactancia capacitiva del condensador en serie se omite la relación $[f_e/f_o]$, pues las relaciones citadas se agregarán en el resultado final.

La impedancia del paralelo de $[R_{sh}]$ y $[X_{cs}]$, en serie con $[r_a]$, $[X_a]$, $[r_s]$ y $[X_s]$ da:

$$(r_s + r_a) + (R_{sh} X_{cs}^2)/(R_{sh}^2 + X_{cs}^2) + j [X_s + X_a - (R_{sh}^2 X_{cs})/(R_{sh}^2 + X_{cs}^2)] \quad [11]$$

La impedancia dada por la ecuación [11] en paralelo con $[j X_m]$ y luego tomando la impedancia del rotor en serie da:

$$\frac{j X_m \left[(r_s + r_a) + (R_{sh} X_{cs}^2)/(R_{sh}^2 + X_{cs}^2) + j [X_s + X_a - (R_{sh}^2 X_{cs})/(R_{sh}^2 + X_{cs}^2)] \right]}{\left[(r_s + r_a) + (R_{sh} X_{cs}^2)/(R_{sh}^2 + X_{cs}^2) - j [X_s + X_m + X_a - (R_{sh}^2 X_{cs})/(R_{sh}^2 + X_{cs}^2)] \right]} + \frac{R_r}{S_o} + j X_r$$

$$\left[(r_s + r_a) + (R_{sh} X_{cs}^2)/(R_{sh}^2 + X_{cs}^2) + j [X_s + X_m + X_a - (R_{sh}^2 X_{cs})/(R_{sh}^2 + X_{cs}^2)] \right]$$

$$\left[(r_s + r_a) + (R_{sh} X_{cs}^2)/(R_{sh}^2 + X_{cs}^2) - j [X_s + X_m + X_a - (R_{sh}^2 X_{cs})/(R_{sh}^2 + X_{cs}^2)] \right] \quad [12]$$

Tener resonancia significa que el término imaginario de la ecuación [12] debe ser cero, por lo cual:

$$\begin{aligned}
& X_m \left\{ \left[\frac{(r_s+r_a)+(R_{sh} X_{cs}^2)}{(R_{sh}^2+X_{cs}^2)} \right]^2 \right. \\
& + \left. \left[\frac{X_s+X_a-(R_{sh}^2 X_{cs})}{(R_{sh}^2+X_{cs}^2)} \right] \left[\frac{X_s+X_m+X_a-(R_{sh}^2 X_{cs})}{(R_{sh}^2+X_{cs}^2)} \right] \right\} \\
& + X_r \left\{ \left[\frac{(r_s+r_a)+(R_{sh} X_{cs}^2)}{(R_{sh}^2+X_{cs}^2)} \right]^2 \right. \\
& \left. + \left[\frac{X_s+X_m+X_a-(R_{sh}^2 X_{cs})}{(R_{sh}^2+X_{cs}^2)} \right]^2 \right\} = 0 \quad [13]
\end{aligned}$$

Desarrollando la ecuación [13] y luego utilizando las ecuaciones [5] y [6], se tiene que la ecuación [13] se convierte en:

$$\begin{aligned}
& (R_{sh}^2 X_{cs}^2)/(R_{sh}^2+X_{cs}^2) - [X_M+X_B+2X_a] [(R_{sh}^2 X_{cs})/(R_{sh}^2+X_{cs}^2)] \\
& + 2(r_s+r_a) [(R_{sh} X_{cs}^2)/(R_{sh}^2+X_{cs}^2)] \\
& + X_M X_B + X_a (X_M+X_B+X_a) + (r_s+r_a)^2 = 0 \quad [14]
\end{aligned}$$

La ecuación [14] puede escribirse también como:

$$\begin{aligned}
& [X_{cs} - (X_M+X_B+2X_a) + (X_M X_B)/X_{cs} + (X_a/X_{cs})(X_M+X_B+X_a) + (r_s+r_a)^2/X_{cs}] R_{sh}^2 \\
& + 2 [(r_s+r_a) X_{cs}] R_{sh} + [X_M X_B X_{cs} + X_a X_{cs} (X_M+X_B+X_a) + (r_s+r_a)^2 X_{cs}] = 0 \\
& [15]
\end{aligned}$$

En la ecuación [15] multiplicando las reactancias inductivas por $[f_0/f_e]$ y la reactancia capacitiva del condensador en serie por $[f_e/f_0]$ se tiene que la ecuación [15] se convierte en:

$$\begin{aligned}
& [X_{cs}(f_e/f_0) - (X_M + X_B + 2X_g)(f_0/f_e) + \{(X_M X_B)/X_{cs}\}(f_0/f_e)^3 \\
& + (X_g/X_{cs})(X_M + X_B + X_g)(f_0/f_e)^3 + \{(r_s + r_g)^2/X_{cs}\}(f_0/f_e)]R_{sh}^2 \\
& + 2[(r_s + r_g)X_{cs}(f_e/f_0)]R_{sh} + [X_M X_B X_{cs}(f_0/f_e) \\
& + X_g X_{cs}(X_M + X_B + X_g)(f_0/f_e) + (r_s + r_g)^2 X_{cs}(f_e/f_0)] = 0
\end{aligned}$$

[16]

La resolución de la ecuación [16] permite determinar el valor del resistor en paralelo $[R_{sh}]$ que evita resonancia sub-sincrónica inestable en máquinas de inducción.

APENDICE 4A1

- 4A1 VOLTAJE A TRAVES DE UN GRUPO SERIE CUANDO UN CONDENSADOR UNIDAD DE EL ESTA FUERA DE SERVICIO; EXPRESADO EN PORCENTAJE DEL VOLTAJE NOMINAL DEL GRUPO SERIE: $[e_f\%]$ - CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO A TRAVES DE UN CONDENSADOR UNIDAD FALLOSO EN VECES LA CORRIENTE NOMINAL DEL MISMO: $[I_f]$.
- 4A1.1 ASPECTOS PRELIMINARES.
- 4A1.2 VOLTAJE A TRAVES DE UN GRUPO SERIE CUANDO UN CONDENSADOR UNIDAD DE EL ESTA FUERA DE SERVICIO; EXPRESADO EN PORCENTAJE DEL VOLTAJE NOMINAL DEL GRUPO SERIE: $[e_f\%]$.
- 4A1.3 CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO A TRAVES DE UN CONDENSADOR UNIDAD FALLOSO EN VECES LA CORRIENTE NOMINAL DEL MISMO: $[I_f]$.

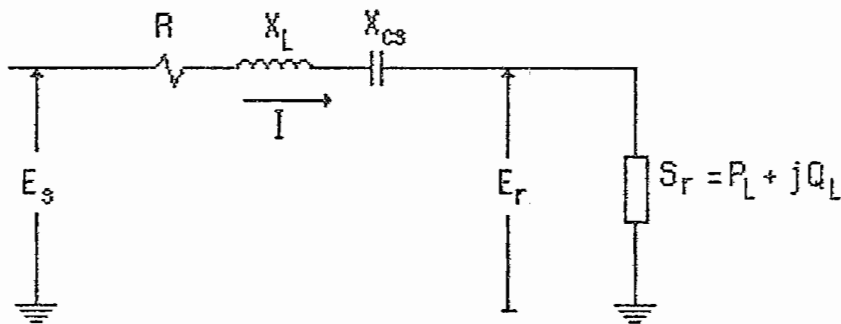
APENDICE 4A1

4A1 VOLTAJE A TRAVES DE UN GRUPO SERIE CUANDO UN CONDENSADOR UNIDAD DE EL ESTA FUERA DE SERVICIO; EXPRESADO EN PORCENTAJE DEL VOLTAJE NOMINAL DEL GRUPO SERIE: $[e_{f\%}]$ - CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO A TRAVES DE UN CONDENSADOR UNIDAD FALLOSO EN VECES LA CORRIENTE NOMINAL DEL MISMO: $[I_f]$

[Ref. 35]

4A1.1 ASPECTOS PRELIMINARES

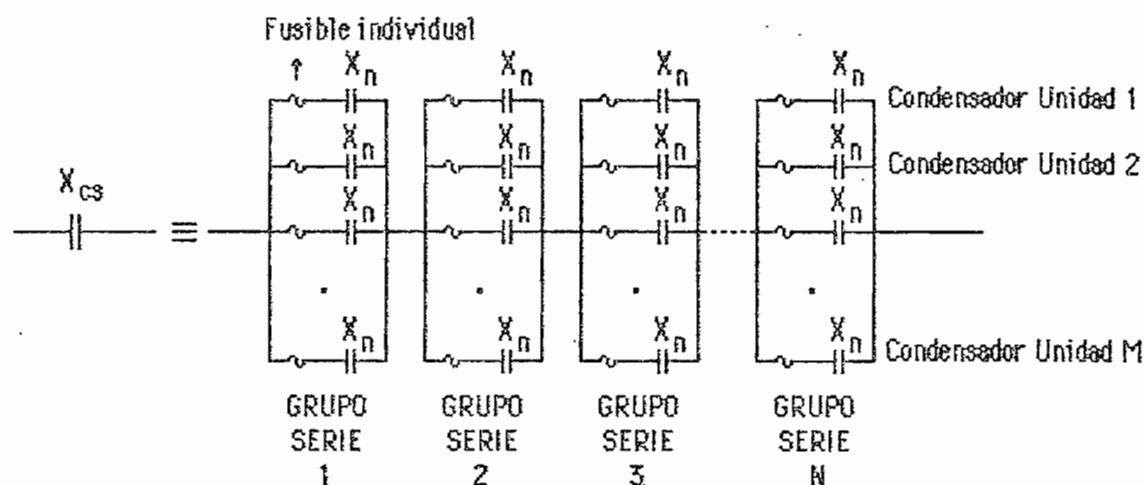
En el circuito de la FIG 1 se muestra el diagrama unifilar de una línea con compensación serie que alimenta a una carga $S_r = P_L + jQ_L$ en el terminal de recepción.



- R : resistencia de la línea
- X_L : reactancia inductiva de la línea
- X_{cs} : reactancia capacitiva del condensador en serie
- E_r : voltaje fase-neutro, en el terminal de recepción
- I : corriente de línea
- S_r : potencia compleja, por fase, en el terminal de recepción
- P_L : potencia activa de carga, por fase, en el terminal de recepción
- Q_L : potencia reactiva de carga, por fase, en el terminal de recepción
- E_s : voltaje fase-neutro en el terminal de envío

FIG 1. Línea compensada serie alimentando a una carga.

En cada fase de una línea el condensador en serie está formado por una combinación serie-paralelo de condensadores unidad, como se muestra en la FIG 2.



- X_{cs} : reactancia capacitiva del condensador en serie
 X_n : reactancia capacitiva de cada condensador unidad
 N : número de grupos serie
 M : número de condensadores unidad en paralelo por cada grupo serie.

FIG 2. Típica configuración de un condensador serie en cada fase de una línea.

4A1.1.1 REACTANCIA CAPACITIVA DEL CONDENSADOR EN SERIE: $[X_{cs}]$

$$X_{cs} = (N/M) X_n \quad [1]$$

4A1.1.2 REACTANCIA CAPACITIVA DEL CONDENSADOR EN SERIE, CUANDO UN CONDENSADOR UNIDAD ESTÁ FUERA DE SERVICIO DE UN GRUPO SERIE: $[X_{cs}']$

Al salir de servicio un condensador unidad de un grupo serie se tiene que la reactancia capacitiva del condensador en serie es $[X_{cs}']$ y está dada por:

$$X_{cs}' = [X_n / (M-1)] + [(N-1)/M] X_n \quad [2]$$

La ecuación [2] puede escribirse así:

$$X_{cs}' = \{ [N(M-1) + 1] / [M(M-1)] \} X_n \quad [3]$$

Mediante la utilización de la ecuación [1] en la ecuación [3], se tiene que la ecuación [3] se expresa así:

$$X_{cs}' = \{ [N(M-1) + 1] / [N(M-1)] \} X_{cs} \quad [4]$$

4A1.1.3 REACTANCIA CAPACITIVA DEL CONDENSADOR EN SERIE, CUANDO SE CORTOCIRCUITA UN CONDENSADOR UNIDAD DE UN GRUPO SERIE: $[X_{cs}'']$

$$X_{cs}'' = [(N-1)/M] X_n \quad [5]$$

Por medio del uso de la ecuación [1] en la ecuación [5], se tiene que la ecuación [5] se expresa así:

$$X_{cs}'' = [(N-1)/N] X_{cs} \quad [6]$$

4A1.1.4 CORRIENTE NOMINAL DE UN CONDENSADOR UNIDAD: $[I_n]$

Del circuito de la FIG 1 se tiene que se cumplen las siguientes ecuaciones:

$$E_s = E_r + I [R + j(X_L - X_{cs})] \quad [7]$$

$$E_r = S_r / I^* \quad [8]$$

con:

I^* : conjugada de la corriente de línea.

La corriente de línea también se escribe así:

$$I = i \angle \theta_i = i [\cos \theta_i + j \operatorname{sen} \theta_i] \quad [9]$$

con:

I : corriente de línea

i : magnitud de la corriente de línea

θ_i : ángulo de la corriente de línea

Por tanto, la conjugada de la corriente de línea será:

$$I^* = i \underline{-\theta_i} = i [\cos\theta_i - j \operatorname{sen}\theta_i] \quad [10]$$

La utilización de las ecuaciones [8] y [10] en la ecuación [7] hacen que ésta se convierta en:

$$E_3 i \cos\theta_i - j E_3 i \operatorname{sen}\theta_i = (i^2 R + P_L) + j [i^2 (X_L - X_{CS}) + Q_L] \quad [11]$$

Tomando E_3 como referencia se tiene que:

$$E_3 = e_3 \underline{0} \quad [12]$$

con:

e_3 : magnitud del voltaje fase-neutro en el terminal de envío

Reemplazando la ecuación [12] en la ecuación [11] se tiene que:

$$e_3 i \cos\theta_i - j e_3 i \operatorname{sen}\theta_i = (i^2 R + P_L) + j [i^2 (X_L - X_{CS}) + Q_L] \quad [13]$$

Igualando las partes reales del primero y segundo miembros de la ecuación [13] se tiene que:

$$e_3 i \cos\theta_i = i^2 R + P_L \quad [14]$$

Igualando las partes imaginarias del primero y segundo miembros de la ecuación [13] se tiene que:

$$\operatorname{sen}\theta_i = - [i^2(X_L - X_{CS}) + Q_L] / (e_3 i) \quad [15]$$

Se sabe además que:

$$\operatorname{cos}\theta_i = (1 - \operatorname{sen}^2\theta_i)^{1/2} \quad [16]$$

La utilización de las ecuaciones [15] y [16] en la ecuación [14] permiten obtener la siguiente ecuación:

$$i^4 [R^2 + (X_L - X_{CS})^2] + [2(RP_L + (X_L - X_{CS})Q_L) - e_3^2] i^2 + P_L^2 + Q_L^2 = 0 \quad [17]$$

Por otra parte se cumplen las siguientes relaciones:

$$Z = R + j(X_L - X_{CS}) = |Z| \angle \theta \quad [18]$$

$$|Z|^2 = R^2 + (X_L - X_{CS})^2 \quad [19]$$

$$\theta = \operatorname{tg}^{-1} [(X_L - X_{CS})/R] \quad [20]$$

$$R = |Z| \operatorname{cos}\theta \quad [21]$$

$$(X_L - X_{CS}) = |Z| \operatorname{sen}\theta \quad [22]$$

$$S_r = P_L + jQ_L = |S_r| \angle \epsilon \quad [23]$$

$$|S_r| = P_L^2 + Q_L^2 \quad [24]$$

$$\epsilon = \operatorname{tg}^{-1} (Q_L/P_L) \quad [25]$$

$$P_L = |S_r| \operatorname{cose} \quad [26]$$

$$Q_L = |S_r| \operatorname{sene} \quad [27]$$

La utilización de las ecuaciones [18] a la [27] en la ecuación [17] hacen que esta última se convierta en:

$$|Z|^2 i^4 + [2|Z||S_r|(\cos\epsilon \cos\theta + \operatorname{sen}\epsilon \operatorname{sen}\theta) - e_s^2] i^2 + |S_r|^2 = 0 \quad [28]$$

Tambi3n se cumple la relaci3n siguiente:

$$\cos(\epsilon - \theta) = (\cos\epsilon \cos\theta + \operatorname{sen}\epsilon \operatorname{sen}\theta) \quad [29]$$

Reemplazando la ecuaci3n [29] en la ecuaci3n [28] se tiene que:

$$|Z|^2 i^4 + [2|Z||S_r|\cos(\epsilon - \theta) - e_s^2] i^2 + |S_r|^2 = 0 \quad [30]$$

La soluci3n de la ecuaci3n [30] permite determinar la magnitud de la corriente de l3nea [i], la misma que circula por el condensador en serie, como se puede constatar de la FIG 1.

En consecuencia la corriente nominal de un condensador unidad [I_n] estar3 dada por:

$$I_n = i/M \quad [31]$$

donde:

i : soluci3n de la ecuaci3n [30]

M : n3mero de condensadores unidad en paralelo por grupo serie

4A1.1.5 VOLTAJE NOMINAL DE UN GRUPO SERIE: [e]

El voltaje nominal de un grupo serie: [e]; est3 dado por:

$$e = i(X_n/M) \quad [32]$$

con:

i : soluci3n de la ecuaci3n [30]

X_n : reactancia capacitiva de cada condensador unidad

M : número de condensadores unidad en paralelo por grupo serie

4A1.2 VOLTAJE A TRAVÉS DE UN GRUPO SERIE CUANDO UN CONDENSADOR UNIDAD DE EL ESTA FUERA DE SERVICIO; EXPRESADO EN PORCENTAJE DEL VOLTAJE NOMINAL DEL GRUPO SERIE: $[e_f\%]$

La corriente $[I']$ que circula por el circuito de la FIG 1 cuando un condensador unidad está fuera de servicio de un grupo serie, es decir cuando la reactancia capacitiva del condensador en serie es $[X_{cs}']$ es:

$$I' = i' \cos \theta_r \quad [33]$$

La ecuación [30] que se dedujo en la sección 4A1.1.4 se utiliza también para determinar la corriente de línea y por tanto la corriente a través de la reactancia capacitiva del condensador en serie, lógicamente según el valor pertinente de reactancia capacitiva que adopte el condensador en serie. Así la ecuación [30] para la corriente $[I']$ y reactancia capacitiva $[X_{cs}']$ se convierte en:

$$|Z'|^2 i'^4 + [2|Z'| |S_r| \cos(\epsilon - \theta') - e_s^2] i'^2 + |S_r|^2 = 0 \quad [34]$$

con:

$$Z' = R + j(X_L - X_{cs}') = |Z'| \angle \theta' \quad [35]$$

$$|Z'|^2 = R^2 + (X_L - X_{cs}')^2 \quad [36]$$

$$\theta' = \text{tg}^{-1} [(X_L - X_{cs}')/R] \quad [37]$$

X_{cs}' : dado por la ecuación [4]

$$S_r = P_L + jQ_L = |S_r| \epsilon \quad [38]$$

$$|S_r| = P_L^2 + Q_L^2 \quad [39]$$

$$\epsilon = \text{tg}^{-1}(Q_L/P_L) \quad [40]$$

$$P_L = |S_r| \text{cose} \quad [41]$$

$$Q_L = |S_r| \text{sene} \quad [42]$$

Siendo $[i']$ la solución de la ecuación [34], se tiene que el voltaje a través de un grupo serie cuando un condensador unidad de él está fuera de servicio es $[e']$, y está dado por:

$$e' = i' [X_n / (M-1)] \quad [43]$$

Dividiendo la ecuación [43] para la ecuación [32] y luego multiplicando por 100, el voltaje a través de un grupo serie cuando un condensador unidad de él está fuera de servicio, expresado en porcentaje del voltaje nominal del grupo serie: $[e_f\%]$, es:

$$e_f \% = 100 \frac{M}{M-1} \frac{i'}{i} \quad [44]$$

con:

M : número de condensadores unidad en paralelo por grupo serie.

i' : solución de la ecuación [34]

i : solución de la ecuación [30]

4A1.3 CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO A TRAVÉS DE UN CONDENSADOR FALLOSO EN VECES LA CORRIENTE NOMINAL DEL MISMO: [I_f]

La corriente [I"] que circula por el circuito de la FIG 1 cuando ha fallado un condensador unidad, es decir cuando la reactancia capacitiva del condensador en serie es [X_{cs}"], es:

$$I'' = i'' \angle \theta_i'' \quad [45]$$

La ecuación [30] aplicada a la corriente [I"] y reactancia capacitiva [X_{cs}"] será:

$$|Z''|^2 i''^4 + [2|Z''||S_r| \cos(\epsilon - \theta'') - e_s^2] i''^2 + |S_r|^2 = 0 \quad [46]$$

con:

$$Z'' = R + j(X_L - X_{cs}'') = |Z''| \angle \theta'' \quad [47]$$

$$|Z''|^2 = R^2 + (X_L - X_{cs}'')^2 \quad [48]$$

$$\theta'' = \text{tg}^{-1} [(X_L - X_{cs}'')/R] \quad [49]$$

X_{cs}'' : dado por la ecuación [6]

$$S_r = P_L + jQ_L = |S_r| \angle \epsilon \quad [50]$$

$$|S_r| = P_L^2 + Q_L^2 \quad [51]$$

$$\epsilon = \text{tg}^{-1} (Q_L/P_L) \quad [52]$$

$$P_L = |S_r| \text{cose} \quad [53]$$

$$Q_L = |S_r| \text{sene} \quad [54]$$

Siendo i'' la solución de la ecuación [46], se tiene que al dividir la solución de la ecuación [46]; i'' para la ecuación [31], se obtiene la corriente de cortocircuito a través de un condensador unidad falloso en vezes la corriente nominal del mismo: I_f , es decir que:

$$I_f = M(i''/i) \quad [55]$$

con:

M : número de condensadores unidad en paralelo por grupo serie.

i'' : solución de la ecuación [46]

i : solución de la ecuación [30]

Es importante acotar que como el fusible está en serie con el condensadores unidad, quiere decir que I_f será el mismo tanto para el condensador unidad falloso como para su respectivo fusible.

APENDICE 6A1

- 6A1 PROCEDIMIENTO DE CALCULO PARA LA CONFECCION DE LA TABLA 6.9 DE LA SECCION 6.3.1.
- 6A1.1 CONSIDERACIONES BASICAS.
- 6A1.2 CALCULOS PARA EL AÑO 1986.

APENDICE 6A1

6A1 PROCEDIMIENTO DE CALCULO PARA LA CONFECCION DE LA TABLA 6.9 DE LA SECCION 6.3.1

6A1.1 CONSIDERACIONES BASICAS

En la sección 5.1.6.1 se realizó la deducción de las fórmulas de cálculo del voltaje fase neutro en el terminal de recepción y del ángulo de operación de la línea, para el caso de dos líneas de similares características conectadas en paralelo, haciéndolo pero partiendo de potencias de recepción por fase y voltaje fase-neutro en el terminal de envío. Para adaptar las fórmulas de la sección 5.1.6.1 al caso de una sola línea se tiene en primer lugar que:

$$R_p = R = 11.11 \text{ [OHM]} \quad [1]$$

$$X_{Lp} = X_L = 23.59 \text{ [OHM]} \quad [2]$$

Es decir los datos de resistencia y reactancia inductiva de una sola línea.

En segundo lugar, la determinación de la magnitud del voltaje de recepción (entre fases) y el ángulo de operación de la línea, se lo va a hacer partiendo de potencias de recepción trifásicas y magnitud de voltaje de envío (entre fases).

Por otro lado en la sección 5.1.6.2 se efectuó la deducción de la fórmula de cálculo de la corriente de línea para el caso de dos líneas similares, en paralelo, partiendo de potencias de recepción por fase y de voltaje fase-neutro en el terminal de recepción. La determinación de la magnitud de la corriente de línea, para el caso de una sola línea se lo va a

hacer partiendo de potencias de recepción trifásicas y de la magnitud de voltaje de recepción (entre fases), por cuya razón la ecuación [5.63] de la sección 5.1.6.2 se convierte en:

$$i = |S_r| / (\sqrt{3} e_r) \quad [3]$$

con:

$$|S_r| = |P_L + jQ_L| = (P_L^2 + Q_L^2)^{1/2} \quad [4]$$

Donde, la ecuación [4] está referida a potencias de recepción trifásicas y $[e_r]$ de la ecuación [3] está referido a la magnitud del voltaje de recepción (entre fases).

6A1.2 CALCULOS PARA EL AÑO 1986

Los datos son:

$$R_p = 11.11 \text{ [OHM]}$$

$$X_{Lp} = 23.59 \text{ [OHM]}$$

$$P_L = 17.1 \text{ [MW]}$$

$$Q_L = 2.4 \text{ [MVAR]}$$

} potencias trifásicas

$$e_s = 70.104 \text{ [KV]} \quad \} \text{ entre fases}$$

- Cálculo de la magnitud del voltaje terminal de recepción (entre fases)

Transcribiendo la ecuación [5.58] de la sección 5.1.6.1 se tiene que:

$$e_{ry} = \frac{R_p Q_L - X_{Lp} P_L}{e_s} \quad [5]$$

Efectuando los cálculos en [5] se tiene que:

$$e_{ry} = \frac{11.11(2.4) - 23.59(17.1)}{70.104} \quad [6]$$

$$\text{ó; } e_{ry} = -5.373 \text{ [KV]} \quad [7]$$

Transcribiendo la ecuación [5.59] de la sección 5.1.6.1 se tiene que:

$$e_{rx} = \frac{e_s \pm \sqrt{e_s^2 - 4[e_{ry}^2 + R_p P_L + X_{Lp} Q_L]}}{2} \quad [8]$$

Efectuando cálculos en [8] se tiene que:

$$e_{rx} = \frac{70.104 \pm \sqrt{(70.104)^2 - 4[(-5.374)^2 + 11.11(17.1) + 23.59(2.4)]}}{2} \quad [9]$$

$$\text{ó; } e_{rx} = \begin{cases} 65.925 \text{ [KV]} & [10] \\ 4.179 \text{ [KV]} & [11] \end{cases}$$

Transcribiendo la ecuación [5.60] de la sección 5.1.6.1 se tiene que:

$$e_r = \sqrt{e_{ry}^2 + e_{rx}^2} \quad [12]$$

Efectuando cálculos en [12], es decir substituyendo el valor de $[e_{ry}]$ dado por [7] y la solución de $[e_{rx}]$ dada por [10], se tiene que la magnitud del voltaje terminal de recepción (entre fases) será:

$$e_r = \sqrt{(-5.373)^2 + (65.925)^2} \quad [13]$$

$$\text{ó; } e_r = 66.144 \text{ [KV]} \quad [14]$$

$$\text{ó; } e_r = 0.96 \text{ [P.U]} \quad [15]$$

- Cálculo del ángulo de operación de la línea

Transcribiendo la ecuación [5.61] de la sección 5.1.6.1 se tiene que:

$$\Delta = -\operatorname{tg}^{-1} \frac{e_{ry}}{e_{rx}} \quad [16]$$

Efectuando cálculos en [16], o sea reemplazando los valores de $[e_{ry}]$ y $[e_{rx}]$ dados respectivamente por [7] y [10], se tiene que el ángulo de operación de la línea será:

$$\Delta = -\operatorname{tg}^{-1} \frac{-5.373}{65.925} \quad [17]$$

$$\text{ó; } \Delta = 4.7 [^\circ] \quad [18]$$

- Cálculo de la magnitud de la corriente de línea

Efectuando cálculos en la ecuación [4] de este apéndice, se tiene que:

$$|S_r| = |17.1 + j2.4| = [(17.1)^2 + (2.4)^2]^{1/2} \quad [19]$$

$$\text{ó; } |S_r| = 17.268 \text{ [MVA]} \quad [20]$$

Reemplazando, el valor de $[|S_r|]$ dado por [20] y el valor de $[e_r]$ dado por [14], en la ecuación [3] de este apéndice, se tiene que la magnitud de la corriente de línea es:

$$i = \{17.268 / [\sqrt{3}(66.144)]\} \times 1000 \quad [21]$$

$$\text{ó; } i = 150.727 \text{ [A]} \quad [22]$$

Hay que anotar que para los otros años hay que seguir el mismo proceso de cálculo que se indica en esta sección 6A1.2, obviamente utilizando los datos pertinentes a cada caso.

APENDICE 6A2

- 6A2 PROCEDIMIENTO DE CALCULO PARA LA CONFECCION DE LA TABLA 6.10 DE LA SECCION 6.4.1.1.1.
- 6A2.1 CONSIDERACIONES BASICAS.
- 6A2.2 CALCULO DEL VALOR TOPE DEL PORCENTAJE DE COMPENSACION SERIE.
- 6A2.3 CALCULOS PARA EL 25[%] DE COMPENSACION SERIE.

APENDICE 6A2

6A2 PROCEDIMIENTO DE CALCULO PARA LA CONFECCION DE LA TABLA 6.10 DE LA SECCION 6.4.1.1.1

6A2.1 CONSIDERACIONES BASICAS

Como paso previo a la elaboración de la tabla 6.10 hay que determinar el valor tope del porcentaje de compensación serie, a fin de establecer un rango de compensación serie dentro del cual se debe realizar los cálculos. El rango de compensación serie está dado por el intervalo de compensación serie que va del 0 [%] al valor tope de compensación serie. El valor tope de compensación serie no es más que el valor de la reactancia del condensador en serie -hasta el cual el voltaje en el terminal de recepción y la corriente de línea; tienen valor real- expresado como porcentaje de la reactancia inductiva de la línea.

En la sección 5.1.4.3, se efectuó la deducción de las fórmulas de cálculo, del valor del condensador en serie que corresponde al valor tope del porcentaje de compensación serie, partiendo de potencias de recepción por fase y magnitud del voltaje fase-neutro en el terminal de envío. En el caso de la tabla 6.10, se determinará el porcentaje de compensación serie pero partiendo de potencias de recepción trifásicas y de la magnitud del voltaje de envío (entre fases).

En la sección 5.1.4.1 se realizó la deducción de las fórmulas de cálculo del voltaje fase-neutro en el terminal de recepción y del ángulo de operación de la línea partiendo de potencias de recepción por fase y voltaje fase-neutro en el terminal de envío, pero para la tabla 6.10 se determina la magnitud del voltaje de recepción (entre fases) y el ángulo de operación de

la línea a partir de potencias de recepción trifásicas y magnitud de voltaje de envío (entre fases).

Por otra parte, en la sección 5.1.4.2 se realizó la deducción de la fórmula de cálculo de la corriente de línea partiendo de potencias de recepción por fase y de voltaje fase-neutro en el terminal de recepción. La determinación de la magnitud de la corriente de línea, en el caso de la tabla 6.10, se lo hace partiendo de potencias de recepción trifásicas y de la magnitud del voltaje de recepción (entre fases), por cuyo motivo la ecuación [5.16] de la sección 5.1.4.2 se convierte en:

$$i = |S_r| / (\sqrt{3} e_r) \quad [1]$$

con:

$$|S_r| = |P_L + jQ_L| = (P_L^2 + Q_L^2)^{1/2} \quad [2]$$

Donde, la ecuación [2] está referida a potencias de recepción trifásicas y $[e_r]$ de la ecuación [1] a la magnitud del voltaje de recepción (entre fases).

6A2.2 CALCULO DEL VALOR TOPE DEL PORCENTAJE DE COMPENSACION SERIE

Los datos son:

$$R = 11.11 \text{ [OHM]}$$

$$X_L = 23.59 \text{ [OHM]}$$

$$P_L = 39.1 \text{ [MW]}$$

$$Q_L = 11.8 \text{ [MVAR]}$$

$$e_s = 70.104 \text{ [KV]}$$

} potencias trifásicas

} entre fases

Transcribiendo la ecuación [5.20] de la sección 5.1.4.3 se tiene que:

$$X_{\gamma} = \frac{Q_L (2RP_L - e_s^2) \pm \sqrt{[-Q_L (2RP_L - e_s^2)]^2 + P_L^2 e_s^2 (e_s^2 - 4RP_L)}}{2 P_L^2} \quad [3]$$

Reemplazando en [3] los datos mencionados y efectuando cálculos se tiene que:

$$X_{\gamma} = \begin{cases} 37.2 \text{ [OHM]} & [4] \\ -68.4 \text{ [OHM]} & [5] \end{cases}$$

Transcribiendo la ecuación [5.19] de la sección 5.1.4.3 se tiene que:

$$X_{\gamma} = X_L - X_{cs} \quad [6]$$

Despejando $[X_{cs}]$ de la ecuación [6] se tiene que:

$$X_{cs} = X_L - X_{\gamma} \quad [7]$$

La ecuación [7] expresada en porcentaje de la reactancia inductiva de la línea $[X_L]$, da:

$$X_{cs}\% = [1 - (X_{\gamma}/X_L)] 100 \% \quad [8]$$

La ecuación [8] permite calcular el valor tope del porcentaje de compensación serie.

Realizando cálculos en [8], es decir reemplazando los valores de $[X_{\gamma}]$ dados por [4] y [5] y el valor de $[X_L]$ de la línea se tiene que:

$$X_{cs}\% = \begin{cases} -57.6 \text{ [%]} & [9] \\ 389.9 \text{ [%]} & [10] \end{cases}$$

Obviamente, la solución para el valor tope del porcentaje de compensación serie es la dada por [10], y se piensa que con el fin de realizar los cálculos para la elaboración de la tabla 6.10 se puede tener el valor tope del porcentaje de compensación serie de:

$$X_{cs}\% = 389 [\%] \quad [11]$$

6A2.3 CALCULOS PARA EL 25 [%] DE COMPENSACION SERIE

Los datos son:

$$R = 11.11 [\text{OHM}]$$

$$X_L = 23.59 [\text{OHM}]$$

$$P_L = 39.1 [\text{MW}]$$

$$Q_L = 11.8 [\text{MVAR}]$$

} potencias trifásicas

$$e_s = 70.104 [\text{KV}]$$

} entre fases

$$X_{cs}\% = 25 [\%]$$

} compensación serie en porcentaje

$$X_{cs} = 5.69 [\text{OHM}]$$

} compensación serie en ohmios

- Cálculo de la magnitud del voltaje terminal de recepción (entre fases)

Transcribiendo la ecuación [5.10] de la sección 5.1.4.1 se tiene que:

$$e_{ry} = \frac{RQ_L - (X_L - X_{cs})P_L}{e_s} \quad [12]$$

Efectuando cálculos en [12] se tiene que:

$$e_{ry} = -8.002 [\text{KV}] \quad [13]$$

Transcribiendo la ecuación [5.11] de la sección 5.1.4.1 se tiene que:

$$e_{rx} = \frac{e_s \pm \sqrt{e_s^2 - 4[e_{ry}^2 + RP_L + (X_L - X_{cs})Q_L]}}{2} \quad [14]$$

Efectuando cálculos en [14] se tiene que:

$$e_{rx} = \begin{cases} 57.885 \text{ [KV]} & [15] \\ 12.219 \text{ [KV]} & [16] \end{cases}$$

Transcribiendo la ecuación [5.12] de la sección 5.1.4.1 se tiene que:

$$e_r = \sqrt{e_{ry}^2 + e_{rx}^2} \quad [17]$$

Efectuando cálculos en [17], o sea, substituyendo el valor de $[e_{ry}]$ dado por [13] y la solución de $[e_{rx}]$ dada por [15] se tiene que la magnitud del voltaje terminal de recepción (entre fases) será:

$$e_r = \sqrt{(-8.002)^2 + (57.885)^2} \quad [18]$$

$$\text{ó; } e_r = 58.435 \text{ [KV]} \quad [19]$$

$$\text{ó; } e_r = 0.847 \text{ [P.U]} \quad [20]$$

- Cálculo del ángulo de operación de la línea.

Transcribiendo la ecuación [5.13] de la sección 5.1.4.1 se tiene que:

$$\Delta = -\text{tg}^{-1} \frac{e_{ry}}{e_{rx}} \quad [21]$$

Efectuando cálculos en [21], es decir reemplazando los valores de $[e_{ry}]$ y $[e_{rx}]$ respectivamente dados por [13] y por [15], se tiene que el ángulo de operación de la línea será:

$$\Delta = -\operatorname{tg}^{-1} \frac{-8.002}{57.885} \quad [22]$$

$$\text{ó; } \Delta = 7.871 [^\circ] \quad [23]$$

- Cálculo de la magnitud de la corriente de línea

Efectuando cálculos en la ecuación [2] de este apéndice se tiene que:

$$|S_r| = |39.1 + j11.8| = [(39.1)^2 + (11.8)^2]^{1/2} \quad [24]$$

$$\text{ó; } |S_r| = 40.8 \text{ [MVA]} \quad [25]$$

Reemplazando el valor de $|S_r|$ dado por [25] y el valor de e_r dado por [19], en la ecuación [1] de este apéndice, se tiene que la magnitud de la corriente de línea es:

$$i = [40.8 / (\sqrt{3} \cdot 58.435)] \cdot 1000 \quad [26]$$

$$\text{ó; } i = 403.113 \text{ [A]} \quad [27]$$

Hay que recalcar que para los otros porcentajes de compensación serie incluyendo para el valor tope del porcentaje de compensación serie, hay que seguir el mismo procedimiento de cálculo de esta sección 6A2.3, lógicamente haciendo uso de los datos correspondientes a cada caso.

APENDICE 6A3

6A3 PROCEDIMIENTO DE CALCULO PARA LA
CONFECCION DE LA TABLA 6.13 DE LA SECCION
6.4.1.1.2.1.2.

6A3.1 ECUACIONES BASICAS.

6A3.2 CALCULOS PARA $N = 1$.

APENDICE 6A3

6A3 PROCEDIMIENTO DE CALCULO PARA LA CONFECCION DE LA TABLA 6.13 DE LA SECCION 6.4.1.1.2.1.2

6A3.1 ECUACIONES BASICAS

Transcribiendo la ecuación [4.15] de la sección 4.1.4 que expresa la corriente circulante a través del fusible de un condensador unidad, en veces la corriente nominal del condensador unidad se tiene que:

$$I_f = M (i''/i) \quad [1]$$

En la ecuación [1], $[i'']$ está dado por la solución de la ecuación [4.16] de la sección [4.1.4]; es decir:

$$|Z''|^2 (i'')^4 + [2|Z''| |S_r| \cos(\epsilon - \theta'') - e_s^2] (i'')^2 + |S_r|^2 = 0 \quad [2]$$

En la ecuación [2] se usan las ecuaciones [4.17], [4.18] y [4.11] de la sección 4.1.4, es decir:

$$Z'' = R + j(X_L - X_{cs}'') = |Z''| \angle \theta'' \quad [3]$$

$$X_{cs}'' = \frac{N-1}{N} X_{cs} \quad [4]$$

$$S_r = P_L + jQ_L = |S_r| \angle \epsilon \quad [5]$$

En la ecuación [1], $[i]$ está dado por la solución de la ecuación [4.13] de la sección 4.1.4:

$$|Z|^2 i^4 + [2|Z| |S_r| \cos(\epsilon - \theta) - e_s^2] i^2 + |S_r|^2 = 0 \quad [6]$$

En la ecuación [6] se usan las ecuaciones [4.14] y [4.11] de la sección 4.1.4, es decir:

$$Z = R + j(X_L - X_{CS}) = |Z| \angle \theta \quad [7]$$

$$S_r = P_L + jQ_L = |S_r| \angle \epsilon \quad [8]$$

Transcribiendo la ecuación [4.8] de la sección 4.1.4, que expresa el voltaje que se presenta en los condensadores unidad restantes del grupo serie, luego de que de dicho grupo ha salido un condensador unidad, tomado como porcentaje del voltaje nominal del grupo, se tiene:

$$e_f \% = 100 \frac{M}{M-1} \frac{i'}{i} \quad [9]$$

En la ecuación [9], $[i']$ está dado por la solución de la ecuación [4.9] de la sección 4.1.4:

$$|Z'|^2 (i')^4 + [2|Z'| |S_r| \cos(\epsilon - \theta') - e_s^2] (i')^2 + |S_r|^2 = 0 \quad [10]$$

En la ecuación [10] se usan las ecuaciones [4.10], [4.11] y [4.12] de la sección 4.1.4, es decir:

$$Z' = R + j(X_L - X_{CS}') = |Z'| \angle \theta' \quad [11]$$

$$S_r = P_L + jQ_L = |S_r| \angle \epsilon \quad [12]$$

$$X_{CS}' = \frac{N(M-1) + 1}{N(M-1)} X_{CS} \quad [13]$$

Además, en la ecuación [9] como en la ecuación [1], $[i]$ está dado por la solución de la ecuación [6] y en esta ecuación [6] también se deben usar las ecuaciones [7] y [8].

6A3.2 CALCULOS PARA N=1

Los datos son:

$$R = 11.11 \text{ [OHM]}$$

$$X_L = 23.59 \text{ [OHM]}$$

$$P_L = 37.5/3 \text{ [MW]}$$

$$Q_L = 11.1/3 \text{ [MVAR]}$$

$$e_s = 70.104/\sqrt{3} \text{ [KV]} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \text{ potencias por fase}$$

$$X_{cs}\% = 150 \text{ [\%]} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \text{ fase-neutro}$$

$$X_{cs} = 35.385 \text{ [OHM]} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \text{ compensación serie en porcentaje}$$

$$X_{cs} = 35.385 \text{ [OHM]} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \text{ compensación serie en ohmios}$$

Para determinar el número mínimo de condensadores unidad en paralelo por grupo serie que debe haber para el caso de que $N=1$ de modo de satisfacer las consideraciones 1.- y 2.- de la sección 4.1.3 del capítulo 4, es necesario calcular para varios valores de $[M]$ tanto $[I_f]$ como $[e_f\%]$ hasta determinar el $[M]$ que siendo el mínimo posible permita cumplir las consideraciones 1.- y 2.- de la sección 4.1.3.

Se ilustrará el cálculo para los casos $M=1$ y $M=2$ indicándose que el procedimiento de cálculo para otro valor de $[M]$ será el mismo, que para $M=1$ o $M=2$.

6A3.2.1 Cálculo de $[I_f]$ y $[e_f\%]$ para $M=1$

6A3.2.1.1 Cálculo de: $[j]$

Substituyendo valores en las ecuaciones [7] y [8] se tiene que:

$$Z = 11.11 + j(23.59 - 35.385) = 16.204 \underline{-46.71} \text{ [OHM]} \quad [14]$$

$$S_r = (37.5 \times 10^6/3) + j(11.1 \times 10^6/3) = 13.036 \times 10^6 \angle 16.49 \quad [\text{VA}]$$

$$[15]$$

De [14] se desprende:

$$|Z| = 16.204 \text{ [OHM]} \quad [16]$$

$$\theta = -46.71 \text{ [}^\circ\text{]} \quad [17]$$

De [15] se desprende:

$$|S_r| = 13.036 \times 10^6 \text{ [VA]} \quad [18]$$

$$\epsilon = 16.49 \text{ [}^\circ\text{]} \quad [19]$$

El valor de $[e_s]$ se escribe así:

$$e_s = 70.104 \times 10^3/\sqrt{3} \text{ [V]} \quad [20]$$

Reemplazando valores de [16], [17], [18], [19] y [20] en la ecuación [6] se tiene que:

$$262.570i^4 - 1447707727i^2 + 1.6994 \times 10^{14} = 0 \quad [21]$$

La solución de la ecuación [21] es:

$$i = 346.402 \text{ [A]} \quad [22]$$

Nótese que el valor $[i]$ de [22] coincide con el de $[i]$ correspondiente al 150 [%] de compensación serie de la tabla 6.11 de la sección 6.4.1.1.1.1, así como con el valor de $[I_{cs}]$ de la tabla 6.12 de la sección 6.4.1.1.2.1.1, coincidencias que debían esperarse.

Hay que mencionar que para valores cualesquiera de $[N]$ y $[M]$ el valor de $[i]$ a emplearse en las ecuaciones [1] y [9] será siempre el dado por [22].

6A3.2.1.2 Cálculo de: I_f

Para $N=1$, reemplazando valores en la ecuación [4] se tiene:

$$X_{cs}'' = [(1-1)/1] 35.385 \quad [23]$$

$$0; \quad X_{cs}'' = 0 \text{ [OHM]} \quad [24]$$

Reemplazando [24] y los valores de $[R]$ y $[X_L]$ en la ecuación [3] se tiene que:

$$Z'' = 11.11 + j(23.59 - 0) = 26.075 \underline{[64.78]} \text{ [OHM]} \quad [25]$$

De [25] se desprende:

$$|Z''| = 26.075 \text{ [OHM]} \quad [26]$$

$$\theta'' = 64.78 \text{ [}^\circ\text{]} \quad [27]$$

Reemplazando [18], [19], [20], [26] y [27] en la ecuación [2] se tiene que:

$$679.906(i'')^4 - 1185859865(i'')^2 + 1.6994 \times 10^{14} = 0 \quad [28]$$

La solución de la ecuación [28] es:

$$i'' = 396.906 \text{ [A]} \quad [29]$$

De la ecuación [4] se desprende que $[X_{cs}'']$ es función de $[N]$ y no de $[M]$ y puesto que la ecuación [2] es función de $[X_{cs}'']$ se deduce fácilmente que para cualquier $[M]$ y $N=1$, $[i'']$ está dado siempre por [29].

Para $M=1$ reemplazando los valores de [22] y [29] en [1] se tiene que la corriente circulante a través del fusible de un condensador unidad en veces la corriente nominal del condensador unidad es:

$$I_f = 1 (396.906/346.402) \quad [30]$$

$$\text{ó; } I_f = 1.146 \quad [31]$$

6A3.2.1.3 Cálculo de: [e_f]

Para N=1 y M=1 reemplazando valores en la ecuación [13] se tiene que:

$$X_{cs}' = [1(1-1)+1]/[1(1-1)] \quad [32]$$

$$\text{ó; } X_{cs}' = \infty \text{ [OHM]} \quad [33]$$

De [33] se tiene que como $X_{cs}' = \infty$ [OHM] significa que en los terminales del condensador en serie hay un circuito abierto por lo que no existe corriente [i'] y tampoco habrá valor para [e_f]

6A3.2.2 Cálculo de [I_f], [e_f] para M=2

6A3.2.2.1 Cálculo de: [i]

Como se indicó en 6A3.2.1.1 el valor de [i] dado por la ecuación [22] será el mismo independiente de los valores de [M] y de [N], como puede desprenderse de la ecuación [6], por tanto se tiene que:

$$i = 346.402 \text{ [A]} \quad [34]$$

6A3.2.2.2 Cálculo de: [I_f]

En 6A3.2.1.2 se señaló que el valor de [i''] dado por [29] es siempre el mismo para N=1 y cualquier [M], por tanto:

$$i'' = 396.906 \text{ [A]} \quad [35]$$

Para M=2, reemplazando los valores de [35] y [34] en [1] se tiene que la corriente circulante a través del fusible de un condensador unidad en veces la corriente nominal del condensador unidad es:

$$I_f = 2 (396.906/346.402) \quad [36]$$

$$\acute{o}; I_f = 2.292 \quad [37]$$

6A3.2.2.3 Cálculo de: $[e_f\%]$

Para $N=1$ y $M=2$ reemplazando valores en la ecuación [13] se tiene que:

$$X_{cs}' = [1(2-1)+1]/[1(2-1)] 35.385 \quad [38]$$

$$\acute{o}; X_{cs}' = 70.77 \text{ [OHM]} \quad [39]$$

Reemplazando el valor de [39] y los datos correspondientes en [11] se tiene que:

$$Z' = 11.11 + j(23.59 - 70.77) = 48.470 \underline{-76.75} \text{ [OHM]} \quad [40]$$

De [40] se desprende:

$$|Z'| = 48.470 \text{ [OHM]} \quad [41]$$

$$\theta' = -76.75 \text{ [}^\circ\text{]} \quad [42]$$

Reemplazando los valores de [41], [42], [18], [19] y [20] en la ecuación [10] se tiene que:

$$2349.341(i')^4 - 1709613299(i')^2 + 1.6994 \times 10^{14} = 0 \quad [43]$$

La solución de la ecuación [43] es:

$$i' = 344.668 \text{ [A]} \quad [44]$$

Para $M=2$, reemplazando los valores de [44] y [34] en la ecuación [9], se tiene que al salir un condensador unidad de un grupo serie, el voltaje que se presenta en los condensadores unidad restantes del grupo serie, tomado como porcentaje del voltaje nominal del grupo, para $N=1$ y $M=2$ es:

$$e_f \% = 100 \frac{2}{2-1} \frac{344.668}{346.402} \quad [45]$$

$$\acute{o}; \quad e_f \% = 198.999 [\%] \quad [46]$$

6A3.2.2.3 Tabla de valores de $[I_f]$ y $[e_f \%$] para $N=1$ y para distintos valores de M .

TABLA 1

N = 1		
NUMERO DE CONDENSADORES UNIDAD EN PARALELO POR GRUPO SERIE	CORRIENTE DE CORTO-CIRCUITO A TRAYES DEL FUSIBLE EN VECES LA CORRIENTE NOMINAL DEL CONDENSADOR UNIDAD	VOLTAJE EN LAS UNIDADES RESTANTES DEL GRUPO SERIE, AL SALIR UN CONDENSADOR UNIDAD DE DICHO GRUPO
M	I_f	$e_f \%$ [%]
1	1.145	—
2	2.292	198.999
3	3.434	147.565
4	4.583	139.516
5	5.729	123.590
6	6.875	118.855
7	8.021	115.705
8	9.166	113.458
9	10.312	111.774
10	11.458	110.465
11	12.604	109.418
12	13.749	108.561
13	14.895	107.848
14	16.041	107.244
15	17.187	106.726

La tabla 1 contiene los valores respectivos de $[I_f]$ y $[e_f\%]$ para $N=1$ y un $[M]$ dado, que se han calculado siguiendo un procedimiento análogo al desarrollado en 6A3.2.1 o 6A3.2.2.

6A3.2.2.4 Número mínimo de condensadores unidad en paralelo por grupo serie para $N=1$

De la tabla 1 se desprende que el número mínimo de condensadores unidad en paralelo para $N=1$ de modo de satisfacer las consideraciones 1.- y 2.- de la sección 4.1.3 es:

$$M = 11 \quad [47]$$

ya que para $M=11$ se cumple que:

$$I_f = 12.604 \geq 10 \quad [48]$$

$$y; \quad e_f\% = 109.418 \leq 110 [\%] \quad [49]$$

Hay que anotar que para otro valor de $[N]$ distinto de 1, el procedimiento seguido para determinar el número mínimo de condensadores unidad en paralelo por grupo serie para satisfacer las consideraciones 1.- y 2.- de la sección 4.1.3 se realiza de modo similar al caso $N=1$ y que ha sido detallado en la sección 6A3.2, lógicamente utilizando los valores pertinentes.

APENDICE 6A4

- 6A4 PROCEDIMIENTO DE CALCULO PARA LA CONFECCION DE LA TABLA 6.14 DE LA SECCION 6.4.1.1.2.1.2.
- 6A4.1 CALCULOS PARA CONDENSADORES UNIDAD DE 50 [KYAR] NOMINALES Y 2400 [V] NOMINALES.

APENDICE 6A4

6A4 PROCEDIMIENTO DE CALCULO PARA LA CONFECCION DE LA TABLA 6.14 DE LA SECCION 6.4.1.1.2.1.2.

6A4.1 CALCULOS PARA CONDENSADORES UNIDAD DE 50 [KVAR] NOMINALES Y 2400 [V] NOMINALES

Los datos son:

$X_{cs} = 35.385 \text{ [OHM]}$	} CARACTERISTICAS DEL DEL CONDENSADOR SERIE (VALORES ANALITICOS) (Tabla 6.12 sección 6.4.1.1.2.1 Capítulo 6)
$I_{cs} = 346.402 \text{ [A]}$	
$E_{cs} = 12257.43 \text{ [V]}$	
$Q_{cs} = 4.25 \text{ [MYAR]}$	
$Q_n = 50 \text{ [KVAR]}$	} VALORES NOMINALES DE LOS CONDENSADORES UNIDAD
$E_n = 2400 \text{ [V]}$	

- Cálculo del número de grupos serie: [N]

Transcribiendo la ecuación [4.4] de la sección 4.1.4 se tiene que:

$$N = E_{cs}/E_n \quad [1]$$

Substituyendo valores en [1] se tiene que:

$$N = 12257.43 / 2400 \quad [2]$$

$$\text{ó; } N = 5.11 \quad [3]$$

Obviamente, el número de grupos serie debe ser un número entero, por lo cual se toma:

$$N = 6 \quad [4]$$

- Cálculo de la corriente nominal de los condensadores unidad: [I_n]

Transcribiendo la ecuación [4.5] de la sección 4.1.4 se tiene que:

$$I_n = Q_n/E_n \quad [5]$$

Substituyendo valores en [5] se tiene que:

$$I_n = [50/2400] 1000 \quad [6]$$

$$\text{ó; } I_n = 20.83 \text{ [A]} \quad [7]$$

- Cálculo del número de condensadores unidad en paralelo, por grupo serie: [M]

Transcribiendo la ecuación [4.6] de la sección 4.1.4 se tiene que:

$$M = I_{cs}/I_n \quad [8]$$

Substituyendo valores en [8] se tiene que:

$$M = 346.402/20.83 \quad [9]$$

$$\text{ó; } M = 16.63 \quad [10]$$

Obviamente, el número de condensadores unidad en paralelo por grupo serie, debe ser un número entero, por lo cual se toma:

$$M = 17 \quad [11]$$

En la tabla 6.13 de la sección 6.4.1.2.1.2 se tiene que para cumplir las consideraciones 1.- y 2.- de la sección 4.1.3 del capítulo 4, que para N=6 como mínimo se debe tener M=12, por tanto la disposición serie-paralelo N=6 y M=17 también satisface las consideraciones 1.- y 2.- de la sección 4.1.3 del capítulo 4; pues 17 es mayor que el mínimo requerido de 12.

- Cálculo de la cantidad de condensadores unidad que forman un condensador en serie: q_c

Transcribiendo la ecuación [4.7] de la sección 4.1.4 se tiene que:

$$q_c = MN \quad [12]$$

Efectuando cálculos en [12] se tiene que:

$$q_c = 17(6) \quad [13]$$

$$\text{ó; } q_c = 102. \quad [14]$$

- Cálculo de los [MVARs] por fase (valor nominal): Q_{cs}

Este valor de Q_{cs} está dado, por supuesto, por

$$Q_{cs} = Q_n q_c \quad [15]$$

Reemplazando valores en [15] se tiene que:

$$Q_{cs} = 50(102) \quad [16]$$

$$\text{ó; } Q_{cs} = 5.1 \text{ [MVAR]} \quad [17]$$

- Cálculo del voltaje de las unidades (valor analítico): E_n

Despejando E_n de la ecuación [1] de este apéndice se tiene que:

$$E_n = E_{cs}/N \quad [18]$$

Substituyendo valores en [18] se tiene lo siguiente:

$$E_n = E_{cs}/N \quad [19]$$

Reemplazando valores en [19] se tiene que:

$$E_n = 12257.43/6 \quad [20]$$

$$\text{ó; } E_n = 2042.91 \text{ [V]} \quad [21]$$

- Cálculo del voltaje a través del condensador en serie (valor nominal): $[E_{cs}]$

Despejando $[E_{cs}]$ de la ecuación [1] se tiene la siguiente ecuación:

$$E_{cs} = NE_n \quad [22]$$

Para efectuar los cálculos en [22], hay que tomar el voltaje nominal de las unidades, o sea:

$$E_{cs} = 6(2400) \quad [23]$$

$$\text{ó; } E_{cs} = 14400 \text{ [V]} \quad [24]$$

- Cálculo de la corriente a través del condensador en serie (valor nominal):
 $[I_{cs}]$

Este valor de $[I_{cs}]$ se determina por la siguiente ecuación:

$$I_{cs} = Q_{cs}/E_{cs} \quad [25]$$

En la ecuación [25], obviamente para que $[I_{cs}]$ tenga valor nominal, tanto $[Q_{cs}]$ como $[E_{cs}]$ deben ser también valores nominales; es decir que:

$$I_{cs} = [5.1/14400]1000000 \quad [26]$$

$$\text{ó; } I_{cs} = 354.17 \text{ [A]} \quad [27]$$

- Cálculo de la reactancia capacitiva del condensador en serie (valor nominal): $[X_{cs}]$

Este valor de $[X_{cs}]$ se determina mediante la siguiente relación:

$$X_{cs} = E_{cs}/I_{cs} \quad [28]$$

Para que $[X_{cs}]$ tenga valor nominal, tanto $[E_{cs}]$ como $[I_{cs}]$ deben ser también valores nominales; por tanto:

$$X_{cs} = 14400/354.17 \quad [29]$$

$$\text{ó; } X_{cs} = 40.66 \text{ [OHM]} \quad [30]$$

- Cálculo de la tolerancia en la reactancia capacitiva del condensador en serie: $[\xi]$

La tolerancia en la reactancia capacitiva del condensador en serie se refiere a la desviación del valor analítico de reactancia con respecto al valor nominal de reactancia como porcentaje de éste último. [Ref. 23].

La tolerancia en la reactancia capacitiva del condensador en serie se la calcula mediante la siguiente relación:

$$\xi = \frac{X_{cs} \text{ (valor nominal)} - X_{cs} \text{ (valor analítico)}}{X_{cs} \text{ (valor nominal)}} 100 \% \quad [31]$$

Reemplazando los valores correspondientes en esta ecuación se tiene que:

$$\xi = [(40.66 - 35.385)/40.66] 100 \% \quad [32]$$

$$\text{ó; } \xi = 12.97 \% \quad [33]$$

APENDICE 6A5

6A5 PROCEDIMIENTO DE CALCULO PARA LA
CONFECCION DE LA TABLA 6.17 DE LA SECCION
6.4.1.1.2.1.2.2.

6A5.1 CONSIDERACIONES BASICAS.

6A5.2 CALCULOS PARA EL AÑO 1988

APENDICE 6A5

6A5 PROCEDIMIENTO DE CALCULO PARA LA CONFECCION DE LA TABLA 6.17 DE LA SECCION 6.4.1.1.2.1.2.2.

6A5.1 CONSIDERACIONES BASICAS

La tabla 6.17 de la sección 6.4.1.1.2.1.2.2 en lo referente a la magnitud del voltaje terminal de recepción (entre fases), ángulo de operación de la línea y magnitud de la corriente de línea, se estructura de forma similar a las tablas 6.10 y 6.11 de las sección 6.4.1.1.1, cuyo procedimiento de cálculo se detalla en el Apéndice 6A2, mencionándose que para la tabla 6.17 es aplicable la sección 6A2.3 del Apéndice 6A2, lógicamente aplicando los datos correspondientes.

En la sección 5.3.2.2 se deduce la fórmula de cálculo de la potencia activa perdida por fase partiendo de potencia activa de carga por fase en el terminal de recepción y potencia activa por fase en el terminal de envío, pero para la tabla 6.17 se determina la potencia activa perdida trifásica partiendo como es lógico de potencias activas trifásicas en el terminal de recepción y en el terminal de envío.

6A5.2 CALCULOS PARA EL AÑO 1988

Los datos son:

$$R = 11.11 \text{ [OHM]}$$

$$X_L = 23.59 \text{ [OHM]}$$

$$P_L = 30.8 \text{ [MW]}$$

$$Q_L = 8.3 \text{ [MVAR]}$$

} potencias trifásicas

- $e_s = 70.104 \text{ [KV]} \quad \}$ entre fases
 $X_{cs}\% = 150 \text{ [\%]} \quad \}$ compensación serie en porcentaje
 $X_{cs} = 35.34 \text{ [OHM]} \quad \}$ compensación serie en ohmios (valor nominal de reactancia tomado de la tabla 6.16, sección 6.4.1.1.2.1.2)

- Cálculo de la magnitud del voltaje terminal de recepción (entre fases).

Transcribiendo la ecuación [12] del Apéndice 6A2 se tiene que:

$$e_{ry} = \frac{RQ_L - (X_L - X_{cs})P_L}{e_s} \quad [1]$$

Efectuando cálculos en [1] se tiene que:

$$e_{ry} = 6.478 \text{ [KV]} \quad [2]$$

Transcribiendo la ecuación [14] del Apéndice 6A2 se tiene que:

$$e_{rx} = \frac{e_s \pm \sqrt{e_s^2 - 4[e_{ry}^2 + RP_L + (X_L - X_{cs})Q_L]}}{2} \quad [3]$$

Efectuando cálculos en [3] se tiene que:

$$e_{rx} = \begin{cases} 65.744 \text{ [KV]} & [4] \\ 4.360 \text{ [KV]} & [5] \end{cases}$$

Transcribiendo la ecuación [17] del Apéndice 6A2 se tiene que:

$$e_r = \sqrt{e_{ry}^2 + e_{rx}^2} \quad [6]$$

Efectuando cálculos en [6], es decir, reemplazando el valor de $[e_{ry}]$ dado por [2] y la solución de $[e_{rx}]$ dada por [4] se tiene que la magnitud del voltaje terminal de recepción (entre fases) será:

$$e_r = \sqrt{(6.478)^2 + (65.744)^2} \quad [7]$$

$$\text{ó; } e_r = 66.062 \text{ [KV]} \quad [8]$$

$$\text{ó; } e_r = 0.957 \text{ [P.U]} \quad [9]$$

- Cálculo del ángulo de operación de la línea

Transcribiendo la ecuación [21] del Apéndice 6A2 se tiene que:

$$\Delta = -\text{tg}^{-1} \frac{e_{ry}}{e_{rx}} \quad [10]$$

Efectuando cálculos en [10], o sea, reemplazando los valores de $[e_{ry}]$ y $[e_{rx}]$ respectivamente dados por [2] y por [4], se tiene que el ángulo de operación de la línea será:

$$\Delta = -\text{tg}^{-1} \frac{6.478}{65.744} \quad [11]$$

$$\text{ó; } \Delta = -5.627 \text{ [}^\circ\text{]} \quad [12]$$

- Cálculo de la magnitud de la corriente de línea

Transcribiendo la ecuación [2] del Apéndice 6A2 se tiene que:

$$|S_r| = |P_L + jQ_L| = (P_L^2 + Q_L^2)^{1/2} \quad [13]$$

Reemplazando los datos correspondientes en la ecuación [13] se tiene que:

$$|S_r| = |30.8 + j8.3| = [(30.8)^2 + (8.3)^2]^{1/2} \quad [14]$$

$$\text{ó; } |S_r| = 31.9 \text{ [MVA]} \quad [15]$$

Transcribiendo la ecuación [1] del Apéndice 6A2 se tiene que:

$$i = |S_r| / (\sqrt{3} e_r) \quad [16]$$

Substituyendo en la ecuación [16] los valores de $|S_r|$ y e_r dados respectivamente por [15] y por [8] se tiene que la magnitud de la corriente de línea es:

$$i = [31.9 / (\sqrt{3} 66.062)] 1000 \quad [17]$$

$$\text{ó; } i = 278.791 \text{ [A]} \quad [18]$$

- Cálculo de la impedancia entre el terminal de envío y de recepción

La impedancia de transferencia entre el terminal de envío y el terminal de recepción se la expresa de acuerdo a la ecuación [5.68] de la sección 5.3.2.2, es decir por:

$$Z = |Z| \angle \theta \quad [19]$$

La impedancia $[Z]$ para una línea con compensación serie es:

$$Z = R + j(X_L - X_{cs}) = |Z| \angle \theta \quad [20]$$

Reemplazando valores en [20] se tiene que:

$$Z = 11.11 + j(23.59 - 35.34) = 16.171 \angle \underline{-46.604} \quad [21]$$

$$\text{ó; } Z = 16.171 \angle \underline{-46.604} \text{ [OHM]} \quad [22]$$

- Cálculo de la potencia activa de envío

Transcribiendo la ecuación [5.67] de la sección 5.3.2.2 se tiene que:

$$P_s = \frac{e_s^2 \cos \theta}{|Z|} - \frac{e_s e_r}{|Z|} \cos(\Delta + \theta) \quad [23]$$

Reemplazando los valores correspondientes en la ecuación [23] se tiene que la potencia activa trifásica de envío es:

$$P_s = 33.389 \text{ [MW]} \quad [24]$$

- Cálculo de la potencia activa perdida

Transcribiendo la ecuación [5.66] de la sección 5.3.2.2 se tiene que:

$$P_p = P_s - P_L \quad [25]$$

Reemplazando los valores correspondientes en la ecuación [25], se tiene que la potencia activa trifásica perdida es:

$$P_p = 33.389 - 30.8 \quad [26]$$

$$\text{ó; } P_p = 2.589 \text{ [MW]} \quad [27]$$

La elaboración de la tabla 6.17 se hace siguiendo el mismo procedimiento aquí señalado utilizando los datos correspondientes a cada año en cuestión, recalcando que para todos los casos la impedancia entre el terminal de envío y el terminal de recepción es la misma.

APENDICE 6A6

- 6A6 PROCEDIMIENTO DE CALCULO PARA LA CONFECCION DE LA TABLA 6.18 DE LA SECCION 6.4.1.1.2.1.2.2.
- 6A6.1 CONSIDERACIONES BASICAS.
- 6A6.2 FORMULA DE CALCULO DEL COSTO DE LAS PERDIDAS.
- 6A6.3 CALCULOS PARA EL AÑO 1988.
- 6A6.4 CALCULOS PARA LOS AÑOS 1991,, 2007.

APENDICE 6A6

6A6 PROCEDIMIENTO DE CALCULO PARA LA CONFECCION DE LA TABLA 6.18 DE LA SECCION 6.4.1.1.2.1.2.2

6A6.1 CONSIDERACIONES BASICAS

La ecuación [5.72] de la sección 5.3.2.2 permite calcular el costo de las pérdidas en función de la potencia activa perdida por fase [P_p], pero si en dicha ecuación, [P_p] en lugar de representar la potencia activa perdida por fase, expresa la potencia activa perdida trifásica, entonces la ecuación [5.72] de la sección 5.3.2.2 se convierte en la siguiente:

$$C_{pp} = P_p [K_p + 8760 F_p K_e] \quad [1]$$

Por otro lado para los años 1988 hasta 1990 el valor presente al año 1986 de los costos de las pérdidas se les calcula con la ecuación [5.73] de la sección 5.3.2.2, es decir con:

$$VP(C_{pp}) = \frac{C_{pp}}{(1+i)^n} \quad [2]$$

Pero, para tener el valor presente al año 1986 de todos los costos de las pérdidas desde el año 1991 hasta el año 2007, se usa la relación siguiente:

$$VP(C_{pp}, j, j+1, \dots, k) = C_{pp} j \frac{(1+i)^{n1} - 1}{i(1+i)^{n2}} \quad [3]$$

donde:

$VP(C_{ppj, j+1, \dots, k})$: valor presente al año 1986 de todos los costos de las pérdidas desde el año $j=1991$ al año $k=2007$.

C_{ppj} : costo de las pérdidas del año $j=1991$

$n1 = 17$: número de años entre $j=1991$ y $k=2007$

$n2 = 21$: número de años entre $k=2007$ y el año 1986.

6A6.2 FORMULA DE CALCULO DEL COSTO DE LAS PERDIDAS

Los datos son:

$$F_c = 0.48$$

$$K_p = 38410 \text{ [DOLARES/MW]} \quad (\text{véase sección 6.2.6})$$

$$K_e = 9.69 \text{ [DOLARES/MW]}$$

El factor de pérdidas $[F_p]$ está dado por la ecuación [5.70] de la sección 5.3.2.2, o sea por:

$$F_p = 0.3F_c + 0.7 F_c^2 \quad [4]$$

Reemplazando el valor de $F_c = 0.48$ en la ecuación [4], se tiene que el factor de pérdidas $[F_p]$ es:

$$F_p = 0.3(0.48) + 0.7 (0.48)^2 \quad [5]$$

$$\text{ó; } F_p = 0.30 \quad [6]$$

Expresando la ecuación [1] en función solamente de $[F_p]$, para lo cual se reemplazan en ella los otros valores respectivos, se tiene que la fórmula del cálculo del costo de las pérdidas es:

$$C_{pp} = P_p [38410 + 8760 (0.30)(9.69)] \quad [7]$$

$$\text{ó; } C_{pp} = 63875 P_p \quad [8]$$

En la ecuación [8], $[P_p]$ debe estar expresado en [MW], para que $[C_{pp}]$ de en [DOLARES]

6A6.3 CALCULOS PARA EL AÑO 1988

Los datos son:

$$P_p = 2.589 \text{ [MW]} \quad \text{potencia activa perdida trifásica para el año 1988 (véase tabla 6.17)}$$

$$i = 8 \text{ [\%]}$$

$$n = 2 \text{ [AÑOS]}$$

- Cálculo del costo de las pérdidas del año 1988

Reemplazando los valores correspondientes en la ecuación [8] se tiene que el costo de las pérdidas del año 1988 es:

$$C_{pp} = 63875 (2.589) \quad [9]$$

$$\text{ó; } C_{pp} = 165372 \text{ [DOLARES]} \quad [10]$$

- Cálculo del valor presente al año 1986 del costo de las pérdidas del año 1988.

Substituyendo los valores correspondientes en la ecuación [2], se tiene que el valor presente al año 1986 del costo de las pérdidas del año 1988 es:

$$VP(C_{pp}) = \frac{165372}{(1 + 0.08)^2} \quad [11]$$

$$VP(C_{pp}) = 141780 \text{ [DOLARES]} \quad [12]$$

Para los años 1989 y 1990 el procedimiento es similar al realizado para el caso de 1988, obviamente usando los datos respectivos.

6A6.4 CALCULOS PARA LOS AÑOS 1991, ..., 2007

Los datos son:

$$i = 8 \text{ [\%]}$$

$$n1 = 17 \text{ [AÑOS]}$$

$$n2 = 21 \text{ [AÑOS]}$$

$$P_p = 4.001 \text{ [MW]} \quad \left. \begin{array}{l} \text{potencia activa perdida trifásica para los} \\ \text{años 1991, ..., 2007 (véase la tabla 6.17)} \end{array} \right\}$$

- Cálculo del costo de las pérdidas de los años 1991, ..., 2007

Reemplazando valores en la ecuación [8] se tiene que el costo de las pérdidas de los años 1991, ..., 2007 es:

$$C_{pp \ 1991} = 63875(4.001) \quad [13]$$

$$\text{ó; } C_{pp \ 1991} = 255564 \text{ [DOLARES]} \quad [14]$$

- Cálculo del valor presente al año 1986 de todos los costos de las pérdidas desde el año 1991 hasta el año 2007

Reemplazando el valor dado por [14] y los datos correspondientes en la ecuación [3] se tiene que:

$$VP(C_{pp} 1991, \dots, 2007) = 255564 \frac{(1+0.08)^{17} - 1}{0.08(1+0.08)^{21}} \quad [15]$$

$$\acute{o}; \quad VP(C_{pp} 1991, \dots, 2007) = 1'713474 \text{ [DOLARES]} \quad [16]$$

APENDICE 6A7

- 6A7 PROGRAMA DIGITAL.
- 6A7.1 DESCRIPCION GENERAL DEL PROGRAMA DIGITAL.
- 6A7.2 DATOS DE ENTRADA DEL PROGRAMA DIGITAL.
- 6A7.3 CALCULOS QUE REALIZA EL PROGRAMA DIGITAL.
- 6A7.4 DATOS DE SALIDA DEL PROGRAMA DIGITAL.
- 6A7.5 MANUAL DE USO DEL PROGRAMA DIGITAL.
- 6A7.6 LISTADO DEL PROGRAMA DIGITAL.
- 6A7.7 CORRIDAS DE EJEMPLO DEL PROGRAMA DIGITAL

APENDICE 6A7

6A7 PROGRAMA DIGITAL

6A7.1 DESCRIPCION GENERAL DEL PROGRAMA DIGITAL

El programa digital sirve para determinar:

- 1.- Voltaje (línea-línea) terminal de recepción -en módulo- en [KV] y en [P.U].
- 2.- Angulo de operación de la línea [GRD].
- 3.- Corriente de línea en el terminal de envío -en módulo- [AMP]

La determinación de 1.- se hace utilizando las ecuaciones [3.23] y [3.24] desarrolladas en la sección 3.3.1. La determinación de 2.- se realiza usando las ecuaciones [3.20] y [3.21] de la sección 3.3.1 y luego, utilizando la función trigonométrica inversa tg^{-1} . La determinación de 3.- se efectúa utilizando la ecuación [3.29] de la sección 3.3.2 y luego extrayendo el valor absoluto del valor calculado por [3.29].

Los valores de 1.-, 2.- y 3.- se determinan modelando la línea y al condensador en serie con sus correspondientes constantes generalizadas [ABCD], para las tres posibles localizaciones del condensador en serie con la línea, que se indicaron en la sección 3.1.2.

- a.- Condensador en serie ubicado en el terminal de envío de la línea.
- b.- Condensador en serie ubicado en el terminal de recepción de la línea.

- c.- Condensador en serie ubicado entre el terminal de envío y de recepción.

6A7.2 DATOS DE ENTRADA DEL PROGRAMA DIGITAL

Los datos de entrada y los nombres de las variables correspondientes se detallan a continuación:

<u>DESCRIPCION</u>	<u>VARIABLE</u>
1.- Longitud de la línea en [KM]:	[L]
2.- Resistencia por unidad de longitud de la línea en [OHM/KM]:	[R1]
3.- Reactancia inductiva por unidad de longitud de la línea en [OHM/KM]:	[XL1]
4.- Reactancia capacitiva por unidad de longitud de la línea en [MEGAOHM-KM]:	[XC1]
5.- Magnitud del voltaje del terminal de envío (entre fases) en [KV]:	[VS1]
6.- Valor tope del porcentaje de compensación serie en [%]:	[PCSERI]
7.- Potencia activa de carga (3ϕ) en [MW]:	[PR]
8.- Potencia reactiva de carga en [MYAR]:	[QR]

El valor tope del porcentaje de compensación serie no es más que el valor del condensador en serie -hasta el cual el voltaje en el terminal de recepción y la corriente de línea (en el terminal de envío), tienen valor real- expresado como porcentaje de la reactancia inductiva de la línea. Mediante el uso de las ecuaciones de la sección 5.1.4.3, [5.20] primero y luego de la ecuación [5.19] se determina el valor del condensador en serie que corresponde al valor tope del porcentaje de compensación serie. El valor tope del porcentaje de compensación serie se obtiene mediante la

utilización de la ecuación [3.1] de la sección 3.1 para lo cual hay que utilizar el valor de la reactancia inductiva de la línea y el valor del condensador en serie que se obtiene mediante las ecuaciones [5.20] y [5.19] de la sección 5.1.4.3.

6A7.3 CALCULOS QUE REALIZA EL PROGRAMA DIGITAL

- 1.- Con los datos de 1.- hasta 4.- de 6A7.2 se calculan las constantes generalizadas equivalentes A_{eq} , B_{eq} , C_{eq} , D_{eq} .
- 2.- Con los parámetros A_{eq} , B_{eq} , C_{eq} , D_{eq} calculados en 1.- y con los datos 5.-, 7.- y 8.- de 6A7.2 se calculan:
 - a.- Voltaje (línea-línea) terminal de recepción -en módulo- en [KV] y en [P.U].
 - b.- Angulo de operación de la línea [GRD].
 - c.- Corriente de línea en el terminal de envío -en módulo- [AMP]

Los valores del numeral 1.- así como los de los literales a.-, b.- y c.- correspondientes al numeral 2.- se determinan en pasos de 25 [%] de compensación, yendo desde el 0 [%] de compensación serie hasta llegar al valor tope del porcentaje de compensación serie y localizando al condensador en serie en intervalos de 25 [%] de la longitud de la línea yendo desde el 0 [%] de longitud hasta llegar al 100 [%] de longitud, es decir desde el terminal de envío hasta llegar al terminal de recepción.

Nota: También se calcula como algo adicional, la impedancia característica de la línea (módulo y ángulo), para lo cual se usan los datos 1.-, 2.-, 3.- y 4.- de 6A7, y se utiliza la ecuación [8] del Apéndice 3A2.

6A7.4 DATOS DE SALIDA DEL PROGRAMA DIGITAL

Los datos de salida del programa digital, así como el nombre de la variable correspondiente usada en el programa digital se detallan a continuación:

1.- Datos de la línea de subtransmisión

<u>DESCRIPCION</u>	<u>VARIABLE</u>
a.- Longitud de la línea en [KM]:	[L]
b.- Resistencia por unidad de longitud de la línea en [OHM/KM]:	[R1]
c.- Reactancia inductiva por unidad de longitud de la línea en [OHM/KM]:	[XL1]
d.- Reactancia capacitiva por unidad de longitud de la línea en [MEGAOHM-KM]:	[XC1]
e.- Magnitud del voltaje del terminal de envío (entre fases) en [KV]:	[VS1]
f.- Valor tope del porcentaje de compensación serie en [%]:	[PCSERI]
g.- Potencia activa de carga (3ϕ) en [MW]:	[PR]
h.- Potencia reactiva de carga (3ϕ) en [MVAR]:	[QR]

2.- Impedancia característica

a.- Módulo de la impedancia característica en [OHM]:	[Z3MOD]
b.- Angulo de la impedancia característica en [GRD]:	[Z3GRD]

- | | | |
|-----|---|---------|
| 3.- | <u>Voltaje (línea-línea) terminal de recepción</u>
<u>-en módulo- [KV]:</u> | [ERKV] |
| 4.- | <u>Voltaje (línea-línea) terminal de recepción</u>
<u>-en módulo- [P.U]:</u> | [ERPU] |
| 5.- | <u>Angulo de operación de la línea [GRD]:</u> | [DELTA] |
| 6.- | <u>Corriente de línea en el terminal de envío</u>
<u>-en módulo- [AMP]:</u> | [IS] |

Hay que indicar que cuando en la salida del programa digital, en lugar de salir impresos los valores mencionados en los numerales 3.-, 4.-, 5.- y 6.-, sale impreso el mensaje: *"el valor tope del porcentaje de compensación serie está muy alta, probar con un valor tope menor de porcentaje de compensación serie"*; significa que el valor tope de porcentaje de compensación serie calculado como se indica en 6A7.2 y utilizado para la ejecución del programa digital no es el adecuado, lo cual se debe a que el programa digital se ejecuta en base a constantes generalizadas para el cuadripolo equivalente línea-condensador en serie; mientras que al determinar el valor tope del porcentaje de compensación serie de la manera como se indica en 6A7.2, el circuito línea-condensador en serie se modela bajo la forma de parámetros concentrados.

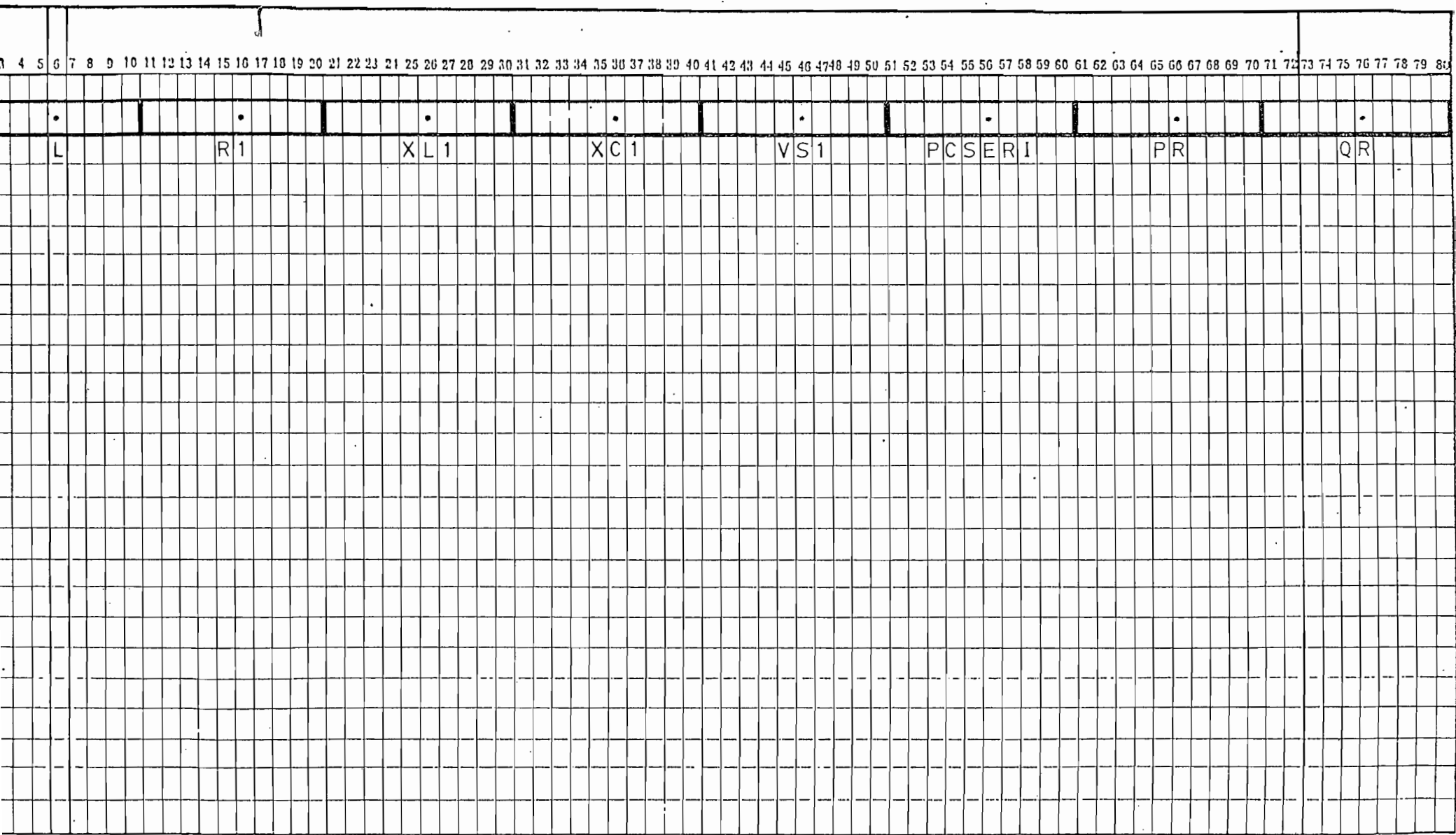
6A7.5 MANUAL DE USO DEL PROGRAMA DIGITAL

Se usa una tarjeta en la que los datos de entrada del programa digital de acuerdo al nombre de la variable que se indicó en 6A7.2, están dispuestos así:

En la tarjeta de datos van las variables:

[L], [R1], [XL1], [XC1], [VS1], [PCSERI], [PR] y [QR] con formato F10.4 cada variable.

A continuación se muestra una hoja de codificación mostrando el campo de las variables antes mencionadas.



6A7.6 LISTADO DEL PROGRAMA DIGITAL

A continuación se muestra el listado del programa digital.

*
*
*
* ESCUELA POLITECNICA NACIONAL *
* ----- *
*
* FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA *
* ----- *
*
* DEPARTAMENTO DE POTENCIA *
* ----- *
*
*
*

TESIS DE GRADO:

TEMA:

CONDENSADOR SERIE EN LINEAS DE SUB-TRANSMISION

REALIZADO POR:

HECTOR ENRIQUE BUSTOS LOPEZ

DIRIGIDO POR:

ING. VICTOR OREJUELA

FECHA:ENERO 1986

PROGRAMA DIGITAL

OBJETIVO:

- CALCULAR LOS VALORES DE:
 - VOLTAJE(LINEA-LINEA) TERMINAL DE RECEPCION-EN MÓDULO-(KV)
 - VOLTAJE(LINEA-LINEA) TERMINAL DE RECEPCION-EN MÓDULO-(FU)
 - ANGULO DE OPERACION DE LA LINEA(GRD)
 - CORRIENTE DE LINEA EN EL TERMINAL DE ENVIO-EN MÓDULO-(AMP)
- LOCALIZANDO AL CONDENSADOR SERIE CADA 25% DE LA LONGITUD

DE LA LINEA, PARA LOS PORCENTAJES DE COMPENSACION SERIE QUE VAN DESDE EL 0% DE COMPENSACION SERIE HASTA EL VALOR TOPE DEL PORCENTAJE DE COMPENSACION SERIE; EN PASOS DE 25% DE COMPENSACION SERIE

METODO:

SE CALCULAN LOS VALORES MENCIONADOS EN EL OBJETIVO MODELANDO A LA LINEA Y AL CONDENSADOR SERIE COMO CUADRIPOLOS CON SUS CORRESPONDIENTES CONSTANTES GENERALIZADAS -ABCC-

DESCRIPCION DE VARIABLES

PROGRAMA PRINCIPAL

L----->LONGITUD DE LA LINEA(KM)
 R1----->RESISTENCIA POR UNIDAD DE LONGITUD DE LA LINEA(OHM/KM)
 XL1----->REACTANCIA INDUCTIVA POR UNIDAD DE LONGITUD DE LA LINEA(OHM/KM)
 XC1----->REACTANCIA CAPACITIVA POR UNIDAD DE LONGITUD DE LA LINEA(MEGAOM-KM)
 VS1----->MODULO DEL VOLTAJE TERMINAL DE ENVIO(LINEA-LINEA) EN (KV)
 PCSERI-->VALOR TOPE DEL PORCENTAJE DE COMPENSACION SERIE(%)
 PR----->POTENCIA ACTIVA TRIFASICA DE CARGA(KW)
 QR----->POTENCIA REACTIVA TRIFASICA DE CARGA(MVAR)
 AJJ----->VECTOR QUE ALMACENA LOS PORCENTAJES DE COMPENSACION SERIE(%)
 XCAPP---->VECTOR QUE ALMACENA LA REACTANCIA CAPACITIVA DEL CONDENSADOR SERIE(OHM)CORRESPONDIENTE AL RESPECTIVO PORCENTAJE DE COMPENSACION SERIE
 ZCAP---->VECTOR QUE ALMACENA LA IMPEDANCIA DEL CONDENSADOR SERIE EN (OHM) DE ACUERDO AL RESPECTIVO PORCENTAJE DE COMPENSACION SERIE
 AKK----->VECTOR QUE ALMACENA LA LONGITUD(%) EN LA CUAL ESTA LOCALIZADO EL CONDENSADOR SERIE
 LPORCT-->VECTOR QUE ALMACENA LA LONGITUD(KM) EN LA CUAL ESTA LOCALIZADO EL CONDENSADOR SERIE
 A----->MATRIZ QUE ALMACENA A LA CONSTANTE GENERALIZADA-A-(NUMERO-COMPLEJO) DEL CUADRIPOLO EQUIVALENTE LINEA-CONDENSADOR-SERIE
 B----->MATRIZ QUE ALMACENA A LA CONSTANTE GENERALIZADA-B-(NUMERO-COMPLEJO) DEL CUADRIPOLO EQUIVALENTE LINEA-CONDENSADOR-SERIE
 C----->MATRIZ QUE ALMACENA A LA CONSTANTE GENERALIZADA-C-(NUMERO-COMPLEJO) DEL CUADRIPOLO EQUIVALENTE LINEA-CONDENSADOR-SERIE
 D----->MATRIZ QUE ALMACENA A LA CONSTANTE GENERALIZADA-D-(NUMERO-COMPLEJO) DEL CUADRIPOLO EQUIVALENTE LINEA-CONDENSADOR-SERIE
 AMOD---->VARIABLE QUE DETERMINA EL MODULO DE CADA ELEMENTO DE LA MATRIZ-A-
 BMOD---->VARIABLE QUE DETERMINA EL MODULO DE CADA ELEMENTO DE LA MATRIZ-B-
 ALFA---->VARIABLE QUE DETERMINA EL ANGULO EN(RAD) DE CADA ELEMENTO DE LA MATRIZ-A-
 BETA---->VARIABLE QUE DETERMINA EL ANGULO EN(RAD) DE CADA ELEMENTO DE LA MATRIZ-B-
 Z3MOD--->VARIABLE QUE DETERMINA EL MODULO DE LA IMPEDANCIA CARACTERISTICA DE LA LINEA EN(OHM)
 Z3GRD--->VARIABLE QUE DETERMINA EL ANGULO EN(GRD) DE LA IMPEDANCIA CARACTERISTICA DE LA LINEA
 ERKV---->MATRIZ QUE ALMACENA EL VOLTAJE(LINEA-LINEA) TERMINAL DE RECEPCION-EN MODULO-(KV)

C

C ERPU---->MATRIZ QUE ALMACENA EL VOLTAJE(LINEA-LINEA) TERMINAL DE RE-
 C CEPCION-EN MODULO-(PU)
 C DELTA--->MATRIZ QUE ALMACENA EL ANGULO DE OPERACION DE LA LINEA(GRD)
 C IS----->MATRIZ QUE ALMACENA LA CORRIENTE DE LINEA EN EL TERMINAL DE
 C ENVIO-EN MODULO-(AMP)

C

C

C

C

VARIABLES EN LAS SUBROUTINAS

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

C

REAL AJJ(50),XCAPP(50),L,AKK(5),LPCRCT(5),YY(2),XX(2)
 REAL ERKV(5,50),ERPU(5,50),DELTA(5,50),IS(5,50)
 COMPLEX Z,Y,Z1,Z2,Z3,COSHIP,SENHIP,AA,AB,DD,ZA,YA,Z1A,Z2A,Z3A
 COMPLEX COSHIA,SENHIA,AA1,BB1,DD1,ZB,YB,Z1B,Z2B,Z3B,COSHIB
 COMPLEX SENHIB,AA2,BB2,DD2,SUMA,PRODA,SUMB,PRODB,SUMD,PRODD
 COMPLEX SUMC,PRODC,ZCAP(50),A(5,50),B(5,50),C(5,50),D(5,50),X
 COMPLEX CC,CC1,CC2,ISS,P1
 EQUIVALENCE (YY,Z3)
 EQUIVALENCE (XX,X)

C----> SE LEEN LOS DATOS DE LA LINEA DE SUB-TRANSMISION:LONGITUD(KM)

C----> RESISTENCIA POR UNIDAD DE LONGITUD(OHM/KM),REACTANCIA INDUCTI-

C----> VA POR UNIDAD DE LONGITUD(OHM/KM),REACTANCIA CAPACITIVA POR U-

C----> NIDAD DE LONGITUD(MEGAOM-KM),VOLTAJE(LINEA-LINEA) TERMINAL DE

C----> ENVIO(KV),VALOR TOPE DEL PORCENTAJE DE COMPENSACION SERIE(%),

C----> POTENCIA ACTIVA TRIFASICA DE CARGA(MW),POTENCIA REACTIVA TRI-

C----> FASICA DE CARGA(MVAR)

READ(5,1) L,R1,XL1,XC1,VS1,PCSERI,PR,QR

C----> TITULOS

WRITE(6,600)

C----> SE IMPRIMEN LOS DATOS DE LA LINEA DE SUB-TRANSMISION:LONGITUD(KM),

C----> RESISTENCIA POR UNIDAD DE LONGITUD(OHM/KM),REACTANCIA INDUCTIVA

C----> POR UNIDAD DE LONGITUD(OHM/KM),REACTANCIA CAPACITIVA POR UNIDAD

C----> DE LONGITUD(MEGAOM-KM),VOLTAJE(LINEA-LINEA) TERMINAL DE ENVIO(KV)

C----> VALOR TOPE DEL PORCENTAJE DE COMPENSACION SERIE(%),POTENCIA ACTIVA

C----> TRIFASICA DE CARGA(MW),POTENCIA REACTIVA TRIFASICA DE CARGA(MVAR)

C

```

WRITE(6,9) L,R1,XL1,XC1,VS1,PCSERI,PR,GR
C----> SE VERIFICA DATOS DE LA LINEA DE SUP-TRANSMISION
      IF(L.LT.0..OR.R1.LT.0..OR.XL1.LT.0..OR.XC1.LT.0..OR.VS1.LT.0..OR.P
      *CSERI.LT.0..OR.PR.LT.0..OR.GR.LT.0..) GO TO 8
C----> SE CALCULA LA IMPEDANCIA DE LA LINEA(OHMS) Y
C----> SE CALCULA LA ADMITANCIA DE LA LINEA(MHOS)
      R=L*R1
      XL=L*XL1
      XC=XC1*1000000./L
      XCC=1./XC
      Z=CMPLX(R,XL)
      Y=CMPLX(0.0,XCC)
C----> SE EMPIEZA EL CALCULO DE LAS CONSTANTES -A-B-C-D- DEL CUADRIPOLO
C----> EQUIVALENTE LINEA DE SUB-TRANSMISION-CONDENSADOR SERIE
999  Z1=CSQRT(Y*Z)
998  Z2=-Z1
997  Z3=CSQRT(Z/Y)
996  Z3MOD=CABS(Z3)
      A2=YY(1)
      B2=YY(2)
      Z3GRD=(ATAN2(B2,A2))*180./3.141592654
      WRITE(6,25) Z3MOD,Z3GRD
      CALL EXPONE(Z1,Z2,COSHIP,SENHIP)
      AA=COSHIP
      BB=Z3*SENHIP
      CC=SENHIP/Z3
      DD=COSHIP
      DIV=PCSERI/25.
      II=DIV
      DDIV=DIV-II
      IF(DDIV.EQ.0.) GO TO 200
      M1=II+2
      GO TO 500
200  M1=II+1
500  MM1=M1-1
      DO 2 K=1,5
      K1=K-1
      AK=0.25*K1
      AKK(K)=AK*100.
      LPORCT(K)=AK*L
      IF(AK.EQ.0..OR.AK.EQ.1.) GO TO 3
      RA=AK*L*R1
      XLA=AK*L*XL1
      XCA=XC1*1000000./(AK*L)
      XCAA=1./XCA
      AL=1.
      AKA=AL-AK
      RB=AKA*L*R1
      XLB=AKA*L*XL1
      XCB=XC1*1000000./(AKA*L)
      XCBB=1./XCB
      ZA=CMPLX(RA,XLA)
      YA=CMPLX(0.0,XCAA)
      Z1A=CSQRT(YA*ZA)
      Z2A=-Z1A
      Z3A=CSQRT(ZA/YA)
      CALL EXPONE(Z1A,Z2A,COSHIA,SENHIA)
      AA1=COSHIA
      BB1=Z3A*SENHIA
      CC1=SENHIA/Z3A
      DD1=COSHIA

```

C

```

ZB=CMPLX(RB,XLB)
YB=CMPLX(0.0,XCRB)
Z1B=CSQRT(YB*ZB)
Z2B=-Z1B
Z3B=CSQRT(ZB/YB)
CALL EXPONE(Z1B,Z2B,COSHI B,SENHIB)
AA2=COSHI B
BB2=Z3B*SENHIB
CC2=SENHIB/Z3B
DD2=COSHI B
SUMA=AA1*AA2+BB1+CC2
PRODA=AA1+CC2
SUMB=AA1*BB2+BB1*DD2
PRODB=AA1+DD2
SUMC=CC1+AA2+DD1+CC2
PRODC=CC1+CC2
SUMD=CC1*BB2+DD1*DD2
PRODD=CC1+DD2
3 DO 4 I=1,M1
  J=I-1
  IF(J.EQ.MM1) GO TO 800
  AJ=0.25*J
  GO TO 900
800 AJ=PCSERI/100.
900 AJJ(I)=AJ*100.
  XCAP=-AJ*XL
  XCAPP(I)=ABS(XCAP)
  ZCAP(I)=CMPLX(0.0,XCAP)
  IF(AK.EQ.0..OR.AK.EQ.1..) GO TO 5
  A(K,I)=SUMA+PRODA+ZCAP(I)
  B(K,I)=SUMB+PRODB+ZCAP(I)
  C(K,I)=SUMC+PRODC+ZCAP(I)
  D(K,I)=SUMD+PRODD+ZCAP(I)
  GO TO 4
5 B(K,I)=BB+ZCAP(I)*DD
  C(K,I)=CC
  IF(AK.EQ.0.) GO TO 6
  A(K,I)=AA
  D(K,I)=AA+ZCAP(I)*CC
  GO TO 4
6 A(K,I)=AA+ZCAP(I)*CC
  D(K,I)=AA
4 CONTINUE
2 CONTINUE
QRR=-QR
SR=(PR**2)+(QR**2)
DO 7 I1=1,5
DO 7 J1=1,M1
C-----> SE CALCULA LOS MODULOS DE LAS CONSTANTES -A-R- DEL CUADRIPOLO
C-----> EQUIVALENTE LINEA DE SUB-TRANSMISION-CONDENSADOR SERIE
  AMOD=CABS(A(I1,J1))
  BMOD=CABS(B(I1,J1))
C-----> SE CALCULA LOS ANGULOS(RAD) DE LAS CONSTANTES -A-R- DEL
C-----> CUADRIPOLO EQUIVALENTE LINEA DE SUB-TRANSMISION-CONDENSADOR SERIE
  X=A(I1,J1)
  A1=XX(1)
  B1=XX(2)
  IF(A1.EQ.0.) GO TO 61
  ALFA=ATAN2(P1,A1)
  GO TO 62
61 IF(B1.EQ.0.) GO TO 63

```

C

```

IF(B1.LT.0.) GO TO 64
ALFA=3.141592654/2.
GO TO 62
64 ALFA=-3.141592654/2.
GO TO 62
63 ALFA=0.
62 X=B(I1,J1)
A1=XX(1)
B1=XX(2)
IF(A1.EQ.0.) GO TO 65
BETA=ATAN2(B1,A1)
GO TO 66
65 IF(B1.EQ.0.) GO TO 67
IF(B1.LT.0.) GO TO 68
BETA=3.141592654/2.
GO TO 66
68 BETA=-3.141592654/2.
GO TO 66
67 BETA=0.
C----> SE CALCULA EL VOLTAJE(LINEA-LINEA) TERMINAL DE RECEPCION
C----> -EN MODULO-ER- EN (KV) Y FN (P.U.)
66 R1=-((2.*AMOD*BMOD)*(PR*COS(ALFA-BETA)-GR*SIN(ALFA-BETA))
*-(VS1**2))
RR1=R1**2
RR2=4.*(AMOD**2)*(BMOD**2)*SR
RR3=RR1-RR2
IF(RR3.LT.0.) GO TO 400
RR4=SQRT(RR3)
RR5=2.*(AMOD**2)
EKV=(R1+RR4)/RR5
C----> VOLTAJE (LINEA-LINEA) TERMINAL DE RECEPCION-EN MODULO-ER-(KV)
ERKV(I1,J1)=SQRT(EKV)
ERR=ERKV(I1,J1)
C----> VOLTAJE (LINEA-LINEA) TERMINAL DE RECEPCION-EN MODULO-ER-(P.U.)
ERPU(I1,J1)=ERR/69.
C----> SE CALCULA EL ANGULO DE OPERACION DE LA LINEA-DELTA-(DIFERENCIA
C----> ENTRE EL ANGULO DEL VOLTAJE DEL TERMINAL DE ENVIO Y EL ANGULO DEL
C----> VOLTAJE DEL TERMINAL DE RECEPCION) EN(GRD)
DELTA=(AMOD*(ERR**2)*SIN(ALFA)-BMOD*GR*COS(BETA)+BMOD*PR*SIN
*(BETA))/(AMOD*(ERR**2)*COS(ALFA)+BMOD*PR*COS(BETA)+BMOD*GR*
*SIN(BETA))
DELTA(I1,J1)=ATAN(DELTA)*180./3.141592654
C----> SE CALCULA LA CORRIENTE DE LINEA EN EL TERMINAL DE ENVIO
C----> -EN MODULO-IS-(AMP)
ISS=(C(I1,J1)*(ERR**2)+D(I1,J1)*(CPLX(PR,GR)))/ERR
IS(I1,J1)=(CABS(ISS)/SQRT(3.2))*1000.0
7 CONTINUE
C----> SE IMPRIME EL VOLTAJE(LINEA-LINEA) TERMINAL DE RECEPCION
C----> -EN MODULO-ER-(KV)
WRITE(6,90)
CALL ESCRI4(AJJ,XCAPP,AKK,LPORCT,ERKV,M1)
C----> SE IMPRIME EL VOLTAJE(LINEA-LINEA) TERMINAL DE RECEPCION
C----> -EN MODULO-ER-(P.U.)
WRITE(6,30)
CALL ESCRI4(AJJ,XCAPP,AKK,LPORCT,ERPU,M1)
C----> SE IMPRIME EL ANGULO DE OPERACION DE LA LINEA-DELTA-(DIFFERENCIA
C----> ENTRE EL ANGULO DEL VOLTAJE DEL TERMINAL DE ENVIO Y EL ANGULO DEL
C----> VOLTAJE DEL TERMINAL DE RECEPCION) EN(GRD)
WRITE(6,31)
CALL ESCRI4(AJJ,XCAPP,AKK,LPORCT,DELTA,M1)
C----> SE IMPRIME LA CORRIENTE DE LINEA EN EL TERMINAL DE ENVIO

```

```

C----> -EN MODULO-IS-(AMP)
      WRITE(6,51)
      CALL ESCRI4(AJJ,XC4PP,AKK,LPORCT,IS,M1)
      GO TO 20
C----> SE IMPRIME UN MENSAJE PARA REVISAR LOS DATOS DE ENTRADA
      8 WRITE(6,12)
      GO TO 20
C----> SE IMPRIME UN MENSAJE QUE INDICA QUE EL VALOR TOPE DEL POR-
C----> CENTAJE DE COMPENSACION SERIE ESTA MUY ALTO Y QUE SE DEBE PRO-
C----> BAR CON UN VALOR TOPE MENOR DE PORCENTAJE DE COMPENSACION SERIE
      400 WRITE(6,450)
      20 CALL EXIT
      1 FORMAT(8F10.4)
      600 FORMAT('1',2(/),46X,'ESCUELA POLITECNICA NACIONAL',/,46X,28('*'),2
      *(/),44X,'FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA',/,44X,32('*'),2(/),44X,
      *DEPARTAMENTO DE POTENCIA',/,48X,24('*'),3(/),53X,'TESIS DE GRADO:
      *',/,53X,15('*'),2(/),57X,'TEMA:',/,57X,5('*'),2(/),37X,'CONDENSADO
      *R SERIE EN LINEAS DE SUB-TRANSMISION',/,37X,46('*'),3(/),53X,'REAL
      *IZADO POR:',/,53X,14('*'),2(/),47X,'HECTOR ENRIQUE MUSTOS LGPF7',/
      *,47X,27('*'),2(/),54X,'DIRIGIDO POR:',/,54X,13('*'),2(/),50X,'ING.
      * VICTOR OREJUELA',/,50X,20('*'),2(/),51X,'FECHA:ENEPO 1986',/,51X,
      +16('*'),3(/),52X,'PROGRAMA DIGITAL',/,52X,16('*'),2(/),7X,'OBJETIV
      +O:',/,7X,9('*'), //,13X,'CALCULAR LOS VALORES DE:',2(/),12X,'-VOLT
      +AJE(LINEA-LINEA) TERMINAL DE RECEPCION-EN MODULO-(KV)',1(/),12X,'-
      +VOLTAJE(LINEA-LINEA) TERMINAL DE RECEPCION-EN MODULO-(PU)',1(/),12
      *X,'-ANGULO DE OPERACION DE LA LINEA(GRD)',1(/),12X,'-CORRIENTE DE
      +LINEA EN EL TERMINAL DE ENVIO-EN MODULO-(AMP)', //,13X,'LOCALIZADO
      +O AL CONDENSADOR SERIE CADA 25% DE LA LONGITUD',/,13X,'DE LA LINEA
      * PARA LOS PORCENTAJES DE COMPENSACION SERIE',/,13X,'QUE VAN DESDE
      * EL 0% DE COMPENSACION SERIE HASTA EL VALOR',/,13X,'TOPE EL PORCEN
      +TAJE DE COMPENSACION SERIE;EN PASOS DE 25%',/,13X,'DE COMPENSACION
      * SERIE ',3(/),7X,'METODO:',/,7X,6('*'),2(/),13X,'SE CALCULAN LOS V
      +ALORES MENCIONADOS EN EL OBJETIVO MODE-',/,13X,'LANDO A LA LINEA Y
      +AL CONDENSADOR SERIE COMO CUADRIPOLOS',/,13X,'CON SUS CORRESPONDIE
      +NTES CONSTANTES GENERALIZADAS -ABCD-')
      9 FORMAT('1',28(/),42X,'DATOS DE LA LINEA DE SUB-TRANSMISION',/,42X,
      +36('*'),2(/), ' LONGITUD ',2X,' RESISTENCIA ',2X,' REACT INDUCTI
      +',2X,' REACT CAPCTVA',2X,' VOLT DE ENVIO',2X,' TOPE%COMP SERIE',2X,' POT
      +ACTCARG',2X,' POT.REACTCARG',/,4X,'(KM)',9X,'(OHM/KM)',7X,'(OHM/KM
      *)',6X,'(MEGAOHM-KM)',7X,'(KV)',12X,'(%)',11X,'(MW)',9X,'(MVAR)',/,
      +2X,F9.3,7X,F7.4,8X,F7.4,8X,F7.4,8X,F7.4,8X,F8.3,7X,F8.3,7X,F8.3,7X,F8.3)
      25 FORMAT(2(/),50X,'IMPEDANCIA CARACTERISTICA',/,55X,'(OHM)',5X,'(GRD
      +)',/,50X,2F10.4)
      90 FORMAT('1',2(/),31X,'VOLTAJE(LINEA-LINEA) TERMINAL DE RECPCION-EN
      * MODULO-(KV)',/,31X,57('*'))
      30 FORMAT('1',2(/),31X,'VOLTAJE(LINEA-LINEA) TERMINAL DE RECEPCION-EN
      * MODULO-(PU)',/,31X,57('*'))
      31 FORMAT('1',2(/),42X,'ANGULO DE OPERACION DE LA LINEA(GRD)',/,42X,3
      +6('*'))
      51 FORMAT('1',2(/),31X,'CORRIENTE DE LINEA EN EL TERMINAL DE ENVIO-EN
      * MODULO-(AMP)',/,31X,59('*'))
      12 FORMAT(2(/),46X,'REVISAR LOS DATOS DE ENTRADA',/,46X,28('*'))
      450 FORMAT(2(/),28X,'EL VALOR TOPE DEL PORCENTAJE DE COMPENSACION SERIE
      +E ESTA MUY ALTO',/,28X,64('*'),/,27X,'PROPONER CON UN VALOR TOPE MEN
      +OR DE PORCENTAJE DE COMPENSACION SERIE',/,27X,66('*'))
      END
      SUBROUTINE EXPONE(Z1,Z2,COSHIP,SENHIP)
      COMPLEX CEXP,Z1,Z2,COSHIP,SENHIP,Z11,Z22
      Z11=CEXP(Z1)
      Z22=CEXP(Z2)
      COSHIP=(Z11+Z22)/2.0

```

C

```
SFNHIP=(Z11-Z22)/2.0
RETURN
END
SUBROUTINE ESCRI4(AJJ,XCAPP,AKK,LPORCT,ERKV,M1)
REAL AJJ(50),XCAPP(50),AKK(5),LPORCT(5)
REAL ERKV(5,50)
WRITE(6,2) (AKK(I),I=1,5),(LPORCT(I),I=1,5)
DO 25 J=1,M1
WRITE(6,26) AJJ(J),XCAPP(J),(ERKV(I,J),I=1,5)
25 CONTINUE
RETURN
2 FORMAT(2(/),5X,'LONGITUD(%)----->',5F18.3,/,12X,'(KM)-----
*>',5F18.3,/,7X,'COMPENSACION',/,6X,'(%)',6X,'(OHM)',2(/))
26 FORMAT(F9.2,5X,F7.3,5X,5F18.3,/)
END
```

6A7.7 CORRIDAS DE EJEMPLO DEL PROGRAMA DIGITAL

Un ejemplo de la corrida del programa digital se ilustra en el Apéndice 6A8 y otro ejemplo en el Apéndice 6A9., de la tesis "CONDENSADORES EN SERIE EN LINEAS DE SUB-TRANSMISION", de HECTOR E. BUSTOS.

APENDICE 6A8

6A8 SALIDA DE LA CORRIDA DEL PROGRAMA
DIGITAL PARA LA CARGA NETA MAXIMA DEL
AÑO 1988.

ESCUFLA POLITECNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

DEPARTAMENTO DE POTENCIA

TESIS DE GRADO:

TEMA:

CONDENSADOR SERIE EN LINEAS DE SUB-TRANSMISION

REALIZADO POR:

HECTOR ENRIQUE BUSTOS LOPEZ

DIRIGIDO POR:

ING. VICTOR OREJUELA

FECHA:ENERO 1986

PROGRAMA DIGITAL

OBJETIVO:

CALCULAR LOS VALORES DE:

- VOLTAJE(LINEA-LINEA) TERMINAL DE RECEPCION-EN MODULO-(KV)
- VOLTAJE(LINEA-LINEA) TERMINAL DE RECEPCION-EN MODULO-(PU)
- ANGULO DE OPERACION DE LA LINEA(GRD)
- CORRIENTE DE LINEA EN EL TERMINAL DE ENVIO-EN MODULO-(AMP)

LOCALIZANDO AL CONDENSADOR SERIE CADA 25% DE LA LONGITUD DE LA LINEA PARA LOS PORCENTAJES DE COMPENSACION SERIE QUE VAN DESDE EL 0% DE COMPENSACION SERIE HASTA EL VALOR TOPE EL PORCENTAJE DE COMPENSACION SERIE:EN PASOS DE 25% DE COMPENSACION SERIE

METODOS:

SE CALCULAN LOS VALORES MENCIONADOS EN EL OBJETIVO MODELANDO A LA LINEA Y AL CONDENSADOR SERIE COMO CUADRIPOLOS CON SUS CORRESPONDIENTES CONSTANTES GENERALIZADAS -ABCD-

DATOS DE LA LINEA DE SUB-TRANSMISION

LONGITUD (KM)	RESISTENCIA (OHM/KM)	REACT INDUCTI (OHM/KM)	REACT CAPCTVA (MEGAOHM-KM)	VOLT DE ENVIO (KV)	TOPEXCOMPSERI (%)	POT.ACTCARG (MW)	POT.REACTCA (MVAR)
52.000	0.2137	0.4536	0.2770	70.104	468.000	30.800	8.30

IMPEDANCIA CARACTERISTICA
(OHM) (GRD)
372.6833 -12.6130

VOLTAJE(LINEA-LINEA) TERMINAL DE RECEPCION-EN MODULO-(KV)

LONGITUD(X)----->		0.000	25.000	50.000	75.000	100.000
(KM)----->		0.000	13.000	26.000	39.000	52.000
COMPENSACION						
(X)	(OHM)					
0.00	0.000	60.570	60.570	60.570	60.570	60.570
25.00	5.897	61.885	61.907	61.928	61.947	61.965
50.00	11.794	62.979	63.023	63.064	63.102	63.139
75.00	17.690	63.890	63.555	64.016	64.073	64.129
100.00	23.587	64.645	64.730	64.811	64.886	64.960
125.00	29.484	65.239	65.365	65.465	65.560	65.650
150.00	35.381	65.745	65.871	65.991	66.105	66.214
175.00	41.278	66.109	66.255	66.396	66.530	66.658
200.00	47.174	66.354	66.522	66.683	66.837	66.985
225.00	53.071	66.482	66.671	66.853	67.028	67.171
250.00	58.968	66.489	66.700	66.904	67.101	67.239
275.00	64.865	66.368	66.602	66.829	67.048	67.181
300.00	70.762	66.108	66.366	66.617	66.861	67.000
325.00	76.658	65.689	65.974	66.251	66.522	66.789
350.00	82.555	65.084	65.397	65.704	66.004	66.261
375.00	88.452	64.242	64.590	64.931	65.266	65.593
400.00	94.349	63.079	63.470	63.856	64.235	64.608
425.00	100.246	61.413	61.869	62.320	62.764	63.193
450.00	106.142	58.716	59.315	59.903	60.478	61.038
468.00	110.388	53.743	55.322	56.459	57.429	58.343

VOLTAJE(LINEA-LINEA) TERMINAL DE RECEPCION-EN MODULO-(PU)

LONGITUD(X)----->		0.000	25.000	50.000	75.000	100.000
(KM)----->		0.000	13.000	26.000	39.000	52.000
COMPENSACION						
(%)	(OHM)					
0.00	0.000	0.878	0.878	0.878	0.878	0.878
25.00	5.697	0.897	0.897	0.896	0.898	0.898
50.00	11.794	0.913	0.913	0.914	0.915	0.915
75.00	17.690	0.926	0.927	0.928	0.929	0.929
100.00	23.587	0.937	0.938	0.939	0.940	0.940
125.00	29.484	0.946	0.947	0.949	0.950	0.950
150.00	35.381	0.953	0.955	0.956	0.958	0.958
175.00	41.278	0.958	0.960	0.962	0.964	0.964
200.00	47.174	0.962	0.964	0.966	0.969	0.969
225.00	53.071	0.964	0.966	0.969	0.971	0.971
250.00	58.968	0.964	0.967	0.970	0.972	0.972
275.00	64.865	0.962	0.965	0.969	0.972	0.972
300.00	70.762	0.958	0.962	0.965	0.969	0.969
325.00	76.658	0.952	0.956	0.960	0.964	0.964
350.00	82.555	0.943	0.948	0.952	0.957	0.957
375.00	88.452	0.931	0.936	0.941	0.946	0.946
400.00	94.349	0.914	0.920	0.925	0.931	0.931
425.00	100.246	0.890	0.897	0.903	0.910	0.910
450.00	106.142	0.851	0.860	0.868	0.876	0.876
469.00	110.388	0.779	0.802	0.818	0.832	0.832

ANGULO DE OPERACION DE LA LINEA (GRD)

LONGITUD (Z)----->		0.000	25.000	50.000	75.000	100.000
(KM)----->		0.000	13.000	26.000	39.000	52.000
COMPENSACION						
(X)	(OHM)					
0.00	0.000	8.639	8.639	8.639	8.639	8.639
25.00	5.897	6.043	6.039	6.036	6.035	6.035
50.00	11.794	3.578	3.573	3.569	3.568	3.568
75.00	17.690	1.208	1.202	1.199	1.200	1.200
100.00	23.587	-1.097	-1.102	-1.103	-1.099	-1.099
125.00	29.484	-3.357	-3.360	-3.358	-3.350	-3.350
150.00	35.381	-5.592	-5.591	-5.584	-5.571	-5.571
175.00	41.278	-7.817	-7.811	-7.798	-7.778	-7.778
200.00	47.174	-10.048	-10.035	-10.015	-9.987	-9.987
225.00	53.071	-12.300	-12.279	-12.250	-12.212	-12.212
250.00	58.968	-14.590	-14.559	-14.519	-14.469	-14.469
275.00	64.865	-16.937	-16.894	-16.840	-16.777	-16.777
300.00	70.762	-19.365	-19.307	-19.238	-19.157	-19.157
325.00	76.658	-21.905	-21.828	-21.739	-21.636	-21.636
350.00	82.555	-24.601	-24.500	-24.386	-24.259	-24.259
375.00	88.452	-27.517	-27.384	-27.237	-27.076	-27.076
400.00	94.349	-30.768	-30.589	-30.394	-30.185	-30.185
425.00	100.246	-34.583	-34.327	-34.055	-33.769	-33.769
450.00	106.142	-39.627	-39.190	-38.746	-38.296	-38.296
468.00	110.388	-47.021	-45.342	-44.199	-43.247	-43.247

CORRIENTE DE LINEA EN EL TERMINAL DE ENVIO-EN MODULO-(AMP)

.....

LONGITUD (X)----->		0.000	25.000	50.000	75.000	100.000
(KM)----->		0.000	13.000	26.000	39.000	52.000
COMPENSACION						
(x)	(OHM)					
0.00	0.000	301.748	301.747	301.747	301.747	301.747
25.00	5.897	295.269	295.243	295.225	295.216	295.216
50.00	11.794	290.085	290.042	290.013	289.998	289.998
75.00	17.690	285.899	285.845	285.809	285.791	285.791
100.00	23.587	282.525	282.461	282.420	282.401	282.401
125.00	29.484	279.834	279.763	279.718	279.698	279.698
150.00	35.381	277.742	277.665	277.615	277.593	277.593
175.00	41.278	276.195	276.111	276.055	276.030	276.030
200.00	47.174	275.160	275.067	275.004	274.973	274.973
225.00	53.071	274.625	274.520	274.447	274.406	274.406
250.00	58.968	274.597	274.476	274.388	274.334	274.334
275.00	64.865	275.103	274.961	274.852	274.778	274.778
300.00	70.762	276.199	276.027	275.889	275.786	275.786
325.00	76.658	277.579	277.465	277.385	277.340	277.340
350.00	82.555	280.597	280.320	280.079	279.873	279.873
375.00	88.452	284.315	283.944	283.608	283.308	283.308
400.00	94.349	289.619	289.092	288.602	288.149	287.778
425.00	100.246	297.562	296.737	295.956	295.221	294.578
450.00	106.142	311.374	309.735	308.195	306.754	305.404
468.00	110.388	340.459	332.376	327.308	323.392	320.000

APENDICE 6A9

6A9 SALIDA DE LA CORRIDA DEL PROGRAMA
DIGITAL PARA LA CARGA NETA MAXIMA DEL
AÑO 1992.

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

DEPARTAMENTO DE POTENCIA

TESTS DE GRADO:

TEMA:

CONDENSADOR SERIE EN LINEAS DE SUB-TRANSMISION

REALIZADO POR:

HECTOR ENRIQUE BUSTOS LOPEZ

DIRIGIDO POR:

ING. VÍCTOR OREJUELA

FECHA:ENERO 1986

PROGRAMA DIGITAL

OBJETIVO:

CALCULAR LOS VALORES DE:

- VOLTAJE(LINEA-LINEA) TERMINAL DE RECEPCION-EN MODULO-(KV)
- VOLTAJE(LINEA-LINEA) TERMINAL DE RECEPCION-EN MODULO-(PU)
- ANGULO DE OPERACION DE LA LINEA(GRD)
- CORRIENTE DE LINEA EN EL TERMINAL DE ENVIO-EN MODULO-(AMP)

LOCALIZANDO AL CONDENSADOR SERIE CADA 25% DE LA LONGITUD DE LA LINEA PARA LOS PORCENTAJES DE COMPENSACION SERIE QUE VAN DESDE EL 0% DE COMPENSACION SERIE HASTA EL VALOR TOPE EL PORCENTAJE DE COMPENSACION SERIE;EN PASOS DE 25% DE COMPENSACION SERIE

METODO:

- SE CALCULAN LOS VALORES MENCIONADOS EN EL OBJETIVO MODELANDO A LA LINEA Y AL CONDENSADOR SERIE COMO CUADRIPOLOS CON SUS CORRESPONDIENTES CONSTANTES GENERALIZADAS -ABCO-

VOLTAJE(LINEA-LINEA) TERMINAL DE RECEPCION-EN MODULO-(KV)

LONGITUD(%)----->		0.000	25.000	50.000	75.000	100.000
(KM)----->		0.000	13.000	26.000	39.000	52.000
COMPENSACION						
(%) (OHM)						
0.00	0.000	56.089	56.089	56.089	56.089	56.089
25.00	5.897	58.517	58.541	58.563	58.582	58.601
50.00	11.794	60.385	60.432	60.474	60.512	60.550
75.00	17.690	61.861	61.928	61.990	62.047	62.104
100.00	23.587	63.031	63.119	63.201	63.276	63.352
125.00	29.484	63.946	64.055	64.157	64.252	64.348
150.00	35.381	64.637	64.767	64.889	65.003	65.118
175.00	41.278	65.119	65.271	65.414	65.548	65.682
200.00	47.174	65.398	65.572	65.736	65.892	66.048
225.00	53.071	65.470	65.666	65.854	66.032	66.200
250.00	58.968	65.318	65.539	65.751	65.954	66.160
275.00	64.865	64.910	65.159	65.398	65.628	65.858
300.00	70.762	64.188	64.468	64.740	65.002	65.274
325.00	76.658	63.035	63.356	63.669	63.972	64.274
350.00	82.555	61.183	61.568	61.945	62.313	62.680
375.00	88.452	57.619	58.193	58.748	59.284	59.818
385.00	90.811	53.289	54.891	55.948	56.829	57.640

VOLTAJE(LINEA-LINEA) TERMINAL DE RECEPCION-EN MODULO-(PU)

.....

LONGITUD(%)----->		0.000	25.000	50.000	75.000	100.000
(KM)----->		0.000	13.000	26.000	39.000	52.000
COMPENSACION						
(%)	(OHM)					
0.00	0.000	0.813	0.813	0.813	0.813	0.813
25.00	5.897	0.848	0.848	0.849	0.849	0.849
50.00	11.794	0.875	0.876	0.876	0.877	0.877
75.00	17.690	0.897	0.898	0.898	0.899	0.899
100.00	23.587	0.913	0.915	0.915	0.917	0.917
125.00	29.484	0.927	0.928	0.930	0.931	0.931
150.00	35.381	0.937	0.939	0.940	0.942	0.942
175.00	41.278	0.944	0.946	0.948	0.950	0.950
200.00	47.174	0.948	0.950	0.953	0.955	0.955
225.00	53.071	0.949	0.952	0.954	0.957	0.957
250.00	58.968	0.947	0.950	0.953	0.956	0.956
275.00	64.865	0.941	0.944	0.948	0.951	0.951
300.00	70.762	0.930	0.934	0.938	0.942	0.942
325.00	76.658	0.914	0.918	0.923	0.927	0.927
350.00	82.555	0.887	0.892	0.898	0.903	0.903
375.00	88.452	0.835	0.843	0.851	0.859	0.859
385.00	90.811	0.772	0.796	0.811	0.824	0.824

ANGULO DE OPERACION DE LA LINEA (GRD)

LONGITUD (X)-----> (KM)-----> COMPENSACION (%) (OHM)	0.000 0.000	25.000 13.000	50.000 26.000	75.000 39.000	100.000 52.000
0.00	0.000	11.651	11.651	11.651	11.651
25.00	5.897	7.906	7.900	7.896	7.895
50.00	11.794	4.530	4.522	4.518	4.516
75.00	17.690	1.380	1.372	1.368	1.369
100.00	23.587	-1.628	-1.634	-1.635	-1.630
125.00	29.484	-4.549	-4.552	-4.548	-4.538
150.00	35.381	-7.425	-7.423	-7.413	-7.395
175.00	41.278	-10.292	-10.283	-10.265	-10.238
200.00	47.174	-13.185	-13.166	-13.138	-13.100
225.00	53.071	-16.140	-16.109	-16.068	-16.017
250.00	58.968	-19.202	-19.156	-19.098	-19.030
275.00	64.865	-22.429	-22.363	-22.285	-22.194
300.00	70.762	-25.912	-25.819	-25.711	-25.591
325.00	76.658	-29.808	-29.673	-29.523	-29.358
350.00	82.555	-34.462	-34.252	-34.027	-33.786
375.00	88.452	-41.143	-40.695	-40.245	-39.792
385.00	90.811	-47.407	-45.668	-44.586	-43.698

CORRIENTE DE LINEA EN EL TERMINAL DE ENVIO-EN MODULO-(AMP)

LONGITUD (X)----->		0.000	25.000	50.000	75.000	100.000
(KM)----->		0.000	13.000	26.000	39.000	52.000
COMPENSACION						
(%) (DHN)						
0.00	0.000	417.760	417.759	417.759	417.759	417.760
25.00	5.897	400.286	400.230	400.190	400.169	400.166
50.00	11.794	387.794	387.708	387.650	387.621	387.611
75.00	17.690	378.459	378.356	378.289	378.257	378.260
100.00	23.587	371.366	371.251	371.178	371.145	371.150
125.00	29.484	365.995	365.871	365.792	365.758	365.760
150.00	35.381	362.044	361.909	361.823	361.785	361.790
175.00	41.278	359.335	359.187	359.091	359.045	359.050
200.00	47.174	357.786	357.620	357.507	357.447	357.440
225.00	53.071	357.391	357.199	357.060	356.977	356.940
250.00	58.968	358.231	357.999	357.822	357.702	357.620
275.00	64.865	360.504	360.209	359.973	359.793	359.670
300.00	70.762	364.602	364.209	363.874	363.598	363.380
325.00	76.658	371.339	370.771	370.263	369.815	369.430
350.00	82.555	382.691	381.750	380.878	380.074	379.340
375.00	88.452	406.578	404.207	402.020	400.005	398.150
385.00	90.811	439.884	428.778	422.408	417.578	413.620

APENDICE 6A10

- 6A10 PROCEDIMIENTO DE CALCULO PARA LA CONFECCION DE LA TABLA 6.54 DE LA SECCION 6.4.1.1.6.1.1.
- 6A10.1 ASPECTOS PRELIMINARES
- 6A10.2 CALCULOS PARA CUANDO OPERA UN GENERADOR.
- 6A10.3 CALCULOS PARA CUANDO OPERAN DOS GENERADORES.
- 6A10.4 CALCULOS PARA CUANDO OPERAN TRES GENERADORES.
- 6A10.5 CALCULOS PARA CUANDO OPERAN CUATRO GENERADORES.


APENDICE 6A10

6A10 PROCEDIMIENTO DE CALCULO PARA LA CONFECCION DE LA TABLA 6.54 DE LA SECCION 6.4.1.1.6.1.1

6A10.1 ASPECTOS PRELIMINARES

En la tabla 1 se tabulan los datos generales de los generadores de Alao que se requieren para la elaboración de la tabla 6.54 de la sección 6.4.1.1.6.1.1

TABLA 1

DATOS GENERALES DE GENERADORES DE ALAO ($G_a G_b G_c G_d$)							
[KVA]	[KV]	CONEXION	VALORES EN PROPIA BASE				
NOMINALES	NOMINALES		$*X_d'$	$*r_s$	$*r_1$	$*r_2$	$*R_r=2(r_2-r_1)$
			[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
3280	2.4		40.8	0.3	0.5	1.2	1.4

* : valores tomados de la [Ref. 11]

De la tabla 6.5 de la sección 6.2.3 se tiene que el equivalente SMI en la S/E Oriente (Ambato) tiene el siguiente valor de secuencia positiva, en una base de 69 [KV_B] y 100 [MVA_B]:

$$Z_1 = 0.4856 \angle 87.92 \text{ [P.U]} = 0.01759 + j 0.4955 \text{ [P.U]} \quad [1]$$

La reactancia capacitiva del condensador en serie seleccionado tomada de la tabla 6.50 de la sección 6.4.1.1.3, que es de 53.53 [OHM] expresada en [PU] para una base de 69 [KV_B] y 100 [MVA_B] es:

$$X_{cs} = 1.1243 \text{ [P.U]} \quad [2]$$

En la FIG 6.14 de la sección 6.4.1.1.6.1.1 tomando una base de 69 [KV_B] y 100 [MVA_B] en la línea Ambato-Riobamba, es decir en la línea representada por [L1] en aquella figura, se tiene que el diagrama de secuencia positiva en [P.U] correspondiente al circuito de la FIG 6.14 de la sección 6.4.1.1.6.1.1 se muestra en la FIG 1. Los valores dados por [1] y [2] están representados en la FIG 1, para expresar el equivalente de secuencia positiva en [P.U] del SNI y la reactancia capacitiva en [P.U] del condensador en serie seleccionado.

Las impedancias de secuencia positiva en [P.U] de [L1], [L2], [T2], [T3], [T4], [G_a], [G_b], [G_c], y [G_d] se las calcula a partir de los datos que para esos elementos se encuentran tabulados en las tablas 6.1, 6.2, 6.3 y 6.4 de la sección 6.2.1; usando el método conocido de cálculo.

Para la FIG 1 y en lo relacionado a los generadores de Alao el valor de la resistencia [*r_s*] en [P.U] se lo calcula a partir del dato de [*r_s*] dado en la tabla 1 y el valor de la reactancia en [P.U] se lo calcula a partir del dato de [*X_d'*] que se encuentra en la tabla 1 de este Apéndice y también en la tabla 1 de la sección 6.2.3.

La ecuación que se utiliza para calcular la frecuencia natural [*f₀*] es la ecuación [3.32] de la sección 3.4.1, es decir:

$$f_0 = f_e \sqrt{\frac{X_{cs}}{X_d}} \quad [3]$$

La ecuación que se utiliza para calcular el deslizamiento relativo [*S₀*] es la ecuación [3.31] de la sección 3.4.1, es decir:

$$S_0 = \frac{f_0 - f_e}{f_0} \quad [4]$$

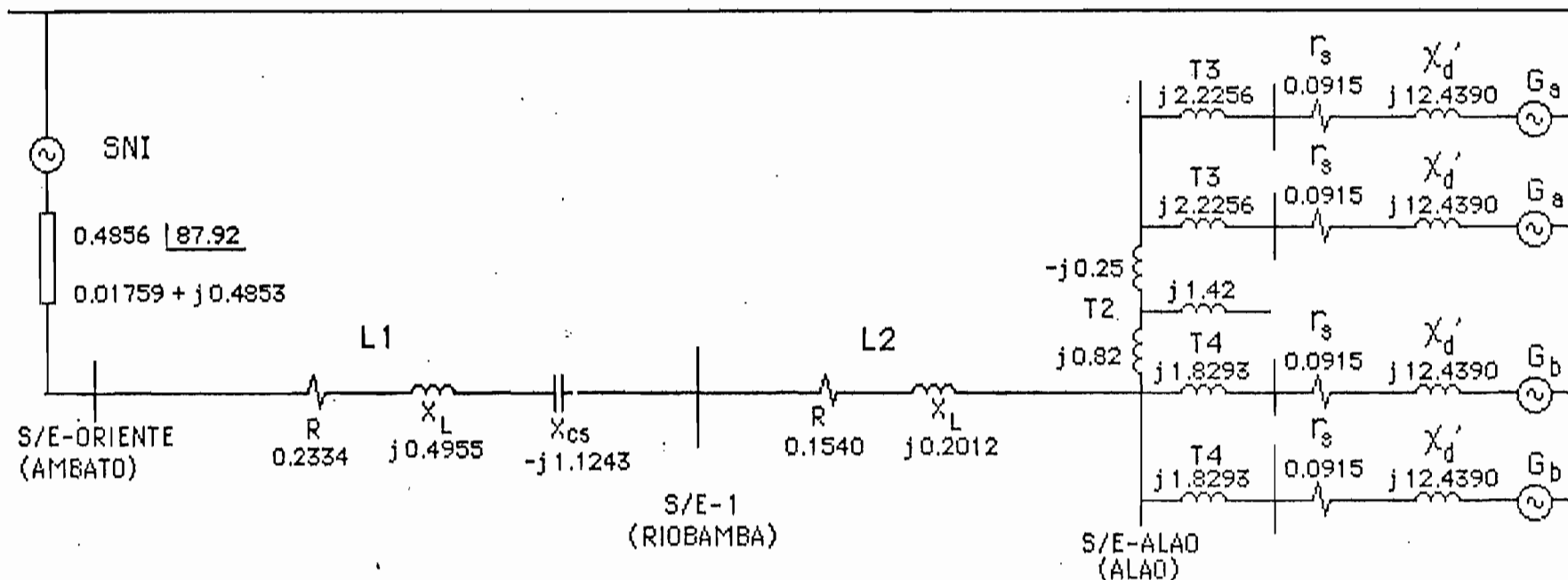


FIG 1 Diagrama de secuencia positiva en [PU] para el circuito de la FIG 6.14 de la sección 6.4.1.1.6.1.1 tomando una base de $69 [KV_B]$ y $100 [MVA_B]$ en la línea Ambato-Riobamba representada por [L1]

La frecuencia de la red [f_e] es:

$$f_e = 60 \text{ [HZ]} \quad [5]$$

6A10.2 CÁLCULOS PARA CUANDO OPERA UN GENERADOR

6A10.2.1 Cálculos para cuando opera un [G_a]

6A10.2.1.1 Cálculo de la frecuencia natural: [f_0]; y del deslizamiento relativo: [S_0]

De la FIG 1 cuando opera un generador [G_a], el valor de [X_d] está dado por la suma siguiente:

$$X_d = 0.4853 + 0.4955 + 0.2012 + 0.82 - 0.25 + 2.2256 + 12.439 \quad [6]$$

$$\text{ó; } X_d = 16.4166 \text{ [EU]} \quad [7]$$

Substituyendo los valores de [2], [5] y [7] en la ecuación [3] se tiene que la frecuencia natural [f_0] es:

$$f_0 = 60 \sqrt{\frac{1.1243}{16.4166}} \quad [8]$$

$$\text{ó; } f_0 = 15.70 \text{ [HZ]} \quad [9]$$

Utilizando los valores dados por [5] y [9] en la ecuación [4] se tiene que el deslizamiento relativo [S_0] es:

$$S_0 = \frac{15.70 - 60}{15.70} \quad [10]$$

$$\text{ó; } S_0 = -2.82 \quad [11]$$

6A10.2.1.2 Cálculo de: $[R_r/S_0]$

La base de 69 [KV_B] y 100 [MVA_B] en el lado [L1], se convierte en una base de 2.4 [KV_B] y 100 [MVA_B] en el lado de los generadores de Alao, por lo cual el valor de $[R_r]$ dado en la tabla 1 en una base de 2.4 [KV_B] y 3.28 [MVA_B] se convierte en una base de 2.4 [KV_B] y 100 [MVA_B] así:

$$R_r = 0.014 [2.4/2.4]^2 [100/3.28] \quad [12]$$

$$\text{ó; } R_r = 0.4268 \text{ [P.U]} \quad [13]$$

El valor de $[R_r]$ dado por [13] es el mismo para todas las máquinas, pues ellas son iguales.

Dividiendo el valor de [13] para el valor de [11] se tiene que;

$$R_r/S_0 = 0.4268/(-2.82) \quad [14]$$

$$\text{ó; } R_r/S_0 = -0.1513 \text{ [P.U]} \quad [15]$$

6A10.2.1.3. Cálculo de la resistencia equivalente positiva: $[R_T]$

Para el circuito mostrado en la FIG 1 y para cuando opera un $[G_s]$ el valor de $[R_T]$ está dado por el resultado de sumar las resistencias del SNI, de [L1], de [L2] y del estator $[r_s]$ de la máquina $[G_s]$; por tanto:

$$R_T = 0.01759 + 0.2334 + 0.1540 + 0.0915 \quad [16]$$

$$\text{ó; } R_T = 0.4965 \text{ [P.U]} \quad [17]$$

De los valores dados por [17] y [15] se desprende que puesto que la resistencia equivalente positiva $[R_T]$ dada por [17] es mayor que la resistencia negativa $[R_r/S_0]$ dada por [15], entonces habrá atenuación de resonancia sub-síncrona.

6A10.2.2 Cálculos para cuando opera un $[G_b]$ 6A10.2.2.1 Cálculo de la frecuencia natural: $[f_0]$; y del deslizamiento relativo: $[S_0]$

De la FIG 1 cuando opera un $[G_b]$, el valor de $[X_d]$ está dado por la suma siguiente:

$$X_d = 0.4853 + 0.4955 + 0.2012 + 1.8293 + 12.4390 \quad [18]$$

$$\text{ó; } X_d = 15.4503 \text{ [P.U]} \quad [19]$$

Substituyendo los valores de [2], [5] y [19] en la ecuación [3] se tiene que la frecuencia natural $[f_0]$ es:

$$f_0 = 60 \sqrt{\frac{1.1243}{15.4503}} \quad [20]$$

$$\text{ó; } f_0 = 16.19 \text{ [HZ]} \quad [21]$$

Utilizando los valores dados por [5] y [21] en la ecuación [4], se tiene que el deslizamiento relativo $[S_0]$ es:

$$S_0 = \frac{16.19 - 60}{16.19} \quad [22]$$

$$\text{ó; } S_0 = -2.71 \quad [23]$$

6A10.2.2.2 Cálculo de: $[R_r/S_0]$

Dividiendo el valor de [13] para el de [23] se tiene que:

$$R_r/S_0 = 0.4268/(-2.71) \quad [24]$$

$$\text{ó; } R_r/S_0 = -0.1575 \text{ [P.U]} \quad [25]$$

6A10.2.2.3 Cálculo de la resistencia equivalente positiva: [R_T]

Para el circuito de la FIG 1 y para cuando opera un [G₀], el valor de [R_T] está dado por la siguiente suma:

$$R_T = 0.01759 + 0.2334 + 0.1540 + 0.0915 \quad [26]$$

$$\text{ó; } R_T = 0.4965 \text{ [P.U]} \quad [27]$$

De los valores dados por [27] y [25] se deduce que puesto que la resistencia equivalente positiva [R_T] dada por [27] es mayor que la resistencia negativa [R_r/S₀] dada por [25], entonces habrá atenuación de resonancia sub-sincrónica.

6A10.3 CALCULOS PARA CUANDO OPERAN DOS GENERADORES

6A10.3.1 Cálculos para cuando operen los dos [G₀]

6A10.3.1.1 Cálculo de la frecuencia natural: [f₀]; y del deslizamiento relativo: [S₀]

De la FIG 1 cuando operan los dos [G₀], el valor de [X₀] está dado por la suma de:

$$X_0 = 0.4853 + 0.4955 + 0.2012 + 0.82 - 0.25 + (2.2256 + 12.4390)/2 \quad [28]$$

$$\text{ó; } X_0 = 9.0843 \text{ [PU]} \quad [29]$$

Substituyendo los valores de [2], [5] y [29] en la ecuación [3] se tiene que la frecuencia natural [f₀] es:

$$f_0 = 60 \sqrt{\frac{1.1243}{9.0843}} \quad [30]$$

$$\acute{o}; \quad f_0 = 21.11 \text{ [HZ]} \quad [31]$$

Utilizando los valores dados por [5] y [31] en la ecuación [4], se tiene que el deslizamiento relativo $[S_0]$ es:

$$S_0 = \frac{21.11 - 60}{21.11} \quad [32]$$

$$\acute{o}; \quad S_0 = -1.84 \quad [33]$$

6A10.3.1.2 Cálculo de: $[R_r/S_0]$

El valor de $[R_r]$ dado por [13] es para un solo generador, pero para dos generadores en paralelo será dicho valor dividido para dos, es decir:

$$R_r = 0.4268/2 \quad [34]$$

$$\acute{o}; \quad R_r = 0.2134 \text{ [PU]} \quad [35]$$

Dividiendo el valor de [35] para el de [33] se tiene que:

$$R_r/S_0 = 0.2134/(-1.84) \quad [36]$$

$$\acute{o}; \quad R_r/S_0 = -0.1160 \text{ [P.U]} \quad [37]$$

6A10.3.1.3 Cálculo de la resistencia equivalente positiva: $[R_T]$

Para el circuito de la FIG 1 y para cuando operan dos $[G_g]$, el valor de $[R_T]$ está dado por la siguiente suma:

$$R_T = 0.01759 + 0.2334 + 0.1540 + 0.0915/2 \quad [38]$$

$$\acute{o}; \quad R_T = 0.4507 \text{ [P.U]} \quad [39]$$

De los valores dados por [39] y [37] se deduce que puesto que la resistencia equivalente positiva $[R_T]$ dada por [39] es mayor que la

resistencia negativa $[R_r/S_0]$ dada por [37], entonces habrá atenuación de resonancia sub-sincrónica.

6A10.3.2 Cálculos para cuando operan los dos $[G_b]$

6A10.3.2.1 Cálculo de la frecuencia natural: $[f_0]$; y del deslizamiento relativo: $[S_0]$

De la FIG 1 cuando operan los dos $[G_b]$, el valor de $[X_{\Omega}]$ está dado por la suma siguiente:

$$X_{\Omega} = 0.4853 + 0.4955 + 0.2012 + (1.8293 + 12.4390)/2 \quad [40]$$

$$\hat{o}; \quad X_{\Omega} = 8.3162 \text{ [P.U]} \quad [41]$$

Substituyendo los valores de [2], [5] y [41] en la ecuación [3] se tiene que la frecuencia natural $[f_0]$ es:

$$f_0 = 60 \sqrt{\frac{1.1243}{8.3162}} \quad [42]$$

$$\hat{o}; \quad f_0 = 22.06 \text{ [HZ]} \quad [43]$$

Utilizando los valores dados por [5] y [43] en la ecuación [4], se tiene que el deslizamiento relativo $[S_0]$ es:

$$S_0 = \frac{22.06 - 60}{22.06} \quad [44]$$

$$\hat{o}; \quad S_0 = -1.72 \quad [45]$$

6A10.3.2.2 Cálculo de: $[R_r/S_0]$

Al ser iguales todos los generadores de Alao quiere decir que el valor de $[R_r]$ dado por [35] para los dos $[G_a]$, será también el mismo para los dos $[G_b]$, es decir que:

$$R_r = 0.2134 \text{ [P.U]} \quad [46]$$

Dividiendo el valor de [46] para el de [45] se tiene que:

$$R_r/S_0 = 0.2134/(-1.72) \quad [47]$$

$$\text{ó; } R_r/S_0 = -0.1241 \text{ [P.U]} \quad [48]$$

6A10.3.2.3 Cálculo de la resistencia equivalente positiva: $[R_T]$

Para el circuito de la FIG 1 al operar dos $[G_b]$, el valor de $[R_T]$ está dado por la siguiente suma:

$$R_T = 0.01759 + 0.2334 + 0.1540 + 0.0915/2 \quad [49]$$

$$\text{ó; } R_T = 0.4507 \text{ [P.U]} \quad [50]$$

De los valores dados por [50] y [48] se deduce que puesto que la resistencia equivalente positiva $[R_T]$ dada por [50] es mayor que la resistencia negativa $[R_r/S_0]$ dada por [48], entonces habrá atenuación de resonancia sub-sincrónica.

6A10.3.3 Cálculos para cuando operan un $[G_a]$ y un $[G_b]$

6A10.3.3.1 Cálculo de la frecuencia natural: $[f_0]$; y del deslizamiento relativo: $[S_0]$

La impedancia de la rama que contiene un $[G_a]$ en serie con [T2] da:

$$Z' = 0.0915 + j(0.82 - 0.25 + 2.2256 + 12.4390) \quad [51]$$

$$\acute{o}; \quad Z' = 0.0915 + j15.2346 \text{ [P.U]} \quad [52]$$

La impedancia de la rama que contiene un $[G_b]$ es:

$$Z'' = 0.0915 + j(1.8293 + 12.4390) \quad [53]$$

$$\acute{o}; \quad Z'' = 0.0915 + j14.2683 \text{ [P.U]} \quad [54]$$

El paralelo de las impedancias dadas por [53] y [54] da:

$$Z_p' = \frac{(0.0915 + j15.2346)(0.0915 + j14.2683)}{(0.0915 + j15.2346) + (0.0915 + j14.2683)} \quad [55]$$

$$\acute{o}; \quad Z_p' = 0.0458 + j7.3678 \text{ [P.U]} \quad [56]$$

El valor de la reactancia inductiva de la impedancia $[Z_p']$ es el que se utiliza para calcular el valor de $[X_Q]$, el cual está dado por la suma siguiente:

$$X_Q = 0.4853 + 0.4955 + 0.2012 + 7.3678 \quad [57]$$

$$\acute{o}; \quad X_Q = 8.5498 \text{ [P.U]} \quad [58]$$

Substituyendo los valores de [2], [5] y [58] en la ecuación [3] se tiene que la frecuencia natural $[f_0]$ es:

$$f_0 = 60 \sqrt{\frac{1.1243}{8.5498}} \quad [59]$$

$$\acute{o}; \quad f_0 = 21.76 \text{ [HZ]} \quad [60]$$

Utilizando los valores dados por [5] y [60] en la ecuación [4], se tiene que el deslizamiento relativo $[S_0]$ es:

$$S_0 = \frac{21.76 - 60}{21.76} \quad [61]$$

$$\text{ó; } S_0 = -1.76 \quad [62]$$

6A10.3.3.2 Cálculo de: $[R_r/S_0]$

Un generador $[G_a]$ es igual a un generador $[G_b]$, por lo cual cuando operan un $[G_a]$ y un $[G_b]$ el valor de $[R_r]$ es el dado por [46], es decir:

$$R_r = 0.2134 \text{ [P.U]} \quad [63]$$

Dividiendo el valor de [63] para el valor de [62] se tiene que:

$$R_r/S_0 = 0.2134/(-1.76) \quad [64]$$

$$\text{ó; } R_r/S_0 = -0.1293 \text{ [P.U]} \quad [65]$$

6A10.3.3.3 Cálculo de la resistencia equivalente positiva: $[R_T]$

Del circuito de la FIG 1 al operar un $[G_a]$ y un $[G_b]$, el valor de $[R_T]$ está dado por la siguiente suma:

$$R_T = 0.01759 + 0.2334 + 0.1540 + 0.0915/2 \quad [66]$$

$$\text{ó; } R_T = 0.4508 \text{ [P.U]} \quad [67]$$

De los valores dados por [67] y [65] se deduce que puesto que la resistencia equivalente positiva $[R_T]$ dada por [67] es mayor que la resistencia negativa $[R_r/S_0]$ dada por [65], entonces habrá atenuación de resonancia sub-sincrónica.

6A10.4 CÁLCULOS PARA CUANDO OPERAN TRES GENERADORES6A10.4.1 Cálculos para cuando operan dos $[G_a]$ y un $[G_b]$ 6A10.4.1.1 Cálculo de la frecuencia natural: $[f_0]$; y del deslizamiento relativo: $[S_0]$

Las impedancias de las dos ramas que contienen un $[G_a]$ cada una, forman una impedancia paralelo que viene dada por:

$$Z' = [0.0915 + j(2.2256 + 12.4390)]/2 \quad [68]$$

$$\text{ó; } Z' = 0.0458 + j7.3323 \text{ [P.U]} \quad [69]$$

La impedancia $[Z']$ en serie con la de $[T2]$ da:

$$Z'' = 0.0458 + j7.3323 + (-j0.25 + j0.82) \quad [70]$$

$$\text{ó; } Z'' = 0.0458 + j7.9023 \text{ [P.U]} \quad [71]$$

La impedancia de la rama que contiene un $[G_b]$ es:

$$Z''' = 0.0915 + j12.4390 + j1.8293 \quad [72]$$

$$\text{ó; } Z''' = 0.0915 + j14.2683 \text{ [P.U]} \quad [73]$$

El paralelo de $[Z'']$ y $[Z''']$ da:

$$Z_p' = \frac{(0.0458 + j7.9023)(0.0915 + j14.2683)}{(0.0458 + j7.9023) + (0.0915 + j14.2683)} \quad [74]$$

$$\text{ó; } Z_p' = 0.0305 + j5.0857 \text{ [P.U]} \quad [75]$$

El valor de la reactancia inductiva de la impedancia $[Z_p']$ dado por [75] se emplea para calcular el valor de $[X_Q]$, el cual está dado por la suma siguiente:

$$X_{\Omega} = 0.4853 + 0.4955 + 0.2012 + 5.0857 \quad [76]$$

$$\text{ó; } X_{\Omega} = 6.2677 \text{ [P.U]} \quad [77]$$

Substituyendo los valores de [2], [5] y [77] en la ecuación [3] se tiene que la frecuencia natural $[f_0]$ es:

$$f_0 = 60 \sqrt{\frac{1.1243}{6.2677}} \quad [78]$$

$$\text{ó; } f_0 = 25.41 \text{ [HZ]} \quad [79]$$

Utilizando los valores dados por [5] y [79] en la ecuación [4], se tiene que el deslizamiento relativo $[S_0]$ es:

$$S_0 = \frac{25.41 - 60}{25.41} \quad [80]$$

$$\text{ó; } S_0 = -1.36 \quad [81]$$

6A10.4.1.2 Cálculo de: $[R_r/S_0]$

Para tres generadores en paralelo el valor de $[R_r]$ está dado por [13] pero dividido para tres, es decir:

$$R_r = 0.4268/3 \quad [82]$$

$$\text{ó; } R_r = 0.1423 \text{ [P.U]} \quad [83]$$

Dividiendo el valor de [83] para el valor de [81] se tiene que:

$$R_r/S_0 = 0.1423/(-1.36) \quad [84]$$

$$\text{ó; } R_r/S_0 = -0.1046 \text{ [P.U]} \quad [85]$$

6A10.4.1.3 Cálculo de la resistencia equivalente positiva: [R_T]

Del circuito de la FIG 1 al operar dos [G_a] y un [G_b], el valor de [R_T] está dado por la siguiente suma:

$$R_T = 0.01759 + 0.2334 + 0.1540 + 0.0915/3 \quad [86]$$

$$\text{ó; } R_T = 0.4355 \text{ [P.U]} \quad [87]$$

De los valores dados por [87] y [85] se deduce que puesto que la resistencia equivalente [R_T] dada por [87] es mayor que la resistencia negativa [R_r/S₀] dada por [85], entonces habrá atenuación de resonancia subsincrónica.

6A10.4.2 Cálculos para cuando operan dos [G_b] y un [G_a]

6A10.4.2.1 Cálculo de la frecuencia natural: [f₀]; y del deslizamiento relativo: [S₀]

La impedancia que resulta del paralelo de las dos ramas que contienen un [G_b] cada una, es:

$$Z' = [0.0915 + j(1.8293 + 12.4390)]/2 \quad [88]$$

$$\text{ó; } Z' = 0.0458 + j7.1342 \text{ [P.U]} \quad [89]$$

La impedancia de una rama que contiene [G_a] en serie con [T2] da:

$$Z'' = 0.0915 + j(12.4390 + 2.2256 - 0.25 + 0.82) \quad [90]$$

$$\text{ó; } Z'' = 0.0915 + j15.2346 \text{ [P.U]} \quad [91]$$

El paralelo de [Z'] y [Z''] da:

$$Z_p' = \frac{(0.0458 + j7.1342)(0.0915 + j15.2346)}{(0.0458 + j7.1342) + (0.0915 + j15.2346)} \quad [92]$$

$$\acute{o}; \quad Z_p' = 0.0305 + j4.8589 \text{ [P.U]} \quad [93]$$

El valor de la reactancia inductiva de la impedancia $[Z_p']$ dado por [93] se emplea para calcular el valor de $[X_{\Omega}]$, el cual está dado por la suma siguiente:

$$X_{\Omega} = 0.4853 + 0.4955 + 0.2012 + 4.8589 \quad [94]$$

$$\acute{o}; \quad X_{\Omega} = 6.0409 \text{ [P.U]} \quad [95]$$

Reemplazando los valores de [2], [5] y [95] en la ecuación [3] se tiene que la frecuencia natural $[f_0]$ es:

$$f_0 = 60 \sqrt{\frac{1.1243}{6.0409}} \quad [96]$$

$$\acute{o}; \quad f_0 = 25.88 \text{ [HZ]} \quad [97]$$

Utilizando los valores dados por [5] y [97] en la ecuación [4], se tiene que el deslizamiento relativo $[S_0]$ es:

$$S_0 = \frac{25.88 - 60}{25.88} \quad [98]$$

$$\acute{o}; \quad S_0 = -1.32 \quad [99]$$

6A10.4.2.2 Cálculo de: $[R_r/S_0]$

Para tres generadores en paralelo el valor de $[R_r]$ está dado por el valor dado por [13] pero dividido para tres, es decir:

$$R_r = 0.4268/3 \quad [100]$$

$$\text{ó; } R_r = 0.1423 \text{ [PU]} \quad [101]$$

Dividiendo el valor de [101] para el valor de [99] se tiene que:

$$R_r/S_0 = 0.1423/(-1.32) \quad [102]$$

$$\text{ó; } R_r/S_0 = -0.1078 \text{ [P.U]} \quad [103]$$

6A10.4.2.3 Cálculo de la resistencia equivalente positiva: [R_T]

Del circuito de la FIG 1 al operar dos [G_b] y un [G_a], el valor de [R_T] está dado por la siguiente suma:

$$R_T = 0.01759 + 0.2334 + 0.1540 + 0.0915/3 \quad [104]$$

$$\text{ó; } R_T = 0.4355 \text{ [PU]} \quad [105]$$

De los valores dados por [105] y [103] se deduce que puesto que la resistencia equivalente [R_T] dada por [105] es mayor que la resistencia negativa [R_r/S₀] dada por [103], entonces habrá atenuación de resonancia sub-sincrónica.

6A10.5 CALCULOS PARA CUANDO OPERAN CUATRO GENERADORES

6A10.5.1 Cálculo de la frecuencia natural: [f₀]; y del deslizamiento relativo: [S₀]

De la FIG 1 la impedancia equivalente de la S/E-Alao cuando operan los cuatro generadores da:

$$Z_p' = 0.0229 + j3.7493 \text{ [P.U]} \quad [106]$$

El valor de la reactancia inductiva de $[Z_p]$ dado por [106] se emplea para calcular el valor de $[X_Q]$, el cual está dado por la suma siguiente:

$$X_Q = 0.4853 + 0.4955 + 0.2012 + 3.7493 \quad [107]$$

$$\text{ó; } X_Q = 4.9313 \text{ [P.U]} \quad [108]$$

Substituyendo los valores de [2], [5] y [108] en la ecuación [3] se tiene que la frecuencia natural $[f_0]$ es:

$$f_0 = 60 \sqrt{\frac{1.1243}{4.9313}} \quad [109]$$

$$\text{ó; } f_0 = 28.65 \text{ [HZ]} \quad [110]$$

Utilizando los valores dados por [5] y [110] en la ecuación [4], se tiene que el deslizamiento relativo $[S_0]$ es:

$$S_0 = \frac{28.65 - 60}{28.65} \quad [111]$$

$$\text{ó; } S_0 = -1.09 \quad [112]$$

6A10.5.2 Cálculo de: $[R_r/S_0]$

Para cuatro generadores en paralelo el valor de $[R_r]$ está dado por el valor de [13] pero dividido para cuatro, o sea:

$$R_r = 0.4268/4 \quad [113]$$

$$\text{ó; } R_r = 0.1067 \text{ [P.U]} \quad [114]$$

Dividiendo el valor de [114] para el valor de [112] se tiene que:

$$R_r/S_0 = 0.1067/(-1.09) \quad [115]$$

$$\acute{o}; \quad R_r/S_0 = -0.0979 \text{ [P.U]} \quad [116]$$

6A10.5.3 Cálculo de la resistencia equivalente positiva: $[R_T]$

Del circuito de la FIG 1 al operar dos $[G_a]$ y dos $[G_b]$, el valor de $[R_T]$ está dado por la siguiente suma:

$$R_T = 0.01759 + 0.2334 + 0.1540 + 0.0915/4 \quad [117]$$

$$\acute{o}; \quad R_T = 0.4279 \text{ [PU]} \quad [118]$$

De los valores dados por [118] y [116] se deduce que puesto que la resistencia equivalente $[R_T]$ dada por [118] es mayor que la resistencia negativa $[R_r/S_0]$ dada por [116], entonces habrá atenuación de resonancia sub-sincrónica.

APENDICE 6A11

6A11 CALCULOS NECESARIOS PARA LA ELABORACION DE LA FIG. 6.17 DE LA SECCION 6.4.1.1.6.2.1.

6A11.1 FUNCION DESCRIPTIVA INCREMENTAL: $[-1/k]$.

6A11.2 $G(j\omega)$ CON $\omega = 1$ [PU].

APENDICE 6A11

6A11 CALCULOS NECESARIOS PARA LA ELABORACION DE LA FIG 6.17 DE LA SECCION 6.4.1.1.6.2.1

6A11.1 FUNCION DESCRIPTIVA INCREMENTAL: [-1/K]

En la sección 3.4.4.2 se vió que en el plano complejo la Función Descriptiva Incremental [-1/K] para un valor particular de $[\lambda_m]$ tiene por lugar geométrico a un círculo en el cual las coordenadas del centro y el valor del radio están dados respectivamente por las fórmulas [3.56] y [3.55] de la sección 3.4.4.2, es decir por:

$$\text{Centro} : \left[\frac{A}{B^2 - A^2}, 0 \right] \quad [1]$$

$$\text{Radio} = \frac{B}{B^2 - A^2} \quad [2]$$

Los valores de A y B están dados respectivamente por las ecuaciones [3.52] y [3.53] de la sección 3.4.4.2 es decir por:

$$A = 1 + \frac{15}{2} \lambda_m^4 \quad [3]$$

$$B = 5 \lambda_m^4 \quad [4]$$

siendo:

$[\lambda_m]$: valor pico de los enlaces de flujo $[\lambda]$ del transformador [T1] de las FIG 6.15 y FIG 6.16 de la sección 6.4.1.1.6.2.1.

En la tabla 1 se tabulan para varios valores de $[\lambda_m]$ en [PU], los valores de las coordenadas del centro y el valor del radio de varios círculos

de la Función Descriptiva Incremental $[-1/K]$, para lo cual se han utilizado las fórmulas [1], [2], [3] y [4].

TABLA 1

COORDENADAS DEL CENTRO Y VALOR DEL RADIO PARA VARIOS VALORES EN [P.U] DE $[\lambda_m]$, PARA LA FUNCION DESCRIPTIVA INCREMENTAL $[-1/K]$		
λ_m	CENTRO	RADIO
[P.U]	[P.U]	[P.U]
0	(-1,0)	0
0.3	(-0.944,0)	-0.036
0.4	(-0.849,0)	-0.091
0.5	(-0.713,0)	-0.152
0.6	(-0.568,0)	-0.187
0.7	(-0.437,0)	-0.187
0.8	(-0.329,0)	-0.165
0.9	(-0.244,0)	-0.135
1.0	(-0.180,0)	-0.106
1.2	(-0.099,0)	-0.062
1.4	(-0.057,0)	-0.037

El signo negativo para la columna que da el valor del radio no es más que un indicativo que el círculo se encuentra en el semi-plano de la izquierda del plano complejo.

Utilizando los valores proporcionados por la tabla 1, se grafizan en la FIG 6.17 de la sección 6.4.1.1.6.2.1 los círculos que describen los lugares

geométricos de la Función Descriptiva Incremental $[-1/K]$, así como también se traza la envolvente de la no linealidad $[N]$.

6A11.2 $G(j\omega)$ CON $\omega = 1$ [P.U]

En la sección 6A11.1 al haberse realizado los cálculos en [P.U] para determinar los lugares geométricos de la Función Descriptiva Incremental $[-1/K]$ y el lugar geométrico de la envolvente de la no linealidad $[N]$, naturalmente para evaluar $[G(j\omega)]$ se debe hacerlo también considerando cantidades en [P.U] en la ecuación [3.43] de la sección 3.4.4.1.

6A11.2.1 Cálculos preliminares

Tomando una base de 69 [KV_B] y 100 [MVA_B] en la línea Ambato-Riobamba designada por [L1] en la FIG 6.15 de la sección 6.4.1.1.6.2.1 se tiene que en [P.U] la resistencia $[R]$ y la reactancia inductiva $[X_L]$ de la línea Ambato-Riobamba designada por [L1] así como la reactancia capacitiva $[X_{CS}]$ del condensador en serie seleccionado dan respectivamente (véase FIG 1 del Apéndice 6A10):

$$R = 0.2334 \text{ [P.U]} \quad [5]$$

$$X_L = 0.4955 \text{ [P.U]} \quad [6]$$

$$X_{CS} = 1.1243 \text{ [P.U]} \quad [7]$$

Los valores dados por [5], [6] y [7] se usan para determinar los correspondientes parámetros $[R]$, $[L]$ y $[C]$ que se encuentran representados en la FIG 6.16 de la sección 6.4.1.1.6.2.1.

- Cálculo de: $[R]$

El valor de $[R]$ está dado por el mismo valor de [5]

- Cálculo de: [L]

El valor de [L] se calcula mediante la relación conocida siguiente:

$$L = X_L / \omega \quad [8]$$

En [8] haciendo $\omega = 1$ [P.U] y substituyendo el valor de $[X_L]$ dado por [6] se tiene que:

$$L = 0.4955/1 \quad [9]$$

$$\text{ó; } L = 0.4955 \text{ [P.U]} \quad [10]$$

- Cálculo de: [C]

El valor de [C] se calcula mediante la relación conocida siguiente:

$$C = 1/(\omega X_{CS}) \quad [11]$$

En [11] haciendo $\omega = 1$ [P.U] y substituyendo el valor de $[X_{CS}]$ dado por [7], se tiene que:

$$C = 1/[1(1.1243)] \quad [12]$$

$$\text{ó; } C = 0.8894 \text{ [P.U]} \quad [13]$$

Los valores de [R], [L] y [C] dados respectivamente por [5], [10] y [13] son en [P.U] los substitutos de los representados por [R], [L] y [C] respectivamente en la FIG 6.16 de la sección 6.4.1.1.6.2.1.

6A11.2.2 Cálculo de $[G(j\omega)]$ con $\omega = 1$

La ecuación [3.43] de la sección 3.4.4.1 con $s = j\omega$ se convierte en:

$$G(j\omega) = \frac{(j\omega)^2 LC + (j\omega) RC + 1}{(j\omega)^2 C} \quad [14]$$

En la ecuación [14] haciendo $\omega = 1$ [P.U] y substituyendo los valores dados por [5], [10] y [13] se tiene que:

$$G(j1) = \frac{(j1)^2 (0.4955)(0.8894) + (j1) (0.2334)(0.8894) + 1}{(j1)^2 (0.8894)} \quad [15]$$

$$\text{ó; } G(j1) = (-0.6289 - j0.2334) [PU] = 0.6708 \angle -159.64 \quad [P.U] \quad [16]$$

El valor dado por [16] se representa también gráficamente en la FIG 6.17 de la sección 6.4.1.1.6.2.1.

APENDICE 6A12

- 6A12 PARA LA CONFIGURACION DEL CONDENSADOR EN SERIE SELECCIONADO - CALCULO DE LA CORRIENTE CIRCULANTE A TRAVES DEL FUSIBLE DE UN CONDENSADOR UNIDAD FALLOSO-[i"].
- 6A12.1 CONSIDERACIONES BASICAS.
- 6A12.2 CALCULO DE:[i "].

APENDICE 6A12

6A12 PARA LA CONFIGURACION DEL CONDENSADOR EN SERIE SELECCIONADO -CALCULO DE LA CORRIENTE CIRCULANTE A TRAVES DEL FUSIBLE DE UN CONDENSADOR UNIDAD FALLOSO -[i"]

6A12.1 CONSIDERACIONES BASICAS

Del Apéndice 4A1, sección 4A1.3 se puede establecer que la corriente circulante a través del fusible de un condensador unidad falloso está dado por la solución de la ecuación [46]. La solución de la ecuación [46] del Apéndice 4A1, sección 4A1.3, da el valor de [i"], para lo cual previamente es necesario aplicar también las ecuaciones [47], [50] y [6].

Transcribiendo las ecuaciones [46], [47], [50] y [6] del Apéndice 4A1 se tiene:

$$|Z^*|^2 i^{*4} + [2|Z^*| |S_r| \cos(\epsilon - \theta^*) - e_s^2] i^{*2} + |S_r|^2 = 0 \quad [1]$$

$$Z^* = R + j(X_L - X_{cs}^*) = |Z^*| \angle \theta^* \quad [2]$$

$$S_r = P_L + jQ_L = |S_r| \angle \epsilon \quad [3]$$

$$X_{cs}^* = [(N-1)/N] X_{cs} \quad [4]$$

6A12.2 CALCULO DE:[i"]

Los datos son:

$$R = 11.11 \text{ [OHM]}$$

$$X_L = 23.59 \text{ [OHM]}$$

$$P_L = 37.5/3 \text{ [MW]}$$

$$Q_L = 11.1/3 \text{ [MVAR]}$$

} potencias por fase

$$e_3 = 70.104/\sqrt{3} \text{ [KV] } \} \text{ fase-neutro}$$

$$X_{cs}\% = 219 \text{ [%] } \} \text{ compensación serie en porcentaje}$$

$$X_{cs} = 53.53 \text{ [OHM]} \} \text{ compensación serie en ohmios (valor nominal de reactancia tomado de la tabla 6.50 sección 6.4.1.1.3)}$$

$$N = 2 \} \text{ valores obtenidos de la sección 6.4.1.1.3}$$

$$M = 17$$

Reemplazando valores en la ecuación [4] se tiene que:

$$X_{cs}^* = [(2-1)/2] 53.53 \quad [5]$$

$$\text{ó; } X_{cs}^* = 26.765 \text{ [OHM]} \quad [6]$$

Reemplazando [6] y los valores de [R] y [X_L] en la ecuación [2] se tiene que:

$$Z^* = 11.11 + j(23.59 - 26.765) = 11.555 \underline{-15.95} \text{ [OHM]} \quad [7]$$

De [7] se desprende que:

$$|Z^*| = 11.555 \text{ [OHM]} \quad [8]$$

$$\theta^* = -15.95 \text{ [}^\circ\text{]} \quad [9]$$

Substituyendo valores en la ecuación [3] se tiene que:

$$S_r = 37.5 \times 10^6/3 + j 11.1 \times 10^6/3 = 13.036 \times 10^6 \underline{16.49} \text{ [VA]} \quad [10]$$

De [10] se desprende:

$$|S_r| = 13.036 \times 10^6 \text{ [VA]} \quad [11]$$

$$\epsilon = 16.49 \text{ [}^\circ\text{]} \quad [12]$$

El valor de e_3 se escribe así:

$$e_3 = [70.104 \times 10^3] / \sqrt{3} \text{ [V]} \quad [13]$$

Reemplazando valores de [8], [9], [11], [12] y [13] en la ecuación [1] se tiene que:

$$133.518 (i^*)^4 - 1383939143 (i^*)^2 + 1.6994 \times 10^{14} = 0 \quad [14]$$

La solución de la ecuación [14], es decir el valor de la corriente circulante a través del fusible de un condensador unidad falloso $[i^*]$ es:

$$i^* = 352.54 \text{ [A]} \quad [15]$$

APENDICE 6B1

- 6B1 PROCEDIMIENTO DE CALCULO PARA LA
 CONFECCION DE LA TABLA 6.66 DE LA
 SECCION 6.4.2.1.2.
- 6B1.1 CONSIDERACIONES BASICAS.
- 6B1.2 CALCULOS PARA EL AÑO 1988.

APENDICE 6B1

6B1 PROCEDIMIENTO DE CALCULO PARA LA CONFECCION DE LA TABLA 6.66 DE LA SECCION 6.4.2.1.2

6B1.1 CONSIDERACIONES BASICAS

En la sección 5.1.5.1 se realizó la deducción de las fórmulas de cálculo de: potencia reactiva por fase de condensadores en derivación con la carga, potencia reactiva por fase en el terminal de recepción y ángulo de operación de la línea; partiendo de potencias de carga por fase y de voltajes fase-neutro del terminal de envío y de recepción, pero para la tabla 6.66 se determina la potencia reactiva trifásica de condensadores en derivación con la carga, potencia reactiva trifásica en el terminal de recepción y ángulo de operación de la línea a partir de potencias de carga trifásica y de voltaje fase-fase del terminal de envío y de recepción.

Por otra parte, en la sección 5.1.5.2 se realizó la deducción de la fórmula de cálculo de la corriente de línea partiendo de potencias de recepción por fase y de voltaje fase-neutro en el terminal de recepción. En el caso de la tabla 6.66, la determinación de la magnitud de la corriente de línea se lo hace partiendo de potencias de recepción trifásicas y de voltaje fase-fase en el terminal de recepción, por cuyo motivo la ecuación [5.40] se convierte en:

$$i = |S_r| / (\sqrt{3} e_r) \quad [1]$$

$$\text{con: } |S_r| = |P_L + j(Q_L - Q_{CD})| = [P_L^2 + (Q_L - Q_{CD})^2]^{1/2} \quad [2]$$

Donde: la ecuación [2] está referida a potencias de recepción trifásicas y $[e_r]$ de la ecuación [1] a la magnitud del voltaje de recepción (entre fases).

6B1.2 CALCULOS PARA EL AÑO 1988

Los datos son:

$$\begin{array}{rcl}
 R & = & 11.11 \text{ [OHM]} \\
 X_L & = & 23.59 \text{ [OHM]} \\
 P_L & = & 30.8 \text{ [MW]} \\
 Q_L & = & 8.3 \text{ [MVAR]} \\
 e_s & = & 70.104 \text{ [KV]} \\
 e_r & = & 0.95 \text{ [PU]} \\
 e_r & = & 65.55 \text{ [KV]}
 \end{array}
 \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \right\} \begin{array}{l} \\ \\ \text{potencias trifásicas} \\ \\ \text{entre fases} \\ \\ \text{entre fases} \end{array}$$

- Cálculo de la potencia reactiva trifásica en el terminal de recepción.

Transcribiendo la ecuación [5.30] de la sección 5.1.5.1 se tiene que:

$$Q_r = \frac{-2e_r^2 X_L \pm \left\{ (2e_r^2 X_L)^2 - 4(R^2 + X_L^2) [e_r^2 (e_r^2 - e_s^2 + 2RP_L) + (R^2 + X_L^2) P_L^2] \right\}^{1/2}}{2(R^2 + X_L^2)} \quad [3]$$

Reemplazando los datos correspondientes en [3] y efectuando los cálculos se tiene que la potencia reactiva trifásica en el terminal de recepción da:

$$Q_r = \begin{cases} -4.67 \text{ [MVAR]} & [4] \\ -293.49 \text{ [MVAR]} & [5] \end{cases}$$

- Cálculo de la potencia reactiva trifásica de condensadores en derivación con la carga.

Transcribiendo la ecuación [5.31] de la sección 5.1.5.1 se tiene que:

$$Q_{CD} = Q_L - Q_r \quad [6]$$

Reemplazando el valor de $[Q_L]$ y los valores de $[Q_r]$ dados por [4] y [5] se tiene que la potencia reactiva trifásica de condensadores en derivación con la carga da:

$$Q_{CD} = \begin{cases} 12.97 \text{ [MVAR]} & [7] \end{cases}$$

$$Q_{CD} = \begin{cases} 301.79 \text{ [MVAR]} & [8] \end{cases}$$

Por supuesto que la solución de $[Q_{CD}]$ está dada por [7]. Al estar dada la solución de $[Q_{CD}]$ por [7], quiere decir que la solución de $[Q_r]$ está dada por [4]

- Cálculo del ángulo de operación de la línea

Transcribiendo la ecuación [5.35] de la sección 5.1.5.1 se tiene que:

$$e_{sx} = \frac{e_r^2 + RP_L + X_L Q_r}{e_r} \quad [9]$$

Efectuando cálculos en [9] se tiene que:

$$e_{sx} = \frac{(65.55)^2 + 11.11 (30.8) + 23.59 (-4.67)}{65.55} \quad [10]$$

$$\text{ó; } e_{sx} = 69.090 \text{ [KV]} \quad [11]$$

Transcribiendo la ecuación [5.36] de la sección 5.1.5.1 se tiene que:

$$e_{sy} = - \frac{RQ_r - X_L P_L}{e_r} \quad [12].$$

Efectuando cálculos en [12] se tiene que:

$$e_{sy} = - \frac{11.11 (-4.67) - 23.59 (30.8)}{65.55} \quad [13]$$

$$\text{ó; } e_{sy} = 11.876 \text{ [KV]} \quad [14]$$

Transcribiendo la ecuación [5.37] de la sección 5.1.5.1 se tiene que:

$$\Delta = \text{tg}^{-1} \frac{e_{sy}}{e_{sx}} \quad [15]$$

Reemplazando los valores en [15] se tiene que el ángulo de operación de la línea es:

$$\Delta = \text{tg}^{-1} \frac{11.876}{69.090} \quad [16]$$

$$\text{ó; } \Delta = 9.753 \text{ [}^\circ\text{]} \quad [17]$$

- Cálculo de la magnitud de la corriente de línea

Efectuando cálculos en la ecuación [2] de este apéndice, se tiene que:

$$|S_r| = |30.8 + j(8.3 - 12.97)| = [(30.8)^2 + (-4.67)^2]^{1/2} \quad [18]$$

$$\text{ó; } |S_r| = 31.152 \text{ [MVA]} \quad [19]$$

Reemplazando en la ecuación [1], el valor de [|S_r|] dado por [19] y el valor de [e_r] dado como dato, se tiene que la magnitud de la corriente de línea es:

$$i = 31.152 / (\sqrt{3} \cdot 65.5) \quad [20]$$

$$\text{ó; } i = 274.380 \text{ [A]} \quad [21]$$

APENDICE 6B2

6B2.- FORMULAS PARA CALCULAR LA CONFIGURACION DOBLE ESTRELLA CON EL NEUTRO UNIDO ENTRE SI Y AISLADO DE TIERRA; PARA CONDENSADORES EN DERIVACION CON LA CARGA.

APENDICE 6B2

6B2 FORMULAS PARA CALCULAR LA CONFIGURACION DOBLE ESTRELLA CON EL NEUTRO UNIDO ENTRE SI Y AISLADO DE TIERRA, PARA CONDENSADORES EN DERIVACION CON LA CARGA.

[Ref. 35]

- Número de grupos serie por fase de cada estrella: [N]

$$N = E/E_n \quad [1]$$

E : voltaje fase-neutro del sistema

E_n : voltaje nominal de las unidades capacitivas.

- Potencia reactiva de cada estrella: [Q_E]

$$Q_E = Q_B / 2 \quad [2]$$

Q_B : potencia reactiva (3φ) de condensadores en derivación

- Potencia reactiva de cada fase de cada estrella: [Q_F]

$$Q_F = Q_E / 3 \quad [3]$$

- Potencia reactiva de cada grupo serie: [Q_N]

$$Q_N = Q_F / N \quad [4]$$

- Número de unidades capacitivas en paralelo por grupo serie: [M]

$$M = Q_N / Q_n \quad [5]$$

Q_n : potencia reactiva nominal de cada unidad capacitiva.

- Cantidad total de unidades capacitivas en condensadores en derivación: q_B

$$q_B = 6 \text{ MN}$$

[6]

APENDICE 6B3

- 6B3 PROCEDIMIENTO DE CALCULO PARA LA
CONFECCION DE LA TABLA 6.72 DE LA
SECCION 6.4.2.1.3.
- 6B3.1 CONSIDERACIONES BASICAS.
- 6B3.2 DEDUCCION DE FORMULAS.
- 6B3.3 CALCULOS PARA EL AÑO 1988.

APENDICE 6B3

6B3 PROCEDIMIENTO DE CALCULO PARA LA CONFECCION DE LA TABLA 6.72 DE LA SECCION 6.4.2.1.3

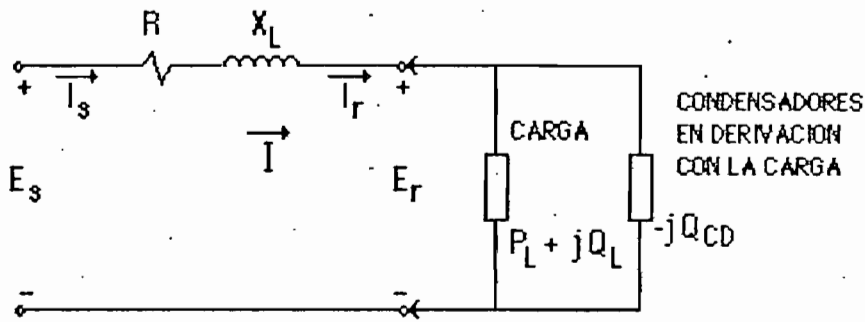
6B3.1 CONSIDERACIONES BASICAS

No obstante que las tablas 6.72 y 6.73 de la sección 6.4.2.1.3 tienen la misma estructura que las tablas 6.66 y 6.67 de la sección 6.4.2.1.2; la construcción de las tablas 6.72 y 6.73 es diferente de la construcción de las tablas 6.66 y 6.67. Efectivamente, en las tablas 6.66 y 6.67 dados los valores de carga, la magnitud del voltaje terminal de envío y la magnitud del voltaje terminal de recepción; se calculan: la potencia reactiva de recepción, la potencia reactiva en condensadores en derivación, el ángulo de operación de la línea y la magnitud de la corriente de línea; en cambio en las tablas 6.72 y 6.73 dados los valores de carga, la magnitud del voltaje terminal de envío y la potencia reactiva en condensadores en derivación, se calculan: la potencia reactiva de recepción, la magnitud del voltaje terminal de recepción, el ángulo de operación de la línea y la magnitud de la corriente de línea. Por lo anotado, las tablas 6.72 y 6.73 no se elaboran siguiendo el procedimiento de cálculo dado en el Apéndice 6B1 y por consiguiente es necesario determinar expresiones matemáticas que permitan elaborar las tablas 6.72 y 6.73.

6B3.2 DEDUCCION DE FORMULAS

6B3.2.1 Fórmulas de cálculo del voltaje terminal de recepción y del ángulo de operación de la línea

El circuito que se usa es el de la FIG 1.



- R : Resistencia de la línea
 X_L : Reactancia inductiva de la línea
 Q_{CD} : Potencia reactiva en condensadores en derivación con la carga.

FIG 1. Circuito de una línea, con condensadores en derivación con la carga

En el circuito de la FIG 1 se cumplen las siguientes ecuaciones:

$$I_s = I_r = I \quad [1]$$

$$E_s = E_r + I(R + jX_L) \quad [2]$$

$$I = S_r^*/E_r^* \quad [3]$$

$$S_r^* = [P_L + j(Q_L - Q_{CD})]^* = [P_L - j(Q_L - Q_{CD})] \quad [4]$$

En la sección 5.1.5.1 está dada la significación de los símbolos utilizados en las ecuaciones [1], [2], [3] y [4].

La sustitución de las ecuaciones [3] y [4] en la ecuación [2] da:

$$E_s E_r^* = E_r E_r^* + [P_L - j(Q_L - Q_{CD})](R + jX_L) \quad [5]$$

Tomando $[E_s]$ como referencia se tiene que:

$$E_s = e_s |0 \quad [6]$$

$$E_r = e_r |-\Delta \quad [7]$$

con:

e_s : magnitud del voltaje fase-neutro, en el terminal de envío

e_r : magnitud del voltaje fase-neutro, en el terminal de recepción

Δ : ángulo de operación de la línea.

En la ecuación [7], $[E_r]$ se descompone en sus componentes real e imaginaria, según la siguiente expresión.

$$E_r = e_{rx} + j e_{ry} \quad [8]$$

El reemplazo de [6] y [8] en [5] da:

$$[e_s e_{rx} - e_{rx}^2 - e_{ry}^2] - j e_s e_{ry} = [R P_L + X_L (Q_L - Q_{CD})] - j [R (Q_L - Q_{CD}) - X_L P_L] \quad [9]$$

Si:

$$Q_r = Q_L - Q_{CD} \quad [10]$$

con:

Q_r : potencia reactiva, por fase, en el terminal de recepción.

Entonces la ecuación [9] da:

$$[e_s e_{rx} - e_{rx}^2 - e_{ry}^2] - j e_s e_{ry} = [R P_L + X_L Q_r] - j [R Q_r - X_L P_L] \quad [11]$$

Igualando los términos imaginarios del primer y segundo miembros de la ecuación [11] se tiene que:

$$e_{ry} = [R Q_r - X_L P_L] / e_s \quad [12]$$

Igualando las partes reales del primer y segundo miembros de la ecuación [11] se tiene que:

$$e_{rx} = \frac{e_s \pm \{ e_s^2 - 4[e_{ry} + RP_L + X_L Q_r] \}^{1/2}}{2} \quad [13]$$

La magnitud del voltaje fase-neutro en el terminal de recepción $[e_r]$ se determina por la siguiente relación:

$$e_r = [e_{rx}^2 + e_{ry}^2]^{1/2} \quad [14]$$

Evaluando previamente las expresiones de $[e_{ry}]$ y $[e_{rx}]$ en las ecuaciones [12] y [13] respectivamente.

Por otra parte, el ángulo de operación de la línea $[\Delta]$ se evalúa de acuerdo a la siguiente relación:

$$\Delta = -\operatorname{tg}^{-1} \frac{e_{ry}}{e_{rx}} \quad [15]$$

con $[e_{ry}]$ y $[e_{rx}]$ evaluados de acuerdo a las ecuaciones [12] y [13] respectivamente. Se señala que el signo negativo en el segundo miembro de la ecuación [15] se debe a la convención adoptada en la ecuación [7].

Es interesante notar que todas las ecuaciones anteriores se pueden usar para el caso de dos líneas en paralelo con la sola substitución de $[R]$ por $[R_p]$ y $[X_L]$ por $[X_p]$, siendo $[R_p]$ la resistencia del paralelo de las dos líneas y $[X_p]$ la reactancia inductiva del paralelo de las dos líneas.

6B3.2.2 Fórmula de cálculo de la corriente de línea (terminal de envío)

Para el circuito de la FIG 1, la corriente de línea en el terminal de envío es la misma que en el terminal de recepción y al igual que la ecuación [1] se tiene que:

$$I_s = I_r = I \quad [16]$$

[1] puede escribirse como:

$$I = i \angle \theta_i \quad [17]$$

con:

I : corriente de línea

i : magnitud de la corriente de línea

θ_i : ángulo de la corriente de línea.

La magnitud de la corriente de línea [i] está dada por la relación:

$$i = |S_r| / e_r \quad [18]$$

con:

$$|S_r| = |P_L + j(Q_L - Q_{CD})| = |P_L + jQ_r| = [P_L^2 + (Q_L - Q_{CD})^2]^{1/2} = [P_L^2 + Q_r^2]^{1/2} \quad [19]$$

$|S_r|$: magnitud de la potencia compleja, por fase, en el terminal de recepción.

En la ecuación [18], [e_r] se determina a partir de la ecuación [14]

6B3.3 CALCULOS PARA EL AÑO 1988

Los datos son:

$$\begin{array}{l}
 R = 11.11 \text{ [OHM]} \\
 X_L = 23.59 \text{ [OHM]} \\
 P_L = 30.8 \text{ [MW]} \\
 Q_L = 8.3 \text{ [MVAR]} \\
 Q_{CD} = 15.6 \text{ [MVAR]} \\
 e_s = 70.104 \text{ [KV]}
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} R \\ X_L \\ P_L \\ Q_L \\ Q_{CD} \\ e_s \end{array}} \right\} \begin{array}{l} \\ \\ \\ \text{potencias trifásicas} \\ \\ \text{entre fases} \end{array}$$

- Cálculo de la potencia trifásica en el terminal de recepción.

Reemplazando los datos correspondientes en la ecuación [10] se tiene que:

$$Q_r = 8.3 - 15.6 \quad [20]$$

$$\text{ó; } Q_r = -7.3 \text{ [MVAR]} \quad [21]$$

- Cálculo de la magnitud del voltaje terminal de recepción (entre fases)

Reemplazando valores en [12] se tiene que:

$$e_{ry} = [11.11 (-7.3) - 23.59 (30.8)] / 70.104 \quad [22]$$

$$\text{ó; } e_{ry} = -11.521 \text{ [KV]} \quad [23]$$

Reemplazando valores en [13] y se tiene que:

$$e_{rx} = \frac{70.104 \pm [(70.104)^2 - 4\{(-11.521)^2 + 11.11(30.8) + 23.59(-7.3)\}]^{1/2}}{2} \quad [24]$$

$$\text{ó; } e_{rx} = \begin{cases} 65.481 \text{ [KV]} & [25] \\ 4.623 \text{ [KV]} & [26] \end{cases}$$

Realizando cálculos en [14], es decir, reemplazando el valor de $[e_{ry}]$ dado por [23] y la solución de $[e_{rx}]$ dada por [25] se tiene que la magnitud del voltaje terminal de recepción (entre fases) será:

$$e_r = [(-11.521)^2 + (65.481)^2]^{1/2} \quad [27]$$

$$\text{ó; } e_r = 66.487 \text{ [KV]} \quad [28]$$

$$\text{ó; } e_r = 0.964 \text{ [PU]} \quad [29]$$

- Cálculo del ángulo de operación de la línea

Efectuando cálculos en [15] o sea reemplazando los valores de $[e_{ry}]$ y $[e_{rx}]$ dados respectivamente por [23] y [25], se tiene que el ángulo de operación de la línea será:

$$\Delta = -\text{tg}^{-1} \frac{-11.521}{65.481} \quad [30]$$

$$\text{ó; } \Delta = 9.979 \text{ [}^\circ\text{]} \quad [31]$$

- Cálculo de la magnitud de la corriente de línea

La ecuación [18] referida a $[|S_r|]$ trifásica y $[e_r]$ fase-fase da:

$$i = |S_r| / (\sqrt{3} e_r) \quad [32]$$

Reemplazando potencias trifásicas en [19] se tiene que:

$$\begin{aligned} |S_r| &= |30.8 + j(8.3 - 15.6)| = |30.8 - j7.3| = [(30.8)^2 + (8.3 - 15.6)^2]^{1/2} \\ &= [(30.8)^2 + (-7.3)^2]^{1/2} \end{aligned} \quad [33]$$

$$\text{ó; } |S_r| = 31.653 \text{ [MVA]} \quad [34]$$

Substituyendo en la ecuación [32] los valores dados por [28] y [34] se tiene que la magnitud de la corriente de línea es:

APENDICE 6B4

- 6B4 PROCEDIMIENTO DE CALCULO PARA LA
 CONFECCION DE LA TABLA 6.80 DE LA
 SECCION 6.4.2.9.
- 6B4.1 ASPECTOS PRELIMINARES
- 6B4.2 CALCULOS PARA EL AÑO 1988.

APENDICE 6B4

6B4 PROCEDIMIENTO DE CALCULO PARA LA CONFECCION DE LA TABLA 6.80 DE LA SECCION 6.4.2.2.9

6B4.1 ASPECTOS PRELIMINARES

La tabla 6.80 de la sección 6.4.2.2.9 es la transcripción de la tabla 6.72 de la sección 6.4.2.1.3 cuyo procedimiento de cálculo se detalla en el Apéndice 6B3, con la particularidad de que a la tabla 6.80 se le ha agregado la tabulación de la potencia activa de envío y la potencia activa perdida. Por consiguiente para la tabla 6.80 se describirá el método de cálculo de la potencia activa de envío y la potencia activa perdida.

En la sección 5.3.2.2 se deduce la fórmula de cálculo de la potencia activa perdida por fase partiendo de potencia activa de carga por fase en el terminal de recepción y potencia activa por fase en el terminal de envío, pero para la tabla 6.80 se determina la potencia activa perdida trifásica partiendo de potencias activas trifásicas; de carga en el terminal de recepción y en el terminal de envío.

6B4.2 CALCULOS PARA EL AÑO 1988

Los datos son:

$$\begin{array}{l} R = 11.11 \text{ [OHM]} \\ X_L = 23.59 \text{ [OHM]} \\ P_L = 30.8 \text{ [MW]} \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} R \\ X_L \\ P_L \end{array}} \right\} \text{ potencia trifásica}$$
$$\begin{array}{l} e_s = 70.104 \text{ [KV]} \\ e_r = 66.487 \text{ [KV]} \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} e_s \\ e_r \end{array}} \right\} \text{ entre fases}$$
$$\Delta = 9.979 \text{ [}^\circ\text{]}$$

- Cálculo de la impedancia entre el terminal de envío y de recepción

La impedancia de transferencia entre el terminal de envío y de recepción se la expresa de acuerdo a la ecuación [5.68] de la sección 5.3.2.2; es decir por:

$$Z = |Z| \angle \theta \quad [1]$$

La impedancia [Z] de la línea es:

$$Z = R + j X_L = |Z| \angle \theta \quad [2]$$

Reemplazando valores en [2] se tiene que:

$$Z = 11.11 + j 23.59 = 26.075 \angle 64.781 \quad [3]$$

$$\text{ó; } Z = 26.075 \angle 64.781 \text{ [OHM]} \quad [4]$$

- Cálculo de la potencia activa de envío

Transcribiendo la ecuación [5.67] de la sección 5.3.2.2 se tiene que:

$$P_s = \frac{e_s^2 \cos \theta}{|Z|} - \frac{e_s e_r}{|Z|} \cos(\Delta + \theta) \quad [5]$$

Reemplazando los valores correspondientes en la ecuación [5] se tiene que la potencia activa trifásica de envío es:

$$P_s = \frac{(70.104)^2 \cos(64.781)}{26.075} - \frac{(70.104)(66.487)}{26.075} \cos(9.979 + 64.781) \quad [6]$$

$$P_s = 33.319 \text{ [MW]} \quad [7]$$

- Cálculo de la potencia activa perdida

Transcribiendo la ecuación [5.66] de la sección 5.3.2.2 se tiene que:

$$P_p = P_s - P_L \quad [8]$$

Reemplazando los valores correspondientes en la ecuación [8] se tiene que la potencia activa trifásica perdida es:

$$P_p = 33.319 - 30.8 \quad [9]$$

$$\text{ó; } P_p = 2.519 \text{ [MW]} \quad [10]$$

APENDICE 6C1

- 6C1 PROCEDIMIENTO DE CALCULO PARA LA
CONFECCION DE LA TABLA 6.83 DE LA
SECCION 6.4.3.1.1.
- 6C1.1 CONSIDERACIONES BASICAS.
- 6C1.2 CALCULOS PARA EL AÑO 1988.

APENDICE 6C1

6C1 PROCEDIMIENTO DE CALCULO PARA LA CONFECCION DE LA TABLA 6.83 DE LA SECCION 6.4.3.1.1

6C1.1 CONSIDERACIONES BASICAS

En la sección 5.1.6.1 se realizó la deducción de las fórmulas de cálculo de voltaje fase-neutro en el terminal de recepción y del ángulo de operación de la línea partiendo de potencias de recepción por fase y voltaje fase-neutro en el terminal de envío, en tanto que para la tabla 6.83 y similares se determinará el voltaje fase-fase en el terminal de recepción y el ángulo de operación de la línea partiendo de potencias trifásicas de recepción y voltaje fase-fase en el terminal de envío.

Por otro lado, en la sección 5.1.6.2 se efectuó la deducción de la fórmula de cálculo de la corriente de línea partiendo de potencias de recepción por fase y de voltaje fase-neutro en el terminal de recepción, en tanto que para la tabla 6.83 y similares se determinará la corriente de línea pero partiendo de potencias trifásicas de recepción y de la magnitud del voltaje de recepción (entre fases), por cuya razón la ecuación [5.63] de la sección 5.1.6.2 se convierte en:

$$i = |S_r| / (2 \sqrt{3} e_r) \quad [1]$$

$$\text{con: } |S_r| = |P_L + j Q_L| = [P_L^2 + j Q_L^2]^{1/2} \quad [2]$$

Donde, la ecuación [2] está referida a potencias de recepción trifásicas y $[e_r]$ de la ecuación [1] está referido a la magnitud del voltaje de recepción (entre fases).

6C1.2 CALCULOS PARA EL AÑO 1988

Los datos son:

$$\begin{array}{l}
 R_p = 5.555 \text{ [OHM]} \\
 X_{Lp} = 11.795 \text{ [OHM]} \\
 P_L = 30.8 \text{ [MW]} \\
 Q_L = 8.3 \text{ [MYAR]} \\
 e_s = 70.104 \text{ [KV]}
 \end{array}
 \left. \begin{array}{l}
 \\
 \\
 \\
 \\
 \end{array} \right\}
 \begin{array}{l}
 \text{valores óhmicos que resulta de dos lí-} \\
 \text{neas similares en paralelo c/u con} \\
 R=11.11 \text{ [OHM] y } X_L=23.59 \text{ [OHM]} \\
 \\
 \text{potencias trifásicas} \\
 \\
 \text{entre fases}
 \end{array}$$

- Cálculo de la magnitud del voltaje terminal de recepción (entre fases).

Transcribiendo la ecuación [5.58] de la sección 5.1.6.1 se tiene que:

$$e_{ry} = \frac{R_p Q_L - X_{Lp} P_L}{e_s} \quad [3]$$

Efectuando los cálculos en [3] se tiene que:

$$e_{ry} = \frac{5.555(8.3) - 11.795(30.8)}{70.104} \quad [4]$$

$$\hat{o}; \quad e_{ry} = -4.524 \text{ [KV]} \quad [5]$$

Transcribiendo la ecuación [5.59] de la sección 5.1.6.1 se tiene que:

$$e_{rx} = \frac{e_s \pm \sqrt{e_s^2 - 4[e_{ry}^2 + R_p P_L + X_{Lp} Q_L]}}{2} \quad [6]$$

Efectuando cálculos en [6] se tiene que:

$$e_{rx} = \frac{70.104 \pm \sqrt{70.104^2 - 4[(-4.524)^2 + 5.555(30.8) + 11.795(8.3)]}}{2} \quad [7]$$

$$\text{ó: } e_{rx} = \begin{cases} 65.698 \text{ [KV]} & [8] \\ 4.406 \text{ [KV]} & [9] \end{cases}$$

Transcribiendo la ecuación [5.60] de la sección 5.1.6.1 se tiene que:

$$e_r = \sqrt{e_{ry}^2 + e_{rx}^2} \quad [10]$$

Efectuando cálculos en [10], o sea substituyendo el valor de $[e_{ry}]$ dado por [5] y la solución de $[e_{rx}]$ dada por [8], se tiene que la magnitud del voltaje terminal de recepción (entre fases) será:

$$e_r = \sqrt{(-4.524)^2 + (65.698)^2} \quad [11]$$

$$\text{ó; } e_r = 65.854 \text{ [KV]} \quad [12]$$

$$\text{ó; } e_r = 0.954 \text{ [PU]} \quad [13]$$

- Cálculo del ángulo de operación de la línea.

Transcribiendo la ecuación [5.61] de la sección 5.1.6.1 se tiene que:

$$\Delta = -\text{tg}^{-1} \frac{e_{ry}}{e_{rx}} \quad [14]$$

Efectuando cálculos en [14], o sea reemplazando los valores de $[e_{ry}]$ y $[e_{rx}]$ dados respectivamente por [5] y [8], se tiene que el ángulo de operación de la línea será:

$$\Delta = -\operatorname{tg}^{-1} \frac{-4.524}{65.698} \quad [15]$$

$$\text{ó; } \Delta = 3.939 \text{ } [^\circ] \quad [16]$$

- Cálculo de la magnitud de la corriente de línea.

Efectuando cálculos, en la ecuación [2] de este apéndice se tiene que:

$$|S_r| = |30.8 + j 8.3| = [(30.8)^2 + (8.3)^2]^{1/2} \quad [17]$$

$$\text{ó; } |S_r| = 31.899 \text{ [MVA]} \quad [18]$$

Reemplazando el valor de $|S_r|$ dado por [18] y el valor de $|e_r|$ dado por [12] en la ecuación [1] de este apéndice se tiene que la magnitud de la corriente de línea es:

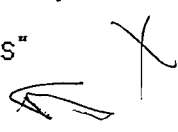
$$i = 31.899 / (2\sqrt{3} \cdot 65.854) \quad [19]$$

$$\text{ó; } i = 139.830 \text{ [A]} \quad [20]$$

BIBLIOGRAFIA

- [1] H. Sarmiento, A. Rodríguez, F. Brito, H. Franco, R. Vargas, "Aplicación de Capacitores serie en sistemas de Distribución. Instituto de Investigaciones Eléctricas, División de Sistemas de Potencia Departamento de Transmisión y Distribución, México 1980.
- [2] A. A. Johnson, J. E. Barkle Jr. and D. J. Povysil, "Series Capacitors for High Tension Lines", Paper No. 311, Proceedings CIGRE, Paris, France, 1952.
- [3] J. Játiva, "Características de Cargabilidad en Líneas de Transmisión", Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador 1983.
- [4] G. D. Brewer, H. M. Rustebakke, R. A. Gibley, H. O. Simmons, "The Use of Series Capacitors to Obtain Maximun EHV Transmission Capability", IEEE Transactions PAS November 1964.
- [5] A. A. Johnson, J. E. Barkle, D. J. Povysil, "Fundamental Effects of Series Capacitors in High Voltage Transmission Lines" AIEE Transactions, January 1951.
- [6] Donald Beeman, "Industrial Power Systems Handbook", McGraw Hill Book Company Inc. 1955.
- [7] E. W. Kimbark, "Improvement of System Stability by Switched Series Capacitors", IEEE Transactions, February 1966.
- [8] J. W. Butler, J. E. Paul, T. W. Schroeder, "Steady - State and Transient Stability Analysis of Series Capacitors in Lons Transmission Lines", AIEE Transactions, vol 62, 1943.
- [9] T. J. E. Miller, "Reactive Power Control in Electric Systems", 1982.

- [10] J. W. Butler, C. Concordia, "Series Capacitor Application Problems", AIEE Transactions, vol. 56, 1937.
- [11] Westinghouse Electric Corporation, "Electrical Transmission and Distribution Reference Book", East Pittsburgh Pennsylvania, September 1950.
- [12] E. F. Kratz, R. W. Manning, Miles Maxwell, "Ferroresonance in Series Capacitor Distribution Transformer Applications", AIEE Transactions, August 1959.
- [13] Westinghouse Engineer, "Applications Problems of Series Capacitors", Julio 1948, pp. 106.
- [14] C. F. Wagner, "Self Excitation of Induction Motors with Series Capacitors", AIEE Transactions, vol 60, 1940.
- [15] R. L. Witzke, E. L. Michelson, "Technical Problems Associated with the Application of a Capacitor in Series with a Synchronous Condenser", AIEE Transactions, vol 70, 1951.
- [16] Beker S. Ashok Kumar, K. Parthasarathy, F. S. Prabhakara, H. P. Khincha, "Effectiveness of Series Capacitors in Long Distance Transmission Lines", IEEE Transactions PAS, May/June 1970.
- [17] Edward W. Kimbark, "How to Improve System Stability Without Risking Subsynchronous Resonance", IEEE Transactions, PAS, vol 96, no. 5 September/October 1977.
- [18] Helena Vass, "Circuitos Eléctricos III", Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Quito - Ecuador 1978.

- [19] R. H. Hartley, R. G. Farmer, L. A. Kilgore, D. G. Ramey, E. R. Taylor, "EHV Series Capacitor Applications Considering Subsynchronous Oscillations", CIGRE vol 2, paper 31-06, 1974.
- [20] C. H. Holley, C. E. J. Bowler, J. B. Tice, "Design and Test of Navajo Plant Subsynchronous Resonance Protective Filters", CIGRE vol 2, paper 31-06, 1976.
- [21] Institute of Electrical and Electronics Engineers National Electrical Manufacturers Association, "American National Standard for Series Capacitors for Transmission - and - Distribution - Line Compensation", New York, June 14, 1973.
- [22] Westinghouse Electric Corporation, "Series Capacitors Increase EHV Capacity", Reprint 177, 1984.
- [23] IEC, "Series Capacitors for Power Systems", Publication 143, 1972.
- [24] G. Jancke, N. Fahlen, O. Nerf, "Series Capacitors in Power Systems" IEEE Transactions PAS, vol 94, No. 3, May/June 1975. 
- [25] Peter Peregrinus Ltd, "Power System Protection", British Library Cataloguing in Publication Data, vol 3, Stevenage, UK, and New York 1981.
- [26] "Inducon do Brasil Capacitores S.A.", Sao Paulo - Brasil 1983.
- [27] T. Yamada, J. Nagamura, T. Omori, K. Oshima, S. Noda, "Development of Series Capacitors in Japan During the Last 15 Years", CIGRE paper 130, 1966.
- [28] Jacinto Viqueira Landa, "Redes Eléctricas", vol 2, Representaciones y Servicios de Ingeniería S. A. México 1970.

- [29] McGraw Edison, "Protection Distribution Systems", Power Systems Division.
- [30] Víctor H. Orejuela, "Protección contra Sobrevoltajes en Sub-estaciones", CIEEPI No. 2, 1984.
- [31] B. M. Jones, J. M. Arthur, C. M. Stearns, A. A. Johnson, "A 10000 KVA series Capacitor Improves Voltage on 66 KV Line Supplying Large Electric Furnace Load", AIEE Transactions PAS vol. 67, 1948.
- [32] Gandhi Mier, "Sub-estaciones en SF6", Escuela Politécnica Nacional, Quito - Ecuador 1983.
- [33] Datos de la Empresa Eléctrica Riobamba, S. A.
- [34] Datos de INECEL
- [35] P. E. Hidalgo Sánchez, "Selección y Protección de un Banco de Capacitores Estáticos en Derivación en una sub-estación de Distribución", Escuela Politécnica Nacional, Quito - Ecuador 1977.
- [36] R. S. Seymour, E. C. Starr, "Economic Aspects of Series Capacitors in High Voltage Transmission", AIEE Transactions vol 70, pt II, 1951.
- [37] Víctor H. Orejuela, "Regulación y Control de Voltaje en Sistemas de Distribución", Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 1979.
- [38] "Contribuciones Técnicas presentadas para el III Seminario Ecuatoriano de Distribución de Energía Eléctrica", Ambato - Ecuador, 1984.
- [39] "Capacitores en Serie", ASEA folleto NR47 - 102 SP, 1985.

- [40] L. A. Kilgore, L. C. Elliot, E. R. Taylor, "The Prediction and Control of Self - Excited Oscillations due to Series Capacitors in Power Systems", IEEE, Trans, vol. PAS - 90, 1971.
- [41] Glenn W. Swift, "An Analytical Approach to Ferroresonance", IEEE, Transactions, vol PAS - 88, January 1969.
- [42] "Tecnología de Alto Voltaje", Laboratorio de Alto Voltaje, EPN, 1982.
- [43] G. E. Harper, "Líneas de Transmisión y Redes de Distribución de Potencia Eléctrica", vol. 1, Méjico 1980.
- [44] A. Roth, "Técnica de la Alta Tensión".
- [45] B-TC The Brewer - Titchner Corporation.
- [46] L. E. Block, "Derivation and Application of Capacitor Case Rupture Curves", University of Texas at Austin, October 26, 1977.