" EL CAPACITOR Y SU APLICACION EN SERIE EN SISTEMAS DE TRANSPORTE Y CONSUMO DE ENERGIA"

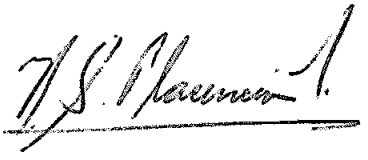
TESIS PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE INGENIERO EN LA ESPECIALIZACION DE ELECTROTECNIA DE LA ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

ALEJANDRO RIBADENEIRA ESPINOSA

Quito, Enero de 1969

CERTIFICO QUE LA PRESENTE TESIS FUE REALIZADA

POR EL SEÑOR ALEJANDRO RIBADENEIRA ESPINOSA



ING. HONORATO PLACENCIA
DIRECTOR DE TESIS

INDICE DE MATERIAS

Pag.

CAPITULO I

1.1. Fundamento, propiedades y tipos de los capacitores 2

1.2. Generalidades sobre el capacitor y su construcción 16

1.2.1. Capacitores de construcción tipo unitario 18

1.2.1.1. Capacitores para bajo voltaje, hasta 660 voltios de valor eficaz 18

1.2.1.2. Capacitores para alto voltaje, hasta los 660 voltios de valor eficaz 20

1.2.2. Capacitores de construcción tipo tanque 22

1.2.2.1. Capacitores para bajo voltaje, hasta 660 voltios de valor eficaz 22

1.2.2.2. Capacitores para alto voltaje sobre los 660 voltios de valor eficaz 22

1.2.3. Generalidades sobre la construcción de los capacitores 23

1.2.3.1. Papel 23

1.2.3.2. Impregnantes 25

Pag.

1.2.3.3. Montaje y tratamiento 27

1.2.3.4. Dispositivos de descarga 27

1.2.3.5. Terminación 27

1.2.3.6. Acabado 28

1.2.3.7. Fusibles 29

1.2.4. Generalidades sobre las características eléctricas de los capacitores 29

1.2.4.1. Capacidad nominal o KVAR nominales 29

1.2.4.2. Corriente nominal 31

1.2.4.3. Voltaje nominal 32

1.2.4.4. Elevación de temperatura 33

1.3. Desarrollo de las instalaciones de capacitores en serie 34

CAPITULO II

Aplicaciones de los Capacitores en Serie 38

2.1. Principios de Aplicación 38

2.1.1. Principios cualitativos 39

2.1.2. Principios cuantitativos 48

2.1.2.1. Mejoramiento de la estabilidad 48

2.1.2.1.1. El límite de estabilidad en estado estable y la influencia que sobre él tie

Pag.

ne la inserción de capa
citores en serie en el
circuito 51

2.1.2.1.2. El límite de la estabili-
dad en estado transitorio
y la influencia que sobre
él tiene la inserción de
capacitores en serie en
el circuito 75

2.1.2.2. Control de la distribución de la
carga en líneas de transporte en
paralelo 82

2.1.2.3. Mejoramiento de la regulación de
tensión 91

2.1.2.4. Mejoramiento del factor de poten-
cia de la carga 94

2.1.2.5. Disminución del "Flicker" o Parpadeo 97

2.2. Aplicaciones Prácticas 108

2.2.1. En los sistemas de transporte de energía 109

2.2.1.1. En líneas de transmisión 109

2.2.1.2. En alimentadores primarios de enlace 111

2.2.1.3. En alimentadores primarios radiales 111

2.2.1.4. En sistemas de distribución 115

		Pag.
2.2.2.	En los sistemas de consumo de energía	118
	2.2.2.1. En soldadoras por resistencia	118
	2.2.2.2. En generadores de alta frecuencia	119
	2.2.2.3. En hornos de grafito	120
	2.2.2.4. En hornos de arco	120
2.3.	Problemas de Aplicación de los Capacitores en Serie	122
2.3.1.	En circuitos que contienen motores	123
2.3.2.	La resonancia con los transformadores	131
2.3.3.	El "hunting" de los motores sincrónicos	132
2.4.	Fundamento de diseño de los equipos de protección de los capacitores en serie	137
2.4.1.	Protección del capacitor en serie durante condiciones de falla en la línea	137
2.4.2.	Protección contra sobrecargas contínuas	142
2.4.3.	Protección contra fallas del dieléctrico	143
2.4.4.	Generalidades sobre los equipos de protección	145
	2.4.4.1. "Spark Gaps"	145
	2.4.4.2. Ignitrones y otros tipos de válvulas de mercurio	149
	2.4.4.3. Materiales de resistencia no lineal	151
2.4.5.	Especificaciones para equipos de protección de capacitores en serie	153

Pag.

2.4.6. Comentarios Generales 156

2.5. Influencia del capacitor en serie y su equipo de protección sobre el equipo de protección de la línea 157

CAPITULO III

Consideraciones económicas sobre la utilización de capacitores en serie 162

3.1. Ventajas económicas conseguidas con el mejoramiento de la estabilidad 163

3.2. Ventajas económicas conseguidas con el mejoramiento de la regulación 165

3.3. Comparación económica entre los capacitores en serie y otros equipos usados para la compensación de la inductancia 166

3.3.1. Ventajas de los capacitores estáticos sobre los sincrónicos 170

3.3.2. Ejemplo de cómo escoger entre un capacitor en serie y uno en paralelo - Regulación de Tensión 171

3.3.3. Comentarios Generales 178

APENDICE I

Economía obtenida por medio del uso de capacitores en serie en un sistema de transmisión a 230 KV 1

INDICE DE TABLAS Y CUADROS

Pag.

CAPITULO I

Cuadro Sinóptico de la Clasificación de Capacitores 15

Cuadro de Sobrevoltajes Permisibles en el Capacitor 33

CAPITULO II

Cuadro de "Spark Gaps" 154

APENDICE

Evaluación de los diferentes planes de transmisión para cumplir con un programa de expansión de transmisión y generación de 4 años 5

1.1 FUNDAMENTO, PROPIEDADES Y TIPOS DE LOS CAPACITORES

Si un cierto número de conductores cargados están próximos unos a otros, el potencial de cada uno de ellos esta determinado, no sólo por su propia carga, sino por el valor y signo de las cargas de los otros conductores y por su forma, tamaño y posiciones relativas. Por ejemplo, el potencial de una esfera cargada positivamente disminuye si se coloca en sus proximidades una esfera cargada negativamente.

Un caso especial e importante se presenta en la práctica cuando dos conductores próximos reciben cargas del mismo valor, pero de signo contrario. Esto se puede conseguir conectando ambos conductores, descargados inicialmente, a los bornes de una batería lo que ocasiona el paso de carga de un conductor a otro. Este dispositivo de dos conductores se denomina capacitor. El hecho de que cada conductor este próximo a otro que lleva una carga de signo opuesto hace posible el paso de relativamente grandes cantidades de carga eléctrica de un conductor a otro con diferencias de potencial relativamente pequeñas.

*En general un capacitor es una combinación de conductores y dieléctricos, dispuestos en tal forma, que permite almacenar una carga apreciable en un volumen reducido.

Cuando se establece una diferencia de potencial entre las placas de un capacitor, se almacenan cargas eléctricas en el mismo, localizándose una carga positiva en una de las placas o grupo de placas, y otra negativa de igual valor, en la otra placa o grupo de placas. Esta propiedad de los capacitores se le conoce con el nombre de capacidad y se la define como la relación de carga Q, de cualquiera de los conductores, a la diferencia de potencial V entre ellos.

A manera de fórmula se puede poner que:

$$C = \frac{Q}{V} \qquad (1.1)$$

El que estas cargas se almacenen de esta manera, puede explicarse considerando la figura 1.1, en la cual se tiene dos placas conductoras A y B, separadas por una capa de aire u otro material aislante, conectadas a los terminales positivo y negativo de una batería. En estas condiciones, el terminal positivo atraerá algunos electrones libres existentes en la placa A y el negativo los repelerá hacia la placa B, es decir que la f.e.m. de la batería separa los electrones de la placa A y los transfiere a la B. De esta manera la placa A quedará cargada positivamente (puesto que ha cedido cargas negativas) y la B quedará cargada negativamente.

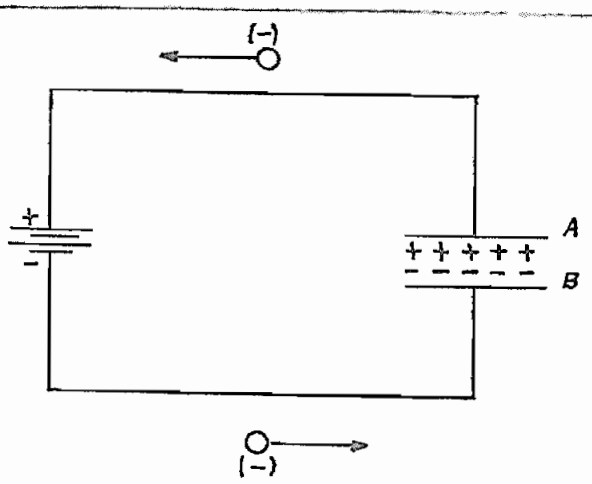


FIG. 1.1.- Transporte de electrones en las placas de un capacitor.

La carga neta del capacitor es en conjunto, naturalmente nula, y la carga de un capacitor se define como la carga de cualquiera de los conductores sin tener en cuenta el signo.

De la fórmula 1.1 se puede ver que las unidades de capacidad se expresan en unidades de carga divididas por unidades de voltaje, o sea, generalmente Coulombio/voltio. Una capacidad de Coulombio/voltio se denomina Farad.

Esto quiere decir que la capacidad de un capacitor es un Farad cuando para una diferencia de potencial de un voltio, la carga transmitida de un conductor a otro es de un Coulombio.

Los capacitores encuentran múltiples aplicaciones en los circuitos eléctricos y electrónicos. Se usa un capacitor para eliminar la chispa que se produce cuando se interrumpe rápidamente la circulación de corriente en un circuito que posee

autoinducción. El sistema de encendido de los motores de automovil tiene para este fin un capacitor. Los capacitores se usan en sistemas de potencia ya sea para mejorar el factor de potencia o la regulación del mismo. En circuitos de radio los capacitores se usan para sintonizar y para eliminar el rizado de la corriente rectificada proporcionada por el generador de energía.

En un capacitor ideal, el único factor a considerar sería la capacitancia o capacidad pura, invariable e indestructible. Sin embargo en la práctica hay algunos factores adicionales, cualquiera de los cuales puede hacer que un circuito o un sistema no funcione adecuadamente si es que no se presta la debida atención. Estas limitaciones se derivan de las limitaciones o características inherentes a los materiales y diseños mecánicos empleados en la construcción del capacitor y ellos están siempre presentes en cualquier capacitor sin importar ouán bien diseñado o cuán bien construído este. Seguidamente se dá un resumen de los factores que deberían ser tomados en cuenta cuando se trata de seleccionar un capacitor.

a) La capacidad es variable

El valor de la capacidad nunca es constante, sino que disminuye gradualmente con el envejecimiento del capacitor y además varía con la frecuencia del sistema al que esta conectado y con la temperatura a la que el capacitor este funcionando, sien-

do esta última característica la más importante.

b) Los capacitores tienen inductancia

Un capacitor se comporta como una capacidad pura, en serie con una pequeña inductancia. Esta reactancia inductiva es debida a las conexiones internas y externas del capacitor.

c) Los capacitores tienen resistencia a la corriente alterna

Esta es otra manera de decir que el capacitor disipa energía en forma de calor. Esta pérdida debe ser estrictamente limitada al usar capacitores en sistemas de gran potencia para prevenir un calentamiento excesivo, el cual puede deteriorar al capacitor. Esta resistencia es llamada también resistencia de aislamiento, ya que cuando se aplica a un capacitor una tensión de polaridad determinada en forma permanente, circula una pequeña corriente de fuga o pérdidas a través del dieléctrico y las superficies. Esta resistencia varía considerablemente con la temperatura.

En algunos dieléctricos, la corriente permanente de pérdidas, produce, en muy largos períodos de tiempo y especialmente a temperaturas más altas que la normal, ciertas reacciones electrolíticas en los electrodos, las cuales pueden causar un serio deterioro y aún la falla del capacitor afectado.

d) Los capacitores tardan en cargarse

Los capacitores con dieléctricos sólidos no absorben la carga eléctrica tan rápidamente como la fuente la entrega, debido a que el proceso de carga está afectado por una demora o retraso en la respuesta del dieléctrico. Por la misma razón, tales capacitores no se descargan instantáneamente cuando son cortocircuitados. Este retraso inherente, difiere grandemente para diversos tipos de capacitores.

e) Los capacitores tienen absorción

Los capacitores que han estado sometidos a tensión durante algún tiempo pueden reproducir por si mismos una carga apreciable después de su desconexión, aún cuando en apariencia quedan completamente descargados. Cuanto más alta sea la tensión y mayor el tiempo de aplicación de la misma tanto mayor será la carga absorbida y tanto más rápidamente reaparecerá.

La absorción dieléctrica es la propiedad del dieléctrico imperfecto, por la cual se produce una acumulación de cargas eléctricas en el cuerpo del material al ser colocado en un campo eléctrico, y se manifiesta, al cargar un dieléctrico, por un crecimiento de la corriente hasta alcanzar el valor de la corriente de conducción permanente. En la descarga, es la corriente que puede circular durante un tiempo más o menos largo con magnitud decreciente antes de que el dieléctrico se haya descargado completamente.

f) Pérdidas y aumento de temperatura

Con corriente continua y tensión constante, la corriente de fuga o pérdidas produce una pérdida de energía infinitesimal. A 230 voltios de corriente continua y 24°C, la corriente de pérdidas de un capacitor de 1 microfarad es del orden de 10^{-5} mA y las pérdidas por ellas causadas, apenas alcanzan a 23 x 10^{-4}mW. No obstante, el mismo capacitor alimentado con 230 voltios de corriente alterna, a una frecuencia de 60 c/seg., tiene una corriente de fuga, en fase con la tensión, del orden de 26 x 10^{-2}mA y sus pérdidas son por lo tanto unos 60 mW. A pesar de que estas pérdidas son del orden de 0,05% y rara vez exceden del 0,6% de la carga total, en VARS, del capacitor, producen un aumento en la temperatura interna del capacitor de 3°C a 5,5°C y en algunos casos críticos pueden alcanzar hasta 17°C. Para la mayoría de los aparatos eléctricos, este incremento de temperatura puede ser perfectamente admisible, pero en el caso de los capacitores la elevación de temperatura interna puede crear condiciones de inestabilidad que conducen a la falla del dieléctrico en pocas horas y en otras ocasiones puede dar lugar a modificaciones químicas pronunciadas que causarán también la falla prematura del capacitor.

Haciendo un resumen de los factores que contribuyen a las pérdidas de un capacitor, tendríamos que ellos son:

1) La fricción molecular en el aislamiento, o sea la pérdida dieléctrica propiamente dicha;
2) La pérdida por absorción, causada por la fricción de iones asociados que tratan de orientarse en el campo eléctrico alternativo;
3) Las pérdidas causadas por la corriente que circula por conductividad de un electrodo a otro;
4) Las pérdidas RI^2 en los electrodos y en las conexiones internas y externas del capacitor;
5) Las pérdidas por corrientes parásitas que circulan por los electrodos.

g) Vida probable de un capacitor

El tiempo que transcurre desde la puesta en funcionamiento del capacitor hasta la falla del dieléctrico del mismo se denomina vida probable del capacitor, la cual es afectada por los siguientes factores:

1) Temperatura ambiente;
2) Tensiones aplicadas;
3) Protección contra humedad;
4) Estabilidad química del dieléctrico; y
5) Variaciones de los materiales y procedimientos de fabricación.

Exceptuando los capacitores cuyos dieléctricos son: un gas inerte, aire o materiales sólidos como la mica, el vidrio o materiales cerámicos, todos los demás se ven grandemente afectados por la temperatura ambiente. Hay variaciones sumamente grandes en la vida probable de un capacitor, y más aún, cuando se comparan varios tipos de capacitores, por lo cual no hay como dar una generalización en lo que respecta a la variación de la vida probable del capacitor con relación a la temperatura, aunque se puede decir, sin temor a equivocarse, que conforme aumenta la temperatura ambiente, la vida probable del capacitor disminuye.

Así mismo la tensión influye mucho en la vida de los capacitores y se puede decir que esta varía en proporción inversa a la tercera y hasta a la quinta potencia de la relación entre la tensión aplicada y la nominal del capacitor.

La humedad es también un factor de importancia en la vida probable de un capacitor, pudiéndose decir que la relación entre la vida de uno herméticamente cerrado y otro no bien cerrado varía entre 10 y 100 veces.

h) Tensión de perforación

Tiene gran importancia, porque de su valor depende la aptitud de un capacitor de soportar sobretensiones y otros fenó

menos transitorios. En capacitores pequeños la tensión de perforación es de 8 a 12 veces la nominal, cuando la tensión nominal es de hasta 100 voltios, pero cuando las tensiones nominales son más elevadas, por ejemplo entre 4 KV y 100 KV, el factor de seguridad disminuye mucho, hallándose en el rango de 2 a 8 veces. Cuando las tensiones nominales son superiores a 100 KV el factor de seguridad puede ser inferior a 2.

Ahora que ya se ha visto en resumen tanto los fundamentos como las propiedades de los capacitores, es conveniente dar una idea, aunque solo general, sobre los tipos de capacitores que se emplean.

La clasificación de los capacitores puede hacerse más fácilmente por medio del tipo de dieléctrico que utilizan y empleando esta base de clasificación podemos decir que los tipos de capacitores son los siguientes:

1) Capacitores cuyo dieléctrico es el vacío, el aire u otro gas.
2) Capacitores con dieléctricos sólidos.
3) Capacitores con dieléctricos líquidos o con impregnación de materias líquidas.

Cada uno de estos tipos puede ser subdividido, dependiendo de la clase de dieléctrico usado.

En lo que al primer grupo se refiere, los varios tipos de capacitores que se construyen son:

a) Capacitores cuyo dieléctrico es el vacío

Tienen una constante dieléctrica baja (1) y se limita a capacidades de hasta 10^{-3} microfarads. Se usa especialmente para aplicaciones de radio. Su vida probable es ilimitada mientras perdure el vacío.

b) Capacitores de aire o de gas

Las constantes dieléctricas del aire y de la mayoría de los gases, en condiciones normales son aproximadamente la unidad, teniendo muy poca variación cuando varían las condiciones de presión y temperatura a la que están sometidos. Su vida probable es prácticamente ilimitada y su mayor aplicación la encuentran en circuitos electrónicos.

En lo que se refiere al segundo grupo tenemos:

a) Capacitores Cerámicos

Este grupo incluye a aquellos capacitores que emplean placas o cuerpos fabricados principalmente con mezclas de óxidos de titanio con otros titanatos. Se obtiene constantes dieléctricas que varían entre 6 y 110, aunque con cerámicas especiales se puede llegar a constantes dieléctricas del orden de 8.000.

También tienen su principal aplicación en circuitos electrónicos. Su vida es prácticamente ilimitada.

b) Capacitores de mica

Gracias a sus excelentes propiedades la mica constituye uno de los dieléctricos más convenientes para capacitores. La constante dieléctrica de las micas usadas para capacitores oscila entre 6 y 6.5. Las principales características de la mica son: a) Muy alta estabilidad química; b) Muy bajas pérdidas. Son muy usados en circuitos electrónicos y de control. Su vida probable oscila entre 10 y 50 años, bajo condiciones normales de operación.

c) Capacitores de papel con impregnación de material sólido

El dieléctrico sólido más usado con el papel como impregnante es el cloruro de naftaleno (Halowax) que tiene una constante dieléctrica de 4.5. La impregnación se efectúa en el vacío con temperaturas de cerca de 110°C. La vida normal de estos capacitores oscila entre 5 y 10 años.

En lo que al tercer grupo se refiere tenemos:

a) Capacitores de aceite:

El aceite de ricino, de clase apropiada para su empleo en capacitores es usado en algunos casos. Con este aceite el

aumento de la capacidad del capacitor es de 4,7 veces respecto a la que él tendría únicamente con aire. El aceite elimina el efecto corona y aumenta la tensión disruptiva de 5 a 10 veces con respecto a la tensión disruptiva en el aire.

La vida probable del capacitor es de más de 20 años.

b) Capacitores de papel con impregnación de líquidos

Los capacitores de papel con impregnación de líquidos son los que se usan como capacitores de potencia. Entre los impregnantes usados se pueden citar:

1) Aceite mineral

En estos capacitores la capacidad puede obtenerse comercialmente dentro de tolerancias de $\mp$ 20% para bajos valores de capacidad y $\pm$ 10% para los valores superiores a 10 microfarads. La vida probable de los capacitores de papel impregnado con aceite mineral varía entre 10 y 20 años. Estos capacitores son adecuados para funcionar a temperaturas ambientes elevadas, hasta 85°C, ya que en tales condiciones poseen baja relación R/X. Las tensiones nominales varían entre 230 y 13.800 V en corriente alterna.

2) Cloruro de difenilo

El cloruro de difenilo tiene una constante dieléctrica de 4,9 y permite una reducción del volumen por microfarad de

aproximadamente un 25% con respecto al aceite mineral cuya constante dieléctrica es 2,2. La vida probable de estos capacitores es de 10 a 20 años.

3) Aceite de ricino

Tiene una constante dieléctrica de 4.7. La vida probable de estos capacitores es de 7 a 9 años.

× CUADRO SINOPTICO DE LA CLASIFICACION DE LOS CAPACITORES

TIPOS DE CAPACITORES

- 1° Capacitores cuyo dieléctrico es el vacío, el aire u otro gas.
  - a) Capacitores cuyo dieléctrico es el vacío.
  - b) Capacitores cuyo dieléctrico es el aire o gas.
- 2° Capacitores con dieléctrico sólido.
  - a) Capacitores cerámicos.
  - b) Capacitores de mica.
  - c) Capacitores de papel con impregnación de material sólido.
- 3° Capacitores con dieléctricos líquidos o con impregnación de materiales líquidos.
  - a) Capacitores de aceite.
  - b) Capacitores de papel con impregnación de líquidos
    - 1° Aceite Mineral.
    - 2° Cloruro de difenilo.
    - 3° Aceite de ricino

1.2. GENERALIDADES SOBRE EL CAPACITOR Y SU CONSTRUCCION

A los capacitores de potencia, que son los que se utilizan para líneas de transporte y aplicaciones industriales se los puede clasificar en dos tipos básicos: el tipo de construcción denominada unitaria y el tipo de construcción denominada de tanque, siendo ambos tipos de capacitores de papel impregnado.

En general, los capacitores de papel que se muestran en las figuras 1-2 y 1-3, se forman con varias capas de papel tipo KRAFT (celulosa de determinadas maderas) con un espesor variable, desde 0,005 a 0,025 mm que separa dos largas láminas metálicas, generalmente de aluminio de 0,0063 mm de espesor. El paquete de láminas y capas de papel se arrolla sobre carretes de diferentes diámetros según las dimensiones deseadas. A veces el elemento del capacitor conserva su forma cilíndrica y en otros casos es achatado. Cuando las láminas son más estrechas que el papel, de modo que sus cantos no sobresalen, las conexiones se efectúan por medio de pequeñas tiras o chapas de cobre estañado colocadas sobre las láminas aproximadamente en la mitad de su longitud. Cuando uno de los bordes de cada lámina sobresale del papel, las conexiones se realizan soldando los hilos de conexión directamente sobre la parte sobresaliente de la lámina. Este último sistema reduce la resistencia ohmica de los electrodos en un factor

que varía de 10 a 2.000, con respecto a la resistencia obtenida en los tipos de láminas no sobresalientes.

FIG. 1.2: Capacitor de papel achatado

FIG. 1.3: Capacitor de papel cilíndrico

El papel utilizado en la fabricación de capacitores contiene normalmente del 4% al 7% de agua, la cual debe ser eliminada en la forma más completa posible, a fin de dar al capacitor las mejores características eléctricas. Esto se consigue secando las secciones de capacitor por medio de una elevación de la temperatura a presiones reducidas. El papel tiene también una gran cantidad de espacios vacíos llenos de aire, el cual debe ser también eliminado para aumentar el valor de la tensión de perforación, lo que se lleva a cabo a presiones de 1 mm de Hg o aún menores. Los espacios vacíos se llenan de inmediato con un dieléctrico líquido, el cual no solamente impide una nueva introducción del aire y humedad, sino que también aumenta la capacidad y la tensión de perforación del capacitor.

1.2.1. Capacitores de construcción tipo unitario

1.2.1.1. Capacitores para bajo voltaje, hasta 660 voltios de valor eficaz

Los capacitores de bajo voltaje, hasta 660 voltios, tipo unitario están compuestos de una serie de pequeños elementos de capacitor que luego de ser embobinados son prensados hasta que queden planos. Posteriormente son ensamblados en recipientes de acero que son luego sellados, a excepción de un pequeño agujero para poner el impregnante. Los elementos que tienen dos hojas o láminas de aluminio con un cierto número de papeles de seda (KRAFT) entre ellos, son secados al vacío y luego impregnados bajo condiciones estrictamente controladas, para que inmediatamente el hueco para poner el impregnante sea sellado. El impregnante que se usa es el cloruro de difenilo, el cual esta libre de partículas significativas de humedad y gas. El cloruro de difenilo que es un líquido no inflamable, tiene una constante dieléctrica de 4,9 la cual es aproximadamente un 200% de la del aceite mineral, de tal manera que se puedan obtener más KVAR por el mismo volumen.

Con este material como impregnante se pueden construir elementos cuyos capacidades varían de 0,05 a 50 microfarads. La reducción de la capacidad con la temperatura es de aproximadamente 0,027% por grado centígrado en el rango de 10°C a 71°C.

Cuando la temperatura baja de 10°C a -18°C, la capacidad disminuye un 25% y a -51°C, la reducción es del 27%. Debido a estos cambios tan repentinos de capacidad, cuando la temperatura baja considerablemente de 10°C, no es conveniente usar estos capacitores en circuitos donde se necesita que la capacidad sea casi constante y la temperatura a la cual van a estar sometidos los capacitores tenga valores muy bajos.

La resistencia de aislamiento para estos capacitores es de 9.000 megaohm por microfarad a una temperatura de 25°C.

Estos capacitores poseen una gran absorción, por lo cual deben ser manejados con cuidado aún después de haberlos descargado, por lo cual como medida de seguridad, se recomienda poner a los capacitores en cortocircuito por medio de un conductor de resistencia despreciable inmediatamente después de haber sido descargados y mantenerlos en esas condiciones durante varios días o hasta que sean nuevamente conectados al circuito.

En condiciones normales de temperatura y tensión, la vida probable de estos capacitores es de 10 a 20 años.

Todos los elementos son conectados en paralelo y cada uno de ellos tiene un fusible individual, de tal manera que cuando un elemento falla, su propio fusible aisla la falla. La operación del fusible no produce ningún daño serio ni al material impregnante ni al capacitor.

Cada unidad tiene un contenido relativamente pequeño de material impregnante libre y por lo tanto, el calor se transfiere al exterior por conducción y radiación.

Las conexiones de los elementos se los saca afuera a bushing terminales, que son montados en el recipiente y están encerrados en una caja terminal. Además de esto, se dispone de aparatos de descarga que están montados así mismo en el exterior del recipiente y también de terminales de tierra.

Las más grandes capacidades (KVAR) se obtienen conectando en paralelo varias unidades standard, lo cual dá la ventaja de la estandarización, la producción en gran escala y también la economía por KVAR nominal.

1.2.1.2. Capacitores para alto voltaje, sobre los 660 voltios de valor eficáz

El diseño básico de estos capacitores es el mismo que para los anteriores, pero hay algunas diferencias.

Para obtener las unidades de alto voltaje, se agrupan los elementos en serie-paralelo, dentro de la misma unidad. Cuando es necesario, especialmente para altísimos voltajes, no solamente los elementos son los que se conectan en serie-paralelo, sino que también los grupos formados por varios de estos elementos conectados en serie-paralelo, son conectados en serie-paralelo.

Los materiales impregnantes usados para este tipo de capacitor son el cloruro de difenilo o el aceite mineral.

Cada unidad o grupo de unidades tiene su fusible propio.

En los capacitores con aceite mineral, se obtiene en un solo elemento capacidades entre 0,0001 y 50 microfarads. El aumento o disminución de temperatura causa una variación en la capacidad. El aumento de la capacidad con la temperatura es de 0,036% por grado centígrado, entre -51°C y -29°C y a partir de este valor el aumento es sólo de 0,0144% por grado centígrado aproximadamente.

La capacidad puede obtenerse comercialmente dentro de tolerancia de ± 20% para bajos valores de capacidad, hasta 10 microfarads y ± 10% para los valores superiores a 10 microfarads.

La resistencia de aislamiento de estos capacitores es de 10.000 megaohm por microfarad, a una temperatura de 25°C.

Estos capacitores impregnados con aceite mineral al igual que los impregnados con cloruro de difenilo tiene una absorción considerable, por lo cual se deben observar las precauciones anteriormente mencionadas.

La vida probable de estos capacitores es de 10 a 20 años en condiciones normales.

Debido a su pequeña variación de la capacidad con la temperatura, los capacitores con aceite mineral son utilizados cuando se desea una capacidad casi constante y la temperatura es variable.

1.2.2. Capacitores de Construcción Tipo Tanque

1.2.2.1. Capacitores para bajo voltaje hasta 660 voltios de valor eficáz

Los elementos usados son similares a aquellos anteriormente descritos, pero tienen una forma cilíndrica y están montados en bastidores o marcos, estando además sumergidos en aceite mineral de alto grado y se ensamblan en tanques robustos de acero.

Aquí también se usan fusibles para los elementos del capacitor y estos fusibles son internos.

La mayor diferencia en el diseño de estos capacitores, en relación con los del tipo unitario es que en los capacitores del tipo tanque hay una gran cantidad de aceite mineral libre y por ende el enfriamiento se realiza principalmente por convección.

1.2.2.2. Capacitores para alto voltaje sobre los 660 voltios de valor eficáz

Las características fundamentales de construcción de este tipo de capacitores son las mismas que para los capaci-

tores tipo tanque para bajo voltaje, siendo la principal diferencia el agrupamiento serie-paralelo de los elementos y cada grupo de elementos así conectados está protegido por su propio fusible.

Se construyen capacitores trifásicos para voltajes de hasta 11 KV; para voltajes más altos es muy usual el método de acomodar las tres fases en tanques separados, debido al hecho de que mientras más alto es el voltaje, mayores son los espaciamientos entre partes conductoras, de tal manera que si las tres fases de un capacitor estuvieran en el mismo tanque, estos capacitores serían muy voluminosos y muy difíciles de manejar.

1.2.3. Generalidades sobre la construcción de los capacitores

Las propiedades de los materiales dieléctricos utilizados, papel e impregnantes se someten a un riguroso control de calidad, tanto antes de la fabricación de los capacitores como durante la misma. Los métodos de elaboración se ajustan a rígidas especificaciones de fabricación.

1.2.3.1. Papel

El papel, elaborado con pulpa de madera de elevado grado de pureza se somete a ensayos para comprobar su uniformidad y compatibilidad con los impregnantes de difenil clorado (cloruro de difenil). Mediante ensayos por descarga eléctrica se determina la uniformidad, es decir, la igualdad de la

estructura y la carencia de partículas conductoras. Para descubrir los puntos débiles se emplean métodos eléctricos y ensayos físicos. La compatibilidad es importante, ya que los difeniles clorados son disolventes muy activos; se hacen pruebas de papel mediante métodos químicos y eléctricos para averiguar si está exento de sustancias iónicas contaminadoras que podrían motivar un aumento de pérdidas y la inestabilidad electroquímica del dieléctrico.

Es en extremo importante la elección del papel para capacitores de alta tensión, pues la celulosa es causante de la mayor parte de las pérdidas inherentes al dieléctrico del capacitor. Después de hacer una elección correcta del papel dieléctrico y controlar cuidadosamente todas las operaciones subsiguientes de fabricación, las características de pérdidas obtenidas con capacitores acabados son como se muestran en la figura 1-4. Dichas características son vitales para asegurar el mantenimiento de la estabilidad térmica durante toda la vida de trabajo prevista.

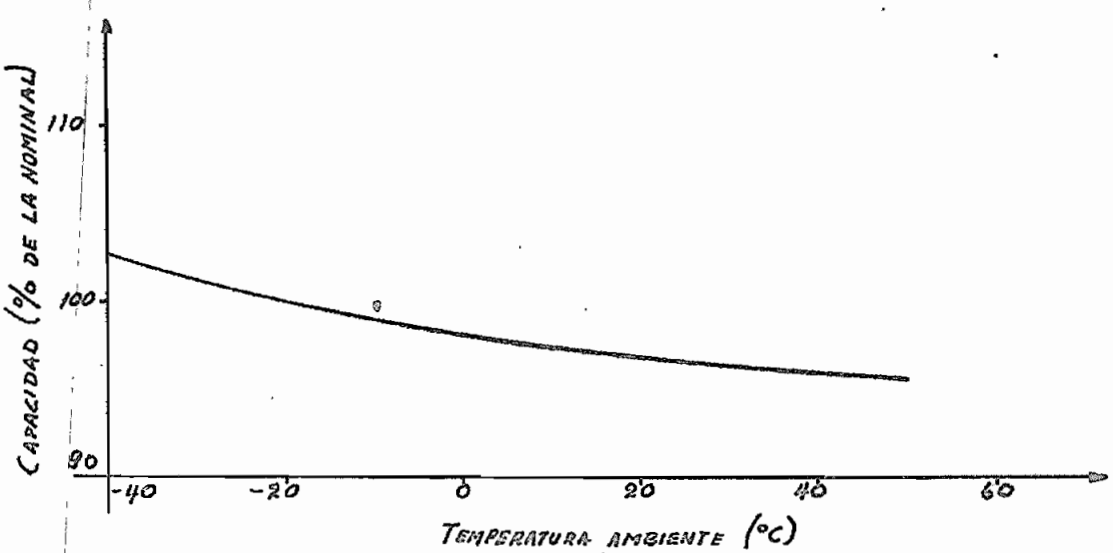


FIG. 1.4a:- Curva característica de capacidad vs. temperatura.

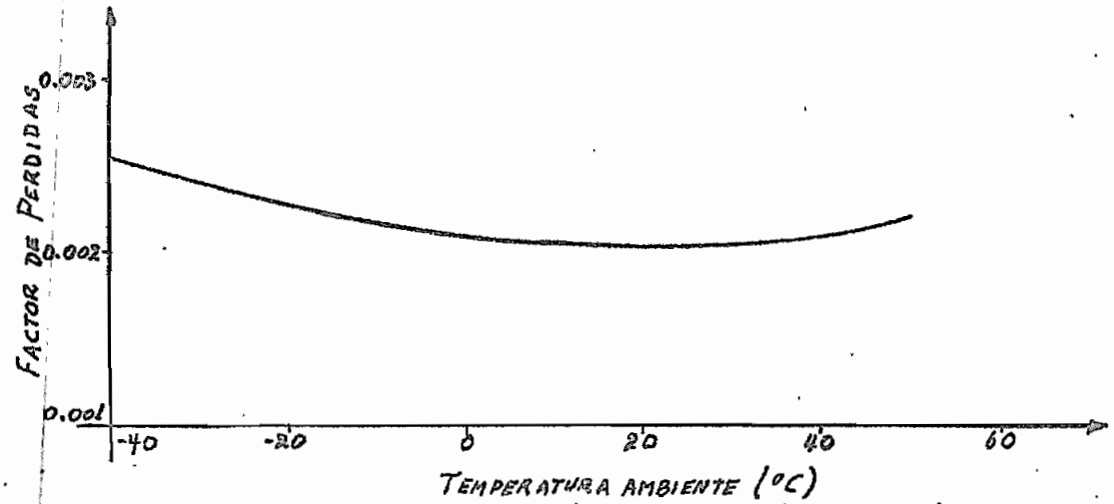


FIG. 1.4b:- Curva característica de factor de pérdidas vs. temperatura.

1.2.3.2. Impregnantes

Los impregnantes se fabrican con el elevado grado de pureza necesario para conseguir óptimas propiedades

001568

eléctricas. Se emplean principalmente dos clases de impregnantes: tricloro difenil y pentacloro difenil, a más del aceite mineral. Los dos primeros tienen una importante ventaja sobre el aceite mineral, que es su elevada constante dieléctrica y cuando se usan en capacitores dan lugar a una reducción de volumen de más del 30%. Los dieléctricos que emplean difenil clorado son sumamente estables electroquímica y térmicamente cuando los capacitores se utilizan con corriente alterna, poseyendo además una elevada resistencia a la ionización. Estas dos últimas propiedades permiten que este tipo de capacitores se haga funcionar con esfuerzos eléctricos notablemente superiores a los permisibles con aceite mineral, siendo nuevos factores que contribuyen a la considerable reducción general de tamaño que es posible conseguir.

Como tanto el pentacloro difenil como el tricloro difenil son polares, es decir, hay temperaturas y frecuencias en las cuales la constante dieléctrica se reduce notablemente y a bajas temperaturas puede producirse una solidificación de los difeniles, con frecuencias industriales, los capacitores impregnados con pentaclorodifenil no deben hacerse funcionar a temperaturas ambiente inferiores a -10°C, pero los impregnados con triclorodifenil pueden funcionar a temperaturas ambiente de hasta -40°C. La figura 1-4a muestra la relación característica de capacidad/temperatura de un capacitor que emplee triclorodifenil.

1.2.3.3. Montaje y Tratamiento

Las bobinas individuales o elementos que forman los componentes básicos del capacitor se montan en serie, en paralelo o en combinaciones de serie y paralelo, como ya anteriormente se dijo, para formar un conjunto que dé la capacidad y el voltaje nominal deseados. Se aplica el aislamiento principal a la cuba y el conjunto se coloca en una caja soldada de acero dulce. La unidad se somete a secado por vacío y a una impregnación en condiciones rigurosamente controladas y entonces se cierra herméticamente la cuba. Finalmente el capacitor se hace pasar por una serie de pruebas físicas y eléctricas.

1.2.3.4. Dispositivos de descarga

Dentro de la cuba se hallan colocadas resistencias de amplias características térmicas, las cuales están permanentemente conectadas entre los terminales del capacitor. El tiempo máximo de descarga para los capacitores de potencia, sea cual fuese la potencia, es de cinco minutos.

1.2.3.5. Terminación

Los capacitores están provistos de uno o dos pasatapas, según el uso al que se los destine. Se usan capacitores con un pasatapa cuando se lo va a utilizar en paralelo con la línea, siempre y cuando se conecte entre una fase y tierra y

con dos pasatapas cuando se lo va a usar en serie con la línea o en paralelo con conexión a dos fases. Así mismo el aislamiento principal de la cuba se gradúa también según la aplicación. Los pasatapas, que son de una pieza de porcelana elaborada por vía húmeda, llevan un cierre hermético en la bobina de montaje y en el casquete del extremo, realizado por un procedimiento especial, patentado por cada casa de fabricación de capacitores, cuya duración sin problemas, tanto en capacitores como en otros equipos, está comprobada.

1.2.3.6. Acabado

Las superficies de la cuba se limpian con un chorro de perdigones, se rocían con cinc y se pintan. El color normal de los capacitores es gris claro, pero pueden ser suministrados en otros colores, de acuerdo a las exigencias de los consumidores. Los elementos de soporte, como pernos, tuercas, etc., son de material no férreo o de acero galvanizado para evitar así la oxidación.

Para mayor facilidad en el montaje y manipulación de los capacitores, la mayoría de las casas fabricantes de estos aparatos acostumbran construirlos con soportes que forman parte integrante de la cuba para mayor seguridad y tienen huecos separados para la elevación y para los pernos de fijación.

1.2.3.7. Fusibles

En general se recomienda el empleo de fusibles exteriores del tipo de expulsión, o del tipo h.r.c. (alta capacidad de ruptura) montándolos próximos al terminal de entrada, ya que el uso de fusibles interiores tiende a deteriorar el dieléctrico, aunque en pequeña escala, cada vez que estos se funden. Las instalaciones a la interperie van provistas de fusibles del tipo de expulsión, en su gran mayoría a no ser que sean necesarios los h.r.c. Esto es necesario ya que en las instalaciones a la interperie, el hombre que inspecciona o hace el servicio de mantenimiento de los capacitores, pueda ver que el fusible ha operado y busque la causa.

1.2.4. Generalidades sobre las características eléctricas de los capacitores

Como en todo equipo eléctrico, un capacitor debe tener una capacidad, voltaje y corriente nominales, por lo que es interesante el conocer dichas características.

1.2.4.1. Capacidad nominal o KVAR nominales

Como a los capacitores se les puede considerar como fuente de potencia reactiva, su capacidad viene dada en KVAR. Las relaciones entre KVAR, corriente, voltaje, etc., vienen dadas por las siguientes ecuaciones:

$$KVAR = Ec\ Ic\ 10^{-3} \qquad (1.2)$$

$$KVAR = Ic^2\ Xc\ 10^{-3} \qquad (1.3)$$

$$KVAR = \frac{Ec^2}{Xc}\ 10^{-3} \qquad (1.4)$$

$$Xc = \frac{10^6}{2\pi fc} \qquad (1.5)$$

En donde:

Ec = Voltaje del capacitor

Ic = Corriente del capacitor

Xc = Reactancia del capacitor

f = Frecuencia

Los capacitores están fabricados de acuerdo a normas muy estrictas; ya sea de la NEMA, los standards británicos, etc. Como ejemplo vale la pena anotar que el Standard Británico 1650 prescribe que la capacitancia nominal esta sujeta a una tolerancia de manufactura que varía desde -0% hasta + 10%.

Para los capacitores en serie, es necesario especificar además de los KVAR nominales, los ohmios nominales (Xc), la corriente normal de carga que va a circular por el capacitor (Ic), el voltaje a través del capacitor bajo condiciones normales de carga (Ec) y el voltaje de línea, ya que los KVAR son los que van a indicar en muchos casos el grado de compensación de la línea, en otros, únicamente la potencia del capacitor; la corriente

nominal de carga es así mismo importante ya que de ella depende la compensación y el capacitor tiene que estar dimensionado para soportar esa corriente sin perjudicar sus características; el voltaje a través del capacitor tiene así mismo su importancia puesto que este es un factor indispensable para el aislamiento de los elementos del capacitor y además porque a la vez es un indicador del grado de compensación que se vá a dar a una línea; el voltaje de línea tiene su importancia para el aislamiento entre las partes vivas del capacitor y su tanque ya que este vá conectando a tierra como medida de seguridad.

1.2.4.2. Corriente nominal

Los capacitores de potencia están diseñados para las siguientes sobrecorrientes: 15% para capacitores de hasta 660 V y 30% para aquellos cuyo voltaje nominal excede los 660 V. Estas sobre corrientes pueden ser causadas por un elevación de voltaje, un incremento en la frecuencia o por la introducción de voltajes no sinusoidales.

Algunos standards prescriben además una condición de sobrecarga (KVAR) por ejemplo, los Standards Británicos prescriben un 30% y la NEMA, un 35% de tal manera que los capacitores de potencia deben ser construídos para poder soportar no sólo las especificaciones en lo que a sobrecorriente se refiere sino también en lo que a sobrecargas se refiere.

1.2.4.3. Voltaje nominal

Los capacitores en serie, durante su funcionamiento están sujetos a dos voltajes, el voltaje de trabajo o sea el voltaje a través de los terminales del capacitor debido al producto Ic Xc y el voltaje del sistema entre las partes vivas del capacitor y tierra; por lo tanto estos capacitores deben ser construídos para ambos voltajes. Vale la pena notar que el voltaje de trabajo durante condiciones normales de funcionamiento, es una fracción del voltaje de línea del sistema al que está conectado.

Los capacitores deben ser capaces de soportar sobrevoltajes, cuyos límites han sido establecidos para frecuencias normales (50 ó 60 c/s), donde no hay transitorios de alta frecuencia, superpuestos; esto quiere decir que el valor de pico del voltaje no debe exceder de 1,41 veces el valor eficaz de voltaje. A continuación se expone una tabla que indica la duración del sobrevoltaje y el valor del mismo.

Estos sobrevoltajes son permisibles sólo si se los aplica un máximo de 300 veces durante la vida del capacitor, pero las condiciones normales de servicio asociadas con el uso regular del capacitor en serie no deben dar lugar a corrientes con exceso de un 150% de la corriente nominal. Estas sobrecargas

son permitidas siempre y cuando el promedio de los voltamperios reactivos del capacitor durante 24 horas no exceda su capacidad nominal.

Cuadro N° 1

Duración Permisible	Factor de multiplicación x el valor eficaz nominal
1 ciclo	4,2
6 ciclos	3,05
15 ciclos	2,6
1 segundo	2,2
15 segundos	1,8
1 minuto	1,7
5 minutos	1,5
30 minutos	1,35

1.2.4.4. Elevación de temperatura

Las pérdidas en los capacitores de potencia son bastante pequeñas, aproximadamente de 2 a 4 vatios por KVAR. Consecuentemente la elevación de temperatura a condiciones normales de operación es también relativamente pequeña; esta elevación varía entre los diversos diseños, pero no excede los 25°C.

Los capacitores de potencia están normalmente diseñados para ser usados a una temperatura media ambiente, medida en 24 horas, de 30°C y una temperatura media en una hora de 40°C. Sin embargo, disminuyendo la capacidad de los capacitores por unidad de volumen, se puede diseñar capacitores para temperaturas medias ambientes más altas.

Los capacitores están diseñados en base de la suposición de que siempre van a trabajar a plena carga. Cuando ellos son usados en un servicio intermitente, traen como consecuencia que los KVAR continuos o promedios sean bajos, pudiendo ser posible operar a dicha unidad a un voltaje más alto.

1.3. Desarrollo de las instalaciones de capacitores en serie

El uso de los capacitores en sistemas de transporte y consumo de energía ha sido muy amplio en los últimos años, especialmente en lo que se refiere a capacitores conectados en shunt o paralelo, en países cuya electrificación ha alcanzado un alto grado de desarrollo, tales como los Estados Unidos, Inglaterra, Canadá, Suecia, Africa, Rusia y Francia, y esta práctica ha proporcionado considerables beneficios tanto a las empresas productoras de energía como a los consumidores.

Durante algún tiempo se viene utilizando los capacitores conectados en serie. La primera instalación de estos

capacitores en serie se efectuó en el Estado de New York, en los Estados Unidos, en 1928. Fuera de los Estados Unidos, sin embargo, los capacitores en serie han venido usándose desde hace sólo pocos años.

El crecimiento de la demanda en los Estados Unidos, trajo hace ya muchos años el problema de transmitir cantidades continuamente crecientes de energía a través de grandes distancias. Este problema ha sido solucionado en muchos casos mediante la introducción de capacitores en serie y una vez que se desarrolló el primer equipo de capacitores en serie para una instalación grande, con el objeto de solucionar los problemas más urgentes, era lógico que se podrían desarrollar equipos para aplicarse en sistemas más pequeños.

En otras partes del mundo han sido encontradas circunstancias similares, aunque no en la misma combinación. En lugares en donde las distancias de transmisión de la energía son grandes el crecimiento de la demanda ha sido relativamente lento y las mayores y más grandes demandas de energía han sido encontradas en países donde las distancias no son grandes y el grado de industrialización ha alcanzado un nivel lo suficientemente alto, tales como Inglaterra y otros países de Europa, en donde los sistemas interconectados han hecho mucho para minimizar el problema de la regulación de voltaje.

El crecimiento de la demanda trae como lógica consecuencia el problema de la transmisión de más energía por las mismas líneas ya existentes y este problema es tanto mayor en países donde el crecimiento industrial tiene características especialmente altas, de tal manera que el crecimiento de la demanda es continuo, lo que trae como consecuencia inmediata los problemas de regulación de voltaje y estabilidad y es aquí donde las instalaciones de capacitores en serie prueban su bondad y llegan a ser extremadamente importantes.

En nuestro país el crecimiento industrial ha sido relativamento lento hasta hace unos pocos años, más con los nuevos programas de desarrollo industrial puestos ya en la práctica el crecimiento de la demanda ha sido bastante grande, especialmente en ciudades como Quito, Guayaquil, en donde ya se ha sentido con cierta importancia los problemas de regulación de voltaje. Más aún con los grandes recursos naturales del país, en el transcurso de pocos años, el crecimiento de la demanda será tal que el país tendrá que pensar en un sistema nacional interconectado para aliviar lor problemas de regulación y estabilidad y allí será cuando el uso de los capacitores en serie llegará a tenerse en cuenta. Es por esta razón que me he decidido a tratar este tema, que a no dudar dentro de pocos años será de actualidad y espero que este trabajo pueda servir de guía para resolver los problemas que se presenten.

APLICACIONES DE LOS CAPACITORES EN SERIE

Para hacer un análisis exhaustivo de las aplicaciones de los capacitores en serie, en sistemas de transporte y de consumo, es necesario dividir el estudio en varios partes:

a) Principios de aplicación;
b) Aplicaciones prácticas;
c) Problemas de aplicación;
d) Protección de los capacitores y su influencia en la protección de la línea.

Cada una de estas partes tiene una importancia decisiva en cuanto a la aplicación en sí se refiere y es imprescindible hacer un desarrollo profundo de cada una de ellas.

2.1. PRINCIPIOS DE APLICACION

A los principios de aplicación se los puede visualizar con mayor facilidad y detalle, separando los principios cualitativos, es decir en esencia, de los principios cuantitativos, es decir, introduciendo ya el uso de fórmulas, porque de esta manera antes de entrar a un análisis matemático detallado, se familiariza uno con las ideas de la aplicación.

2.1.1. Principios cualitativos

La función primordial de un sistema eléctrico es la de generar, transmitir y distribuir la energía eléctrica por él producida de la manera más eficiente posible. En lo que a eficiencia se refiere, hay muchos y muy variados criterios; sin embargo, creo más conveniente adoptar uno, que más adelante probará ser de utilidad. Este criterio es el de la relación de los vatios consumidos por la carga a los voltamperios generados por la fuente.

La máxima relación de eficiencia es teóricamente la unidad y digo teóricamente, puesto que para que ello suceda sería necesario que no hubieran pérdidas en ninguna de las partes constitutivas del sistema de generación, transporte y distribución de energía, además de que el factor de potencia de la carga y del sistema fuesen iguales a la unidad. Esto en la práctica es imposible de conseguir ya que por más bien diseñado que esté el sistema y por mejores que sean las características de la carga, nunca se conseguirán las condiciones anteriormente mencionadas para que la eficiencia sea la unidad.

En circuitos de corriente alterna la inductancia reduce la eficiencia, ya que aumenta la demanda de voltamperios en el generador para una potencia dada consumida por la carga.

En un sistema de generación, transmisión y distribución de energía, la inductancia es un factor que existe en todos los elementos constitutivos del sistema: alternadores, líneas, transformadores y la carga.

Generalmente la autoinducción del alternador es compensada interiormente en el mismo alternador; sin embargo, la inductancia de la carga, incrementa la demanda de voltamperios en el alternador y la inductancia de los sistemas de transmisión y distribución incrementan la demanda de voltaje reactivo, incrementando por ende la demanda de voltamperios en el alternador.

Hay varios métodos disponibles para compensar el efecto de la inductancia en el funcionamiento de un sistema y estos son los siguientes:

1) El voltaje del sistema puede ser elevado ya sea por medio del mecanismo propio de los transformadores, denominado "tap changing" o cambiador de taps, o por medio del uso de reguladores de voltaje.

2) La reactancia inductiva del sistema, puede ser reducida instalando circuitos en paralelo.

3) Las reactancias de la carga y del sistema pueden ser compensadas mediante el uso de capacitores en paralelo, capacitores sincrónicos, adelantadores de fase o capacitores en serie.

Esta tesis discutirá y tratará de establecer un campo de aplicación definido para los capacitores en serie, completamente distinto de cualquier otro método de compensación de la inductancia.

La inductancia cuyo origen puede estar tanto en el circuito de alimentación como en el circuito de carga, puede en principio, ser compensada por la conexión de capacitores en serie o en paralelo en puntos adecuados. En general los voltamperios adelantados, tomados por estos aparatos no exceden a la componente reactiva retrazada de la parte del sistema a la cual el aparato es conectado. Así la compensación del sistema de alimentación y de carga tienen normalmente procedimientos separados, aunque en algunos casos especiales, puede ser permisible compensar parte de la inductancia de la carga por medio de una sobre compensación de la inductancia del sistema de alimentación o viceversa.

Los aparatos conectados en paralelo son de gran valor para reducir la corriente reactiva que circula por el sistema de alimentación, mejorando por lo tanto la eficiencia. La reducción de la corriente reduce la pérdida de voltaje en el sistema de alimentación, elevando por lo tanto el nivel de voltaje en los terminales receptores. También mediante una sobrecompensación de

la inductancia en el lado de alimentación desde el punto de conexión y el aparato conectado en paralelo se obtendrá un incremento posterior de voltaje. Este incremento depende considerablemente de la corriente tomada por la carga, de tal manera que alguna forma de control sensitiva al voltaje es necesario para capacitores en paralelo. La sobre compensación de la inductancia de la carga incrementa la posibilidad de inestabilidad, como se verá más adelante y es así que la sobre compensación debe ser empleada con precaución.

En contraste con los aparatos conectados en paralelo, los aparatos conectados en serie no reducen significativamente la demanda de corriente reactiva en los alternadores, sino que más bien reducen la demanda de voltaje reactivo y es así que, cuando el principal problema es el de variación de voltaje de la carga y la estabilidad del sistema, el aparato conectado en serie tiene su aplicación lógica y es más efectivo. El bajo costo de mantenimiento y la economía de capital hacen que el capacitor sea evidentemente aceptable para la compensación en serie.

Por muchos años se ha venido usando con éxito los capacitores en serie para reducir el parpadeo o "flicker" en los circuitos de distribución. En estos sistemas el capacitor actúa como un regulador de voltaje que responde instantáneamente

Este parpadeo debido a fluctuaciones de la carga, causado ya sea por hornos de arco, soldadoras eléctricas y motores, es eliminado. En esta situación que es de especial importancia, en la que una gran fluctuación de corriente de carga es abastecida a través del sistema de alimentación y además en la que la corriente tiene una componente reactiva relativamente alta, el uso de capacitores conectados en serie, los cuales compensan exacta y expontáneamente dichas fluctuaciones sin la necesidad de usar taps, dá la solución más satisfactoria a los problemas de regulación de voltaje.

Estando en serie con el sistema de transmisión o distribución, el voltaje introducido por el capacitor, adelanta a la corriente en 90°, es proporcional a la magnitud de la corriente y es opuesta a la caída de voltaje inductiva del circuito. Cualquier cambio de la corriente de carga causa un cambio en el voltaje compensador actuando el capacitor como un regulador instantáneo de voltaje ya que entra en operación sin necesitar ningún equipo de control.

Por otra parte, el regulador de voltaje tipo inducción, o el del tipo de pasos, no puede responder tan rápidamente a fluctuaciones repentinas de la carga, debido a que la caída de voltaje en sí es usada para iniciar la operación del regulador,

es decir el regulador tiene un retraso de tiempo para entrar en operación. En lo que a capacitores en paralelo se refiere, aunque ellos estén operados automáticamente, la potencia reactiva adelantada, por ellos tomada, no puede ser ajustada lo suficientemente rápido como para reducir el parpadeo debido a rápidas fluctuaciones de la carga.

En resumen, hasta aquí se han fijado dos campos de aplicación para los capacitores en serie, en los que su uso está plenamente justificado tanto por el bajo costo inicial que los capacitores tienen como por el bajo costo de mantenimiento; estos campos son:

a) Como reguladores instantáneos de voltaje;
b) Como reductores del parpadeo debido a rápidas fluctuaciones de carga.

Cabe anotar aquí, que para el primer campo de aplicación existen otros equipos de regulación, como los reguladores tipo inducción y los reguladores tipo de pasos, pero, estos son equipos más caros y cuando se necesita una regulación instantánea no son convenientes. En lo que al segundo campo de aplicación se refiere, el capacitor en serie es el medio más económico y eficaz de corrección del parpadeo.

Insistiendo en lo que a regulación instantánea se refiere, es conveniente indicar que los capacitores en serie tienen efectos correctivos más alla del punto de aplicación de ellos en el sistema. En el caso de que algunos alimentadores estén conectados a las mismas barras de una subestación, fluctuaciones rápidas y repetidas de la carga en cualquier circuito causarían variaciones de voltaje en todos los alimentadores. En este caso el capacitor en serie debería ser instalado en el circuito que alimenta la carga fluctuante, antes de la subestación, para retirar o evitar las fluctuaciones de voltaje en las barras de la misma.

Una aplicación más de los capacitores en serie, es que si la corriente de carga está atrasada con respecto al voltaje, como normalmente sucede, es posible obtener un aumento de voltaje en el lado de carga, incrementando la reactancia del capacitor en serie, sobre la reactancia de la línea, es decir ocasionando una sobrecompensación de la reactancia de la línea para compensar parte de la reactancia de la carga. Sin embargo, como ya se indicó esta medida debe adoptarse con precaución pues puede dar lugar a condiciones de inestabilidad en el sistema.

Sin embargo, los capacitores en serie no pueden ser considerados como hasta el presente punto se lo hecho como meros

reguladores de voltaje, ya que ellos pueden ser también usados para incrementar la capacidad de transmisión de energía a través de las líneas de transmisión.

Las objeciones que se oponían al uso de capacitores en serie, en el sentido de que ellos modificaban las características del circuito de transmisión, están desapareciendo ya que problemas tales como la protección contra sobrecorrientes y sobrevoltajes, el efecto de ferroresonancia con los transformadores, el "hunting" de los motores sincrónicos, etc. han sido resueltos satisfactoriamente.

Resumiendo las aplicaciones de los capacitores en serie, podemos decir que las principales y más importantes son las siguientes:

a) Para disminuir la impedancia de la línea de enlace entre dos centrales generadoras, o en un sistema cualquiera, compensando parte de la reactancia de la línea y mejorando por lo tanto la estabilidad del sistema.

b) Para balancear la reactancia de dos o más circuitos paralelos produciendo la repartición de carga deseada entre ellos. Un capacitor en serie instalado en un circuito con una gran reactancia inductiva puede asegurar la di-

visión de la carga en proporción a la capacidad de transporte de corriente de cada alimentador.

c) El capacitor en serie decrece la reactancia total del circuito, mejorando así mismo la regulación de voltaje del sistema.

d) Mejoramiento del factor de potencia de la carga, cuando está conectada en serie con ella.

e) Reducción del parpadeo o "flicker" debido a rápidas fluctuaciones de la carga.

Antes de examinar el comportamiento del capacitor en serie bajo el aspecto cuantitativo de sus efectos en los diferentes campos de aplicación, es necesario recalcar que el capacitor en serie goza con respecto a cualquier otro medio hasta hoy usado para el mismo efecto de una superioridad neta por el hecho de ser autoregulable, es decir su regulación es contínua e inmediata es la respuesta. Tan importante y a la vez determinante superioridad, por ejemplo cuando se toma carga rápida y continuamente oscilante, se agrega a aquellas peculiaridades del capacitor estático como son: mínimas pérdidas, mínimos gastos de mantenimiento, simplicidad de instalación con la posibilidad de dividir la potencia a instalar ya sea en lo que a tamaño se refiere o en lo que a tiempo de instalación se refiere.

2.1.2. Principios cuantitativos

Ahora si se pueden ver con detalle cada una de las aplicaciones de los capacitores en serie, para poder determinar cuando es conveniente su uso y cuando no lo es.

2.1.2.1. Mejoramiento de la Estabilidad

Antes de entrar a la aplicación del capacitor en serie para el mejoramiento de la estabilidad, vale la pena hacer un pequeño estudio acerca de lo que es la estabilidad de un sistema.

La tendencia de un sistema de potencia o de sus partes para desarrollar fuerzas tendientes a mantener el sincronismo y el equilibrio se conoce con el nombre de estabilidad.

Para efectuar el estudio consideremos un motor sincrónico conectado a través de un transformador a una fuente de energía. Como posteriormente se verá, la potencia entregada al motor depende del voltaje de la fuente, del voltaje interno del motor y del ángulo entre estos dos voltajes, siendo éste ángulo dependiente de la posición del rotor del motor. Ahora bien, la potencia entregada al motor cuando éste está en funcionamiento a una velocidad constante, es igual a la potencia entregada por el motor a la carga, más las pérdidas en él. Si la carga

mecánica aplicada al motor se incrementa, éste no puede sostener toda la carga a no ser que también la potencia eléctrica entregada al motor se incremente. Por lo tanto si esto no sucede, el motor disminuye su velocidad, con lo cual el ángulo de fase entre el voltaje interno del motor y el voltaje del sistema se incrementa hasta que la potencia eléctrica suministrada al motor iguala a la potencia entregada por el motor a la carga, más las pérdidas en él. Mientras el ángulo está incrementándose, el exceso de potencia requerida por el motor, sobre la potencia eléctrica a él suministrada, es alimentada por medio de la energía cinética almacenada en las partes rotativas del motor; así, mientras la velocidad disminuye, la energía almacenada alimenta parte de la carga. Si el motor oscila alrededor del nuevo punto de equilibrio, y eventualmente queda en reposo, la aplicación de la carga no ha hecho que el motor pierda su estabilidad. Si el incremento de la carga es demasiado grande o repentino, el motor puede perder su sincronismo, en cuyo caso se dice que ha excedido el límite de estabilidad. Si el incremento de la carga es demasiado grande o repentino, el motor puede perder su sincromismo, en cuyo caso se dice que se ha excedido el límite de estabilidad. Si la reactancia de la línea o del transformador conectado entre la fuente y el motor es incrementada, la posibilidad de mantener la estabilidad disminuye, como se verá más adelante.

Los términos estabilidad y límite de estabilidad están definidos en "American Standard Definitions of Electrical Terms", publicada por el Instituto Americano de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE), como sigue:

Estabilidad.- Cuando este término es usado con referencia a un sistema de potencia, es aquél atributo del sistema o parte del sistema, que lo capacita para desarrollar fuerzas restauradoras entre sus elementos, iguales o mayores que las fuerzas perturbadoras, de tal manera que se puede restaurar un estado de equilibrio entre los elementos.

Límite de Estabilidad.- Es el máximo flujo posible de potencia a través de un punto particular del sistema, cuando todo el sistema o parte de él, a la cual el límite de estabilidad se refiere, está operando con estabilidad.

Los términos estabilidad y límite de estabilidad son aplicados tanto a condiciones de estado estable, como a condiciones transitorias. El límite de estabilidad en estado estable se refiere al máximo flujo de potencia a través de un punto, sin la pérdida de estabilidad cuando la potencia es incrementada gradualmente. El límite de estabilidad en estado transitorio, se refiere al máximo flujo de potencia a través de un punto sin la pérdida de estabilidad cuanto ocurre una perturbación súbita.

La perturbación transitoria puede ser un súbito incremento de la carga, la cual podría ser aceptada sin perder la estabilidad al ser aplicada gradualmente, causando la pérdida de la misma la rapidez de su aplicación. A menudo, la perturbación para la cual se desea conocer el límite transitorio de estabilidad, es aquella causada por una falla o por la desconexión del circuito de una de varias líneas en paralelo, o por una falla y su subsecuente aislamiento por medio de la desconexión de la parte fallosa del sistema. Debido a que cada sistema está sujeto a perturbaciones transitorias y debido a que el límite transitorio de estabilidad es casi siempre menor que el límite de estabilidad en estado estable, la estabilidad en estado transitorio es la que más importancia tiene y por lo tanto es necesario hacer un análisis separado de los límites de estabilidad en estado estable y en estado transitorio para sacar conclusiones más claras.

2.1.2.1.1. El límite de estabilidad en estado estable y la influencia que sobre él tiene la inserción de capacitores en serie en el circuito

Para condiciones estables el circuito equivalente de un sistema de dos máquinas es considerado como una simple red de dos pares de terminales. El voltaje emisor o de salida es el voltaje detrás de la reactancia sincrónica del gene-

rador y el voltaje receptor es el voltaje detrás de la reactancia sincrónica del motor, esto para condiciones de estado estable.

Para ilustrar los factores de los que depende la estabilidad, se puede adoptar un esquema sencillo, como el de la figura 2.1.

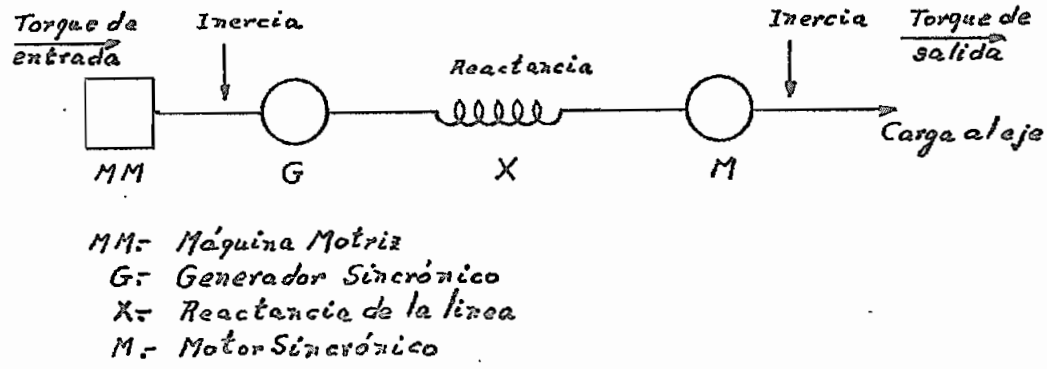


FIG. 2.1:- Esquema básico para el estudio del problema de la estabilidad entre dos máquinas.

Hay siete factores que afectan a la estabilidad, siendo estos factores de dos clases: mecánicos y eléctricos. Los factores mecánicos son:

1. Torque de entrada al accionador
2. Inercia del accionador y del generador
3. Inercia del motor y de la carga a él conectada
4. Torque de salida a la carga

Los factores eléctricos son:

1. Voltaje interno del generador sincrónico.
2. Reactancia del sistema, incluyendo la reactancia sincrónica del generador, la reactancia de la línea y la reactancia sincrónica del motor.
3. Voltaje interno del motor sincrónico.

Para entender mejor el funcionamiento del sistema eléctrico adoptado, es conveniente hacer uso de los diagramas de círculo de potencia y de los diagramas de potencia, versus ángulo de desfasamiento entre los voltajes internos del generador y del motor. El diagrama de círculo de potencia puede obtenerse de la siguiente manera:

Supongamos una red de dos pares de terminales como la representada en la figura 2.2.

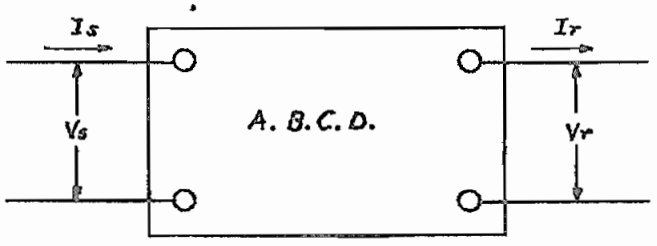


FIG. 2.2:- Diagrama representativo de una red de dos pares de terminales.

Aplicando la teoría de las constantes generalizadas, se puede obtener las siguientes ecuaciones vectoriales:

$$Vs = AVr + BIr \qquad (2.1)$$

$$Vr = DVs - BIs \qquad (2.2)$$

En el presente desarrollo, las constantes generalizadas van a tener los siguientes valores:

$$A = \bar{A} \angle \alpha$$
$$B = \bar{B} \angle \beta \qquad (2.3)$$
$$D = \bar{D} \angle \Delta$$

La ecuación 2.1, de acuerdo a los valores dados en las igualdades 2.3, dá lugar a un diagrama vectorial como el de la figura 2.3.

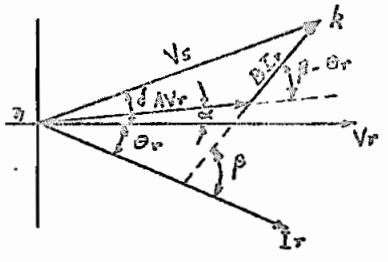


FIG. 2.3.- Diagrama vectorial de una red de dos pares de terminales, entregando una corriente de carga Ir.

Todos los vectores en este diagrama son voltajes con excepción del vector Ir, y puesto que lo que nos interesa es la po

tencia, tenemos que multiplicar todos los vectores de la figura 2.3 por la corriente. Ahora bien, es necesario explicar que se pueden obtener los diagramas de círculo de potencia, el uno para los términales receptores y el otro para los terminales emisores, los cuales en conjunto dan el diagrama general de círculo de potencia para todo el sistema. A partir de la ecuación 2.1 y del diagrama vectorial de la figura 2.3, se obtiene el diagrama de círculo de potencia para los terminales receptores, y puesto que la cantidad que nos interesa encontrar es la potencia en los terminales receptores, es necesario multiplicar todos los vectores de la figura 2.3 por una cantidad que tenga magnitud de corriente, pudiendo escoger para el efecto el vector Vr/B, el cual tiene dimensiones de corriente como se puede deducir del diagrama vectorial de la figura 2.3. Ahora bien el producto del vector Vr/B por el vector BIr, que tiene magnitud de voltaje, dá el vector VrIr, el cual es la potencia en los terminales receptores de la red de dos pares de terminales.

El resultado de la multiplicación de todos los vectores de la figura 2.3 por el vector corriente Vr/B, se puede examinar de la siguiente manera:

Puesto que el vector de referencia en la figura 2.3, es Vr, su ángulo de fase es 0° y el vector Vr/B está desplazado del vector de referencia por un ángulo $-\beta$, ya que:

$$\frac{\bar{V}r}{\bar{B}}\frac{/0^{\circ}}{/\beta} - \frac{\bar{V}r}{\bar{B}}/-\beta \qquad (2.4)$$

Por lo tanto la multiplicación de los vectores de voltaje en la figura 2.3 por el vector Vr/B, desplaza a todos los fasores y al diagrama entero un ángulo $-\beta$. El resultado es el diagrama vectorial de la figura 2.4.

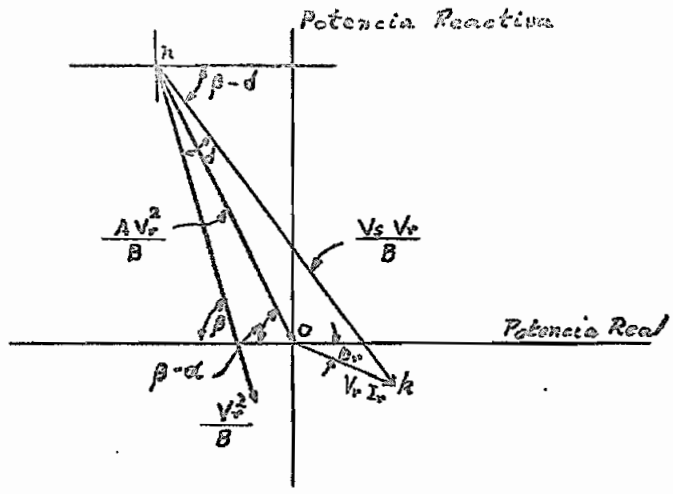


FIG. 2.4 - Diagrama de potencia en los terminales receptores. La potencia reactiva tomada por una carga inductiva está dibujada debajo del eje horizontal.

En este nuevo diagrama el vector VrIr está localizado a un ángulo θ_r debajo de la horizontal, ya que el vector VrIr es el producto BIr a un ángulo $\beta-\theta_r$ y el vector Vr/B a un ángulo $-\beta$.

Puesto que el vector VrIr intersecta al eje horizontal con un ángulo igual al que existe entre la corriente y el voltaje, la componente horizontal del vector VrIr es la potencia real, y la componente vertical es la potencia real, y la componente vertical es la potencia reactiva.

En la construcción de la figura 2.4, se supone que la corriente está retrazada con respecto al voltaje, por lo cual la carga se supone que es inductiva, y en el diagrama la potencia reactiva tomada por la carga inductiva es negativa; pero la mayoría de los ingenieros no están de acuerdo en que la potencia reactiva tomada por una carga inductiva sea considerada como negativa, por lo cual el IEEE adoptó una regla por la cual la potencia tomada por una carga inductiva sea considerada como positiva, mientras que la tomada por una carga capacitiva sea considerada como negativa. Con esta explicación, para que el diagrama vectorial de la figura 2.4 esté de acuerdo con la regla dada por el IEEE, es necesario hacerlo girar un ángulo de 180°, con lo cual se obtiene el diagrama de la figura 2.5.

Como Vr y Vs son constantes, el punto N, que no depende de la corriente Ir, no cambiará de posición, mientras Vr sea constante. Además la distancia del punto N al punto K es constante, mientras los valores de Vr y Vs sean constantes.

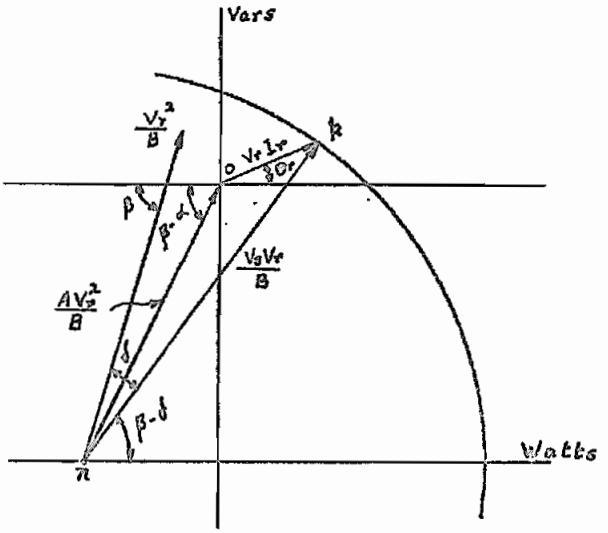


FIG. 2.5.- Diagrama de potencia en los terminales receptores, resultado de la rotación del diagrama de la figura 2.4.

Por lo tanto como la distancia del punto O al punto K cambia conforme cambia la carga, el punto K debe moverse en un círculo cuyo centro está en el punto N, ya que el punto K debe permanecer a una distancia invariable del punto fijo N.

Lo mismo que se ha hecho para los terminales receptores se puede hacer para los terminales emisores, a partir de la fór-

mula 2.2 y de la igualdad 2.3, más como el procedimiento es exactamente el mismo no creo que valga la pena alargarse más, y más bien es conveniente dibujar directamente el diagrama de círculo de potencia para los terminales emisores, lo que se ha hecho en la figura 2.6.

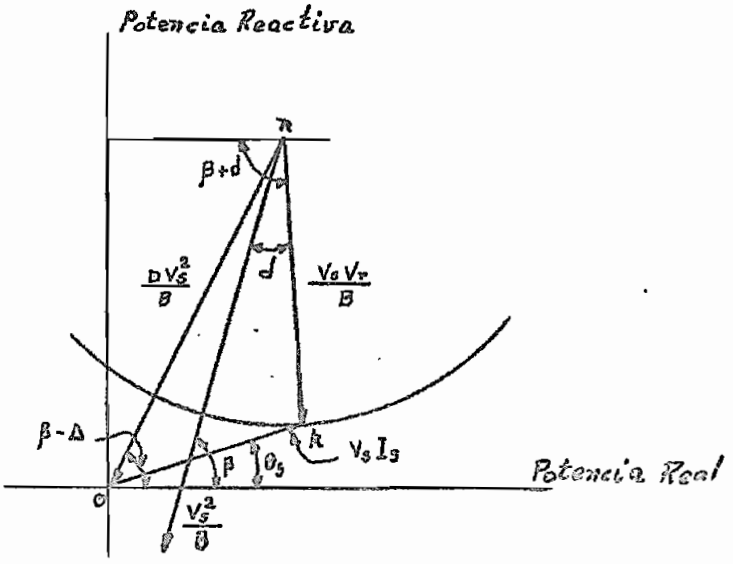


FIG. 2.6.- Diagrama de potencia en los terminales emisores, obtenido de una manera similar al de la figura 2.5.

Tanto en la figura 2.5 como en la 2.6 se puede ver que las únicas variables son la corriente Ir e Is, y por ende también el ángulo α, que es el ángulo entre los voltajes emisor

y receptor, según está indicado en la figura 2.3. Este ángulo δ se denomina ángulo de torque.

De la figura 2.6 se puede deducir que la potencia suministrada a la red viene dada por la fórmula:

$$Ps = -\frac{\bar{V}s\,\bar{V}r}{\bar{B}}\cos(\beta+\delta) + \frac{\bar{D}\,\bar{V}s^2}{\bar{B}}\cos(\beta-\Delta) \qquad (2.5)$$

Por lo tanto, como en esta fórmula δ es la única variable, la máxima potencia entregada a la red tiene lugar cuando $\beta + \delta = 180°$, y por ende:

$$Ps\ máx = \frac{\bar{V}s\,\bar{V}r}{\bar{B}} + \frac{\bar{D}\,\bar{V}s^2}{\bar{B}}\cos(\beta-\Delta) \qquad (2.6)$$

Ahora bien, hay un límite en la cantidad de potencia que puede ser transmitida a través de una red con valores fijos de voltaje emisor y receptor, como se lo puede ver de la figura 2.5. Según esta figura la carga puede ser incrementada hasta que el punto K esté en la intersección del círculo con la línea horizontal trazada desde el punto N. Esta posición del punto K representa la máxima potencia que puede ser recibida para aquellos voltajes Vr y Vs, para los cuales el círculo fue dibujado. De hecho, esta potencia que se la conoce con el nombre de límite de estabilidad en estado estable, si la carga es una máquina

sincrónica, puede ser recibida sólo si la carga es incrementada gradualmente.

Para un ángulo de torque dado, la potencia recibida en los terminales receptores puede ser deducida de la figura 2.5, obteniéndose la siguiente fórmula:

$$Pr = \frac{\bar{V}s\ \bar{V}r}{\bar{B}} \cos(\beta - \delta) - \frac{\bar{A}\ \bar{V}r^2}{\bar{B}} \cos(\beta - \alpha) \qquad (2.7)$$

Siempre y cuando los voltajes Vr y Vs sean constantes, la única variable que existe en la ecuación 2.7, es el ángulo de torque y por ende la máxima potencia que puede ser recibida tendría lugar cuando $\beta = \delta$ y por lo tanto:

$$Pr\ máx = \frac{\bar{V}s\ \bar{V}r}{\bar{B}} - \frac{\bar{A}\ \bar{V}r^2}{\bar{B}} \cos(\beta - \alpha) \qquad (2.8)$$

Lo mismo que hasta aquí se ha visto puede ser aplicado al sistema de dos máquinas sincrónicas como el mostrado en la figura 2.1 y las ecuaciones 2.5 a 2.8, darán ya sea la potencia recibida por el motor para un ángulo de torque dado, o la máxima potencia recibida por el motor, o la potencia suministrada por el generador para un ángulo de torque dado, o la máxima potencia suministrada por el generador a la red, si los voltajes internos de las máquinas, o sea los voltajes detrás de las reactan-

cias sincrónicas, reemplazan a los voltajes $\bar{V}s$ y $\bar{V}r$, y si además las constantes generalizadas de la red incluyen las reactancias sincrónicas de las máquinas y la red que las une. Así si reemplazamos $\bar{E}g$ por $\bar{V}s$ y $\bar{E}m$ por $\bar{V}r$, las ecuaciones 2.5 a 2.8 quedan como sigue:

$$Pgen = -\frac{\bar{E}g\,\bar{E}m}{\bar{B}}\,\cos(\beta+\delta) + \frac{\bar{D}\,\bar{E}^2 g}{\bar{B}}\,\cos(\beta-\Delta) \qquad (2.5a)$$

$$Pgen\ máx = \frac{\bar{E}g\,\bar{E}m}{\bar{B}} + \frac{\bar{D}\,\bar{E}^2 g}{\bar{B}}\,\cos\,(\beta-\Delta) \qquad (2.6a)$$

$$Pmot = \frac{\bar{E}g\,\bar{E}m}{\bar{B}}\,\cos(\beta-\delta) - \frac{\bar{A}\,\bar{E}m^2}{\bar{B}}\,\cos(\beta-\alpha) \qquad (2.7a)$$

$$Pmot\ máx = \frac{\bar{E}g\,\bar{E}m}{\bar{B}} - \frac{\bar{A}\,\bar{E}^2 m}{\bar{B}}\,\cos(\beta-\alpha) \qquad (2.8a)$$

Los dos diagramas de círculo dibujados en las figuras 2.5 y 2.6, pueden ser transformados en uno sólo en el que se dibuja conjuntamente el diagrama de círculo de potencia para los terminales emisores y para los receptores, como se puede ver en la figura 2.7.

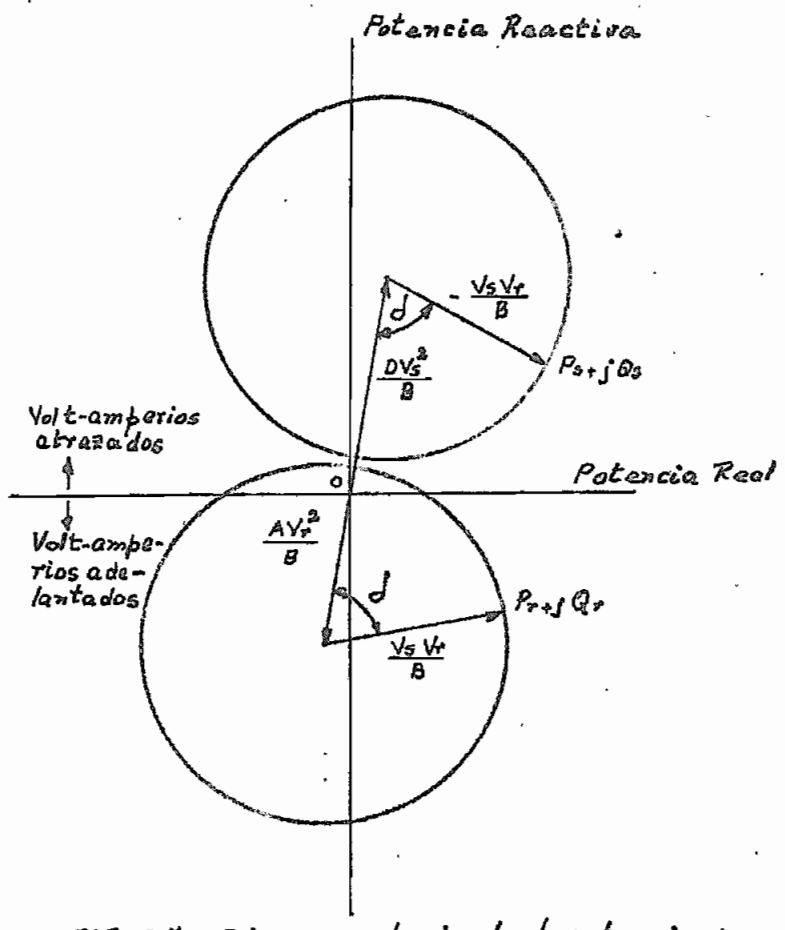


FIG. 2.7.- Diagrama de circulo de potencia para lineas de transmisión cortas.

Ahora bien, si se desprecia la resistencia y por ende las pérdidas que existen en un sistema práctico el diagrama de la figura 2.7 se transforma en aquel de la figura 2.8.

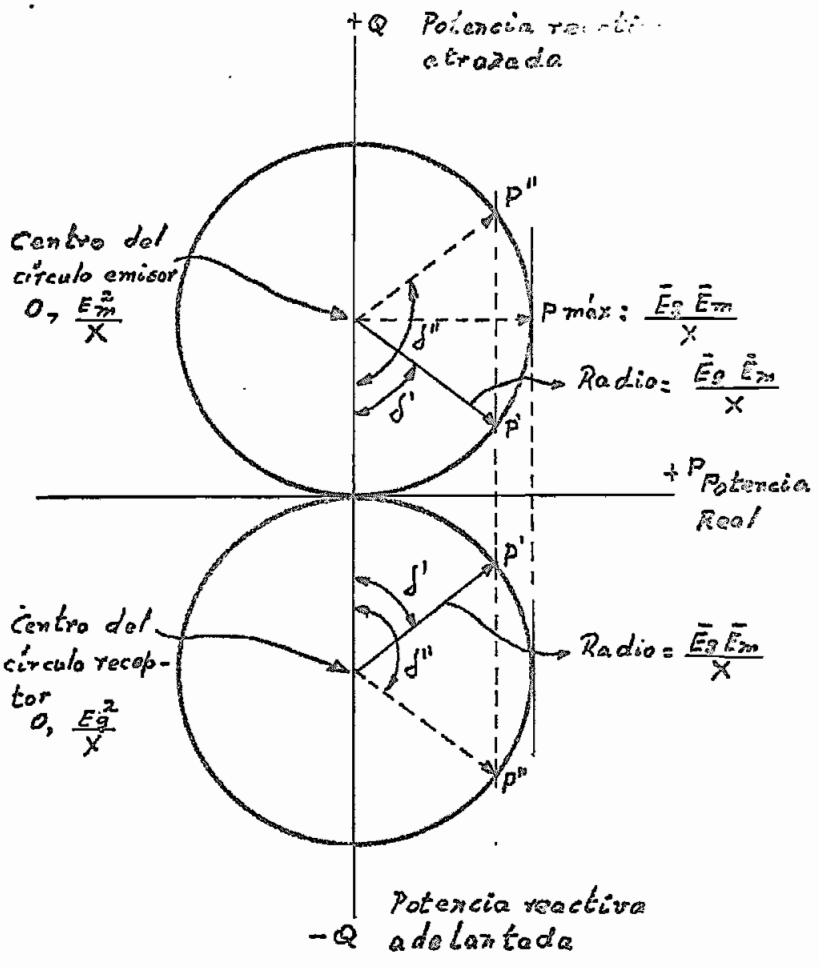


Fig. 2.8: Diagrama elemental de círculo de potencia.

A partir del diagrama de círculo mostrado en la figura 2.8 facilmente se puede obtener el denominado diagrama de ángulo de torque versus potencia, el cual está representado en la figura 2.9.

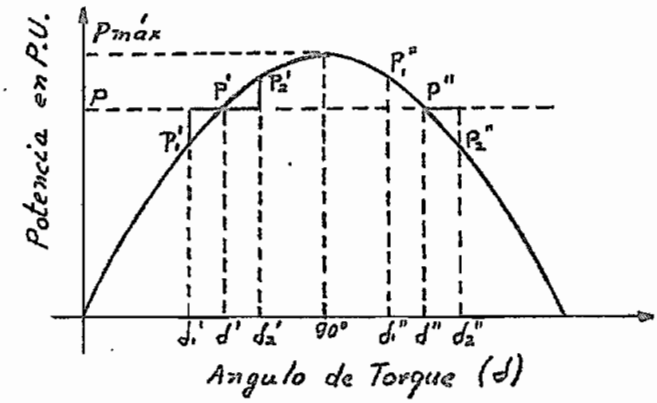


FIG. 2.9.- Diagrama elemental de ángulo de torque vs. potencia.

En base de estos dos últimos diagramas se pueden obtener rápidamente las características de funcionamiento de un sistema simple de transmisión como el mostrado en la figura 2.1.

La ecuación de la potencia transferida en un sistema trifásico puede ser desarrollada a partir de las ecuaciones 2.5a y 2.7a, mientras que la ecuación para obtener la máxima potencia transferida puede obtenerse a partir de las ecuaciones 2.6a y 2.8a, lo cual se realizará a continuación, con la ayuda del diagrama de círculo de la figura 2.8 en el que se ha despreciado la resistencia.

Cuando se desprecia la resistencia, el diagrama de secuencia positiva para un sistema de dos máquinas es el mostrado en la figura 2.10, en donde X incluye las reactancias del generador del motor y de la línea que los une.

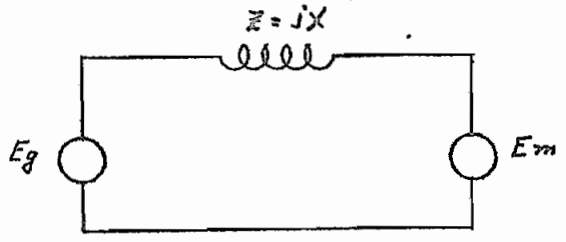


FIG. 2.10 :- Diagrama de impedancia de secuencia positiva para un sistema de dos máquinas.

Puesto que la resistencia del sistema se ha despreciado y que al circuito o línea que une a las dos máquinas se la considera como una línea de transmisión corta, las constantes generalizadas del circuito son:

$$A = 1 \angle 0^\circ$$
$$B = \bar{X} \angle 90^\circ$$
$$D = 1 \angle 0^\circ \qquad (2.9)$$

Reemplazando estas igualdades en las ecuaciones 2.5a y 2.7a se tiene que:

$$Pgen = -\frac{\bar{E}g\ \bar{E}m}{\bar{X}} \text{ Cos } (90 + \delta) + \frac{\bar{E}g^2}{\bar{X}} \text{ Cos } (90 - 0)$$

$$Pgen = +\frac{\bar{E}g\ \bar{E}m}{\bar{X}} \text{ Sen } \delta \qquad (2.10)$$

$$Pmot = \frac{\bar{E}g\ \bar{E}m}{\bar{X}} \text{ Cos } (90 - \delta) - \frac{\bar{E}m^2}{\bar{X}} \text{ Cos } (90 - 0)$$

$$Pmot = \frac{\bar{E}g\ \bar{E}m}{\bar{X}} \text{ Sen } \delta \qquad (2.11)$$

De una comparación de las ecuaciones 2.10 y 2.11 se puede ver facilmente que la potencia generada es igual a la potencia recibida por el motor en ausencia de pérdidas y a esta potencia se la denomina potencia transferida, es decir que la ecuación para dicha potencia es:

$$P = \frac{\bar{E}g\ \bar{E}m}{\bar{X}} \text{ Sen } \delta \qquad (2.12)$$

Ahora bien, a partir de las ecuaciones 2.6a y 2.8a, se puede obtener la ecuación para calcular la máxima potencia transferida, la cual se realizará con mayor facilidad a partir de la ecuación 2.12, ya que suponiendo que los voltajes permanezcan constantes al igual que la reactancia, la única variable es δ, y la potencia transferida entre las dos máquinas será máxima cuando Sen δ sea la unidad y por lo tanto $\delta = 0°$, de tal manera que la máxima potencia transferida sería:

$$Pmax = \frac{\bar{E}g\ \bar{E}m}{\bar{X}} \qquad (2.13)$$

Continuando con el estudio de la estabilidad, es necesario establecer un criterio único para la determinación de las condiciones necesarias e imprescindibles para que exista estabilidad. Este criterio puede ser definido así:

"Un sistema de transmisión de energía operando bajo condiciones específicas de carga transmitida es estable cuando al ser desplazado de esas condiciones por cualquier fuerza arbitraria pequeña, el sistema luego de anular dicha fuerza crea o desarrolla fuerzas restauradoras tendientes a hacer que el sistema regrese a las condiciones iniciales de operación".

La aplicación, tanto de este criterio de estabilidad, como la definición de estabilidad en conexión con el sistema de la figura 2.1, va a ser de gran utilidad en el presente estudio en conexión con las figuras 2.8 y 2.9, las cuales muestran las soluciones obtenidas para los puntos correspondientes a la potencia P' a un ángulo δ' y también a la potencia P" a un ángulo δ''.

Aplicando el criterio de estabilidad, supongamos que el sistema está sujeto a una pequeña reducción en el ángulo entre los voltajes internos, desde δ' a δ_1', en la figura 2.9 y por lo tanto la potencia transferida del generador al motor se reduce de P' a P'_1. Ahora bien, los torques de entrada y de salida

permanecen constantes y son iguales entre sí, teniendo un valor de P puesto que el sistema no tiene pérdidas. En estas condiciones el torque de entrada P es mayor que la potencia eléctrica a la salida del generador P'_1, lo cual trae como consecuencia que el rotor del generador se acelere tendiendo a aumentar el ángulo entre los voltajes internos del generador y motor. Por otra parte la potencia eléctrica que alimenta al motor P'_1 es menor que la carga mecánica a él aplicada P, lo cual tiende a disminuir la velocidad del motor incrementándose por lo tanto el ángulo entre los voltajes internos. De esta manera, una reducción arbitraria del ángulo entre los voltajes internos de δ' a δ_1', reduce la potencia eléctrica transferida a través del sistema y desarrolla fuerzas tendientes a restaurar al sistema a las condiciones iniciales de funcionamiento, o sea la potencia P' y el ángulo δ'. Debido a que las pérdidas han sido despreciadas al desechar la resistencia del sistema, el ángulo entre los voltajes internos oscilará alrededor del valor δ', pero en los sistemas prácticos, en los que las pérdidas están siempre presentes, la oscilación sería amortiguada y el sistema regresaría al ángulo original.

Como siguiente paso asumamos que el sistema esta sujeto ahora a un pequeño incremento del ángulo de torque de δ' a δ_2'.

Bajo esta condición, la salida del generador P'_2 es mayor que su entrada P, lo cual tiende a disminuir la velocidad del rotor del generador disminuyendo el ángulo entre los voltajes internos. Simultáneamente puesto que no hay pérdidas, la entrada del motor P'_2 es mayor que su salida P, lo cual tiende a acelerar al motor disminuyendo el ángulo entre los voltajes internos. Así, este aumento arbitrario en el ángulo de torque δ desarrolla fuerzas que tratan de restaurar las condiciones iniciales de operación.

De esta manera se ha mostrado que si el sistema está operando a un ángulo δ' y se lo somete a pequeñas perturbaciones tendientes, ya sea a incrementar o disminuir el ángulo de torque, luego de que esas fuerzas han sido anuladas, el sistema desarrolla fuerzas tendientes a hacer retornar al sistema a sus condiciones iniciales de operación. Así pues la solución correspondiente a la potencia P' y al ángulo δ' constituye un punto estable de operación, puesto que cualquier tendencia del sistema para salirse de esta solución desarrolla fuerzas restauradoras adecuadas.

Ahora bien, consideremos la siguiente operación en el punto definido por la potencia P" y el ángulo δ'' y supongamos que el ángulo δ se incrementa de δ'' a δ_2''. En este caso, tanto

la salida del generador como la entrada del motor disminuye a P" de tal manera que la entrada al generador P es mayor que su salida $P"_2$ y la salida del motor P es mayor que la entrada al mismo $P"_2$. Esto hace que el generador acelere y el motor disminuya su velocidad, operaciones que hacen que el ángulo de torque se incremento más aún. Como se vé, esta operación ha traído como consecuencia que el sistema pierda su sincronismo y se convierta en un sistema inestable. Asúmanse ahora que se le somete al sistema a una pequeña reducción del ángulo δ de δ'' a δ_1'' En este caso la potencia a la salida del generador y la de entrada al motor aumentan a $P"_1$, de tal manera que la entrada al generador P es menor que la salida de $P"_1$ y la entrada al motor $P"_1$ es mayor que su salida P. Esto trae como consecuencia que el generador disminuya su velocidad y el motor incremente la suya, siendo estas operaciones de tal naturaleza que hacen que el ángulo entre los voltajes internos disminuya más aún. Así se puede ver que el punto de operación correspondiente a la potencia P" y al ángulo δ'' es un punto inestable de operación, ya que cualquier cambio trae como consecuencia el desarrollo de fuerzas que en vez de oponerse a él lo favorecen. Sin embargo en el caso de una reducción del ángulo δ desde el punto definido por δ'' hace que este ángulo se reduzca más aún en dirección del punto estable de operación definido por δ', es decir que el sistema

desarrollará fuerzas tendientes a mover el ángulo hacia δ', para todos los ángulos entre δ' y δ''.

Así el punto correspondiente al ángulo δ'' es el punto crítico en la oscilación del sistema para condiciones dadas de voltajes internos, reactancia y condiciones de flujo de potencia. Si el sistema tiene una solución estable en el ángulo δ', él puede soportar cualquier perturbación que haga oscilar el ángulo en cualquier dirección, hasta δ''. Si tal ángulo es excedido el sistema pierde su sincronismo, pero si no se llega a ese ángulo el sistema oscilará alrededor de δ' y debido a las pérdidas el sistema quedaría en equilibrio en dicho ángulo.

Para el sistema de transmisión ilustrado en la figura 2.1 el límite de estabilidad en estado estable está dado por la máxima potencia obtenida ya sea del diagrama de círculo, o del diagrama de ángulo de torque veraus potencia. El límite de estabilidad de estado estable de un sistema sin pérdidas ocurre cuando el ángulo de torque es igual a 90°, como ya se vió al obtener la ecuación 2.13, la cual da la máxima potencia en vatios, cuando los voltajes están en voltios (línea-línea) y la reactancia en ohmios por fase. Si el criterio de estabilidad se aplica para todas las cargas que tengan una potencia y un ángulo menor que los correspondientes al límite de 90°, el

sistema es inherentemente estable, mientras que para todas las cargas con ángulos mayores a 90°, el sistema es inestable. El punto de carga de 90° para un sistema sin pérdidas es la carga crítica o el máximo valor de todos los puntos de operación de estado estable, que son inherentemente estables.

Hay un sólo límite de estabilidad en estado estable para condiciones específicas de impedancias y voltajes internos. Por lo tanto, si la excitación de una o ambas máquinas se cambia, también cambiarán los voltajes internos y por ende el límite de estabilidad.

Ahora bien, si se inserta un capacitor en serie en el circuito de la figura 2.1, la reactancia de la línea será disminuída en una cantidad igual a la reactancia capacitiva del capacitor (Xc) de tal manera que la fórmula para la potencia transferida quedaría así:

$$P = \frac{\bar{E}g\ \bar{E}m}{X - Xc} \operatorname{Sen} \delta \qquad (2.14)$$

El efecto de la inserción de un capacitor en serie se puede explicar en pocas palabras, con ayuda de la fórmula 2.14 y la figura 2.11, en la que se aprecia dos curvas diferentes, la una para el sistema sin capacitor y la otra para el sistema con capacitor en serie.

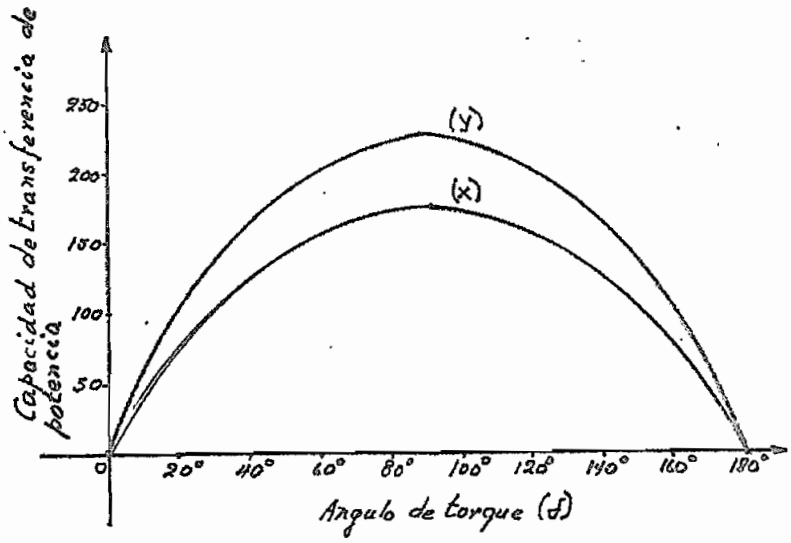


FIG. 2.11.- Diagrama de ángulo de torque vs potencia
Curva (x) : sin capacitor en serie
Curva (y) : con capacitor en serie

De esta figura y de la fórmula 2.14 se puede ver que los efectos del capacitor en serie sobre la estabilidad en estado estable son:

a) Para una misma potencia transmitida se incrementa el margen de estabilidad.

b) El límite de estabilidad es mayor, lo cual quiere decir que se puede transmitir más potencia sin que el sistema pierda su sincronismo.

Hay que anotar que cuando el propósito de la inserción de un capacitor en serie es el mejorar la estabilidad del sistema, nunca se acostumbra usar la sobrecompensación y generalmente la reactancia del capacitor no necesita ser mayor de un 70% de la reactancia inductiva del circuito de enlace.

2.1.2.1.2. El límite de estabilidad en estado transitorio y la influencia que sobre él tiene la inserción de capacitores en serie en el circuito

La estabilidad transitoria se refiere a la cantidad de potencia que puede ser transmitida con estabilidad cuando el sistema está sometido a una perturbación aperíodica que se la podría definir como aquella perturbación que no aparece con regularidad y sólo después de ciertos intervalos de tiempo tales, que el sistema puede alcanzar el equilibrio entre ellos. Hay muchos tipos de perturbaciones que pueden promover un estado transitorio en el sistema, pero son dos los que requieren una especial atención en los estudios de estabilidad:

1) Incremento de la carga
2) Operaciones de conexión o desconexión

Los diagramas básicos de ángulo de torque versus potencia dan una visión adecuada de los fenómenos de estabilidad encontrados en cada una de estas perturbaciones.

1) Incremento de la carga.

Los incrementos de la carga pueden traer como consecuencia perturbaciones transitorias que serán importantes desde el punto de vista de la estabilidad solamente si:

a) La carga total excede el límite de estabilidad de estado estable para condiciones específicas de voltaje y de reactancia del circuito.

b) El incremento de carga dá lugar a una oscilación, la cual hace que el sistema se desplace más alla del punto crítico de operación, desde el cual sería imposible recobrar la estabilidad como ya se dijo anteriormente.

Consideremos ahora un sistema operando bajo las condiciones mostradas en la figura 2.12 curva I con la carga P_1 a un ángulo δ_1 y el torque de entrada y el torque de salida abruptamente incrementados a P_2. Debido a la inercia de las máquinas rotativas, los voltajes internos del motor y del generador no se desplazan inmediatamente al ángulo δ_2, lo cual permitiría transmitir la potencia P_2. En vez de aquello la diferencia inicial entre la potencia de entrada y la de salida, es usada para acelerar el generador y disminuir la velocidad del motor. Estos dos cambios hacen que los rotores se aparten de la velocidad sincrónica y se incremente su diferencia angular. Así cuando el sistema llega al ángulo δ_2 el generador está moviéndose con una velocidad superior a la sincrónica y el motor con una velocidad inferior a la sincrónica. La diferencia en la energía almacenada no puede ser instantáneamente absorbida y como resultado de

esto el sistema sobrepasa el ángulo δ_2 y llega a un ángulo un poco más grande, como el δ_3 , de tal manera que el área rayada cde sea igual al área rayada abc. Despreciando las pérdidas, éstas dos áreas pueden ser consideradas iguales. La oscilación no excederá al ángulo δ_3 y debido a las pérdidas en los sistemas prácticos, el sistema llegará al equilibrio en el ángulo δ_2 . En el caso ilustrado en la figura 2.12, el sistema oscila hasta el ángulo δ_3 , el cual es mayor que 90°, pero el sistema es estable puesto que el ángulo δ_3 es menor que δ_4 , el cual es el ángulo crítico para la carga P_2. Con una carga total un poco más grande, o con un incremento mayor de la carga, el punto máximo al cual llegaría la oscilación podría ser más grande que el punto δ_3 mostrado en el diagrama de la figura 2.12. Con condiciones más severas se puede llegar a un punto en el cual el ángulo crítico es igualado y este representa el límite transitorio para el incremento de carga. La cantidad de incremento de carga que un sistema puede soportar depende del límite de estabilidad de estado estable del sistema y del ángulo inicial de operación.

Ahora bien cuando un capacitor en serie se aplica al sistema, el diagrama de la figura 2.12, curva II, dá una adecuada visualización de lo que sucede.

Para la misma potencia P_1, el ángulo de torque es únicamente δ_1' y el ángulo crítico es δ_4', con lo cual se vé que se puede transmitir la misma potencia con un mayor margen de estabilidad, o con el mismo margen de estabilidad el sistema puede soportar un mayor incremento de la carga sin perder el sincronismo.

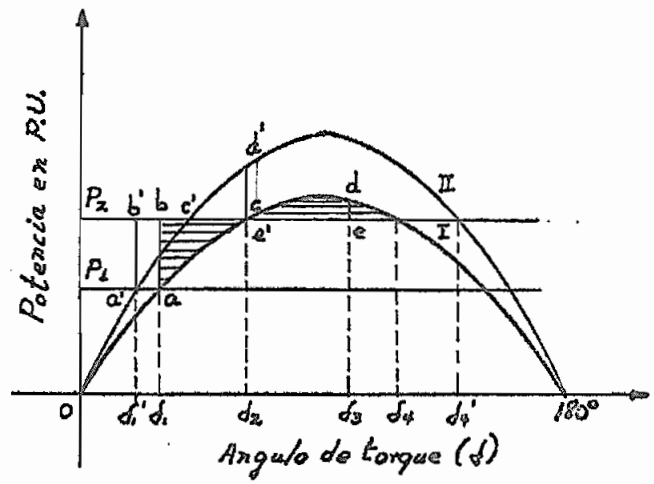


FIG. 2.12: Diagrama de ángulo de torque vs. potencia para analizar los incrementos de carga.
Curva I: sin capacitor en serie
Curva II: con capacitor en serie

2) Operaciones de conexión o desconexión

Los límites transitorios de estabilidad para operaciones de conexión o desconexión pueden ser investigados de una manera similar, usando el criterio de áreas iguales que ha sido adoptado para la determinación del límite transitorio de estabilidad para los incrementos de carga. En el caso de las operaciones de conexión o desconexión, hay sinembargo dos diagramas de ángulo de torque versus potencia que necesitan ser considerados:

a) El diagrama de ángulo de torque versus potencia para la condición inicial.

b) El diagrama de ángulo de torque versus potencia para la condición final, es decir exactamente después de que la operación de conexión o desconexión ha tenido lugar.

La figura 2.13 (a) muestra un sistema con dos líneas inicialmente en servicio y la figura 2.13 (b) muestra dos diagramas de ángulo de torque versus potencia, en los cuales la curva I se aplica a la condición inicial del circuito y la curva II se aplica a la condición final del circuito.

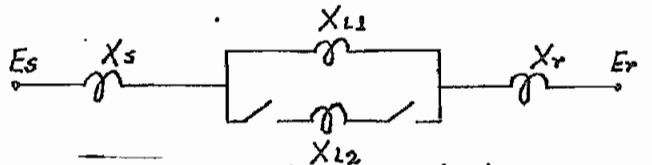


FIG. 2.12a - Circuito equivalente

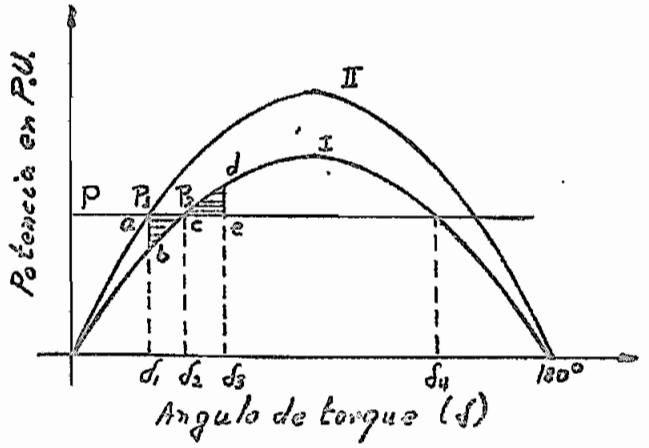


FIG. 2.12b - Diagrama de ángulo de torque vs. potencia para analizar los transitorios debidos a operaciones de conexión y desconexión

El diagrama muestra la potencia transmitida P, la condición inicial de operación en al ángulo δ_1 , y la potencia P_1 y la condición final de operación en el ángulo δ_2 y la potencia P_2. El momento en que la operación de desconexión tiene lugar, la potencia eléctrica de salida se reduce de P_1 a P'. Este cambio produce un incremento de potencia cuya magnitud es igual a P-P', el cual es disponible para acelerar el rotor del generador y para disminuir la velocidad del rotor del motor. Estos cambios tienden a incrementar el ángulo entre los voltajes internos de las máquinas. Así las dos máquinas se apartan de la velocidad

sincrónica incrementando el ángulo de δ_1 a δ_2. En este punto el rotor del generador está moviéndose con una velocidad superior a la sincrónica y el rotor del motor con una velocidad inferior a la sincrónica, lo cual trae como resultado que ambos rotores tiendan a sobrepasar el ángulo δ_2 y llegar al ángulo δ_3 de tal manera que el área abc sea igual al área cde. En el ángulo δ_3 la energía almacenada sobre y debajo de la velocidad sincrónica, ha sido absorbida y puesto que la potencia instantánea de salida del generador y la potencia instantánea de entrada al motor son más grandes que el torque de entrada al generador y el de salida del motor respectivamente, se desarrollan fuerzas restauradoras que hacen que el sistema oscile alrededor del ángulo δ_2 y llegue a un estado de equilibrio debido a las pérdidas que existen en todos los sistemas prácticos.

La cantidad de potencia transferible en el caso de una operación de conexión o desconexión depende de:

a) El límite de estabilidad en estado estable después de que ha tenido lugar la operación de desconexión;

b) De la diferencia entre los ángulos final e inicial de operación en estado estable.

En lo que respecta a la influencia que aquí tiene la inserción del capacitor en serie, vale la pena hacer notar que a

pesar de que la perturbación transitoria es diferente a la anteriormente analizada, el efecto del capacitor en serie permanece siendo el mismo, ya que en nada lo afecta a él y por lo tanto lo mismo que se ha dicho sobre la aplicación de los capacitores en serie, en los casos de incrementos de carga, se puede decir que con relación a las operaciones de conexión o desconexión.

Con esto creo que se puede dar por terminado el estudio de la aplicación de los capacitores en serie, con el objeto de mejorar la estabilidad del sistema al que se aplican, ya que se han visto ya los efectos que tiene la inserción de capacitores en serie sobre el límite de estabilidad de estado estable y sobre el límite transitorio de estabilidad.

2.1.2.2. Control de la distribución de la carga en líneas de transporte en paralelo

Los alimentadores primarios y líneas de transmisión sobrecargadas son frecuentemente reforzados por medio de un segundo circuito operando en paralelo y no es muy raro que las longitudes y calibres de los conductores de los dos circuitos sean diferentes, y más aún, no es nada raro que los dos circuitos estén operando a voltajes diferentes. Como consecuencia de todo esto, se tiene que las impedancias de los dos circuitos pueden ser diferentes, y que el circuito de menor impedancia, referidos ambos, a una misma base de voltaje, tenga que soportar un mayor flujo de corriente o potencia.

Cuando esto sucede, es necesario que exista un control de la carga para permitir:

a) Que ambos circuitos operen dentro de sus capacidades de conducción de corriente.

b) Que la pérdida total de potencia sea mínima. Todo esto puede lograrse por medio de la inserción de un capacitor en serie en el ramal, que tenga la impedancia más grande como está mostrado en el gráfico de la figura 2.14, suponiendo que el ramal 2 sea el que tiene mayor impedancia.

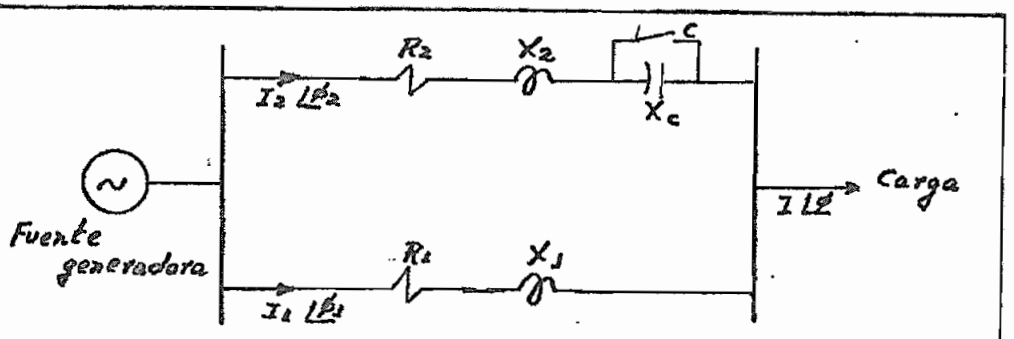


FIG. 2.14.- Control de la distribución de la carga entre alimentadores en paralelo.

Supongamos que en un principio el interruptor C estaba cerrado, entonces la distribución natural de la carga sería la siguiente:

$$I_1 = \frac{\bar{Z}_2 \ \angle \phi 2}{\bar{Z}_1 \angle \phi 1 + \bar{Z}_2 \angle \phi_2} \ \bar{I} \angle \phi \qquad (2.14)$$

$$I_2 = \frac{\bar{Z}_1 \ \angle \phi 1}{\bar{Z}_1 \angle \phi 1 + \bar{Z}_2 \angle \phi_2} \ \bar{I} \angle \phi \qquad (2.15)$$

En donde:

I_1 = Corriente en el ramal 1

Z_1 = Impedancia del ramal 1

ϕ_1 = Angulo de impedancia del ramal 1

I_2 = Corriente en el ramal 2

Z_2 = Impedancia del ramal 2

ϕ_2 = Angulo de impedancia del ramal 2

I = Corriente de carga

ϕ = Angulo de impedancia de la carga

El diagrama vectorial del circuito de la figura 2.14 es el siguiente:

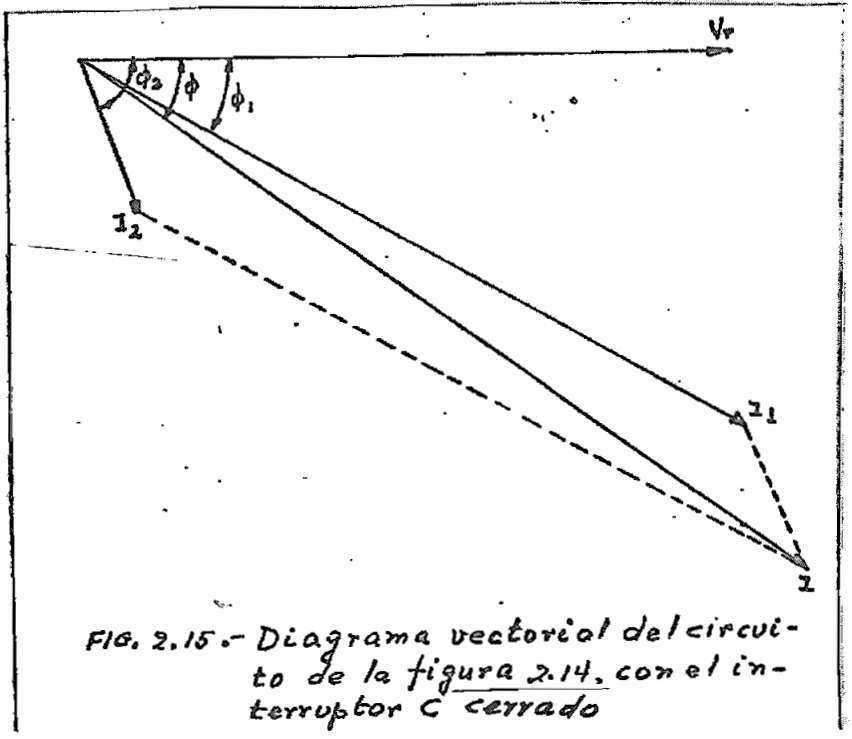


FIG. 2.15.- Diagrama vectorial del circuito de la figura 2.14, con el interruptor C cerrado

De aquí se vé que I_1 e I_2 están retrazadas con respecto al voltaje receptor V_r por los ángulos ϕ_1 y ϕ_2 respectivamente. Luego de abrir el interruptor C, el capacitor queda intercalado en el circuito y por lo tanto se vá a introducir un voltaje:

$$Vc = I_2 \ (-jXc) \qquad (2.16)$$

Este voltaje introducido en el circuito está retrazado con respecto a la corriente I_2, por un ángulo de 90°, y va a causar un desequilibrio de voltajes y por ende aparecerá una corriente circulante Ic, que va a fluir por la red.

La magnitud de esta corriente va a ser igual a:

$$Ic = \frac{Vc}{Z_{12}} \qquad (2.17)$$

En donde:

$$Z_{12} = (R_1 + R_2) + j \ (X_1 + X_2 - Xc) \qquad (2.18)$$

A esta impedancia Z_{12} se le conoce con el nombre de impedancia de la malla cerrada.

Si es que la reactancia de la malla $X_1 + X_2$, es mayor que la reactancia Xc del capacitor, la corriente que circula sigue siendo inductiva y por lo tanto Ic va a estar retrazada con respecto al voltaje Vc, causante de dicha corriente, por un ángulo α .

Al introducir un voltaje capacitivo Vc en el ramal 2, el voltaje en los terminales de este ramal va a ser superior que el voltaje Vr, produciéndose la corriente circulante, cuya dirección va a ser tal que se suma a la corriente I_2 y es opuesta a I_1.

Sin embargo, debe ser enfatizado que la corriente circulante Ic, está atrazada con respecto a la corriente I_2 por un ángulo de $(90 + \alpha)°$.

Consecuentemente la corriente resultante en el alimentador 2 va a ser igual a:

$$I'_2 = I_2 + (-Ic) = I_2 - Ic \qquad (2.19)$$

Mientras que la corriente resultante en el alimentador I va a ser igual a:

$$I'_1 = I_1 - (-Ic) = I_1 + Ic \qquad (2.20)$$

Con todos estos datos se puede dibujar el diagrama vectorial representado en la figura 2.16.

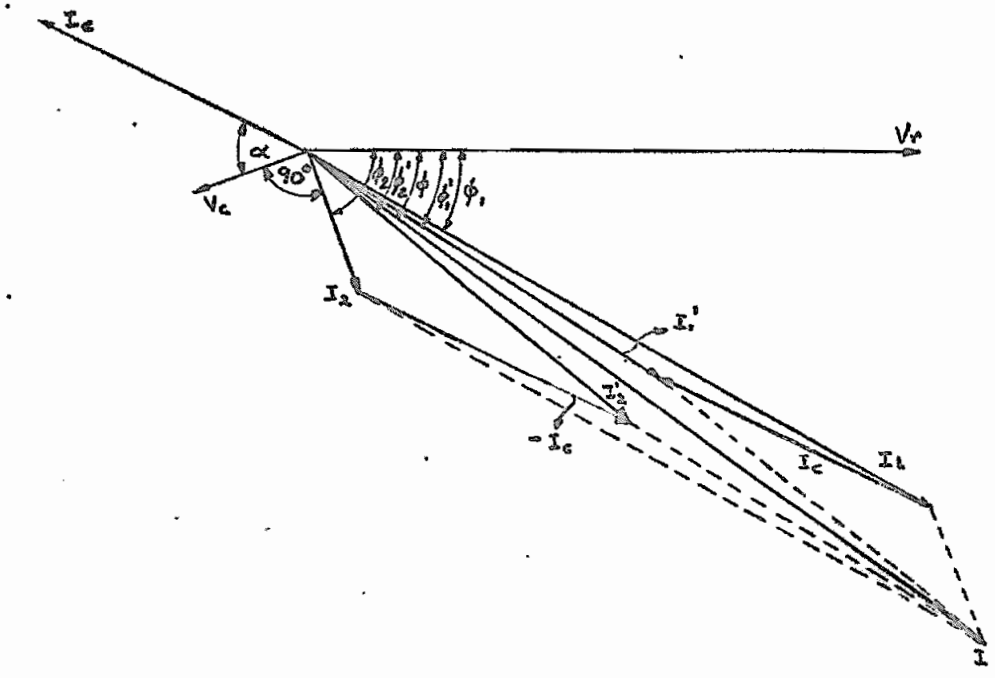


FIG. 2.16.- Diagrama vectorial correspondiente al circuito de la figura 2.14, con el interruptor C abierto

Sin embargo se debe notar que la relación X/R de los alimentadores puede ser diferente ya que tanto las resistencias como las reactancias pueden ser diferentes aunque tengan la misma impedancia. Cuando esto sucede no se puede garantizar una distribución igual de KW y KVARS. Esto se puede demostrar de la siguiente forma:

La potencia que se entrega a la carga, suponiendo que el sistema sea trifásico es:

$$P = \sqrt{3}\ Vr\ I$$

$$P = \sqrt{3}\ \bar{V}r\ \angle 0^\circ\ \bar{I}\angle\phi$$

$$P = \sqrt{3}\ \bar{V}r\ \bar{I}\angle\phi = \sqrt{3}\ \bar{V}r\ \bar{I}\ (\text{Cos}\ \phi + j\ \text{Sen}\ \phi)$$

$$P = \sqrt{3}\ \bar{V}r\ \bar{I}\ \text{Cos}\ \phi + j\sqrt{3}\ \bar{V}r\ \bar{I}\ \text{Sen}\ \phi \qquad (2.21)$$

De esta ecuación el primer término representa la potencia activa, o sea los KW y el segundo la potencia reactiva o sea los KVARS.

Ahora bien la potencia que va a ser suministrada a la carga por medio del alimentador va a ser:

$$P_1 = \sqrt{3}\ Vr\ I_1$$

$$P_1 = \sqrt{3}\ \bar{V}r\ \angle 0^\circ\ \bar{I}_1\angle\phi_1$$

$$P_1 = \sqrt{3}\ \bar{V}r\ \bar{I}_1\angle\phi_1 = \sqrt{3}\ \bar{V}r\ \bar{I}_1(\text{Cos}\ \phi_1 + j\ \text{Sen}\ \phi_1)$$

$$P_1 = \sqrt{3}\ \bar{V}r\ \bar{I}_1\ \text{Cos}\ \phi_1 + j\sqrt{3}\ \bar{V}r\ \bar{I}_1\ \text{Sen}\ \phi_1 \qquad (2.22)$$

y la que va a ser suministrada por el alimentador 2 va a ser:

$$P_2 = \sqrt{3}\ \bar{V}r\ \bar{I}_2\ \text{Cos}\ \phi_2 + j\sqrt{3}\ \bar{V}r\ \bar{I}_2\ \text{Sen}\ \phi_2 \qquad (2.23)$$

En las ecuaciones 2.22 y 2.23 los primeros términos representan la potencia activa a KV y para que los KW transportados por el alimentador 1 y por el alimentador 2 sean iguales es necesario que:

$$\sqrt{3}\ \bar{V}r\ \bar{I}_1\ \text{Cos}\ \phi_1 = \sqrt{3}\ \bar{V}r\ \bar{I}_2\ \text{Cos}\ \phi_2 \qquad (2.24)$$

Como lo que se ha hecho es igualar las corrientes, entonces $\bar{I}_1 = \bar{I}_2$ y por lo tanto ϕ_1 y ϕ_2 tienen que ser iguales para que los KW transportados por cada alimentador sean iguales.

Lo mismo que se ha visto para los KW, se puede ver para los KVARS y se tendrá la misma condición de igualdad entre ϕ_1 y ϕ_2 para que los KVARS transportados por ambos alimentadores sean iguales.

Ahora bien como los ángulos ϕ_1 y ϕ_2 dependen de la resistencia y la reactancia del alimentador 1 y del alimentador 2 respectivamente, se necesita que las relaciones X/R de los dos alimentadores sean iguales para que dichos ángulos sean iguales.

Para que el capacitor en serie lleve a cabo satisfactoriamente su función de compensador de la inductancia en líneas

en paralelo para mejorar la distribución de la carga, es necesario que se cumplan los siguientes requisitos:

1) Igualar la impedancia de los ramales, si es que todos tienen la misma capacidad de conducción de corriente. En caso contrario equilibrar las impedancias proporcionalmente a ellas, para que en el primer caso las corrientes de todos los alimentadores sean iguales y en el segundo para que las corrientes en los alimentadores sean proporcionales a las respectivas capacidades de conducción. Resumiendo todo esto se puede escribir que:

$$\frac{\bar{I}_1}{\bar{I}c1} = \frac{\bar{I}_2}{\bar{I}c2} = \frac{\bar{I}_3}{\bar{I}c3}$$

En donde:

$\bar{I}_1$, $\bar{I}_2$, $\bar{I}_3$ = Corrientes en los alimentadores

$\bar{I}c1$, $\bar{I}c2$, $\bar{I}c3$ = Capacidades de conducción de los alimentadores.

2) Las relaciones de las reactancias de los alimentadores a las resistencias de los mismos deben ser iguales para todos ellos, con el objeto de garantizar que la distribución de KW y KVARS sean iguales o proporcionales en los alimentadores, según el caso de que se trate como en el punto anterior.

2.1.2.3. Mejoramiento de la regulación de tensión

La regulación de tensión se la define como la relación entre la diferencia del voltaje emisor menos el receptor y el voltaje receptor en valores absolutos. Expresando esto a manera de fórmula podemos poner:

$$R\ \% = \frac{\bar{E}s - \bar{E}r}{\bar{E}r} \times 100 \qquad (2.25)$$

Con el objeto de ilustrar el empleo de capacitores en serie para el mejoramiento de la regulación de tensión, es preferible usar aquel circuito en el que más fácil y rápidamente se pueden obtener las relaciones entre el voltaje emisor y el receptor, siendo este circuito aquél que corresponde a una línea corta de transmisión, cuyo circuito equivalente y diagrama vectorial están mostrados en las figuras 2.17 y 2.18 respectivamente.

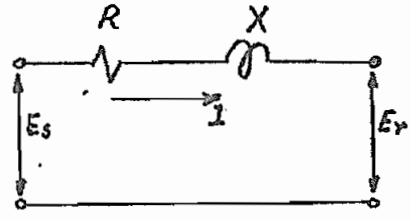


FIG. 2.17.- Circuito equivalente de una línea de transmisión corta.

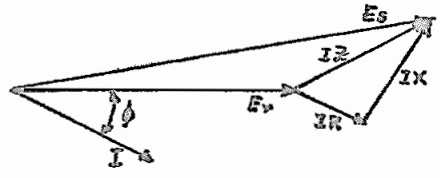


FIG. 2.18.- Diagrama vectorial del circuito de la FIG. 2.17.

La expresión analítica que dá la relación entre el voltaje emisor y el receptor es:

$$Es = Er + Iz \qquad (2.26)$$

Ahora bien, el tipo más común entre los problemas de regulación es aquél en el que es deseable conocer el voltaje emisor para condiciones dadas en el lado receptor. Para la resolución de este problema es más conveniente el tomar Er como vector de referencia, como se indica en el diagrama vectorial de la figura 2.18. A partir de este diagrama se pueden obtener las siguientes relaciones:

$$I = \bar{I} \cos \phi r + j \bar{I} \operatorname{Sen} \phi r$$

$$Z = Rl + j Xl$$

$$Es = Er + Iz$$

$$Er = \bar{E}r = \text{referencia} \qquad (2.27)$$

De las relaciones anteriores, podemos deducir la relación entre el voltaje emisor y el receptor.

$$Es = \bar{E}r + (\bar{I} \cos \phi r + j \bar{I} \operatorname{Sen} \phi r)(Rl + j Xl) =$$

$$= \bar{E}r + \bar{I}Rl \cos \phi r + j \bar{I} Rl \operatorname{Sen} \phi r + j \bar{I} Xl \cos \phi r - \bar{I} Xl \operatorname{Sen} \phi r =$$

$$Es = (\bar{E}r + \bar{I}Rl \cos \phi r - \bar{I} Xl \operatorname{Sen} \phi r) + j (\bar{I} Xl \cos \phi r + \bar{I} Rl \operatorname{Sen} \phi r)$$

(2.28)

Por lo tanto la magnitud de Es será:

$$\bar{E}s = \sqrt{(\bar{E}r + \bar{I}\ R1\ \text{Cos}\ \phi r - \bar{I}\ X1\ \text{Sen}\ \phi r)^2 + (\bar{I}\ X1\ \text{Cos}\ \phi r + \bar{I}R1\ \text{Sen}\ \phi r}$$

(2.29)

Si es que las caídas de tensión $\bar{I}R1$ e $\bar{I}X1$ no son más de un 10% de $\bar{E}r$ y si además los factores de potencia son normales, es decir están dentro de un rango de 100% a 50%, Es puede ser determinado despreciando la componente en cuadratura, con lo cual se tiene que:

$$\bar{E}s = \bar{E}r + \bar{I}R1\ \text{Cos}\ \phi r - \bar{I}X1\ \text{Sen}\ \phi r \qquad (2.30)$$

Reemplazando esta ecuación en la 2.25 se obtiene:

$$R\% = \frac{\bar{E}r + \bar{I}R1\ \text{Cos}\ \phi r - \bar{I}X1\ \text{Sen}\ \phi r - \bar{E}r}{\bar{E}r} \times 100$$

$$= \frac{\bar{I}R1\ \text{Cos}\ \phi r - \bar{I}X1\ \text{Sen}\ \phi r}{\bar{E}r} \times 100$$

$$R\% = \frac{\bar{I} \times 100}{\bar{E}r}\ (R1\ \text{Cos}\ \phi r - X1\ \text{Sen}\ \phi r) \qquad (2.31)$$

Ahora bien, al introducir un capacitor en serie en el circuito de la figura 2.17, se tiene un circuito como el representado en la figura 2.19, cuyo diagrama vectorial es el representado en la figura 2.20.

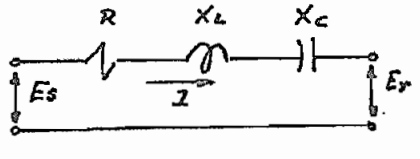


FIG. 2.19.- Circuito equivalente de una linea de transmisión corta con capacitor en serie

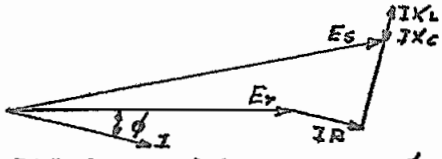


FIG. 2.20 = Diagrama vectorial del circuito de la FIG. 2.19.

Aplicando las ecuaciones anteriormente usadas y empleando idénticos criterios, se puede deducir que la regulación de tensión cuando se introduce un capacitor en serie es:

$$R\% = \frac{\bar{I} \times 100}{\bar{E}r} (Rl \cos \phi r - (Xl - Xc) \operatorname{Sen} \phi r) \quad (2.32)$$

De aquí se puede ver claramente cual ha sido el efecto que sobre la regulación de tensión tiene la inserción del capacitor en serie, es decir mejorarla mediante una reducción de la inductancia de la línea.

Hay que anotar sin embargo que esta última fórmula no es aplicable para todos los casos y especialmente cuando el grado de compensación de la inductancia es mayor que un 80%, o cuando la capacitancia de las líneas es apreciable, Para estos casos es necesario emplear la ecuación completa, dada en 2.29 en unión con la 2.25, siguiendo un procedimiento similar al ya utilizado, por lo cual creo que no es necesario repetir el desarrollo anterior ya que el objeto del presente estudio es únicamente el de visualizar el efecto de la inserción de los capacitores en serie sobre la regulación de tensión.

2.1.2.4. Mejoramiento del factor de potencia de la carga

Si el capacitor en serie está conectado en serie con la carga en los terminales receptores, éste se encargará

de mejorar en algo el factor de potencia de la misma. Este análisis se puede efectuar a partir del gráfico de las figuras 2.21 (a) y 2.21 (b), en las cuales se muestra el circuito de carga con un capacitor en serie y su diagrama vectorial.

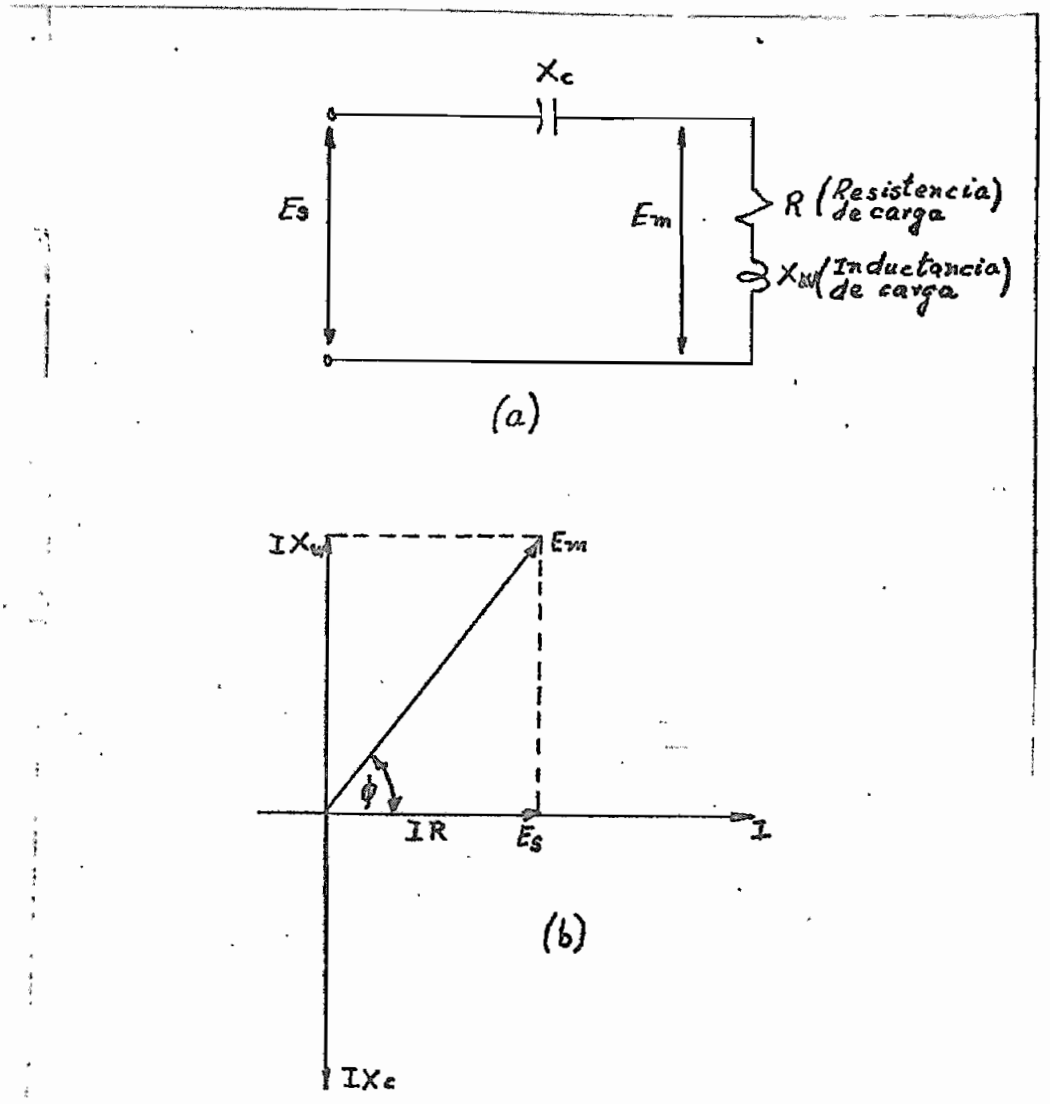


FIG. 2.21.- Mejoramiento del factor de potencia mediante capacitores en serie

Si no se llegara a usar el capacitor en serie, el voltaje de alimentación, la corriente de carga y el factor de potencia estarían representados por Em, I y Cosϕ respectivamente. Al usar el capacitor en serie, las magnitudes antes enunciadas serían: I, Es y 1 respectivamente, suponiendo que se use una compensación completa de Xw.

Con esto se vé claramente que el capacitor insertado en serie con la carga, cuando esta es inductiva trae como consecuencia ventajosa por cierto, el incremento del factor de potencia.

La ventaja de tener un factor de potencia alto es obvia y para hacer un poco más explícita esta ventaja se puede citar lo siguiente:

1) Los sistemas de energía transportan en general un costoso gravamen de corriente devatiada debido a las cargas inductivas, es decir esto sucede cuando el factor de potencia es bajo.

2) Las compañías eléctricas se han visto en la necesidad de imponer ciertas cláusulas que crean un recargo en las tarifas establecidas cuando el factor de potencia es más bajo del estipulado;

3) El bajo factor de potencia de las cargas causan inconvenientes a las compañías suministradoras de energía,

las cuales en definitiva encarecen el costo de producción de la energía.

Si con la inserción de los capacitores en serie junto a la carga se consigue incrementar el factor de potencia, logicamente tanto el consumidor como la compañía suministradora de energía obtendrán ventajas.

2.1.2.5. Disminución del "Flicker" o Parpadeo

La regulación del voltaje ha sido uno de los problemas más importantes de la industria eléctrica desde sus comienzos y es la regulación de voltaje la que determina el tamaño de muchos de los equipos que forman parte de un sistema de potencia.

Una gran proporoión del precio de venta de la energía eléctrica es el interés y otras cargas fijas en facilidades de producción y distribución, de tal manera que cualquier mejora en la regulación repercute en precios más altos de venta de energía, debido a que mientras mejor es la regulación, más costosos son los equipos componentes del sistema. Igualmente algunos tipos de cargas que imponen al sistema condiciones extremadamente rigurosas de regulación de voltaje, incrementan también el costo de la energía.

Al principio, cuando la industria eléctrica recien empezaba, era aceptado por los consumidores un grado más o menos grande de variación de voltaje debido a que aquellos no estaban acostumbrados aún a tener una intensidad luminosa constante. Sin embargo, actualmente existe una mayor exigencia para que el voltaje esté dentro de los límites aceptables, ya que cuando el voltaje está demasido bajo, las lámparas no dán la suficiente intensidad luminosa y cuando el voltaje es demasiado alto, la vida de las lámparas disminuye. Además con el desarrollo de nuevos equipos se han introducido cargas que imponen rápidas y frecuentes oscilaciones de voltaje y la práctica ha demostrado que estos cambios rápidos y frecuentes de voltaje son más perjudiciales que los lentos, de tal manera que los efectos del "flicker" o parpadeo pueden limitar la capacidad de transporte de los circuitos, mucho antes de que se haya alcanzado, ya sea la mínima regulación de voltaje en estado estable o el máximo calentamiento permisible.

El monto permisible de "flicker" no puede ser determinado exactamente debido a varias razones. En primer lugar se tiene el elemento humano, ya que un individuo puede pensar que es objecionable un "flicker" que no lo es para otro.

Otro elemento de importancia es el tipo de iluminación usado, ya que por ejemplo las lámparas flourescentes son más

sensibles que las incandescentes a las variaciones de voltaje. Además, aún dentro del mismo tipo de iluminación hay variaciones, ya que por ejemplo las lámparas incandescentes pequeñas cambian más rápidamente de iluminación que las grandes. También el carácter de la fluctuación es de importancia, ya que los cambios cíclicos y repetidos de voltaje son más perjudiciales que los no cíclicos. Estos y otros factores complican enormemente el problema de asignar límites permisibles para las fluctuaciones de voltaje.

Las causas más comunes de producción de "flicker" son:

a) Las máquinas que mueven a los generadores especialmente las máquinas diesel, ya que cuando hay cambios de velocidad se produce una fluctuación en el voltaje del generador asociado a dicha máquina.

b) Los generadores, debido a que tienen carga, excitación y velocidad constantes, producirán un voltaje dado, pero si cualquiera de esos factores varía, el voltaje terminal variará también.

c) Los motores son los que generalmente causan el "flicker", ya que cuando arrancan la potencia absorbida por ellos es mucho mayor que la abosrbida cuando funcionan normalmente, causando parpadeos especialmente cuando hay arran-

ques repetidos. Otra causa del "flicker" son los motores que están moviendo cargas variables o pulsantes como compresores de aire, bombas, refrigeradoras, cortadoras, etc.

d) Hornos eléctricos de inducción y de arco.

e) Soldadoras eléctricas.

Ahora bien, los equipos de carga anteriormente mencionados pueden producir "flicker" en uno o varios de los siguientes puntos:

1) Sistemas secundarios de distribución.
2) Líneas primarias.
3) Barras de subestación.
4) Centrales generadoras.

Cualquier variación de voltaje en las centrales generadoras se transmite prácticamente a todos los puntos servidos o alimentados por tal central. Igualmente si hay una variación de voltaje en las subestaciones todas las cargas alimentadas desde ella son afectadas. Lo mismo se puede decir de las líneas primarias y los sistemas secundarios de distribución.

Para corregir el "flicker" hay una gran variedad de métodos, pero debido al enfoque de la presente tesis, se verá úni-

camente el empleo de los capacitores en serie para tal objeto.

Hay dos usos principales para el capacitor en serie, dependiendo de si éste va a corregir la inductancia de la alimentación o de la carga. Su uso más frecuente y familiar es para la compensación de la alimentación y aunque la aplicación de ellos para la corrección de equipos es más reciente, ésta promete mucho ya que mejora las condiciones en todo el sistema, mientras que los capacitores conectados en la línea, benefician únicamente a aquellos consumidores que están detrás del punto de aplicación del capacitor.

Estando en serie con el sistema los capacitores tienen un efecto correctivo instantáneo y esta es tal vez su mayor ventaja debido a que cualquier cambio en la corriente de la línea causa un cambio inmediato en el voltaje compensador introducido por el capacitor.

En primer lugar analizaré las ventajas que tiene un capacitor en serie conectado a la línea de alimentación. La figura 2.22 (a) muestra un esquema favorable para la aplicación de los capacitores en serie.

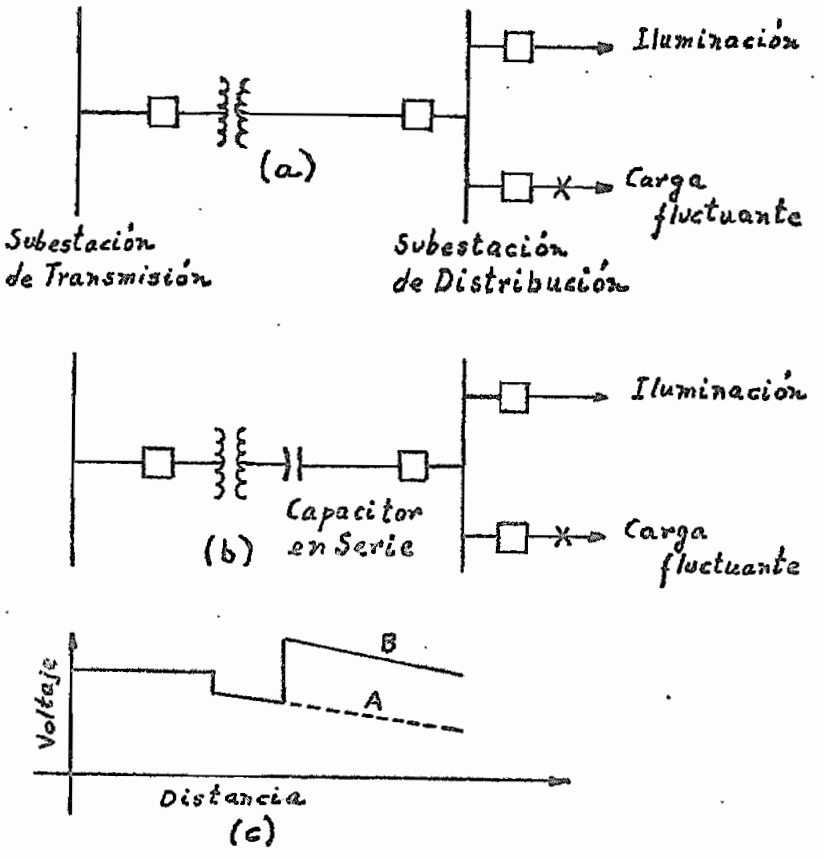


FIG. 2.22.- Aplicación típica de los capacitores en Serie

a).- Esquema del circuito
b).- Localización del capacitor
c).- A: sin capacitores
B: con capacitores

Se asume que la subestación de transmisión tiene regulación de voltaje a las barras de tal manera que el voltaje es más o menos constante. El banco de transformadores de bajada y la línea de transmisión alimentan a una subestación de distribución, la cual a su vez alimenta a una carga fluctuante y a car-

gas de iluminación; además no existen cargas en puntos intermedios entre las subestaciones. El capacitor en serie puede ser instalado ya sea cerca de la subestación de transmisión como está mostrado en la figura 2.22 (b) o cerca de la subestación de distribución.

Otra alternativa es el instalar el capacitor en serie entre las barras de la subestación de transmisión y el banco de transformadores de bajada, dependiendo la mejor solución del voltaje más apropiado para la instalación de capacitores estandard. El voltaje a lo largo de la línea está mostrado en el diagrama de la figura 2.22 (c) en la cual la curva A muestra el voltaje no compensado y la B el compensado. El punto de interés enfatizado en la figura 2.22 (c) es que el voltaje de compensación es introducido de golpe, en un solo paso, mientras la caída de voltaje a lo largo de la línea es uniforme. Para este caso, en el que no hay cargas intermedias, la gradiente de voltaje a lo largo de la línea es constante y no tiene mucha importancia el lugar en que se instale el capacitor. Lo contrario sucederá en el caso de existir cargas distribuidas a lo largo de la línea siendo allí necesario considerar detenidamente la localización del capacitor.

Debido a que el capacitor produce una elevación brusca de voltaje en su punto de aplicación, las cargas que están inme-

diatamente antes y después del capacitor, diferirán en voltaje por una cantidad igual al aumento producido por el capacitor. La experiencia ha demostrado que en general la mejor localización para el capacitor en serie es a un tercio de la distancia eléctrica entre la fuente y la carga productora del "flicker" como esta mostrado en la figura 2.23.

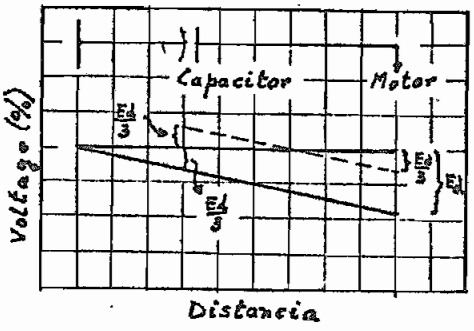


FIG.2.23.- Localización del capacitor en Serie. Ed: distancia eléctrica

En principio el capacitor en serie es efectivo para reducir el "flicker", causado por prácticamente todas las cargas fluctuantes. Sin embargo su efecto se siente únicamente detrás

de su punto de aplicación y por lo tanto no corrige a todo el sistema. Por ejemplo un capacitor en serie instalado exactamente antes de la subestación B en la figura 2.24, puede remover todas las fluctuaciones de voltaje. Sin embargo en la subestación A, puede todavía existir una considerable fluctuación de voltaje, ya que el capacitor no tiene influencia sobre los equipos y partes del sistema que están delante de él, es decir en este caso no corrige al sistema de alimentación.

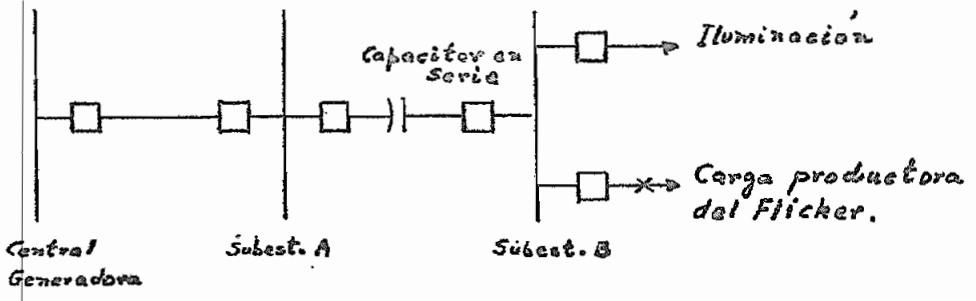
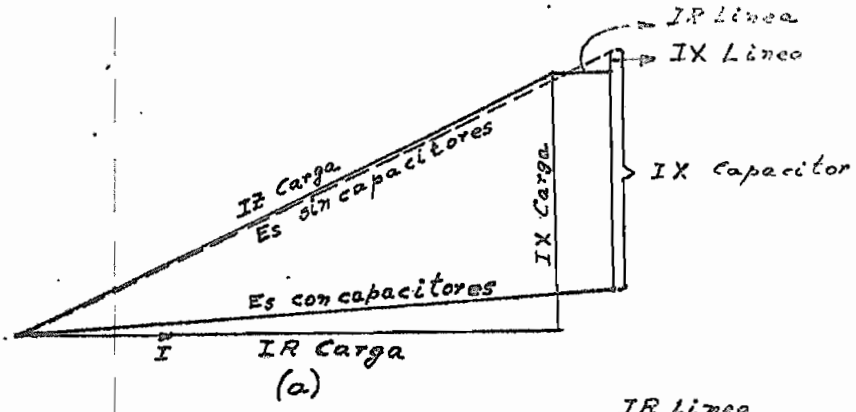


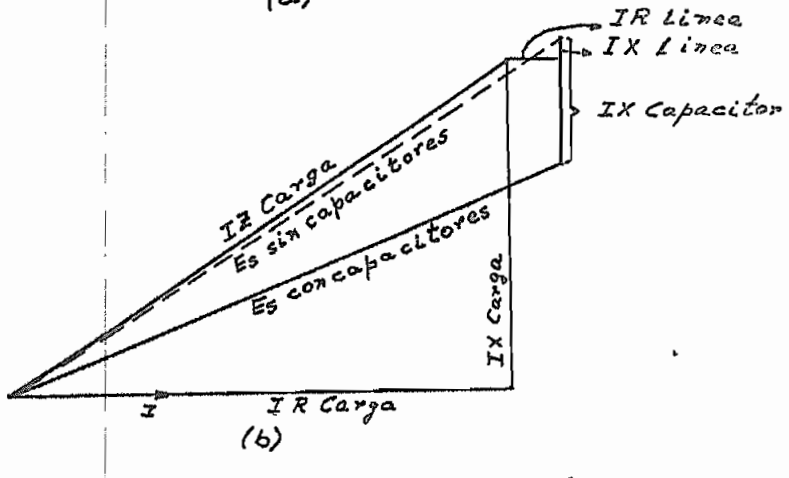
FIG. 2.24.- El capacitor en serie debe ser capáz de soportar la carga total de la subestación B.

Se debe notar también con relación a la figura 2.24 que el capacitor debe ser lo suficientemente grande como para poder soportar toda la corriente que alimenta a las cargas situadas detrás de él. Consecuentemente, si la carga productora del "flicker" es pequeña comparada con la carga normal, el costo del capacitor es demasiado grande en comparación con la corrección que se obtiene.

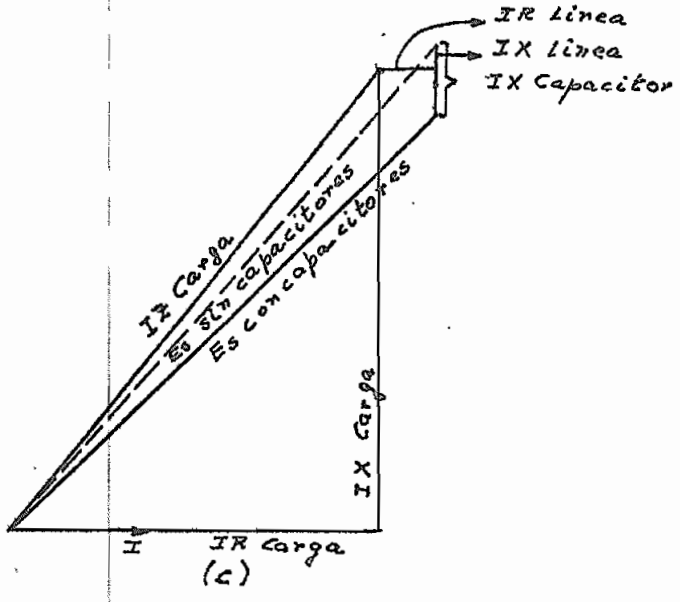
Los diagramas vectoriales para capacitores en serie a varios factores de potencia están mostrados en la figura 2.25 a, b y c.



(a) $\cos\phi = 0.90$
Emisor = Centro carga



(b) $\cos\phi = 0.75$
Emisor = Centro carga



(c) $\cos\phi = 0.60$
Emisor = Centro carga

FIG. 2.25.- Diagramas vectoriales para capacitores en serie a varios Cos ϕ.

Estos diagramas muestran que solamente la componente inductiva de la impedancia de la línea es compensada por el capacitor. Sin embargo si el factor de potencia del incremento de carga es bajo y constante es posible el sobrecompensar la reactancia del sistema y así anular total o parcialmente la caída de voltaje debido a la resistencia. Con cargas y factores de potencia variables este procedimiento puede causar características indeseables de regulación de voltaje y por lo tanto cada caso de sobrecompensación debe ser estudiado detenidamente.

De todo esto se vé que los capacitores en serie son particularmente económicos en aquellos casos en los que la carga productora del "flicker" es una gran parte de la carga total, donde la resistencia de la línea es igual o más baja que la reactancia, donde la carga productora del "flicker" es de bajo factor de potencia y donde los circuitos de alimentación son bastante largos.

Ahora que ya se ha analizado la aplicación del capacitor en serie con la línea de alimentación, es interesante el anotar su aplicación en conexión con los equipos de carga. Esta aplicación está limitada al equipo de carga con una reactancia inductiva constante, la cual es posible compemsar con el capacitor en serie, de tal manera que la carga alimentada desde el circui

to tenga un factor de potencia prácticamente unitario en todo momento. Así aunque la potencia tomada de la línea es aún fluctuante, el "flicker" producido se reduce enormemente. La figura 2.26 muestra tal compensación aplicada a un transformador de soldadura, de tal manera que mientras la carga es corregida, los beneficios se sienten en todo el sistema de alimentación. Algunas de estas aplicaciones se han realizado con éxito especialmente en soldadoras por puntos y por cordón.

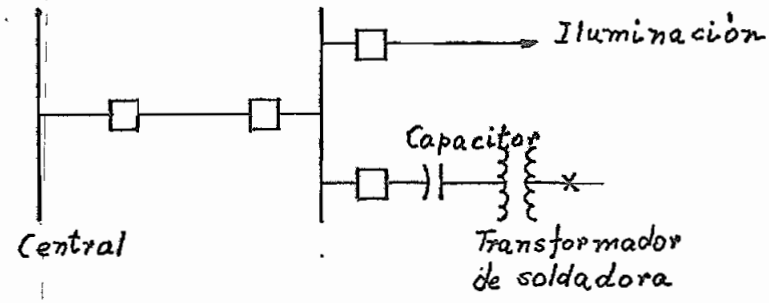


FIG. 2.26 Capacitor en serie conectado a un transformador de soldadora para reducir la demanda de KVA y mejorar el Cos ϕ.

2.2 APLICACIONES PRACTICAS

En lo que a aplicaciones prácticas se refiere, se pueden estudiar dos campos de aplicación completamente diferentes entre sí, siendo el primero las aplicaciones en los sistemas de transporte de energía y el segundo las aplicaciones en los sistemas de consumo de energía. Esta diferenciación tiene como único objeto el separar un tipo de aplicación de otro y hacer más sencillo su estudio.

2.2.1. En los sistemas de transporte de energía

2.2.1.1. En líneas de transmisión

Con el transcurso de los años la industria eléctrica se ha ido fortaleciendo debido a que tiene un mayor número de clientes que servir, es decir que la carga se ha incrementado y para poder realizar este servicio ha tenido que incrementar las distancias de transmisión de energía, al mismo tiempo que se incrementaba el voltaje de transmisión para que el servicio resulte más económico. Ahora bien, como la reactancia inductiva de las líneas está en proporción directa a la longitud de ellas y al voltaje de transmisión, al incrementar estos dos últimos factores la reactancia inductiva de las líneas también se ha incrementado, llegando a ser un parámetro de gran importancia en lo que a la regulación de voltaje y estabilidad del sistema se refiere, ya que la capacidad de transporte de una línea puede ser limitada, por consideraciones de regulación y estabilidad, a un valor muy por debajo de su capacidad de transporte más económica.

Ahora bien, como ya se vió el uso de capacitores en serie con la línea reduce la reactancia efectiva de la línea a un valor óptimo, dictado por consideraciones técnicas y económicas, de tal manera que mejora la regulación del voltaje

de las líneas de transmisión, a la vez que mejora la estabilidad del sistema.

Además, este método puede ser usado en el caso de que la carga sea alimentada por dos o más líneas en paralelo que tienen diferentes reactancias inductivas, ya que como anteriormente se vió, un capacitor insertado en serie con la línea que tiene mayor impedancia, puede asegurar una distribución de la carga proporcional a la capacidad de conducción de corriente de cada una de las líneas.

En resumen, las principales aplicaciones que tiene un capacitor en serie con las líneas de transmisión son:

a) Incremento de la regulación de voltaje.
b) Mejoramiento de la estabilidad del sistema.
c) Repartición de carga entre alimentadores paralelos.

Como ejemplo vale la pena citar que la Comisión de Energía Eléctrica de Rhodesia del Sur, ha incrementado la capacidad de transmisión de una línea de 88 KV, en un 100% mediante el uso de capacitores en serie. En Suecia, la capacidad de transferencia de potencia de una línea de transmisión, basada en consideraciones de estabilidad, ha sido incrementada de 450 MW a 700 MW por medio de la instalación de capacitores en serie con la línea.

2.2.1.2. En alimentadores primarios de enlace

Como se vé de la fórmula 2.13, la capacidad de transferencia de potencia de un alimentador primario de enlace es inversamente proporcional a su reactancia, y puesto que la resistencia de un alimentador de enlace es generalmente pequeña comparada con la reactancia del mismo, es ésta la que primordialmente afecta al ángulo entre los voltajes emisor y receptor y por lo tanto a los límites de estabilidad en estado estable y en estado transitorio.

Pues bien ya que un capacitor en serie decrece la reactancia del alimentador, su instalación permite que se pueda transmitir mayor potencia con el mismo margen de estabilidad, o mejorar el límite de estabilidad para la misma potencia transferida.

2.2.1.3. En alimentadores primarios radiales

La acción de un capacitor en serie para reducir la caída de voltaje está ilustrado en la figura 2.27 a. La caída de voltaje a lo largo del alimentador es aproximadamente igual a:

$$\bar{e} = \bar{I}R \cos \phi + \bar{I}X1 \operatorname{Sen} \phi \qquad (2.33)$$

Si el segundo término es igual o mayor que el incremento de voltaje deseado, puede ser aplicable un capacitor en serie. La magnitud del segundo término es relativamente la mayor parte de la caída total de voltaje cuando el factor de potencia es bajo y cuando la relación de la resistencia del alimentador a su reactancia es pequeña, de tal manera que si se instala un capacitor en serie con el alimentador, como se muestra en la figura 2.27 b, la caída de voltaje viene a ser:

$$\bar{E} = \bar{I}R1 \cos \phi r + \bar{I} (X1 - Xc) \operatorname{Sen} \phi r \qquad (2.34)$$

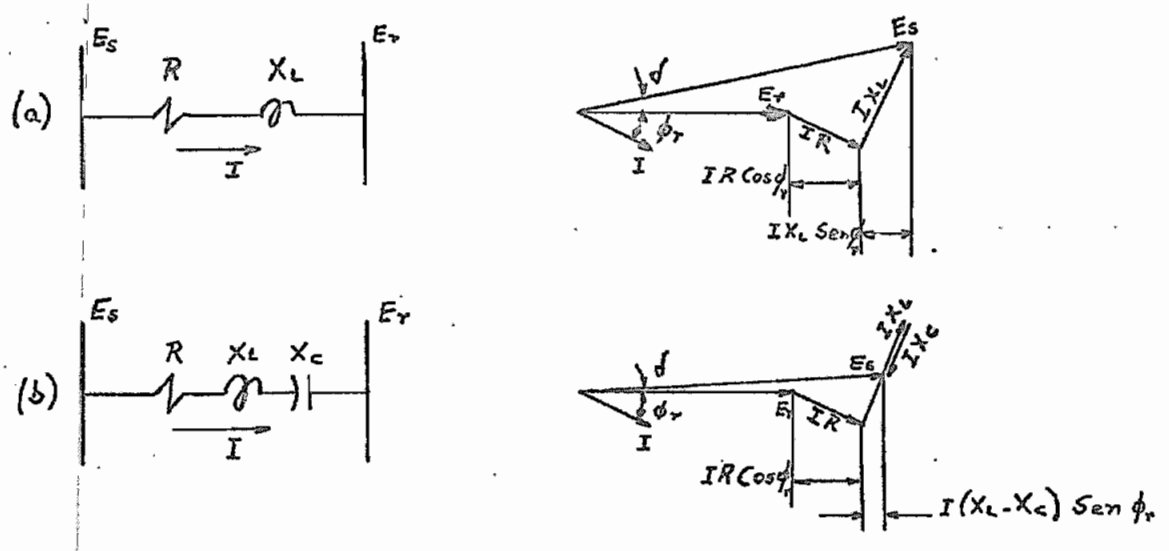


FIG. 2.27.- *Diagramas vectoriales para un circuito con Cos ϕ atrazado. (a) sin capacitor en serie; (b) con capacitor en serie*

En la mayoría de las aplicaciones la reactancia capacitiva es más pequeña que la reactancia del alimentador, en caso contrario existe una sobrecompensación, la cual se emplea generalmente cuando la resistencia del alimentador es relativamente grande para hacer que el segundo término de la ecuación 2.34 sea negativo. Sin embargo se debe tener mucho cuidado con el empleo de la sobrecompensación, ya que si la capacitancia es seleccionada para condiciones normales de carga durante condiciones de arranque de motores una gran corriente retrazada puede causar un excesivo incremento de voltaje como se muestra en la figura 2.28, lo cual es peligroso para las lámparas e introduce el "flicker".

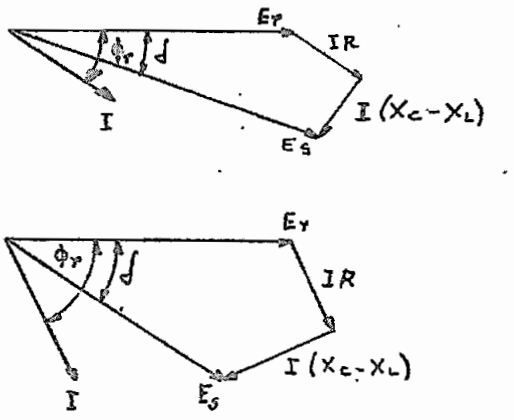


FIG. 2.28.- Efecto de la sobrecompensación con capacitores en serie, durante el arranque de motores

El factor de potencia de la corriente de carga debe ser retrazado para que el capacitor en serie decrezca la caída de voltaje apreciablemente, ya que en caso contrario la introducción del capacitor en serie causaría un incremento posterior en la caída de voltaje, como se muestra en la figura 2.29. Cuando el factor de potencia es cercano a la unidad, el segundo término de la ecuación 2.34 es casi cero y por ende la aplicación de un capacitor en serie en tales condiciones es inefectivo.

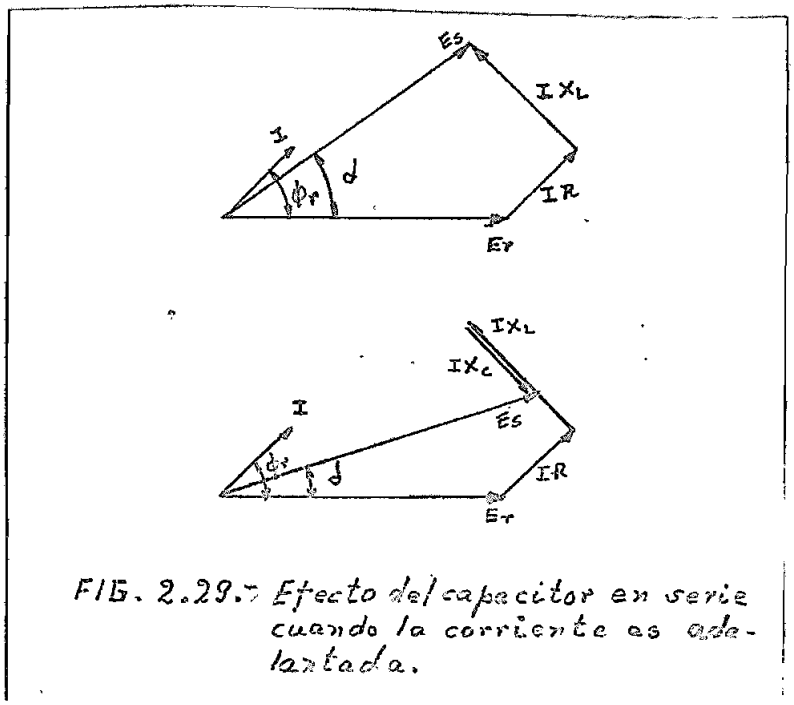


FIG. 2.29.- Efecto del capacitor en serie cuando la corriente es adelantada.

Cuando se lo aplica adecuadamente un capacitor en serie reduce la impedancia del alimentador y por lo tanto incrementa el voltaje receptor, incrementando la capacidad de transporte de la línea y además para la misma potencia entregada a la

carga a través del alimentador, la corriente de línea se reduce un poco disminuyendo las pérdidas por calentamiento.

2.2.1.4. En sistemas de distribución

La regulación de voltaje es a menudo un problema en los sistemas de distribución que alimentan a cargas tales como: soldadoras por resistencia, hornos de arco, excavadoras, etc., o cuando las corrientes de arranque de ciertos motores grandes es significativa, comparada con la corriente normal del circuito. La mayoría de las máquinas anteriormente citadas se caracterizan por tener cambios rápidos y repetidos en la corriente de carga por ellos absorbida, teniendo estas además un bajo factor de potencia que causa serios problemas de regulación de voltaje y parpadeo.

Los métodos normales de regulación de voltaje tales como el empleo de reguladores de inducción o de pasos, no son lo suficientemente rápidos en su respuesta como para anular estos cambios súbitos y repetidos en el voltaje, ya que estos cambios son usados como señal para iniciar la operación de corrección.

Mientras tanto, un capacitor conectado en serie con la línea tiene una respuesta instantánea y es efectivo en

eliminar las variaciones de voltaje causadas por cualquier tipo de carga fluctuante.

En nuestro país existen muchas posibilidades de utilizar los capacitores en serie en los circuitos de distribución, ya sea en los alimentadores secundarios radiales largos, en los transformadores de distribución que alimentan a cargas fluctuantes, o en circuitos donde predominan las condiciones de arranque de grandes motores. En estos casos la instalación de un capacitor en serie puede ser más económico y práctico que instalar otro transformador u otra línea.

Una aplicación interesante de los capacitores en serie, es en los sistemas de distribución monofásica con un sólo hilo, el cual usa la tierra como retorno de corriente. En estos sistemas, pequeños capacitores en serie conectados entre el secundario del transformador y la tierra son muy efectivos para mantener una regulación de voltaje económicamente aceptable.

Aquí vale la pena anotar que en un circuito donde la carga está concentrada en un extremo de la línea, la localización del capacitor en serie no tiene influencia alguna sobre el voltaje receptor. Pero si hay algunas cargas distribuídas a lo largo de la línea y el objeto de la instalación del capacitor es el de mejorar la regulación de voltaje, el capacitor debe ser

instalado en un lugar tal que produzca la más uniforme repartición de voltaje entre las cargas, siendo esta posición generalmente el centro de carga de la línea. Para capacitores en serie instalados con el objeto de mejorar la capacidad de transporte de una línea y la estabilidad del sistema, el punto medio de la línea es la posición más adecuada.

Un capacitor en serie no debería ser colocado, inmediatamente antes de un transformador si es que es capáz de elevar el voltaje hasta la región de saturación del transformador, ya que esto produciría una condición de ferro-resonancia.

Por otra parte, si el capacitor está localizado muy cerca del terminal emisor de la línea, las condiciones de falla que el equipo de protección del capacitor debe soportar son más severas.

Ahora bien si las condiciones anteriores han sido cumplidas y todavía existen varias alternativas para instalar un capacitor en serie, como por ejemplo en el lado primario o en el secundario de un transformador, la posición más económica y práctica del capacitor será seleccionada teniendo en cuenta la aislación requerida, el voltaje a través del dieléctrico y el equipo de protección necesarios.

En sistemas complejos es necesario hacer un análisis más profundo y a menudo se deberá utilizar un analizador de redes para poder determinar la localización más adecuada para un capacitor en serie.

2.2.2. En los sistemas de consumo de energía

2.2.2.1. En soldadoras por resistencia

Las soldadoras eléctricas por resistencia generalmente imponen al sistema grandes cargas monofásicas intermitentes de bajo factor de potencia, el cual oscila entre 0.2 y 0.8, de tal manera que si la capacidad de la fuente de alimentación no es adecuada con relación a las altas demandas instantáneas de volt-amperios, cada vez que se haga una suelda habrá caídas de voltajes introduciéndose por ende un parpadeo en el sistema.

Se puede corregir este fenómeno mediante el uso de capacitores en paralelo o en serie, siendo este último tipo de corrección el preferido, puesto que la compensación es efectiva para todas las corrientes de carga y debido a que la duración de la suelda es a menudo menor que dos ciclos, la respuesta instantánea del capacitor en serie es ventajosa.

La combinación resultante de una soldadora con un capacitor en serie tiene un diferente voltaje nominal del aplicado originalmente, como se puede ver de la figura 2.21 a y b, en donde el voltaje ha sido reducido de Ew a Es después de la instalación del capacitor en serie, de tal manera que es necesario el usar un autotransformador para bajar el voltaje de alimentación al conjunto.

Cuando se usan diferentes taps en el lado de alimentación de un transformador para soldadoras, la aplicación de un capacitor en serie no es práctico, ya que el capacitor necesitaría también taps y un mecanismo para cambiarlos.

Omitiendo los aparatos de descarga del capacitor, en capacitores en serie para soldadoras controladas electrónicamente, el capacitor mantiene su carga entre sueldas, evitándose así la corriente transitoria de recarga la cual de otra manera existiría al empezar cada suelda. Sin embargo se preveé un equipo exterior de descarga del capacitor únicamente por seguridad.

2.2.2.2 En generadores de alta frecuencia

Los generadores de alta frecuencia son usados para alimentar a equipos de alta velocidad para esmerilar y pulir y también a hornos de inducción por calentamiento y fundi-

ción. Estos generadores poseen una alta reactancia interna la cual podría causar serios problèmas de regulación de voltaje si no se utilizaran capacitores en serie para compensar parcialmente dicha reactancia. El grado de compensación varía entre un 60% a un 80% para los hornos de calentamiento por inducción, hasta casi un 100% para las maquinarias de alta velocidad.

2.2.2.3. En hornos de grafito

El proceso del grafitado requiere algunos días para ser acabado, tiempo durante el cual la corriente se incrementa progresivamente de pocos cientos de amperios a muchos miles. Durante el mismo período el voltaje disminuye de aproximadamente 80 voltios a 40 voltios. La carga es monofásica y el factor de potencia varía desde el valor unitario a bajas corrientes, hasta 0.4 a altas corrientes.

Estas condiciones son ideales para la aplicación de los capacitores en serie y se puede mantener un factor de potencia unitario a lo largo de todo el proceso de grafitado.

2.2.2.4. En hornos de arco

La condición normal de operación de estos hornos está caracterizada por dos períodos bastante bien definidos: el primero conocido como "breaking down" y el segundo como "refining" o "holding".

Durante el período de "breaking down" tienen lugar violentas fluctuaciones de carga reactiva y un flujo de corriente monofásica de alta magnitud y bajo factor de potencia. Estas características hacen de estas cargas un verdadero problema desde el punto de vista de la alimentación.

El período de "refining" o "holding" trae consigo una apreciable reducción de la carga, que el factor de potencia sea más alto y que no existan variaciones apreciables de la corriente.

A primera vista parece que el capacitor en serie pudiera ser usado durante el primer período, pero el extremadamente amplio rango de variación causa problemas muy difíciles para proteger al capacitor de sobrevoltajes y en este caso el capacitor en serie no es generalmente una buena solución.

Sin embargo existe una aplicación de los capacitores en serie en unión con otro equipo. Las variaciones bruscas e indeseables de voltajes durante el período de "breaking down" pueden ser eliminadas instalando un capacitor sincrónico en las barras del horno. Dentro de esta fuente de generación de volt-amperios reactivos en paralelo, una parte de los cambios repentinos de carga reactiva puede ser eliminada, siendo esta parte determina-

da por la relación de la reactancia del capacitor sincrónico a la reactancia de la fuente.

Los capacitores en serie han sido usados para reducir la reactancia transitoria y subtransitoria del capacitor sincrónico, permitiéndole alimentar una mayor parte de las demandas repentinas de volt-amperios reactivos.

Los capacitores en serie también se han usado con alternadores privados que alimentan hornos de arco, en paralelo con el sistema público de alimentación, siendo su objeto en este caso el de evitar que sea el sistema público el que cargue con la mayor parte de los cambios violentos de carga reactiva.

2.3. PROBLEMAS DE APLICACION DE LOS CAPACITORES EN SERIE

Conjuntamente con las ventajas que presentan los capacitores en serie instalados en sistemas de potencia existe la posibilidad de que se produzcan ciertos fenómenos indeseables en el sistema. Estos fenómenos que están relacionados generalmente a cierta clase de resonancia, han hecho que hasta épocas recientes las grandes instalaciones de capacitores en serie no sean usadas aún cuando estas eran la mejor solución para resolver ciertos problemas de operación del sistema o sis-

temas. En muchos casos las dificultades que se van a encontrar pueden ser anticipadas y se pueden tomar las precauciones adecuadas para que el sistema funcione sin problemas siendo necesario para ello hacer un estudio detallado de todas las cargas posibles en todas las combinaciones posibles.

Hay basicamente tres problemas fundamentales en las instalaciones de capacitores en serie y pueden encontrarse todos o algunos de ellos en una misma instalación; los problemas son:

a) En circuitos que contienen motores;

b) La resonancia con los transformadores;

c) El "hunting" de los motores sincrónicos.

2.3.1. <u>En circuitos que contienen motores</u>

El voltaje a través de los capacitores en serie, depende de la corriente que fluye por la línea y es normal el uso de aparatos y dispositivos de protección, que limiten el valor de este voltaje a un valor seguro.

Los capacitores en serie instalados en circuitos que alimentan a cargas que en su mayor parte son motores, deben tener un voltaje nominal lo suficientemente alto como para poder soportar las corrientes de arranque de los motores y es impor-

tante diseñar el equipo de protección del capacitor contra sobrevoltajes para que no opere en las condiciones de arranque. La práctica ha demostrado que para calcular el voltaje nominal continuo del capacitor se puede emplear con seguridad la siguiente fórmula:

$$Vn = \frac{1}{1.5} \cdot I \text{ arranque} \times Xc \qquad (2.53)$$

En donde:

Vn = Voltaje nominal continuo del capacitor

I arranque = Corriente instantánea de arranque de los motores

Xc = Reactancia del capacitor

Pero no solamente este problema de sobrevoltajes producidos por las corrientes de arranque de los motores es el que se encuentra en esquemas eléctricos de capacitores en serie con motores, sino que además hay otro tal vez más importante que es el de la resonancia subsincrónica durante el arranque de los motores.

Cuando un motor de inducción o un motor sincrónico arranca a través de un capacitor en serie, el rotor del motor puede bloquearse y continuar girando a una velocidad menor que

la velocidad sincrónica. Esta condición se la conoce con el nombre de resonancia subsincrónica y es producida por el capacitor cuya reactancia capacitiva en unión con la reactancia inductiva del circuito del motor establece un circuito resonante a una frecuencia más baja que la de la fuente de alimentación. Bajas condiciones tales el rotor actúa como un generador sincrónico estable, ya que recibe energía de la fuente de alimentación a la frecuencia nominal a través del estator y la convierte o transforma a la frecuencia subsincrónica, la cual regresa al circuito que contiene el capacitor. Este circuito estando en resonancia, presenta una impedancia mínima al voltaje subsincrónico y consecuentemente conduce una gran corriente, de tal manera que un motor que esté operando bajo estas condiciones puede dañarse por causa de una excesiva vibración o un excesivo calentamiento.

La frecuencia subsincrónica depende de los tamaños relativos del capacitor y del motor. La capacidad (KVAR) del capacitor es determinada por la capacidad del circuito y consecuentemente la frecuencia resonante depende indirectamente de la relación que existe entre la potencia del motor y la capacidad de la línea que lo alimenta. Esta frecuencia subsincrónica cae generalmente en el rango de 20 a 30 ciclos para un motor de 60 ciclos cuya potencia sea igual a la mitad de la capacidad de la línea.

Siempre que el tamaño del motor decrece con respecto a las capacidades del circuito y del capacitor, su reactancia es mayor. Ahora bien, durante la resonancia tanto la reactancia capacitiva como la inductiva son iguales y por lo tanto el único factor limitativo de la corriente que va a fluir va a ser la resistencia de la línea, siendo esta la causa de que fluyan grandes corrientes que pueden causar el daño del motor.

Debido a que la reactancia capacitiva crece al disminuir la frecuencia, la frecuencia subsincrónica de resonancia es más baja cuando el motor es más pequeño. Un motor cuya potencia sea menor que el diez por ciento de la capacidad del circuito puede entrar en resonancia a una frecuencia subsincrónica de cinco ciclos o menos si se lo arranca con carga.

El método más común de prevenir la resonancia subsincrónica es el eliminar dicha frecuencia colocando una resistencia en paralelo con el capacitor. Para calcular dicha resistencia existen algunos métodos, cada uno de los cuales requiere un estudio particularmente extenso, ya que para poder explicarlos sería necesario estudiar en detalle el funcionamiento de los motores de inducción y sincrónicos, lo que estaría fuera del alcance de esta tesis. Sin embargo vale la pena anotar que la

práctica ha demostrado que los valores calculados son apenas la mitad ó un décimo de los valores en realidad necesarios. Esto se debe a la dificultad de precisar variables tales como la inercia del motor y la carga del mismo, la carga a la que va a estar sujeto el motor durante el arranque, la aceleración del motor, el tipo de arrancador que tiene el motor y otras cargas en el circuito. Por ejemplo cuando existen otras cargas en el circuito al momento de arrancar el motor, se reduce la posibilidad de la resonancia subsincrónica ya que su efecto es similar al de la resistencia en paralelo con el capacitor.

La resistencia que se use debe ser tan grande como sea posible para que las pérdidas continuas en esta resistencia sean pequeñas, ya que estas son iguales al cuadrado del voltaje a través del capacitor dividido para el valor de la resistencia. Es una práctica común el usar resistencias ajustables dentro de un rango predeterminado, particularmente en las instalaciones grandes. No obstante, cuando no es posible usar una resistencia grande, se pueden usar resistencias de valores pequeños que puedan ser desconectadas cuando el motor ha alcanzado su velocidad nominal y el riesgo de la resonancia haya pasado. La desconexión puede ser mahual, por control remoto con hilo piloto o por medio de ondas de radio con un equipo de desconexión operado eléctricamente.

Sin embargo este no es el único método para evitar la resonancia subsincrónica, existiendo otro que es el de usar resistencias en paralelo únicamente entre las dos fases de un capacitor trifásico, pero esta solución es aceptable únicamente cuando tal conexión no produce un desbalanceamiento apreciable de voltaje. Este desbalanceamiento depende del valor de la resistencia ya que mientras más grande es su valor, menor es el desbalanceamiento. Sin embargo, no es el grado de desbalanceamiento el que determina el valor ohmico de la resistencia, sino el riesgo de la resonancia subsincrónica. A pesar de que este método es un tanto complicado, por lo menos una instalación de este tipo está en servicio en los Estados Unidos y está operando satisfactoriamente.

Como la resonancia subsincrónica puede existir únicamente durante el arranque del motor, esta puede ser prevenida insertando una resistencia en serie en los terminales del motor en vez de instalarlo en paralelo con el capacitor. Cuando se usa este sistema es necesario utilizar contactos para cortocircuitar la resistencia una vez que el motor haya alcanzado su velocidad nominal. Este procedimiento es especialmente usado cuando existen en un circuito sólo unos pocos motores y así resulta más económico que el usar una resistencia grande en paralelo con el capacitor.

Si los motores no arrancan con frecuencia, la resonancia subsincrónica puede evitarse sin usar resistencias, cortocircuitando el capacitor cuando arranca el motor. Además si es que es aceptable un desbalanceamiento temporal, se puede evitar la resonancia en algunos casos cortocircuitando solamente una fase del banco de capacitores, lo cual hace más económico el esquema eléctrico ya que el equipo de conexión y desconexión es más fácil.

Puesto que la reactancia del capacitor es inversamente proporcional a la frecuencia, mientras que la de una inductancia es directamente proporcional a la frecuencia, es un circuito que consiste de un capacitor y una inductancia, la caída de voltaje a través del primero aumenta al disminuir la frecuencia. Por lo tanto, cuando existe resonancia subsincrónica en un sistema de potencia, la caída de voltaje a través del capacitor aumenta y este voltaje puede ser lo suficientemente grande como para que el equipo de protección del capacitor opere cortocircuitando el capacitor. Esta operación elimina la condición de resonancia y permite que el motor alcance su velocidad nominal para que luego de pasado un momento el capacitor sea automáticamente reconectado al circuito. Esta secuencia de operaciones puede hacer posible, en algunas ocasiones, particularmente cuando los motores no tienen arranques continuos, usar únicamente

el equipo de protección del capacitor contra sobrevoltajes para prevenir la resonancia subsincrónica y tal vez para eliminar la necesidad de usar resistencias en paralelo.

El equipo de protección (gap) es seleccionado para operar a una corriente doble y por ende voltaje doble del nominal del capacitor a frecuencia nominal. Consecuentemente, durante la resonancia subsincrónica, cuando la frecuencia sea la mitad el "gap" operará con la corriente nominal puesto que la reactancia capacitiva aumenta al doble. Mientras menor sea la frecuencia menor será la corriente necesaria para que opere el "gap" cuyas características y función se verán más adelante cuando se trate del equipo de protección.

En general, la posibilidad de que existan condiciones de resonancia subsincrónica, debería ser chequeada en todos los circuitos en los cuales exista un motor cuya potencia sea más del 5% de la capacidad del circuito. Sin embargo la experiencia ha indicado que los motores que tienen una capacidad menor que el 10% de la capacidad del circuito de alimentación, no encuentran dificultad alguna para arrancar sin carga, pero cuando los motores están moviendo grandes cargas con gran inercia, el circuito debe ser chequeado para la condición de resonancia subsincrónica, aún cuando la potencia de los motores sean menores que el 5% de la capacidad del circuito.

2.3.2. La resonancia con los transformadores

Cuando un transformador es energizado, éste toma una corriente transitoria de excitación sumamente grande. Si un capacitor está en serie en el circuito, este puede ocasionar una condición de resonancia, lo cual hace que esta corriente continúe circulando, causando un daño irreparable tanto en el capacitor como en el transformador. Este fenómeno se denomina ferro-resonancia.

Este fenómeno de la ferro-resonancia puede ocurrir particularmente si la reactancia del capacitor excede a la reactancia inductiva del circuito de alimentación y no solamente cuando el transformador es energizado sino también cuando hay rápidas fluctuaciones de carga, ya que la corriente de descarga del capacitor produce una componente unidireccional en el transformador causando una saturación, por lo cual este fenómeno está relacionado con la forma de la característica de magnetización del transformador.

La ferro-resonancia en la mayoría de los casos se elimina automáticamente por medio del "gap", ya que la corriente de magnetización es probablemente de la suficiente magnitud y de una frecuencia lo suficientemente baja como para poder hacer que a través del capacitor aparezca un voltaje lo suficientemen

te alto como para hacer operar el "gap". Ahora bien, conforme el período transitorio de excitación llega a su fin, la corriente que fluye a través del "gap" va disminuyendo y cuando se llega al estado estable la corriente de estado estacionario que circula a través del "gap" por un corto período es generalmente tan pequeña que no se puede cebar el arco a través del "gap", lo cual hace que el capacitor sea reinsertado en el circuito automáticamente.

La posibilidad de que el "gap" pueda prevenir la ferro-resonancia se chequea por medio de oscilogramas luego de que el capacitor ha sido instalado. Si las pruebas indican que el "gap" es inadecuado, la ferro-resonancia puede ser eliminada poniendo una resistencia en paralelo con el capacitor, la cual puede ser la misma que se usa para prevenir la resonancia subsincrónica con los motores. También se puede hacer que en el momento de energizar el transformador, haya una carga mínima aplicada a él, ya que esto trae como consecuencia la disminución de la corriente transitoria de magnetización.

2.3.3. El "hunting" de los motores sincrónicos

Para hacer más comprensible el problema del "hunting" de los motores sincrónicos es necesario hacer un análisis de lo que es el "hunting".

Cuando un motor sincrónico está funcionando con la excitación fija dentro de la región de estabilidad un incremento de la carga aplicada al motor, de un valor P_1 a un valor P_2, trae como consecuencia un desplazamiento del rotor de un ángulo δ_1 a un ángulo $\delta_1 + \Delta\delta$. En otras palabras, el rotor debe retrazarse con respecto al campo de armadura por un ángulo de $\Delta\delta$ grados eléctricos. En general, sin embargo la inercia del rotor y de la carga a él conectada previenen que haya un ajuste instantáneo del rotor a las condiciones de variación de carga, lo cual trae como consecuencia que el rotor se retraze más aún del ángulo $\Delta\delta$ que es el ángulo de equilibrio, desarrollando por lo tanto un torque mayor que el que requiere la carga, con lo cual no sólo que compensa la reducción inicial de velocidad del rotor, sino que la aumenta un poco sobre la velocidad sincrónica del mismo. De esta manera se ha creado o producido una oscilación del rotor, primero a un lado y luego al otro, de la nueva posición de equilibrio, estando ésta oscilación superpuesta a la velocidad sincrónica uniforme de rotación. Mirando el problema de otra manera se puede decir que el campo de armadura producido por la corriente de línea, gira a una velocidad angular constante y el campo del rotor, que se mueve en el espacio con el campo de armadura, tiene un movimiento hacia y en contra del primero. Todo este fenómeno causa la aparición de

de las corrientes de Eddy en las caras de los polos, las cuales de acuerdo a la Ley de Lenz se oponen siempre a las causas que las generan y por lo tanto tratan de amortiguar estas oscilaciones. Los cambios de ángulo δ están acompañados de cambios en la corriente de la armadura y este fenómeno denominado "hunting" puede ser observado por una oscilación periódica de un amperímetro colocado en el circuito de la armadura del motor. Debido a que el "hunting" es un fenómeno objecionable a los motores sincrónicos se los provee de bobinas de amortiguamiento, las cuales consisten de barras de cobre de baja resistencia que se las introduce en ranuras en las caras de los polos, estando los extremos de estas barras conectados a los anillos del motor. La potencia por fase desarrollada por el motor es:

$$P = \frac{\bar{V}\bar{E}\,\text{Cos}\,(\phi - \delta) - \bar{E}^2\,\text{Cos}\,\phi s}{\bar{Z}s} \qquad (2.54)$$

En donde:

δ = Angulo de torque

P = Potencia por fase del motor en Watts

$\bar{V}$ = Voltaje aplicado al motor en Volts

$\bar{E}$ = Fuerza contraelectromotriz en Volts

$\bar{Z}s$ = Impedancia sincrónica del motor en Ohms

ϕs = Angulo de la impedancia sincrónica

Esta ecuación muestra la manera en la que la potencia desarrollada por el motor y por ende el torque por el desarrollado dependen del ángulo de torque (δ).

Diferenciando esta ecuación con respecto a δ , tenemos que:

$$\frac{dP}{d\delta} = \frac{\bar{V}\bar{E}}{\bar{Z}s} \text{ Sen } (\phi_s - \delta) \qquad (2.55)$$

Debido a que el valor de la resistencia de la armadura (Ra) es muy pequeña comparada con la reactancia sincrónica del motor (Xs), el ángulo ϕs que es el ángulo de la impedancia sincrónica (Zs) tiene un valor de aproximadamente 90° y la ecuación 2.55 se puede escribir:

$$\frac{dP}{d\delta} = \frac{\bar{V}\bar{E}}{\bar{Z}s} \text{ Cos } \delta \qquad (2.56)$$

De esta fórmula se vé que la variación de la potencia desarrollada por el motor, por unidad de cambio en al ángulo de torque es directamente proporcional a $\bar{V}.\bar{E}$. y Cos δ e inversamente proporcional a $\bar{Z}s$.

Ahora bien, como $\bar{Z}s = \bar{X}s$, la ecuación 2.56 se transforma en:

$$\frac{dP}{d\delta} = \frac{\bar{V}\bar{E}}{\bar{X}s} \quad \text{Cos } \delta \qquad (2.57)$$

Con lo cual se vé que mientras menor sea Xs, mayor será el cambio en la potencia y por ende en el torque desarrollado por el motor, lo cual trae como consecuencia que el peligro del "hunting" sea mayor.

El "hunting" de un motor sincrónico ligeramente cargado puede ser producido por perturbaciones tales como desconexiones del circuito de alimentación y por cambios en la carga o en la excitación del mismo motor.

El factor preponderante en la producción del "hunting" es la relación entre la resistencia del alimentador del motor, a la reactancia del mismo (incluyendo la reactancia del capacitor, entre la fuente generadora y los terminales del motor. Si es que esta relación es menor que la unidad y no es negativa, es muy difícil que se produzca el "hunting" según la práctica lo ha demostrado. Ahora bien, puesto que la instalación de capacitores en serie disminuye la reactancia efectiva del alimentador, la posibilidad de que exista el "hunting" aumenta considerablemente y esta posibilidad debe ser considerada cuando una línea compensada alimenta a un motor sincrónico. En las líneas de gran capacidad de transmisión a altos voltajes, el riesgo es mucho menor debido a que la relación entre la resisten

cia y la reactancia de la línea es muy grande, y que en estos casos un 50% de compensación de la reactancia prueba a menudo ser suficiente para los propósitos de aplicación de capacitores en serie.

2.4. FUNDAMENTO DE DISEÑO DE LOS EQUIPOS DE PROTECCION DE LOS CAPACITORES EN SERIE

Al capacitor en serie es necesario protegerlo contra varios aspectos del funcionamiento del sistema al que está aplicado, tales como fallas en la línea y sobrecargas y problemas en el funcionamiento del mismo capacitor tales como fallas del dieléctrico y es por esta razón por la que el equipo de protección del capacitor debe cumplir con varios requisitos, los cuales vamos a estudiar en detalle.

2.4.1. Protección del capacitor en serie durante condiciones de falla en la línea

En la mayoría de los circuitos en los cuales se aplican los capacitores en serie, las corrientes y por lo tanto los voltajes a través del dieléctrico del capacitor, durante condiciones de falla llegan a alcanzar valores algunas veces el máximo valor normal de trabajo. Como las unidades standard de capacitores que se construyen pueden soportar aproximadamente un 200% de su valor nominal de voltaje de trabajo durante cortos

períodos sin que el dieléctrico sufra ningún daño, es necesario usar capacitores con una corriente nominal igual al 50% de la máxima corriente que puede fluir durante condiciones de falla, o en su defecto usar equipos de protección para limitar el voltaje a través del dieléctrico.

Para un valor dado de reactancia del capacitor el costo de un capacitor se incrementa aproximadamente con el cuadrado de la corriente nominal, de tal manera que es más económico el usar capacitores cuyas capacidades nominales de corriente están basadas en la corriente normal de trabajo y limitar el voltaje que puede aparecer a través de sus terminales por medio de aparatos auxiliares.

Hay que tener mucho cuidado al especificar un equipo de protección de capacitores contra fallas, de que el voltaje nominal del capacitor en serie y su equipo de protección asociado sea lo suficientemente alto como para que el capacitor no sea cortocircuitado durante condiciones normales de carga. En circuitos radiales para asegurar el buen funcionamiento del capacitor en serie durante el arranque de los motores, la experiencia ha demostrado que la capacidad nominal del capacitor debe ser al menos un 67% de la corriente transitoria de arranque, más grande que puede ser impuesta a la línea, más la corriente nor-

mal de operación. De esta manera cuando se usan equipos de protección para cortocircuitar al capacitor cuando el voltaje llega a 200% del valor nominal, el capacitor permanece en servicio durante tales cargas transitorias.

El aparato usado para proteger al capacitor en serie durante fallas, debe limitar el voltaje a alrededor de 2 veces el valor nominal del capacitor aún durante cortos períodos, de tal manera que este debe ser cortocircuitado durante el primer medio ciclo de la corriente de falla, lo cual se lo logra por medio de una abertura (gap) lo cual está representada en la figura 2.30 y se pueden escoger los materiales que se emplean en su construcción para obtener un arco estable y evitar el encebamiento. En la mayoría de los casos, sin embargo, se debe prever algún medio para desviar el arco a algún otro camino de descarga que no sea el "gap" para evitar que cuando la corriente sea muy alta lo dañe.

Luego de que la corriente de falla desaparece y el circuito regresa a sus condiciones normales de operación, el "gap" debe ser abierto para que el capacitor se reincorpore al servicio, lo cual se puede hacer y normalmente se lo hace por medio de contactos térmicos o magnéticos, o por medio de un "circuit breaker" automático el cual cierra sus contactos para corto-

circuitar tanto al "gap" como al capacitor y los abre un poco de tiempo después de que la corriente de falla ha desaparecido reincorporando al capacitor al circuito.

Cuando la clase de aislamiento del capacitor en serie es bajo, no es posible diseñar el "gap" para que opere a valores de voltaje tan bajos como los que sería necesario y por lo tanto se debe usar un circuito adicional de arranque para iniciar el arco.

En los grandes capacitores en serie aplicados a líneas de transmisión que sirven de enlace entre dos centrales, por ejemplo, es necesario usar "gaps" especiales o "circuit breakers" de alta velocidad y en muchos casos ambos equipos, para proteger al capacitor y reinsertarlo en el circuito a lo más después de un ciclo luego de que la falla se ha despejado. Esto es necesario para que el capacitor cumpla su función de incrementar la estabilidad del sistema. Si los capacitores no son reincertados tan rápidamente, no se podrá conseguir el beneficio que se espera conseguir con su instalación y más aún su utilidad en este tipo de líneas de transmisión se reduciría substancialmente tanto en el aspecto eléctrico como en el económico.

En muchos casos se usa en lugar de los "circuit breakers" otros equipos tales como el denominado "gap" de autoexitación,

el cual tiene un tiempo de deionización sumamente bajo, de tal manera que cuando desaparece la corriente de falla, el arco producido por ella en el "gap" desaparece rápidamente. Para el mismo efecto se usan también equipos electrónicos.

Un esquema típico de protección del capacitor contra fallas se aprecia en la figura 2.30, en la cual:

1. Capacitor
2. Aislador
3. Reactor de descarga con embobinado secundario
4. Switch para cortocircuitar al capacitor y al "gap"
5. "Gap"
6. Transformador de corriente
7. Resistencia de amortiguamiento

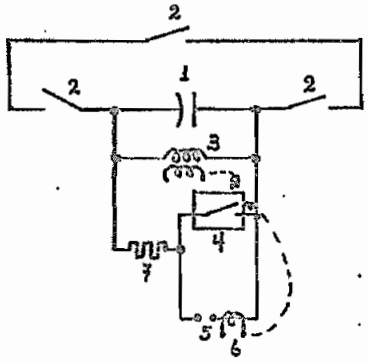


FIG. 2.30.- Circuito típico de protección para capacitores en serie.

El objeto de los aisladores es el poder aislar al capacitor de la línea y sin embargo dejar el circuito en servicio cuando sea necesario reparar el capacitor. Los reactores de descarga sirven para limitar la corriente de descarga cuando el "gap" está operando. El transformador de corriente tiene por objeto el operar el switch para cortocircuitar el capacitor y el "gap".

2.4.2. Protección contra sobrecargas contínuas

Los capacitores estandard no deberían ser usados continuamente a un voltaje promedio mayor del 105% de su voltaje nominal y consecuentemente la corriente promedio de trabajo a través de un capacitor en serie no debería exceder a la corriente nominal de trabajo del mismo en más de un 5%. Debido a que el equipo de protección del capacitor para cortocircuitos en la línea esta diseñado para funcionar al menos a un valor de 2 veces la corriente nominal de trabajo del capacitor, no va a operar con sobrecargas que sean inferiores a ese valor y por lo tanto a menudo es necesario proveer al capacitor de un equipo de protección tanto contra sobrecargas como contra cortocircuitos.

El aparato protector del capacitor contra sobrecargas debe tener una característica inversa de tiempo-corriente, que debe ser coordinada con la característica tiempo-corriente del

capacitor para permitir sobrecargas momentáneas, más no sobrecargas contínuas que exceden el 5% de la corriente nominal. Según se puede ver en la Tabla Nº 1, en el capítulo I, página 33 un capacitor tiene una capacidad de sobrecarga de 1,35 veces la nominal durante 30 minutos y durante 5 minutos de 1,5 veces, es decir que si es que la corriente que circula por el capacitor durante más de 5 minutos, tiene un valor de 1,5 veces la corriente nominal, el equipo de protección del capacitor contra sobrecargas debería operar.

Uno de los equipos más usados para prevenir la sobrecarga del capacitor es un switch térmico, el cual debe tener una característica tiempo-corriente capaz de ser coordinada con la del capacitor. Sin embargo, esta protección puede eliminarse en capacitores pequeños debido al sobreprecio que existiría. Cuando esto sucede es importante el hacer una selección cuidadosa de la capacidad nominal del capacitor.

2.4.3. Protección contra fallas del dieléctrico

La protección contra fallas del dieléctrico del capacitor es generalmente usada en grandes bancos de capacitores en serie, ya que en los bancos pequeños el incluirlo traería como consecuencia una mayor complicación del esquema y un mayor costo inicial.

La protección del dieléctrico es un medio de detectar una unidad de capacitor fallosa dentro de un banco de capacitores. En un banco de capacitores sin fusibles internos, un capacitor cortocircuitado puede mantener un arco interno, el cual produce gases que se van acumulando en la unidad. En el caso de que el capacitor continúe operando, la presión interna de los gases puede llegar a un valor tan alto en el que se produce la ruptura del tanque de protección, causándose daños no sólo al capacitor en sí mismo, sino también a otras unidades y equipos alcanzados por la explosión. Si las unidades están equipadas por medio de fusibles, como en verdad deberían ser, la operación del fusible para retirar del servicio la unidad fallosa, hace que la reactancia del banco de capacitores aumente y por lo tanto si es que el banco continúa operando con la corriente nominal, las unidades que aún permanecen en servicio están sujetas a sobrevoltajes.

Esta protección del capacitor contra fallas del dieléctrico se la hace detectando el valor de la corriente en dos ramales iguales del banco de capacitores y cuando el valor del desbalanceamiento excede un valor previamente determinado, considerando los valores de sobrevoltajes y sobrecorrientes que pueden soportar las unidades sin sufrir daño alguno, el banco de capacitores es cortocircuitado para reemplazar la unidad fallosa.

2.4.4. Generalidades sobre los equipos de protección

Ahora bien, habiendo ya estudiado en general cuales son los principales equipos de protección que un capacitor o un banco de capacitores en serie debe tener, vale la pena hacer un estudio un poco más detallado de los aparatos de protección que son usados para tales objetos, siendo estos:

a) "Spark Gaps"

b) Ignitrones y otros tipos de válvulas de mercurio

c) Materiales de resistencia no lineal

2.4.4.1. "Spark Gaps"

Los "spark gaps" consisten generalmente de dos electrodos cuyas formas pueden ser variadas, como por ejemplo: cilindros, discos, esferas, segmentos de esferas, etc., separados por un dieléctrico que puede ser aire o algún otro gas, o material sólido tal como la mica; sin embargo, el dieléctrico más usado para los spark gaps es el aire. El valor de voltaje para que se produzca la aparición del arco entre los electrodos, denominado también voltaje de rompimiento, es determinado tanto por la forma de los electrodos como por su separación y por el dieléctrico entre ellos.

Ahora bien, hay varios tipos de "spark gaps" los cuales merecen una consideración especial:

a) "Spark gaps" con dieléctricos sólidos

Los electrodos en este tipo de "spark gaps" están separados por un disco de mica u otro material aislante, cuyo espesor determina el valor del voltaje de rompimiento. Dependiendo de la duración y de la magnitud de la corriente, los electrodos van a ser picados y en algunos casos solidamente soldados, por lo cual después de cada operación el "spark gap" simple debe ser cambiado.

Por esta razón este tipo de "spark gaps" debe ser utilizado únicamente en líneas de importancia muy relativa y si la probabilidad de que ocurra una falla es muy remota.

b) "Spark gaps" con gas

Este tipo de "spark gaps" están generalmente compuestos de un recipiente de vidrio, el cual envuelve a los electrodos y a un gas tal como hidrógeno. Estos "gaps" pueden obtenerse con valores precisos de voltaje de rompimiento, en el rango de 200 voltios a 7 KV de valor eficaz. Sin embargo, el valor del voltaje de rompimiento no puede ser ajustado después de que estos "gaps" hayan sido construídos.

Estos "gaps" tienen un valor limitado de la corriente de falla que pueden soportar y además tienen algunas características de auto-extinción del arco. Pueden ser usados con capa-

citores pequeños y medianos en sistemas cuyo voltaje no sobrepase los 33 KV.

c) "Spark gaps" simples de aire, sin breakers o switches para cortocircuitarlos

En el uso de un "spark gap" simple la corriente de falla fluye por el "gap" hasta que los aparatos de protección del sistema operan y eliminan la falla, por lo cual estos "gaps" deben ser diseñados para soportar la corriente de falla durante un tiempo tal, que permita que los aparatos de protección del sistema operen sin que el "gap" sufra daño alguno. Tales "gaps" no tienen propiedades de auto-extinción, es decir que el aislamiento entre los electrodos no reaparece nuevamente hasta que la corriente de falla no desaparezca. Estos "gaps" son usados para líneas rurales de distribución con voltajes de hasta 33 KV y aún con voltajes más altos.

Para la protección de capacitores en serie, este tipo de "spark gaps" no son aceptables cuando necesitan un voltaje de rompimiento mayor de 4 ó 6 KV de valor eficaz y cuando es imprescindible su uso para proteger capacitores de bajos valores de voltaje nominal se pueden emplear tres métodos:

1) Se puede lograr el encebamiento del arco al voltaje requerido, alimentando al "gap" por medio de un alto voltaje de alta frecuencia.

2) Un transformador especial de elevación puede ser conectado a través de los terminales del capacitor con el "gap" conectado en el secundario.

3) La resistencia del dieléctrico del capacitor puede ser incrementada a un valor más alto del necesario para cumplir con las condiciones máximas de carga normal.

d) "Spark gaps" simples, de aire, con breakers o switches para cortocircuitarlos.

Con este tipo de "gap" el cierre del aparato encargado de cortocircuitarlo es iniciado por el flujo de corriente a través del "gap" y cuando el sobrevoltaje ha desaparecido el aparato es desconectado, ya sea manualmente o automáticamente. Este equipo de protección es aceptable para sistemas donde los voltajes exceden los 11 KV, hasta los voltajes más altos de transmisión.

e) "Spark gaps" de auto extinción

Los "gaps" de este tipo inician el rompimiento de manera normal, pero el arco entre los electrodos es extinguido por medio de aire comprimido, o por medio de bobinas productoras de viento magnético, luego de que se han reestablecido las condiciones normales en el circuito. Por razones de costo es

tos "gaps" se usan primordialmente en sistemas de altísimo voltaje, digamos del orden de 132 KV hacia arriba.

Un esquema típico de protección de un capacitor en serie se puede obtener en la figura 2.31.

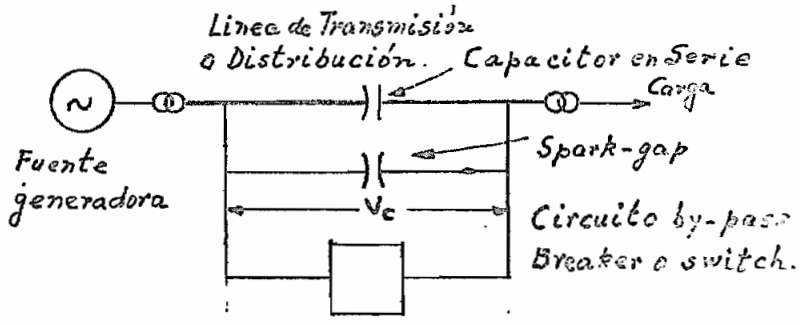


FIG. 2.31: Método convencional de protección de capacitores en serie.

2.4.4.2 Ignitrones y otros tipos de válvulas de mercurio

El circuito simplificado de la figura 2.32 muestra el principio de operación de un circuito de protección de sobrevoltajes.

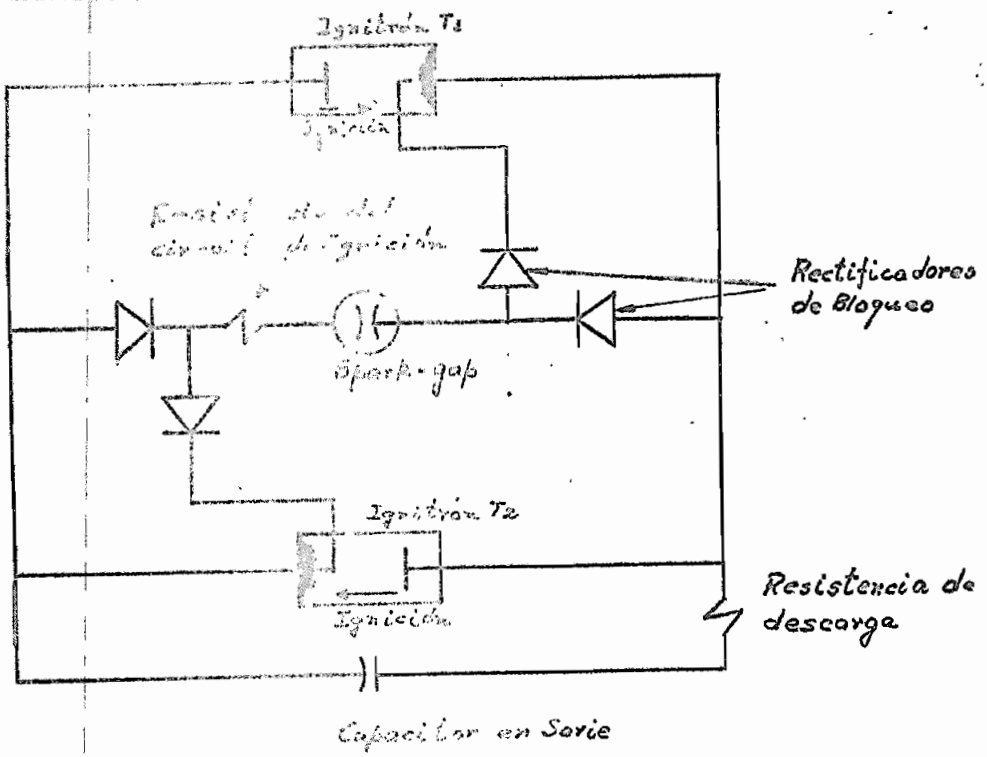


FIG. 2.32 [illegible] de capacitores en serie por [illegible] de Ignitrones.

Asumamos que en el instante en que ocurre la falla el ánodo del tubo ignitron T_1 es positivo con respecto al cátodo. El voltaje en este terminal aumenta hasta que se produce el rompimiento en el "spark gap", a un valor lo suficientemente bajo de voltaje, como para proteger al capacitor en serie. Esto causará un gran impulso de corriente a través del tubo T_1 ionizando el mercurio que está en él. Después de unos pocos microsegundos este tubo se vuelve conductor, cortocircuitando así al capacitor. Cuando la corriente se aproxima a cero, el mercurio del tubo se desioniza automáticamente reincorporando al capacitor al circuito. Durante el próximo medio ciclo la

la secuencia se repite, pero la corriente fluye ahora a través del tubo T_2 y mientras el sobrevoltaje persista, los tubos continuarán conduciendo alternativamente.

La resistencia de descarga limita el pico de la corriente de descarga del capacitor a través de los tubos. La resistencia del circuito de los tubos ignitrones limita la corriente a través de los mismos y los rectificadores en los mismos circuitos previenen que se impongan voltajes negativos a los ignitrones.

Los tubos ignitrones son capaces de acarrear corrientes de falla de unos cuantos cientos de amperios durante corto tiempo. El circuito es completamente automático y el retraso de tiempo que hay lugar desde el instante en que ocurre la falla hasta que el circuito opera es prácticamente despreciable.

En el presente estado de desarrollo, los ignitrones son considerados aceptables tanto técnica como económicamente para voltajes de hasta 33 KV y bajo consideraciones especiales para voltajes de 132 KV o mayores.

2.4.4.3. Materiales de resistencia no lineal

La resistencia de ciertos materiales cerámicos semiconductores, como por ejemplo: el carbón silicoso, de

cae rápidamente cuando el voltaje a él aplicado incrementa siendo esta propiedad muy utilizada en los pararrayos tipo válvula.

Por otra parte es evidente que los capacitores en serie pueden ser protegidos contra sobrevoltajes, por medio de resistencias de carbón silicoso a través de sus terminales y los experimentos realizados han demostrado que este tipo de protección da resultados satisfactorios.

Sin embargo ciertas características de los materiales silicosos ponen un límite en el rango de aplicación de estas resistencias, ya que bajo condiciones de trabajo, los elementos de carbón silicoso conectados a través del capacitor constituyen una resistencia, por la cual fluye corriente, la cual causa una pérdida de potencia y por ende calentamiento y mientras más grande sea la potencia pérdida que ellos tienen que disipar, mayor será su costo.

Los elementos de carbón silicoso son considerados aceptables para instalaciones pequeñas de capacitores en serie, con voltajes de hasta 11 KV, en donde las corrientes de falla no exceden de 300 ó 400 amperios de valor eficaz y en los cuales el tiempo de despeje de la falla no excede de 20 ó 30 ciclos. Esto se debe a que mientras más altas son las corrientes de falla y mientras mayor duración tienen, la pérdida de poten-

cia que los elementos de carbón silicoso tienen que evacuar es mayor y por ende su costo sería mayor y en muchos casos prohibitivo.

En el limitado número de aplicaciones donde este material prueba ser práctico en la protección del capacitor en serie contra sobrevoltajes, tiene una ventaja adicional que es la de proveer cierta resistencia amortiguadora en paralelo con el capacitor, la cual puede ser suficiente para evitar los problemas de la resonancia. Además como el carbón silicoso es un material cerámico no envejece y los elementos que se hacen de él no necesitan normalmente mantenimiento alguno.

Haciendo un resumen de lo dicho podemos elaborar un cuadro en el cual se pueden ver los rangos de aplicación de los diferentes sistemas de protección. (Ver cuadro próxima hoja).

2.4.5. Especificaciones para equipos de protección de capacitores en serie

Unicamente como guía para hacer una especificación de los equipos de protección de los capacitores y no como una regla fija pueden servir las siguientes características, según los casos de aplicación de los capacitores en serie.

Tipo de aparato de Protección	Voltajes del sistema (Valor eficaz)	Propiedades de auto-extinción	Equipo Auxiliar Requerido
"Spark gaps" con dieléctrico sólido	Hasta 33 KV	Ninguna	Ninguno
"Spark gaps" llenos de aire	Hasta 33 KV	Limitadas	Ninguno
"Spark gaps" simples de aire sin breakers ni switch	Hasta al menos 33 KV	Ninguna	Ninguno
"Spark gaps" simples de aire con breakers o switches	Hasta los más altos voltajes de transmisión	Completas	Breakers o switches
"Spark gaps" de autoextinción	Desde 132 KV hacia arriba	Completas	Ninguno
Ignitrones y otros tipos de válvulas de mercurio	Desde 132 hacia arriba	Completas	Ninguno

Sin embargo creo que como mera guía, como ya indique, las características que deben tener los "spark gaps" son las siguientes:

1) Debe ser de autoextinción luego de que las condiciones anormales del circuito hayan desaparecido.

2) Debe ser capaz de soportar la máxima corriente de falla que pueda existir en el sistema al que el capaci-

tor esté conectado y durante el tiempo necesario para que la falla sea eliminada.

3) La vida probable del equipo debe ser de por lo menos 20 operaciones en las condiciones indicadas en el numeral segundo.

4) Las descargas del capacitor luego del rompimiento, pero sin condiciones de falla, deben ser soportadas al menos 10.000 veces por el "gap".

5) El valor máximo para iniciar el rompimiento no debe ser mayor de 4 veces el valor nominal del voltaje del capacitor que está protegiendo. Esta relación debe ser determinada como la relación entre el valor de pico del voltaje de rompimiento, al valor de pico del voltaje nominal del capacitor.

6) Bajo condiciones normales de carga el rompimiento no debe empezar para valores de voltajes menores que el doble del valor nominal de voltaje del capacitor cuando el sistema está operando con corriente de carga.

7) El "gap" debe extinguir el arco, luego del rompimiento, cuando la corriente alcanza un valor tal que produce el voltaje nominal a través de los terminales del capacitor.

8) El "gap" debe ser aceptable para la interperie y conveniente para montaje en un capacitor.

2.4.6. Comentarios Generales

Es deseable, desde el punto de vista económico el aislar a los aparatos de protección únicamente para los máximos valores de voltaje que pueden aparecer entre sus terminales y para tomar ventaja de ello, cualquier energía necesaria para el equipo auxiliar del equipo de protección debe ser tomado a un voltaje no mayor que el voltaje de línea.

La protección contra sobrecargas con características inversas de tiempo-corriente puede ser aplicada a los grandes bancos de capacitores, en los cuales existe otra posible protección contra fallas del dieléctrico como ya se vió anteriormente. Así mismo puede ser necesario instalar resistencias de amortiguamiento y reactores en el circuito del "gap", para limitar la corriente de descarga del capacitor cuando se produce el rompimiento.

El dieléctrico del capacitor presenta tan baja impedancia contra las descargas atmosféricas que no está sometido a un sobre esfuerzo dieléctrico. Lo más importante en el capacitor contra descargas atmosféricas es el aislamiento entre partes conductoras y la tierra, el cual tiene que soportar el

mayor esfuerzo y los capacitores en serie están provistos de un gran aislamiento en este sentido.

2.5. INFLUENCIA DEL CAPACITOR EN SERIE Y SU EQUIPO DE PROTECCION SOBRE EL EQUIPO DE PROTECCION DE LA LINEA

En circuitos radiales la protección contra fallas no es afectada con la adición de capacitores en serie, ya que se considera que las corrientes de falla siempre exceden el doble de la corriente nominal y consecuentemente el "gap" empezará el rompimiento en el primer medio ciclo de la corriente de falla. Esta operación es mucho más rápida que la operación de los relés normalmente usados y por ende, la operación tanto de los relés como de los breakers protectores de la línea es la misma, ya sea con capacitores en serie como sin ellos.

Sin embargo en lo que a la protección a distancia, o por impedancia se refiere, ésta puede no funcionar adecuadamente cuando se insertan capacitores en la línea, ya que la reactancia capacitiva introducida cambia la relación impedancia distancia en la cual este tipo de protección se basa.

Supongamos un esquema como el siguiente:

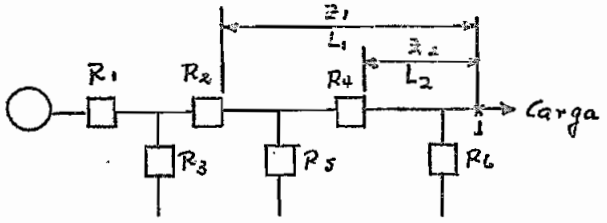


FIG. 2.33 : Influencia del capacitor en serie en la protección por impedancia.

Cuando sucede una falla en el punto 2, circulará una corriente de alimentación de la falla desde la fuente de alimentación hacia ella y únicamente podrán accionar los relés por los cuales fluya una corriente en la dirección indicada por las flechas en la figura.

Estos relés tienen un tiempo de disparo que es proporcional a la impedancia o sea que:

$$t_d = KZ \qquad (2.58)$$

En la que:

t_d = Tiempo de disparo

K = Constante del relé

Z = Impedancia desde el relé a la falla

Ahora bien, supongamos una falla en el punto 1 y además que tanto los relés R_2 y R_4 tengan la misma constante, en este caso los tiempos de disparo de los relés R_2 y R_4 serán:

$$t_d\ R_2 = KZ_1 \qquad (2.59)$$

$$t_d\ R_4 = KZ_2 \qquad (2.60)$$

Como L_1 es mayor que L_2, Z_1 será mayor que Z_2 y por ende $t_d\ R_4$ menor que $t_d\ R_2$ y será el relé R_4 el que opere para aislar la falla en 1.

Ahora supongamos que entre el relé R_2 y el relé R_4 se ha instalado un capacitor en serie cuya reactancia capacitiva sea mayor que la reactancia inductiva entre los dos relés, esto traería como consecuencia que la impedancia entre el relé R_2 y el punto de falla 1, Z_1' sea menor que la impedancia entre el relé R_4 y el punto 1, Z_2, de tal manera que de acuerdo a la fórmula 2.58 los tiempos de disparo de los relés R_2 y R_4 serían:

$$t_d\ R_2 = KZ_1' \qquad (2.61)$$

$$t_d\ R_4 = KZ_2 \qquad (2.62)$$

Puesto que Z_1' es menor que Z_2, $t_d\ R_2$ será menor que $t_d\ R_4$ y por lo tando el relé R_2 disparará antes que el R_4 pro-

duciéndose así una secuencia inadecuada de operación de los relés.

Por esta razón cuando se trata de insertar capacitores en serie en una red ya construída, es necesario chequear el tiempo de disparo de los relés de impedancia para que estos operen en la secuencia adecuada. Cuando por la inserción de un capacitor en serie se produzca una falla en la operación de los relés, se deben calibrar las constantes de dichos relés para que su funcionamiento sea correcto.

CONSIDERACIONES ECONOMICAS SOBRE LA UTILIZACION DE CAPACITORES EN SERIE

Se han visto ya las ventajas técnicas que se consiguen con la inserción de los capacitores en serie en los sistemas de potencia, ventajas tales como el mejoramiento de la estabilidad, el mejoramiento de la regulación, el mejoramiento del factor de potencia y la disminución del flicker. Todas estas ventajas técnicas se traducen, o deberían traducirse en ventajas económicas para que la aplicación del equipo tenga sentido, ya que cualquier inversión se justifica siempre y cuando los costos de operación, mantenimiento, depreciación y rentabilidad del capital invertido sean menores que el ahorro producido por el equipo en el cual se invierte el capital. En otras palabras, se debe cumplir la ecuación:

$$a + b + c < d \qquad (3.1)$$

En donde:

a = Rentabilidad del capital invertido

b = Depreciación del equipo

c = Costos de operación y mantenimiento

d = Ahorro conseguido

Ahora bien, es necesario estudiar cada una de las ventajas técnicas para tratar de encontrar el provecho económico que

en cada una de ellas se encuentra. Sinembargo hay que anotar que para la corrección del factor de potencia el uso de capacitores en paralelo resulta ser el más económico y es el que se utiliza en la práctica; por tal motivo no vale la pena siquiera hacer un análisis económico sobre tal aspecto. En cuanto al flicker, como ya anteriormente se dijo, su efecto se siente en los consumidores, de tal manera que cualquier intento en disminuirlo traería como consecuencia un mejor servicio a ellos, lo cual como es lógico incrementaría las ventas de energía. Sin embargo, no hay como apreciar de manera cuantitativa la ventaja económica que se lograría reduciendo el flicker, por lo cual también el análisis económico, en cuanto a la reducción del flicker, quedaría fuera del presente estudio, para dedicarnos a los dos puntos más importantes que son: el mejoramiento de la estabilidad y el mejoramiento de la regulación.

3.1. VENTAJAS ECONOMICAS CONSEGUIDAS CON EL MEJORAMIENTO DE LA ESTABILIDAD

Como se vió en el Acápite 2.1.2.1., la inserción de capacitores en un sistema trae como consecuencia el incremento de la estabilidad con dos características fundamentales:

1) Con el mismo margen de estabilidad se puede transmitir mayor potencia.

2) Con la misma potencia transmitida el margen de estabilidad es mayor.

Con referencia a la primera característica se puede decir que cuando un sistema, no tanto por consideraciones de regulación de voltaje, ni por capacidad de conducción de corriente, sino más bien por consideraciones de estabilidad ha llegado a un punto crítico en cuanto a transmisión de potencia se refiere, el poder aumentar la capacidad de transmisión del sistema permitiría aprovechar al máximo tanto el equipo de generación como el de transmisión. Ahora bien, el aprovechar al máximo las instalaciones es el fin que persigue toda empresa para hacer que los costos de producción sean mínimos y poder tener mayores ganancias. Por lo tanto, si el mejoramiento de la estabilidad permite el aprovechar el equipo instalado con toda su potencia, se están consiguiendo ventajas económicas que en ciertos casos pueden llegar a ser sumamente grandes.

En lo que al segundo aspecto se refiere, no es muy fácil llegar a vislumbrar las ventajas económicas que se obtendrían. Pero si se detiene un poco en el contenido, resulta relativamente sencillo darse cuenta de que si el margen de estabilidad es mayor, menores serán las ocasiones que tenga el sistema de salirse del sincronismo y por ende, menores serán los desgastes de

todas las partes constitutivas del sistema de control, tales como breakers, reles, etc. y lo que es más importante aún, la venta de energía será mayor ya que el suministro de energía a los consumidores no sufriría interrupciones.

Es decir que las ventajas económicas que se obtendrían con el mejoramiento de la estabilidad son:

a) Mejor aprovechamiento del equipo instalado, con lo cual los costos de producción serían menores.

b) Mayor venta de energía con su consiguiente mayor ingreso.

c) Menor desgaste de los equipos de control y por lo tanto menores costos de mantenimiento.

Todo esto habría que comparar con el costo, depreciación del equipo de capacitores y rentabilidad del capital invertido en tal equipo para ver si tal inversión es justificable.

3.2. VENTAJAS ECONOMICAS CONSEGUIDAS CON EL MEJORAMIENTO DE LA REGULACION

Al insertar un capacitor en serie en un sistema se vió que mejoraba la regulación de tensión, es decir que para un mismo voltaje generado, el voltaje entregado a los consumidores es más alto en el caso de que se usen capacitores en serie que cuando no se los usa.

Esta característica es una gran ventaja económica puesto que al ser el voltaje en los terminales receptores mayor, menor va a ser la corriente que circule por el sistema y como las pérdidas son directamente proporcionales al cuadrado de la corriente, éstas pérdidas en los sistemas de transmisión y distribución van a ser menores también.

Además al disminuir la corriente que circula por un sistema, la caída de voltaje inductiva en ellos va a ser menor y por lo tanto la demanda de voltaje reactivo en los generadores es menor también, con lo cual la potencia que ellos tienen que generar es menor, disminuyendo además las pérdidas.

En resumen las ventajas técnicas que se consiguen al insertar capacitores en serie en un sistema para mejorar la regulación de tensión son:

a) Menores pérdidas en los sistemas de transmisión y distribución.

b) Menores pérdidas en los sistemas de generación.

5.3. COMPARACION ECONOMICA ENTRE LOS CAPACITORES EN SERIE Y OTROS EQUIPOS USADOS PARA LA COMPENSACION DE LA INDUCTANCIA

Una comparación económica entre los capacitores en serie y otros métodos de compensación de la inductancia es muy difícil

debido a la diferente naturaleza de los resultados obtenidos con los varios métodos.

Es sin embargo interesante el comparar los capacitores en serie con los capacitores en paralelo y los sincrónicos y se puede llegar más o menos con facilidad a la conclusión de que para obtener un incremento dado en la capacidad de transmisión con una caída de voltaje aceptable, la capacidad (KVAR) de los capacitores en serie es más pequeña que la de los capacitores en paralelo o de los capacitores sincrónicos usados para el mismo objeto.

Sin embargo se deben considerar dos puntos importantes a favor de los capacitores sincrónicos y en paralelo:

1) Dan una contribución mayor a la demanda de volt-amperios reactivos del sistema, relevando así a los generadores de esa pesada carga que son los volt-amperios reactivos que deben generar.

2) Hacen que la corriente de línea disminuya significativamente reduciendo así las pérdidas en las líneas.

Por otra parte, el costo del equipo de control de los capacitores en paralelo y de los capacitores sincrónicos puede

ser demasiado alto comparado con el necesario para los capacitores en serie. Es un estudio sumamente detallado y demasiado largo para poder incluirlo en la presente tesis, ya que sería necesario entrar a un análisis económico en el que intervendrían muchos rubros. Se pueden llegar a varias conclusiones, las que se podrían resumir de la siguiente manera:

1) El uso de capacitores en serie para incrementar la capacidad de transmisión de una línea puede probar ser la solución más económica en líneas donde el factor de carga es relativamente bajo.

2) La ventaja económica de los capacitores en serie es tanto más plausible mientras más grande es la relación de la reactancia de la línea a la resistencia de la misma.

3) La ventaja económica del capacitor en serie es tanto mayor cuanto menor es la caída de voltaje permisible.

4) La solución más ventajosa dependerá de las condiciones individuales del problema, siendo un factor importante en cualquier decisión el poder anticipar el crecimiento de la carga, ya que si se contempla un crecimiento de carga posterior a la instalación de los capacitores, el capacitor en serie tiene una ventaja inherente que es la

de que él puede adaptarse a tales condiciones más fácil mente que los aparatos conectados en paralelo.

Ahora bien vala le pena citar ciertas investigaciones realizadas por la Corporación Anglo Americana de Sud Africa,[1] acerca de la economía de los capacitores en serie empleados puramente como reguladores de voltaje para líneas de transmisión típicas a 132, 220 y 275 KV. En esta investigación se compara el costo anual total de los capacitores en serie con aquél de los capacitores sincrónicos y de los capacitores en paralelo que realizan funciones similares.

La conclusión a la que llega la mencionada investigación es que para aquellas líneas de transmisión consideradas bajo ciertas condiciones de longitud de la línea y demanda reactiva, los capacitores en serie prueban ser más económicos como reguladores de voltaje que los capacitores sincrónicos y en paralelo. Lamentablemente, debido a la extensión del estudio hecho por la mencionada Corporación, no hay como incluirlo en la presente tesis. Sin embargo por ser de interés, aunque está ya fuera de la tesis, vale la pena transcribir un estudio hecho por la Compañía Westinghouse con relación a una línea de transmisión y los diferentes sistemas usados en el diseño y planificación, sacando comparaciones fáciles de seguir y entender. Este estudio está descrito en el Apéndice I de la presente tesis.

3.3.1. Ventajas de los capacitores estáticos sobre los sincrónicos

Las ventajas de los capacitores estáticos sobre los sincrónicos se pueden enumerar como sigue:

1) Son construidos en diferentes potencias lo que permite obtener fácilmente la potencia requerida.
2) La protección contra fallas internas es muy simple.
3) Son fáciles de instalar y tienen gran duración.
4) Casi no requieren mantenimiento.
5) Son más baratos que las máquinas rotativas.
6) Como no tienen vibración requieren fundaciones más baratas que las necesarias para los capacitores sincrónicos.

Sin embargo hay que anotar que cuanto existe un motor sincrónico grande y hay que decidir el uso de un capacitor en paralelo, puede ser que el capacitor sincrónico sea más barato que el estático ya que no hay que realizar la inversión inicial fuerte.

Como conclusión se puede decir que un capacitor estático es siempre más barato que un sincrónico, excepto cuando exis-

ta ya instalado un motor sincrónico que pueda ser usado como capacitor.

3.3.2. Ejemplo de como escoger entre un capacitor en serie y uno en paralelo - Regulación de tensión

El ejemplo que se cita a continuación sirve para visualizar mejor el problema de escoger uno entre los varios métodos de compensación de la inductancia.

Supongamos un sistema trifásico aéreo de 11.5 KV que opera a una frecuencia de 60 c/sg. con una longitud de 30 millas, formado por conductores de cobre 4/0 de 7 kilos de 0,1739 plg^2 de sección, con un espaciamiento simétrico de 3 pies. La carga máxima contínua que va a soportar el circuito es de 1.200 KW a un factor de potencia de 0.8. El circuito alimenta a una serie de motores que imponen una condición de arranque de 120 A a un factor de potencia 0,3. Se asume que el voltaje receptor es constante. Si es que las máximas caídas de voltajes son de 10% para condiciones de máxima carga contínua y 15% para condiciones de arranque de los motores, averiguar si es qué es más económico el usar capacitores en serie o en paralelo.

1) En primer lugar es necesario encontrar los valores de resistencia e inductancia del circuito. Usando las tablas

del Libro Transmission and Distribution de la Westinghouse se tiene que:

$R = 8,34\ \Omega$

$X_1 = 19,08\ \Omega$

2) Caída de voltaje sin capacitores

a) En condiciones de carga máxima contínua

$$In = \frac{KW}{\sqrt{3}.\ V.\ Cos\ \phi}$$

$$In = \frac{1.200}{\sqrt{3} \times 11.5 \times 0,8} = 75\ A$$

Por lo tanto la caída de voltaje (V) es:

$V = \sqrt{3} \times I_n\ (R\ Cos\ \phi + Xl\ Sen\ \phi)$

$V = \sqrt{3} \times 75\ (8,34 \times 0,8 + 19,08 \times 0.6)$

$V = 2.350$ Volts

$V = 20,40\%$

b) En condiciones de arranque

En este caso I arr = 120 A y Cos ϕ = 0,3

$V = \sqrt{3} \times 120\ (8,34 \times 0,3 + 19,08 \times 0,954)$

$V = 4.300$ volts

$V = 37,4\%$

Tanto la caída de voltaje en condiciones normales de trabajo, como la caída de voltaje durante condiciones de arranque son excesivas y por lo tanto se necesita un sistema de compensación de la inductancia.

3) El uso de capacitores en serie

Según las especificaciones del problema, la caída de voltaje durante condiciones de máxima carga contínua no puede ser mayor de un 10%, es decir no puede sobrepasar de 1.150 volts.

La caída de voltaje cuando un capacitor en serie es insertado en el circuito viene dada por la siguiente ecuación:

$$V = \sqrt{3}\ I\ (r \cos \phi + (Xl - Xc) \operatorname{Sen} \phi)$$

De esta ecuación lo único que no se conoce y que interesa determinar es la reactancia del capacitor en serie (Xc)

$$1.150 = \sqrt{3} \times 75\ (8{,}34 \times 0{,}8 + (19{,}08 - Xc)\ 0.6)$$

$$Xc = 15{,}4 \text{ Ohmios}$$

Luego, para que la caída de voltaje no sea mayor de 10% la reactancia del capacitor en serie debe ser de 15,4 ohmios. Sin embargo antes de nada hay que determinar si es que con esa reactancia el capacitor en serie puede hacer que la caída de voltaje durante las condiciones de arranque no exceda de 15%, lo cual se hace a continuación.

$V = \sqrt{3} \times 120\ (8,34 \times 0,3 + (19,08 - 15,4)\ 0,954)$

$V = 1.248$ volts

$V = 10,85\%$

Con esto se vé que con un capacitor de 15,4 ohmios por fase conectado en serie se consiguen los resultados deseados.

Ahora bien, lo único que falta por hacer es el determinar las características del capacitor.

Puesto que la máxima corriente que va a circular por el circuito es de 120 A, el capacitor debe ser diseñado para soportar esta corriente. Por lo tanto la corriente nominal del capacitor es de 120 A.

La potencia del capacitor por fase será de:

$P = I^2 . Xc . 10^{-3}$

$= 120^2 \times 15,4 \times 10^{-3} \cong 222$ KVAR aproximadamente.

Es decir que la potencia total del capacitor sería de:

$P = 222 \times 3 \cong 660$ KVAR

El voltaje a través de sus terminales será:

$V = 120 \times 15,4 = 1.848$ volts.

Con esto se podría hacer un resumen de las caracteristicas del capacitor:

I nominal = 120 A

P por fase = 220 KVAR

P total = 660 KVAR

Tensión entre líneas = 11,5 KV

Tensión de trabajo = 1.848 volts

Reactancia = 15,4 ohm.

4) El uso de capacitores en paralelo

a) Condiciones normales de arranque

Supongamos que el capacitor que se instala en paralelo va a aumentar el factor de potencia de 0,8 a 0,99, de tal manera que la corriente que va a circular por el circuito en condiciones normales será de:

$$In = \frac{1.200}{\sqrt{3} \times 11.5 \times 0,99} = 61 \text{ A}$$

Por lo tanto la caída de voltaje será de:

$V = \sqrt{3} \times 61 \ (8,34 \times 0,99 + 19,08 \times 0,1385)$

V = 1.150 volts

V = 10%

Con esto se vé que es necesario usar un capacitor en paralelo que eleve el factor de potencia a 0,99 para que la caída de voltaje sea de 10% en condiciones de carga máxima.

Ahora lo que interesa es conocer la potencia del capacitor por fase.

Los KVAR de la carga, correspondientes a un factor de potencia de 0,8 es:

$$KVAR = \frac{KW}{\text{Cos } \phi_1} \times \text{Sen } \phi_1$$

$$KVAR_1 = \frac{1.200}{0,8} \times 0,6 = 900 \text{ KVAR}$$

Los KVAR de la carga correspondientes a un factor de potencia de 0,99 es:

$$KVAR_2 = \frac{1.200}{0,99} \times 0,1385 = 168 \text{ KVAR}$$

Por lo tanto los KVAR que deben ser entregados por el capacitor son:

KVAR cap = 900 - 168 = 732 KVAR

Es decir que la potencia total del capacitor es de 732 KVAR con lo cual la potencia por fase sería de $\frac{732}{3}$ = 244 KVAR.

5) Condiciones de Arranque

Los KVAR de la carga en el momento del arranque, sin capacitores son:

$KVAR_1 = \sqrt{3} \times 11.5 \times 120 \times 0,954 = 2.280$ KVAR

Los KVAR de la carga en el momento del arranque con un capacitor en paralelo de 732 KVAR es:

$KVAR_2 = 2.280 - 732 = 1.548$ KVAR

Ahora bien la carga en el momento de arranque es de:

$P = \sqrt{3} \times 11.5 \times 120 \times 0,3 = 716$ KW

Suponiendo que esa carga permanezca constante en el momento de arranque, el factor de potencia en este instante es de:

$$\text{Cos } \phi = \text{Cos } \left(tg^{-1} \frac{1.548}{716}\right)$$

$$\text{Cos } \phi = \text{Cos } 65,2^{\circ}$$

$$\text{Cos } \phi = 0,578$$

Por lo tanto la corriente de arranque con los capacitores conectados es de:

$$Iarr = \frac{716}{\sqrt{3} \times 11.5 \times 0.578} = 62,3 \text{ A}$$

Con lo cual la caída de voltaje sería de:

$$V = \sqrt{3} \times 62,3 \ (8,3 \times 0,578 + 19,08 \times 0,908)$$

$$V = 2.387 \text{ volts}$$

$$V = 20,7\%$$

Con esto se puede sacar ya las características del capacitor en paralelo.

Tensión de trabajo = 11.5 KV

Potencia total = 732 KVAR

Potencia por fase = 244 KVAR

De todos los datos anteriores se puede sacar el siguiente cuadro:

Método de Compensación	Caída de Voltaje		Factor de potencia resultante		Capacidad por fase del capcitor en paralelo	Capacidad por fase del capaciror en serie
	Condición x	Condición y	Condición x	Condición y		
Capacitores en serie	10	10,85	0,8	0,3	-	220 KVAR 15,4 ohms
Capacitores en paralelo	10	20,07	0,99	0,578	244 KVAR	-

Condición x = Carga máxima contínua

Condición y = Arranque de los motores

Así se vé que el método más fácil y más económico de lograr los resultados apetecidos es el de usar capacitores en serie.

3.3.3. Comentarios Generales

a) Los capacitores en paralelo pueden mejorar las condi-

ciones durante estados de carga normal y reducirán las pérdidas en las líneas, pero tienen un valor muy escaso para los estados de arranque de los motores. Sin embargo vale la pena anotar que al usar capacitores en paralelo para compensar los KVAR de la carga se evita que el equipo de generación tenga que entregar un costoso gravamen de potencia reactiva.

b) Un capacitor en serie representa el método más efectivo y económico de resolver el problema.

c) Es necesario antes de decidirse por cualquier método el comparar el costo de los equipos de control y protección necesarios, tanto para los capacitores en serie como para los capacitores en paralelo.

De todo lo dicho se puede sacar como conclusión que antes de decidirse por cualquier método de compensación de la inductancia hay que hacer un estudio tanto técnico como económico para determinar si es que la inversión que se va a hacer en el equipo se justifica, es decir que su costo anual de operación más la depreciación y el interés sea considerablemente menor que el ahorro que se va a obtener con su instalación.

Ahora bien, como regla general para el mejoramiento de la regulación de tensión, mejoramiento de la estabilidad y eliminación o disminución del flicker, el capacitor en serie es el sistema más efectivo y más económico que se dispone; sin embargo hay que hacer siempre un estudio económico, ya que la economía depende mucho del método escogido y del tipo de problema que se presente.

APENDICE I

ECONOMIA OBTENIDA POR MEDIO DEL USO DE CAPACITORES EN SERIE EN UN SISTEMA DE TRANSMISION A 230 KV

La instalación de capacitores en serie en líneas de transmisión para mejorar la capacidad de transmisión de potencia, es un método menos costoso que otros, elimina la necesidad de grandes sistemas de control y reduce los gastos de mantenimiento a un mínimo. Los capacitores en serie son particularmente efectivos para este objeto ya que su reactancia negativa compensa a la reactancia inductiva de la línea, que es el factor preponderante en la capacidad de transmisión de potencia.

Para mostrar la bondad de los capacitores en serie vale la pena hacer un resumen del estudio hecho para el Consorcio Eléctrico del Estado de Arizona en los Estados Unidos, en donde era necesario tender una línea desde la Central Eléctrica de Cuatro Esquinas hasta la ciudad de Phoenix, con una distancia de 200 millas entre sí. Las necesidades de dicha ciudad eran tales que se necesitaba instalar en un principio un grupo de 250 MW y luego de cuatro años era necesario instalar otro grupo de 250 MW. El problema era el de decidir qué sistema de transmisión se debía emplear para satisfacer las necesidades de la ciudad de Phoenix. Por consideraciones especiales del circuito se decidió que el voltaje de operación del sistema de transmisión sea de 230 KV.

Tres alternativas se consideraron, cada una de las cuales cumplía con la condición de que la potencia generada pueda ser transmitida sin pérdida de la estabilidad aún cuando se deba aislar una línea fallosa.

El Plan A requiere que se construyan tres líneas en un principio y que una cuarta sea construída cuando la segunda unidad generadora sea instalada en el cuarto año.

En el Plan B se usan tres líneas durante los tres primeros años, como en el Plan A, pero se evita la adición de la cuarta línea por medio del uso de capacitores en serie. Añadiendo un 30% de compensación en cada una de las tres líneas existentes se incrementa de tal manera la capacidad firme de transmisión del sistema, que no es necesario el añadir la cuarta línea. La economía del Plan B sobre el Plan A es obvia, ya que sólo una pequeña compensación de las tres líneas reemplaza a la nueva línea. Además solamente se necesitan torres de un solo circuito para la tercera línea en contraste con las torres de doble circuito que se deben utilizar para la tercera y cuarta línea en el Plan A.

Sinembargo, mayores ventajas se obtienen con el Plan C, en el cual se usan capacitores en serie desde el principio.

Una capacidad de transmisión adecuada se consigue con sólo dos líneas instaladas inicialmente, incluyendo un 30% de compensación en cada una de ellas en el momento de su construcción. La adición de la tercera línea con un 30% de compensación se realiza en el cuarto año como en el Plan B. La tabla I muestra los resultados del estudio del Valor Presente realizado para determinar la ventaja del Plan C sobre el Plan B. Los costos estimados de los bancos de capacitores instalados se toma de la Figura I, figura que aunque ha sido desarrollada para capacitores de 345 KV, puede ser utilizada para capacitores de 230 KV sin incurrir en un error apreciable, ya que la diferencia de precios para capacitores pertenecientes a estas dos clases de voltaje es muy pequeña. Otros datos que sirvieron de base para el estudio realizado están mostrados en la Tabla I.

El Plan C tiene una ganancia neta en el valor presente de las cargas fijas anuales y pérdidas de $3'600.000 sobre el Plan B. Así el Plan C resulta con ahorros nivelados sobre un período de 20 años. Estos ahorros podrían soportar o justificar una inversión de capital de $2'120.000 para un proyecto de 20 años de vida útil.

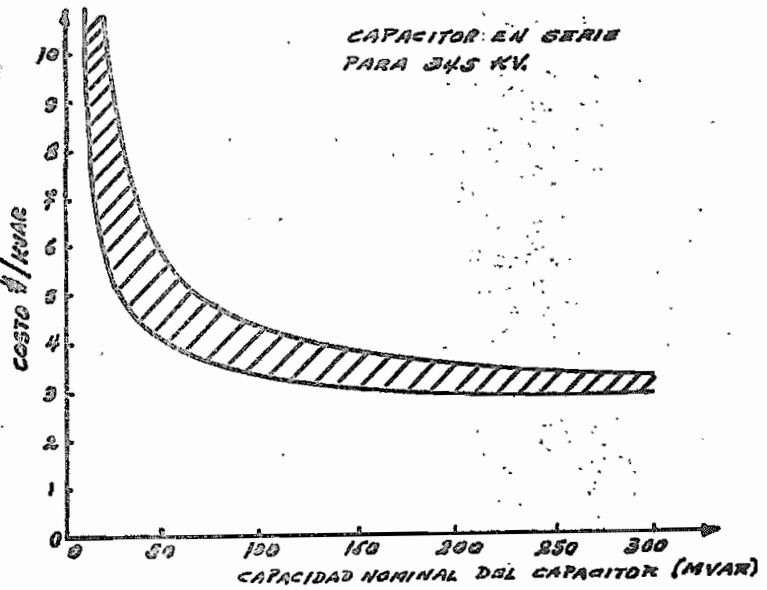


FIG. 1.- COSTOS ESTIMADOS POR KVAR PARA CAPACITORES EN SERIE DE 345 KV.

TABLA I

EVALUACION DE LOS DIFERENTES PLANES DE TRANSMISION PARA CUMPLIR CON UN PROGRAMA DE EXPANSION DE TRANSMISION Y GENERACION DE CUATRO AÑOS

GENERACION		A	Año de instalación	TRANSMISION				
Nº y tamaño de unidades añadidas	Capacidad total MW	SIL PU		Construcción requerida	Circuitos añadidos	Total Circuito	Total MW	Capacidad SIL-PU
PLAN A								
1-250	250	1,9	0	2 Torres doble circuit.	3	3	370	2,8
1-250	500	3,8	4	Poner cuarta línea	1	4	355	4,2
Plan B								
1-250	250	1,9	0	1 Torre doble circuito + 1 torre 1 circuito	3	3	370	2,8
1-250	500	2,8	4	Añadir 30% Comp	0	3	500	3,8
PLAN C								
1-250	250	1,9	0	1 Torre doble circ. + 30% Comp	2	2	250	1,9
1-250	500	3,8	4	1 Torre 1 Circ.+ 30% Comp	1	3	500	3,8

Y

(Tabla I cont.)

Datos para el Análisis Económico

Cargos fijos: 14%

Factor de pérdidas: 55%

Breaker de 230 KV: $200.000 (se requieren 2 breakers con la tercera línea)

Cargo anual por pérdidas: $14/Kw

Torres de 1 circuito: $40.000/milla

Torres de doble circuito: $63.000/milla

Comparación de costos entre los Planes C y B

Ganancia en el valor presente de los cargos fijos anuales y pérdidas del Plan C sobre el Plan B:	$ 3'600.000
Ahorros nivelados sobre el primer período de 4 años:	$ 979.000
Ahorros nivelados sobre el período de 20 años:	$ 296.000
Estos ahorros podrían justificar una inversión en un proyecto de 20 años de vida útil de:	$ 2'120.000

Nota: Traducción del artículo titulado "SERIES CAPACITORS ECONOMICS" escrito por J.E. O NEIL y J.W. BANKOSHE, publicado en la edición de Noviembre de 1966 de la revista TRANSMISSION & DISTRIBUTION.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1 CAPACITORES EN SERIE
L. Clarke y H. Walker
Reproducción de Electrical Energy, Septiembre, 1957
Realizada por: British Insulated Callender's Cables, Pag. 11

BIBLIOGRAFIA

LIBROS

Robert Plonsey y Robert E. Collin
PRINCIPIOS Y APLICACIONES DE CAMPO ELECTROMAGNETICOS
Editado por: McGraw-Hill Book Company, Inc., N.Y. 1967

Walter E. Rogers
CAMPOS ELECTRICOS
Editado por: McGraw-Hill Book Company, Inc., N.Y. 1954

LA APLICACION DE LOS CAPACITORES DE POTENCIA
Editado por: British Insulated Callender's Cables, Londres, 1965

E. Norman Lurch
CIRCUITOS ELECTRICOS
Editado por: John Willey & Sons, Inc., N.Y., 1963

TRANSMISSION AND DISTRIBUTION
Editado por: Westinghouse Electric Corporation, East Pittsburgh, Penn., 1964

A.E. Fitzgerald y David E. Higginbotham
INGENIERIA ELECTRICA BASICA
Editado por: McGraw-Hill Book Company, N.Y., 1957

William D. Stevenson Jr.
ELEMENTOS DE ANALISIS DE SISTEMAS DE POTENCIA
Editado por: McGraw-Hill Book Company, N.Y., 1962

Archer E. Knowlton
MANUAL ESTANDARD PARA INGENIEROS ELECTRICOS
Editado por: McGraw-Hill Book Company, N.Y., 1957

Hugh Hildreth Skilling
CORRIENTES TRANSITORIAS
Editado por: McGraw-Hill Book Company, N.Y., 1952

Kerchner & Corcoran
CIRCUITOS DE CORRIENTE ALTERNA
Editado por: Compañía Editorial Continental, México, 1962

R.E. Marbury
CAPACITORES DE POTENCIA
Editado por: McGraw-Hill Book Company, N.Y., 1949

REVISTAS Y PUBLICACIONES

CICLOR POWER CAPACITORS
Publicación N° 430 D, Enero 1966
Editada por: British Insulated Callender's Cables

NEW ISOFILM CAPACITORS
Publicación GEA-7119
Editada por: General Electric Corporation

CAPACITORES EN SERIE PARA SISTEMAS DE ALTO VOLTAJE
Revista: Transmission and Distribution, de Febrero de 1967
Editada por: Westinghouse Electric Corporation

CAPACITORES EN SERIE PARA LINEAS DE TRANSMISION DE ALTO VOLTAJE
Revista: Transmission and Distribution, de Enero de 1967
Editada por: Westinghouse Electric Corporation

EL MAS GRANDE BANCO DE CAPACITORES EN SERIE DE LA NACION, COMPENSA LAS LINEAS DE 345 KV DE APSCO
Revista: Electric Light and Power, de Julio y Agosto de 1965
Editada por: Rogers Publishing Company

LOS CAPACITORES EN SERIE AUMENTAN LA CAPACIDAD DE LOS SISTEMAS DE ALTO VOLTAJE
Revista: Electrical World, de Diciembre 26, 1966
Editada por: McGraw-Hill Book,Company

ECONOMIA DE LOS CAPACITORES EN SERIE PARA ALTO VOLTAJE
Revista: Transmission and Distribution, Noviembre de 1966
Editada por: Westinghouse Electric Corporation

LA APLICACION DE LOS CAPACITORES DE POTENCIA EN LOS SISTEMAS DE ALTO VOLTAJE
Editada por: British Insulated Callender's Cables

LOS CAPACITORES EN RELACION CON LAS CARGAS PERTURBADORAS Y LAS FLUCTUACIONES TRANSITORIAS
L. Clarke, G.A. Curtis, R.O.M. Powell
Publicación 4168 P, de 1962
Editada por: British Insulated Callender's Cables

ANALISIS DE LOS PROBLEMAS DE APLICACION DE LOS CAPACITORES EN SERIE
J.W. Butler y C. Concordia
Revista: Transactions, Vol. 56, 1937
Editada por: The American Institute of Electrical Engineers

LA FERRORESONANCIA EN LAS APLICACIONES DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCION CON CAPACITORES EN SERIE
E.F. Kratz, L.W. Manning y Miles Maxwell
Revista: Transactions, Publicación N° 59-53, 1959
Editada por: The American Institute of Electrical Engineers

PROBLEMAS TECNICOS EN EL USO DE CAPACITORES EN SERIE
N. Knudsen
Revista: ASEA, Journal N° 23, de 1950
Editada por: ASEA

CAPACITORES DE ALTO VOLTAJE
Publicación N° 346/0
Editada por: British Insulated Callender's Cables

CAPACITORES EN SERIE
L. Clarke y H. Walker
Reproducción de Electrical Energy - Septiembre 1957
Realizada por: British Insulated Callender's Cables

CAPACITORES EN SERIE EN LINEAS DE DISTRIBUCION DE VOLTAJE MEDIANOS
F. Barozzi
Revista: Elettrotechnica, Vol. 39, 1952

CAPACITORES EN SERIE EN SISTEMAS DE TRANSFERENCIA DE POTENCIA
A. Salzmann
Revista: Electrical Times, Agosto 1955

EL DISEÑO DE CAPACITORES DE POTENCIA PARA SU INSTALACION EN SERIE
O.N. Harrison
Revista: Electrical Engineering, Febrero 1952
Editada por: American Institute of Electrical Engineers

LA ECONOMIA EN LA REGULACION DE VOLTAJE POR MEDIO DE CAPACITORES EN SERIE
L.H. Black
Publicación N° 312
Editada por: C.I.G.R.E.

APLICACIONES DE LOS CAPACITORES EN SERIE
A.A. Johnson
Revista: Westinghouse Engineer, Vol 8, Sept. 1948
Editada por: Westinghouse Electric Corporation

DESARROLLO DE LOS CAPACITORES EN SERIE
Revista: ASEA, Journal, Julio de 1951
Editada por: ASEA

LA FERRORESONANCIA.- PROBLEMAS Y APLICACIONES
Y.F. Young
Revista: Electrical Review, Mayo 1965
Editada por: Iliffe Electrical Publications, London

CAIDAS DE VOLTAJE Y PARPADEO
A.A. Kroneberg
Revista: Electrical Engineering, Julio 1956
Editada por: The American Institute of Electrical Engineers

EL REFASAMIENTO DE LA RED DE DISTRIBUCION A MEDIA Y BAJA TENSION
N. Faletti
Revista: L'Energia Elettrica, Enero 1961, N° 1
Editada por: Socd. Ed. Riviste Industrie Elettriche

CAPACITORES EN SERIE O EN PARALELO PARA SISTEMAS DE DISTRIBUCION
Rune L. Olsson
Revista: ASEA, Journal, Vol. 36, 1963
Editada por: ASEA

ESPECIFICACION PARA CAPACITORES PARA SISTEMAS DE POTENCIA
Publicaciones N° 70-71 (1954), 70-72 (1955) y 70-73 (1957)
Editada por: International Electrotechnic Comission

INFLUENCIA DEL CAPACITOR EN SERIE SOBRE LA ESTABILIDAD DINAMICA DE UNA LINEA DE TRANSMISION
Filippo Ciampolini
Revista: L'Energía Elettrica, 1957, N° II
Editada por: Socd. Ed. Riviste Industrie Elettriche

EL EMPLEO DEL CAPACITOR EN SERIE EN REDES DE DISTRIBUCION
I. Romano
Estratto dai "Rendiconti dell' A.E.I." 18-24 Sept. 1960
Editado por: Stabiumento Grafico R. Scotti N° 159/1960

EL EMPLEO DEL CAPACITOR EN SERIE EN LARGAS LINEAS DE TRANSMISION DE ALTO VOLTAJE
I. Romano
Estratto dai "Rendiconti dell' A.E.I." - 18-24 Sept. 1960
Editado por: Imprenta de la Universidad de Palermo N° 139/1960