

Estudio de la Estabilidad de un Sistema

**(GUMBAYA desde la Casa de máquinas, línea de
transmisión Gumbaya-Quito, hasta Subestación Norte).--**

**TESIS PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE INGENIERO
EN LA ESPECIALIZACION DE ELECTROTECNIA DE LA
"ESCUELA POLITECNICA NACIONAL".--**

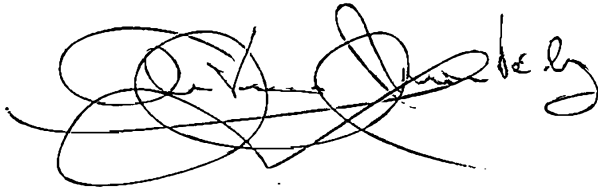
José Arturo Domínguez Larco

Quito, Octubre de 1.964

=====

Certifico que la presente Tesis ha sido trabajada por
el Sr. José Domínguez bajo mi dirección

Quito, Octubre 16/64

A handwritten signature in black ink, appearing to read "José Domínguez". The signature is highly stylized and somewhat illegible due to overlapping loops and flourishes.

I N D I C E

Página

Introducción	1
Datos y características generales del sistema	3
Central de Cumbayá	4
Condiciones que se asumen	7
Selección del método a usarse en el estudio	8
Método de la "Igualdad de Areas"	8
Aplicaciones del criterio de "igualdad de áreas"	13
Método "Paso por Paso"	22
Estabilidad en "estado transitorio"	26
Valores de las reactancias	28
Voltaje interno del generador, V'_g , con <u>máxima carga</u>	32
Reactancia equivalente de secuencia positiva, X_1	34
Reactancia equivalente de secuencia negativa, X_2	35
Reactancia equivalente de secuencia cero, X_0	36
Falla de línea a línea, después de las barras colectoras	37
Ecuación de balanceo u "oscilación"	42
Determinación de la constante de inercia, H	45
Explicación columnas de "tabulación de valores"	46
Falla de tres líneas, después de las barras colectoras	51
Falla de una línea a tierra, a la salida	57
Falla de una línea a tierra, a la llegada	63
Falla de dos líneas a tierra, a la salida	70
Falla de dos líneas a tierra, a la llegada	75
Falla de tres líneas a tierra, a la salida	80
Falla de tres líneas a tierra, a la llegada	81
<u>Mínima carga</u> , valores de las reactancias	87
Voltaje interno del generador, V'_g	89
Reactancia equivalente de secuencia positiva, X_1	90
Reactancia equivalente de secuencia negativa, X_2	91
Reactancia equivalente de secuencia cero, X_0	92
Falla de línea a línea, después de las barras colectoras	93
Falla de tres líneas, después de las barras colectoras	101
Falla de una línea a tierra, a la salida	106
Falla de una línea a tierra, a la llegada	111

I n d i c e

- 2 -

	<u>Página</u>
Falla de dos líneas a tierra, a la salida	118
Falla de dos líneas a tierra, a la llegada	123
Falla de tres líneas a tierra, a la salida	128
Falla de tres líneas a tierra, a la llegada	129
Chequeo de la estabilidad por el criterio de igualdad de áreas	131
Conclusiones	139

=====

INDICE DE FIGURAS Y TABLAS

<u>Fig. #</u>	<u>Ref. Pág. #</u>	<u>Fig.#</u>	<u>Ref. Pág.#</u>	<u>Tabla #</u>	<u>Ref.Pág. #</u>
1	5	d	67	A	42
2	5	d'	67	1	47
3	6	e	72	2	54
4	6	e'	72	3	60
5	10	f	77	4	68
6	12	f'	77	5	73
7	13	g	83	6	78
8	14	g'	83	7	84
9	15	h	97	8	98
10	16	h'	100	9	104
11	18	i	103	10	109
12	19	i'	103	11	116
13	21	j	108	12	121
14	24	j'	108	13	126
15	45	k	115	=====	
a	41	k'	115		
a'	48	l	120		
b	53	l'	120		
b'	53	m	125		
c	59	m'	125		
c'	59				

=====

C A P I T U L O I

Introducción.- Datos y características generales del sistema.- Condiciones que se asumen.- Selección del método a usarse en el estudio.

=====

1.1.- INTRODUCCION: El problema de la "Estabilidad" de los sistemas se presenta cuando las varias máquinas sincrónicas del sistema operan en paralelo o permanecen en sincronismo entre todas ellas.

En sistemas comerciales de energía, las máquinas más grandes son del tipo sincrónico: generadores, condensadores rotativos y una gran parte de motores. En tales sistemas es necesario mantener el sin cronismo entre las máquinas sincrónicas bajo condiciones de carga permanente y bajo condiciones de disturbios transitorios, con el fin de llegar a obtener una calidad de servicio satisfactorio al consumidor. Estos disturbios transitorios pueden ser producidos por cambios de carga, operación de suiches y particularmente por fallas y pérdidas de excitación; por tanto, el mantenimiento del sincronismo o su recuperación luego de un disturbio es de vital importancia para las Compañías Eléctricas. Además los fabricantes están comprometidos, porque las consideraciones de estabilidad determinan muchas características de los aparatos y bajo muchas condiciones importantes afectan su cos to y funcionamiento. Las características de cada elemento del sistema tienen su efecto sobre la estabilidad del mismo; ésto introduce problemas que deben tomarse en cuenta en la coordinación de aparatos eléctricos y líneas, para obtener, a más bajo costo, un sistema capaz de llevar las cargas deseadas y de mantener una calidad satisfactoria de servicio.

La fase más importante del problema, es la determinación de los equipos del sistema y de las cargas que aseguren la operación satisfactoria al producirse disturbios transitorios.

Recíprocamente, la "inestabilidad" indica una condición que involucra pérdida de sincronismo. Así, cuando una máquina pierde el sincronismo con respecto a las otras del sistema, éste no cumple su función: si es un generador, no constituye una fuente de servicio eficaz; si es un motor, no entrega potencia mecánica a la propia velocidad; si es un condensador rotativo, no será capaz de mantener el voltaje apropiado de terminales. Además una máquina sincrónica fuera de sincronismo, no solamente es inútil sino perjudicial al resto del sistema, debido a los efectos producidos sobre el voltaje. Por tanto, la inestabilidad tiene el mismo mal efecto en el servicio a los clientes.

Puede presentarse el caso de que se pierda la estabilidad como consecuencia de producirse una falla, pero al despejar ésta no se recupere la estabilidad y continúen las fluctuaciones de voltaje por un tiempo muy largo; en este caso, deben retirarse del sistema la máquina o grupo de máquinas que hayan perdido el sincronismo para efectuar la re-sincronización de las mismas.

Puesto que la inestabilidad tiene un mal efecto en la calidad de servicio, un sistema de fuerza debe ser diseñado y operado de tal manera que sea improbable la inestabilidad u ocurra rara vez, es decir que el sistema debe operar siempre en estado de "estabilidad permanente".

La presencia de oscilaciones o disturbios en un sistema, no es necesariamente una indicación de la inestabilidad; sin embargo, hay situaciones en que estas variaciones se presentan tan severas que se pierde la estabilidad y los generadores salen de sincronismo. Por tanto, los sistemas de relés designados para protección contra fallas, deberán mantener una función apropiada durante las variaciones en el sistema. De lo que se deduce la necesidad de conocer qué clases de problemas se presentan en estas condiciones y qué requerimientos deben reunir los relés para hacer frente a estas clases de disturbios.

1.2.- DATOS Y CARACTERISTICAS GENERALES DEL SISTEMA:

Antes de exponer concretamente los datos y características del sistema de Cumbayá, a continuación se da una pequeña y ligera descripción del sistema eléctrico existente en la ciudad:

A) El sistema de "Generación" está constituido en la siguiente manera:

Central de Guangopolo	9.400 Kw., # unidades: 5
Central de los Chillos	1.760 Kw., # unidades: 2
Central de Guápulo	920 Kw., # unidades: 4
Central de Cumbayá	20.000 Kw., # unidades: 2
Central de Machachi(arriendo)...	1.500 Kw., # unidades: 3
Central Diessel	8.725 Kw.,

Lo que da una capacidad total en generación de 42.305 Kw.; esta capacidad es incrementada haciendo funcionar las unidades con sobrecarga durante cortos periodos de la demanda máxima, pero naturalmente esta capacidad así obtenida se reduce debido a las pérdidas en el sistema existente.

B) El sistema de "Transmisión" se agrupa en la forma siguiente:

a) La línea de transmisión a 22 Kv. de la Central de Guangopolo, está constituida por dos circuitos que se extienden desde la Central hasta la Subestación SUR, ubicada al Sur de la ciudad; además las características siguientes:

Fases	3
Ciclos	60
Capacidad	11.500 KVA
Número circuitos ..	2
Longitud.....	7.548 mts(aéreo) 707 mts(sub.)

La línea de protección es de cable de acero galvanizado de 25 mm² de sección. La distancia equivalente de conductores es aproximadamente de 1,73 mts.

- b) La línea de transmisión a 22 Kv. de la Central de los Chillos, conecta la central con la Subestación N° 3, ubicada en el Barrio de la Tola; tiene las siguientes características:

Fases	3
Ciclos	60
Capacidad	2,500 KVA
Número de circuitos..	2
Longitud	19,500 mts.

El conductor de protección es de acero galvanizado. De los dos circuitos, en la actualidad solamente uno está en servicio.

- c) La línea de transmisión a 6.6 Kv. de la central de Guápulo que conecta la central con la Subestación N° 3; tiene las siguientes características:

Fases	3
Ciclos	60
Capacidad	1,200 KVA
Número de circuitos.	2
Longitud	6,350 mts.

No posee conductor de protección.

- d) Central de Cumbayá:

La Central hidroeléctrica de Cumbayá está generando actualmente 20,000 Kw., e incrementará esta capacidad en el futuro y de acuerdo con la demanda, hasta 40.000 Kw. por medio de instalaciones de unidades generadoras adicionales y demás accesorios necesarios.

La línea de transmisión tiene una longitud aproximada de 6.2 Kmts. y una tensión de 46 Kv.; esta misma tensión se usa para las líneas que constituyen las barras de subtransmisión primaria de la ciudad. El sistema de transmisión a 46 Kv. es de conexión estrella con sólida conexión a tierra.

Para conseguir la seguridad de servicio en la transmisión, se ha planeado la construcción de dos líneas de dos circuitos a 46 Kv., que se extenderán hasta la Subestación "Norte", ubicada al Norte de la ciudad. Actualmente está en servicio una sola línea, que es la "Línea Cumbayá-Quito N° 2", que pasando por la Subestación Norte, forma la barra Este N° 2 a 46 Kv. de la cual se hace las derivaciones a las diferentes Subestaciones de distribución.

En la Central de Cumbayá, la capacidad total de diseño será provista por cuatro unidades de 10.000 Kw. cada una. Los generadores irán directamente conectados a las turbinas y estarán especificados para una potencia normal continua de 11.111 KVA., 3 fases, 60 ciclos, 4.160 voltios. Estas unidades serán capaces de generar por lo menos 10.800 Kw. durante cortos periodos de sobrecarga, factor de potencia de 90%.

En la Fig. # 1, se ha dibujado el diagrama eléctrico unifilar de todo el sistema, que representa las Centrales de Generación, líneas de transmisión y subtransmisión y Subestaciones de distribución.

La Fig. # 2, indica las Centrales existentes y proyectadas, con - juntamente con la indicación de las zonas de baja tensión a servirse de las Subestaciones proyectadas.

A continuación los datos generales del sistema de Cumbayá, muchos de los cuales se utilizarán en el estudio de la estabilidad:

Generadores:

Son trifásicos, de corriente alterna, de eje vertical, 11.111 KVA., 60 ciclos/seg., 4.160 voltios, 514 RPM, factor de potencia 90%.

Momento de inercia (GD^2)	103,8 ton-mt ²
Peso neto	71.000,0 Kg.
Diámetro del estator	2.310,0 mm
Eficiencia	97,3%
Capacidad excitatriz	60,0 Kw.
Excitación a plena carga	51,0 Kw.
Relación de corto circuito	1,1%
Embalaje	950 RPM
Voltaje de excitación	125 voltios

Reactancia transitoria del eje directo	35%
Reactancia subtransitoria del eje en cuadratura.	1,35%
Valores de las reactancias en PU:	
Reactancia de secuencia positiva(X'd)..... X1 =	0,325
Reactancia de secuencia negativa	X2 = 0,1964
Reactancia de secuencia cero	Xo = 0,1015

Transformadores:

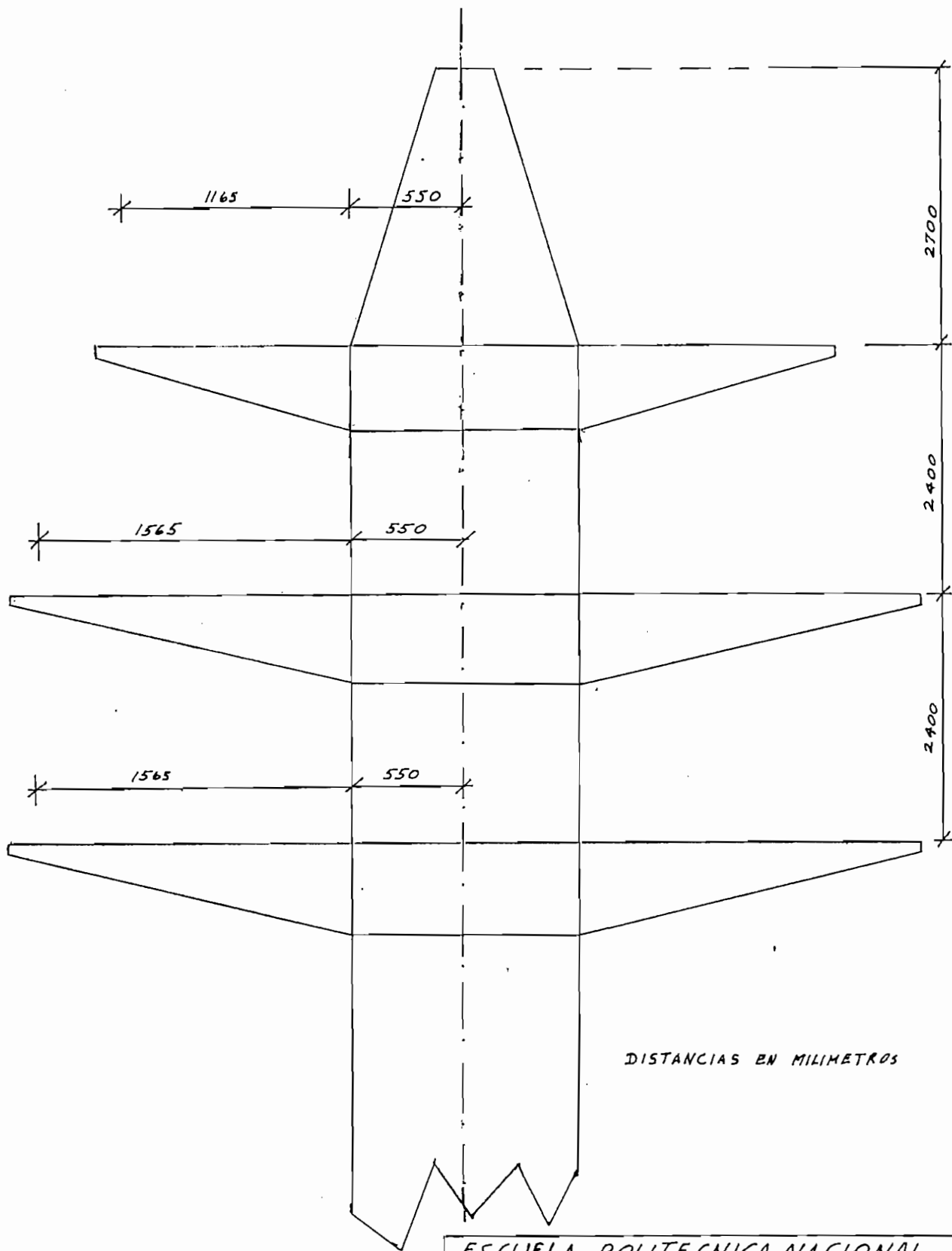
Capacidad	10.000/12.500 KVA
Resistencia de fase a neutro	0,46 ohmios (lado de AT)
Resistencia de fase a neutro	0,00627 " (" " BT)
Taps disponibles	48.300 voltios
.....	47.150 voltios
.....	46.000 voltios
.....	44.850 voltios
.....	43.700 voltios
Impedancia	6,39% a voltaje nominal
Conexiones	Delta/ Estrella, conectado directamente a tierra.

Línea de transmisión:

Conductores ACSSR	Nº 477 MCM
Longitud	6.175 mts.
Voltaje nominal	46 Kv.
Distancia equivalente de conductores =	3 mts. (Ver Fig. # 3)

Interrupciones 1 y 2 (Fig. # 4)

Voltaje nominal	7.200 voltios
Máximo voltaje de diseño	7.800 voltios
Voltaje de impulso	60.000 voltios (BIL)
Corriente nominal	2.000 amperios
Corriente máxima	40.000 amperios
Corriente - 4 seg. =	25.000 amperios
Frecuencia nominal	60 ciclos/seg.
Capacidad de interrupción	150 MVA.



DISTANCIAS EN MILIMETROS

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
TESIS DE GRADO

DISTANCIA ENTRE CONDUCTORES:
LINEA DE TRANSMISION "CUMBAYA - QUITO"

DIBUJADO:

José A. Domínguez L.

FIG. # 3

REF. PAG. # 6

CROQUIS

FECHA: OCTUBRE 1964

Voltaje de cierre, c-c 130 á 90 v. (para bobina)

Voltaje de apertura, c-c 125 v. (para bobina)

Tiempo de apertura: a) para cierre, y b) para apertura, en ambos casos para los dos tipo FE202A y FE202B:

a) Para cierre:

<u>FE202A</u>		<u>FE202B</u>	
Voltaje	Tiempo	Voltaje	Tiempo
130 v.	0,251 seg.	130 v.	0,233 seg.
125 v.	0,254 seg.	125 v.	0,243 seg.
90 v.	0,406 seg.	90 v.	0,377 seg.

b) Para apertura:

140 v.	0,040 seg.	140 v.	0,043 seg.
125 v.	0,044 seg.	125 v.	0,046 seg.
70 v.	0,057 seg.	70 v.	0,054 seg.

Para este estudio, en el caso a), se toma el tiempo correspondiente al voltaje de cierre, que es de 90 voltios y que corresponde a un tiempo de 0,406 seg. para el tipo FE202A y de 0,377 seg. para el tipo FE202B; en el caso b), se toma el tiempo correspondiente a 125 voltios que es el voltaje de apertura y que corresponde un tiempo de 0,044 seg. para el tipo FE202A y de 0,046 seg. para el tipo FE202B.

1.3.- CONDICIONES QUE SE ASUMEN:

Por carecer de algunos datos necesarios para el estudio de la estabilidad del sistema propuesto, al tratar en el siguiente capítulo del análisis de la estabilidad en estado transitorio, se asumirán los valores y datos que en cada caso se necesiten, tratando de aproximarlos lo más a la realidad, extrayendo dichos informes de sistemas similares y características afines al sistema que se trata en este estudio.

Para plantear el problema de la forma más sencilla, se harán las siguientes suposiciones generales que son admitidas en el estudio de la estabilidad:

- a) Que el sistema de transmisión a estudiarse, está formado solamente por reactancias inductivas, de tal manera que en él no se producen pérdidas.
- b) Que siempre es posible reemplazar un grupo de máquinas sincrónicas que trabaja sobre las mismas barras, mediante una sola que representará, de manera equivalente, no sólo las características eléctricas, sino también las mecánico-dinámicas.
- c) Que siempre es posible substituir dos máquinas sincrónicas, reales o equivalentes, conectadas en los extremos de una línea de transmisión, por una sola conectada mediante la misma línea a "barras de potencia infinita". Se llaman barras de potencia infinita, o más brevemente "barras infinitas" a una fuente de tensión absolutamente constante en la que la magnitud, fase y frecuencia de la tensión no varía, cualquiera que sea la corriente que se deriva de ella o que a ella afluye.

1.4.- SELECCION DEL METODO A USARSE EN EL ESTUDIO:

Como el problema presente se refiere al análisis de la estabilidad en estado transitorio, se explica a continuación los dos métodos principales, éstos son:

A.- Método de la "Igualdad de áreas", y

B.- Método "Paso por paso".

A.- Método de la Igualdad de Areas:

Para determinar si un dispositivo mantiene la estabilidad después de una falla o perturbación, es necesario dibujar y examinar las curvas de balanceo. Si estas curvas indican que el ángulo de desplazamiento entre cualesquiera de las dos máquinas tiende a incrementarse sin límite, el sistema es inestable.

La ecuación de balanceo es una ecuación diferencial que gobierna el movimiento de cada máquina de un sistema. Las leyes de rotación se aplican al movimiento de máquinas sincrónicas cuyo estator y rotor están acoplados magnéticamente; este hecho se expresa en forma analítica

con la ecuación de balanceo o ecuación para oscilaciones no amortiguadas:

$$M \frac{d^2\theta}{dt^2} = Pa = Pi - Pu \quad (1)$$

en donde:

- M = constante de inercia de la máquina = I.w
- Pi = potencia de entrada al eje, corregida para las pérdidas por rotación = Ti.w
- Pu = potencia eléctrica de salida, corregida para las pérdidas eléctricas = Tu.w
- Pa = potencia aceleratriz, o diferencia entre potencia entrante y saliente, cada una corregida para las pérdidas, = Pi - Pu.
- θ = desplazamiento angular de la máquina con respecto a la barra infinita.
- w = velocidad, en radianes por segundo.
- Ti = torque del eje, corregido para el torque debido a las pérdidas por rotación.
- Tu = torque electromagnético.
- t = tiempo, en seg.

Multiplicando ambos términos de la ecuación (1) por 2dθ/Mdt, después cada lado por dt, y finalmente efectuando la integración y considerando que θ varía de θ₀ a θ_{máxima}, se tiene:

$$\left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 = \frac{2}{M} \int_{\theta_0}^{\theta_{m\acute{o}x.}} Pa \cdot d\theta \quad (2)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = w' = \sqrt{\frac{2}{M} \int_{\theta_0}^{\theta_{m\acute{o}x.}} Pa \cdot d\theta} \quad (3)$$

La ecuación (3) expresa, en términos de potencia, la velocidad angular con que cambiará el ángulo θ entre los ejes de los campos magnéticos del rotor empujado por la máquina motriz y del estator que despliega su potencia sincronizante. Es evidente que la máquina sincrónica hallará su nueva posición de equilibrio cuando los dos ejes de los campos rotantes no estén más en movimiento. La expresión analítica de esta condición está formulada con la siguiente ecuación:

$$d\theta/dt = \sqrt{\frac{2}{M}} \int_{\theta_0}^{\theta_{\text{máximo}}} Pa. d\theta = 0$$

o simplemente:

$$\int_{\theta_0}^{\theta_{\text{máximo}}} Pa. d\theta = 0 \quad (4)$$

Esta integral puede interpretarse gráficamente con la FIG. 5, la cual indica que la superficie encerrada entre las curvas P_i y P_u y limitada por los valores θ_0 y $\theta_{\text{máximo}}$, tiene que representar un valor igual a cero.

P_i es una línea recta, paralela al eje de abscisas, ya que se supone que la potencia propulsora queda constante; la curva P_u está representada por una sinusoides.

Para que la superficie encerrada dentro de las dos curvas sea igual a cero, tiene que estar formada por dos áreas A_1 positiva con P_i mayor que P_u y otra A_2 negativa con P_i menor que P_u .

Solamente si las dos áreas son iguales, se cumplirá la ecuación (4) arriba anotada y por tanto el sistema podrá conservar el sincronismo. Es por eso que esta condición se ha denominado "Criterio de igualdad de áreas", para estabilidad.

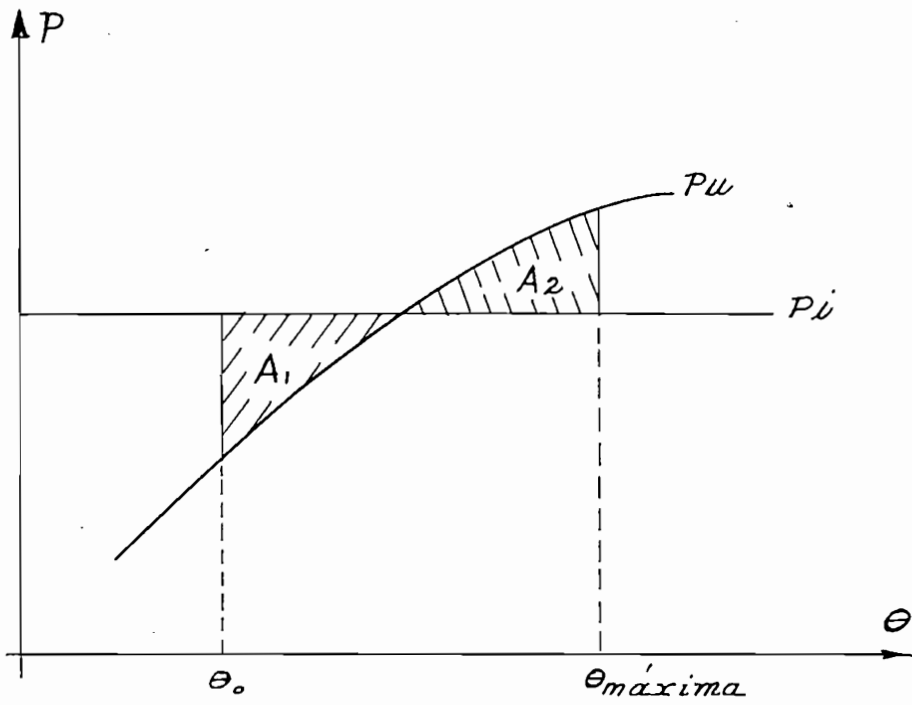


FIG. 5

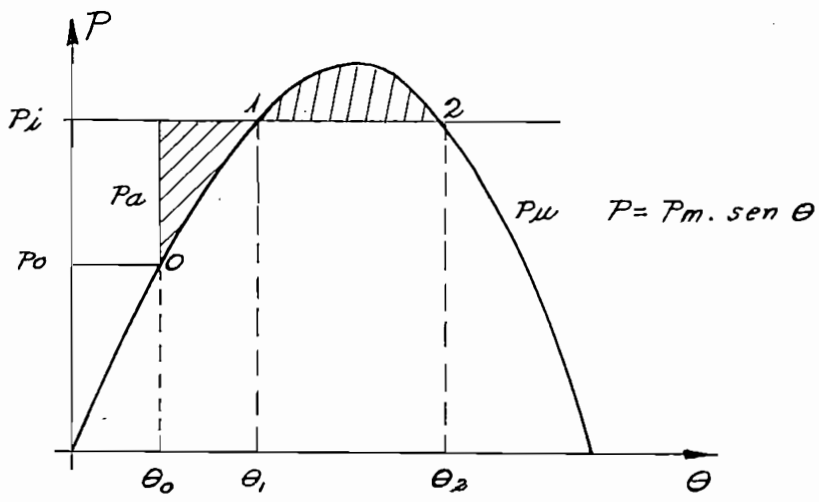


FIG. 6

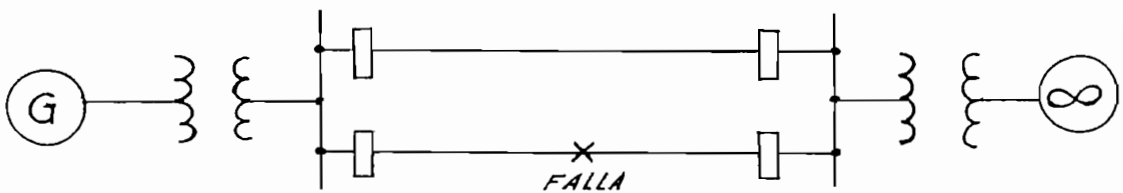


FIG. 7

Las áreas encerradas entre las dos curvas pueden interpretarse en términos de "energía cinética". El trabajo efectuado por un cuerpo en rotación de torque T actuando a través de un ángulo $\theta_{\text{máx.}} - \theta_0$, es:

$$W = \int_{\theta_0}^{\theta_{\text{máx.}}} T \cdot d\theta$$

y este trabajo aumenta la energía cinética del cuerpo. El área A_1 , haciendo referencia a la Fig. # 5, representa la energía cinética excedente de la máquina motriz que acelera el rotor del alternador.

El área A_2 , representa la energía eléctrica sobrante y sola - mente si las dos áreas son iguales, la máquina sincrónica conservará su velocidad anterior, es decir el sincronismo.

Para una mejor comprensión de este método, es necesario examinar el caso en que la potencia propulsora P_i aumenta repentinamente y poder definir así con exactitud los límites en los cuales puede cambiar la potencia y el desplazamiento angular θ de una transmisión sincrónica, sin perder el sincronismo. Este caso prácticamente no ocurre, pero es el más sencillo para el análisis.

Haciendo referencia a la Fig. # 6, se supone que, en el caso de equilibrio, la potencia generada por el alternador y transmitida a través de la línea a las barras infinitas, sea $P_0 = P_m \cdot \text{sen } \theta_0$, representada en la sinusoides de potencia por el punto 0 en un instante dado. Se supone ahora que la potencia del motor propulsor aumenta repentinamente de P_0 a P_i , correspondiendo a este nuevo estado el punto 1, definido por la relación:

$$P_1 = P_m \cdot \text{sen } \theta_1$$

La potencia aceleradora estará definida por la ecuación:

$$P_a = P_i - P_u = P_m(\text{sen } \theta_1 - \text{sen } \theta) \quad (5)$$

Suponiendo que θ alcanzara su máximo valor en θ_2 , las áreas entre P_i y P_u estarán definidas con la integral:

$$\int_{\theta_0}^{\theta_2} P_a \cdot d\theta = \int_{\theta_0}^{\theta_2} P_m(\text{sen } \theta_1 - \text{sen } \theta) d\theta \quad (6)$$

Aplicando a la ecuación (6) el criterio de la igualdad de áreas, tiene que verificarse la relación:

$$\int_{\theta_0}^{\theta_2} P_m(\text{sen}\theta_1 - \text{sen}\theta) = P_m(\theta_2 - \theta_0)\text{sen}\theta_1 + \text{cos}\theta_2 - \text{cos}\theta_0 = 0 \quad (7)$$

que puede también escribirse en la siguiente forma:

$$\text{cos}\theta_2 + \theta_2\text{sen}\theta_1 = \text{cos}\theta_0 + \theta_0\text{sen}\theta_1 = 0 \quad (8)$$

esta ecuación se cumplirá solamente si:

$$\theta_2 \leq (\pi - \theta_1)$$

de manera que el límite de estabilidad en función de θ , está definida por la relación:

$$(\pi - \theta_1 - \theta_0)\text{sen}\theta_1 = \text{cos}\theta_1 + \text{cos}\theta_0 \quad (9)$$

que, según Rissik, puede expresarse mediante la siguiente relación numérica aproximada:

$$\text{sen}\theta_1 = 0,724 + 0,276 \text{sen}\theta_0 \quad (10)$$

También se puede expresar, en términos de potencia, las condiciones límites para el mantenimiento de la estabilidad. Si la potencia inicial "antes" de que ocurra la falla es $P_0 = P_m \cdot \text{sen}\theta_0$, se deduce, según lo desarrollado, que la máxima potencia que todavía puede conservar el sincronismo, está definida con la relación:

$$\begin{aligned} P_1 \leq P_m \cdot \text{sen}\theta_1 &= 0,724 P_m + 0,276 P_0 \\ &= (0,276 + 0,724/\text{sen}\theta_0) P_0 \end{aligned} \quad (11)$$

Con las ecuaciones (6) hasta (11) están, en principio, definidos los límites de estabilidad de un alternador sincrónico cuya potencia propulsora aumenta repentinamente. Como se dijo, este caso tiene poca importancia en la práctica, ya que en sistemas de transmisión interconectados, el repentino cambio de potencia de cargas eléctricas no representa un peligro para la estabilidad de los sistemas, porque éstos alimentan grandes grupos de consumidores y en consecuencia la variación de las cargas se realiza paulatinamente.

Mucho más real e importante para la estabilidad de los sistemas de transmisión existentes, es el peligro que se deriva del "cambio del valor de la impedancia de transferencia", resultante de defectos o fallas en las líneas.

A continuación unas cuantas aplicaciones del "criterio de la igualdad de áreas":

a) Falla mantenida en la línea.--

Suponiendo que la falla tiene lugar en el punto X de un sistema simple (ver FIG. 7) consistente de un alternador conectado a través de un circuito de doble línea a una barra infinita.

Se consideran constantes la energía eléctrica de entrada del alternador y la reactancia transitoria en atraso al voltaje.

En la FIG. 8 se indican las curvas del "ángulo de potencia" que dan la energía de salida del alternador con el ángulo de desplazamiento, para las condiciones : normal y en falla.

La línea horizontal P_i , haciendo referencia a la misma FIG. 8, paralela al eje de abscisas, representa la energía eléctrica de entrada del alternador, que se supuso permanece constante.

El punto inicial de operación es a que representa la intersección de P_i con la curva de la potencia eléctrica de salida para la condición normal (curva 1). El ángulo inicial de desplazamiento es θ_0 y la velocidad angular relativa es cero.

Examinado la FIG. 8, cuando se inicia la falla el punto de operación cae a b directamente bajo a en la curva de la energía eléctrica de salida para la condición "en falla" (curva 2), no se modifica el ángulo θ_0 .

Hay entonces una potencia aceleratriz:

$$P_a = P_i - P_u$$

representada por la longitud ab. En consecuencia, el alternador es acelerado, se incrementa el ángulo de desplazamiento y el punto de operación se mueve a lo largo de la curva desde b hacia c; de esta manera, la potencia aceleratriz y el decremento de la aceleración llegan a ser cero en el punto c. En este punto, la velocidad del alternador es más grande que aquélla de la barra infinita y el ángulo θ continúa incrementándose.

De esta manera, P_a llega a ser negativa representando potencia retardada.

La velocidad disminuye hasta el punto d determinada por la igualdad de las áreas $A_1 = A_2$. Aquí se alcanza el máximo ángulo de desplazamiento $\theta_{\text{máx}}$.

Existe todavía un torque retardado, por lo tanto la velocidad del alternador continúa decreciendo, llegando a ser menor que aquélla de la barra infinita.

El ángulo de desplazamiento θ decrece y el punto de operación se traslada desde d a través de c hacia b. El sistema es inestable. El punto de operación continúa oscilando entre b y d, pero como existe amortiguación, ésta hace disminuir las oscilaciones y el punto de operación llega a establecerse en c.

Al incrementar la carga inicial sobre el alternador, las áreas A_1 y A_2 y el ángulo $\theta_{\text{máx}}$ se incrementarían.

El mayor valor que podrá tener P_i, sin que la máquina pierda el sincronismo durante la existencia de la falla, será cuando el valor de $\theta_{\text{máx}}$ tenga lugar en la intersección de las curvas P_i y 2, como se puede ver en la FIG. 9. Esta es la condición crítica en la

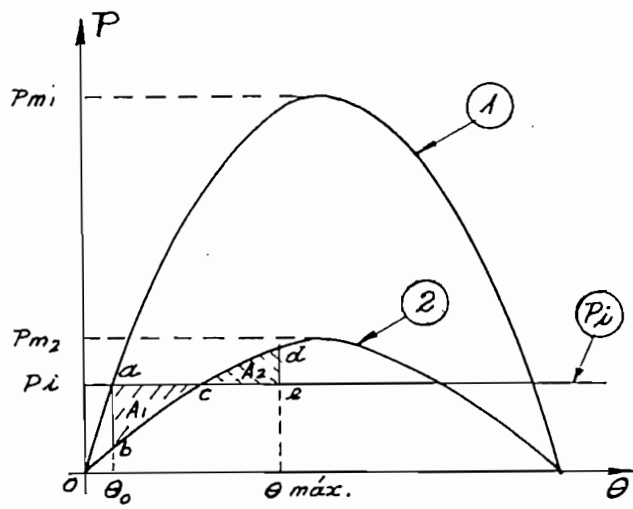


FIG. 8

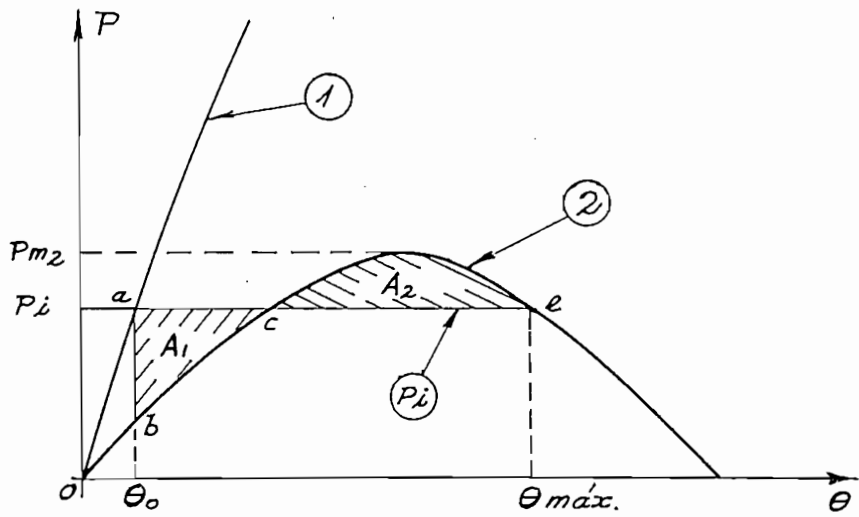


FIG. 9

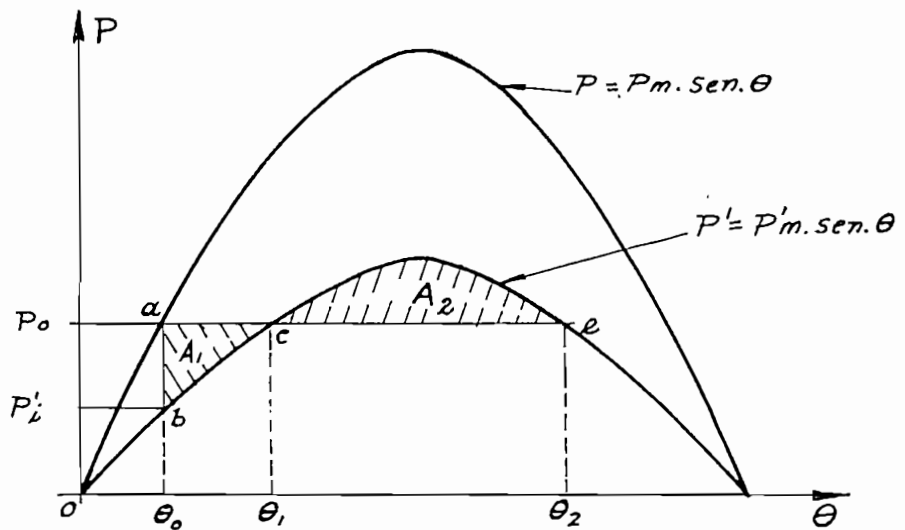
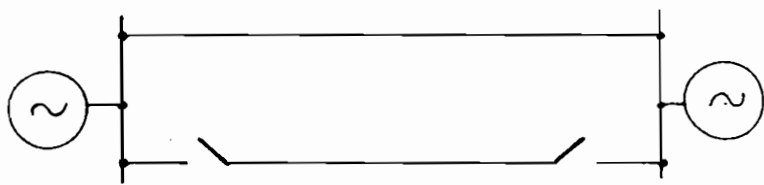


FIG. 10

cual, a un mismo tiempo la velocidad y la aceleración llegan a ser simultáneamente cero al ángulo $\theta_{m\acute{a}x}$.

El valor de P_i , el cual marca esta condición, produce el "límite de estabilidad transitoria".

Si la curva de la energía de salida en condiciones normales, curva 1, fuera todavía más grande, el área A_2 sería menor que el área A_1 . El alternador alcanzaría el punto e en la curva donde es cero la aceleración. Por lo tanto θ continuaría incrementándose y la potencia aceleratriz llegaría otra vez a ser cero. El sistema sería inestable.

Si la potencia de entrada (P_i) fuese más grande que P_{m2} , que es la potencia máxima de salida para la condición durante la falla, no constituiría un retraso y por lo tanto el sistema sería inestable para el presente caso de "una falla mantenida".

- b) Desconexión de una línea que forma parte de la interconexión:

Al efectuar la desconexión de una línea, la impedancia de transferencia cambia según la razón:

$$r_1 = X_m / X_n$$

que representa el cociente de las reactancias para las condiciones "anterior" y "durante" la falla; por tanto la potencia eléctrica transmitida disminuye instantáneamente por el valor:

$$r_1 \cdot P$$

pasando el punto operativo a a una nueva posición b (Referencia a la FIG. 10) .

La energía cinética de las partes rotantes, impulsa el rotor del alternador a tomar otro defasaje θ , de tal manera que el punto de operación b se traslada sobre la curva P' más allá del nuevo punto de equilibrio llegando hasta el punto e.

Para determinar si el sistema conserva el sincronismo, hay que aplicar el criterio de la igualdad de áreas a las dos sinusoides que intervienen en este caso.

El sincronismo se conservará solamente si las áreas A_1 y A_2 son iguales. Analíticamente puede expresarse el límite de la estabilidad con la relación siguiente:

$$\begin{aligned} P_0 &\leq P'_m \cdot \text{sen } \theta_1 \\ &= r_1 \cdot P_m \cdot \text{sen } \theta_1 \end{aligned} \quad (12)$$

que según la ecuación (10), puede escribirse:

$$P_0 \leq r \cdot P_m (0,724 + 0,276 \text{ sen } \theta_0)$$

o también:

$$\text{Sen } \theta_0 = \frac{0,724 \cdot r}{1 - 0,276 \cdot r} \quad (13a)$$

$$P_0 \leq \frac{0,724 \cdot r \cdot V_B \cdot V_R}{(1 - 0,276) \cdot X} \quad (13b)$$

en donde:

V_G = voltaje en el lado de generación

V_R = voltaje en el lado de recepción

X = reactancia del sistema

Entonces, solamente si la potencia eléctrica transmitida en condiciones normales antes de que ocurra la falla, satisface la ecuación (13b), puede conservarse el sincronismo.

Las mismas condiciones se realizan también cuando se produce una puesta a tierra simple en una sola de las ternas de una línea múltiple de interconexión. Tratándose de interconexión con línea múltiple, el sistema puede eventualmente seguir funcionando también sin desconectar la línea en falla, pues la relación r_1 en este caso, tiene un valor no muy pequeño.

- c) Corto-circuitos de líneas del sistema, que no forman parte de la interconexión:

Se supone que el sistema tiene la misma impedancia de transferencia que en el caso anterior una vez que se haya desconectado la línea en defecto; de manera que el proceso puede representarse por dos sinusoides de potencia, según se indica en la FIG. 11.

Al producirse el defecto, el punto operativo O pasa al punto O' de la segunda sinusoide, disminuyendo la potencia transmitida por la relación $r_1.P$.

La inercia de las partes rotantes hace que el punto O' se traslade a lo largo de la segunda sinusoide hasta el punto $1'$.

Se puede mantener el sincronismo solamente si la línea en defecto se desconecta muy rápidamente para no permitir que el ángulo θ supere el valor crítico.

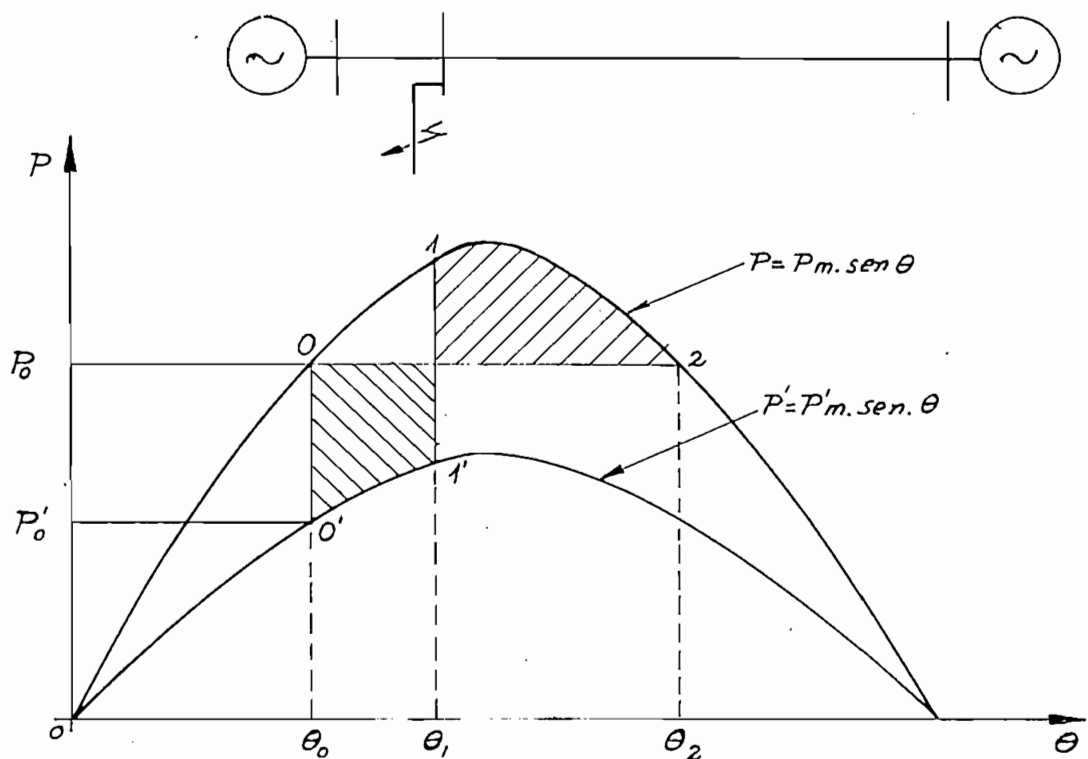


FIG. 11

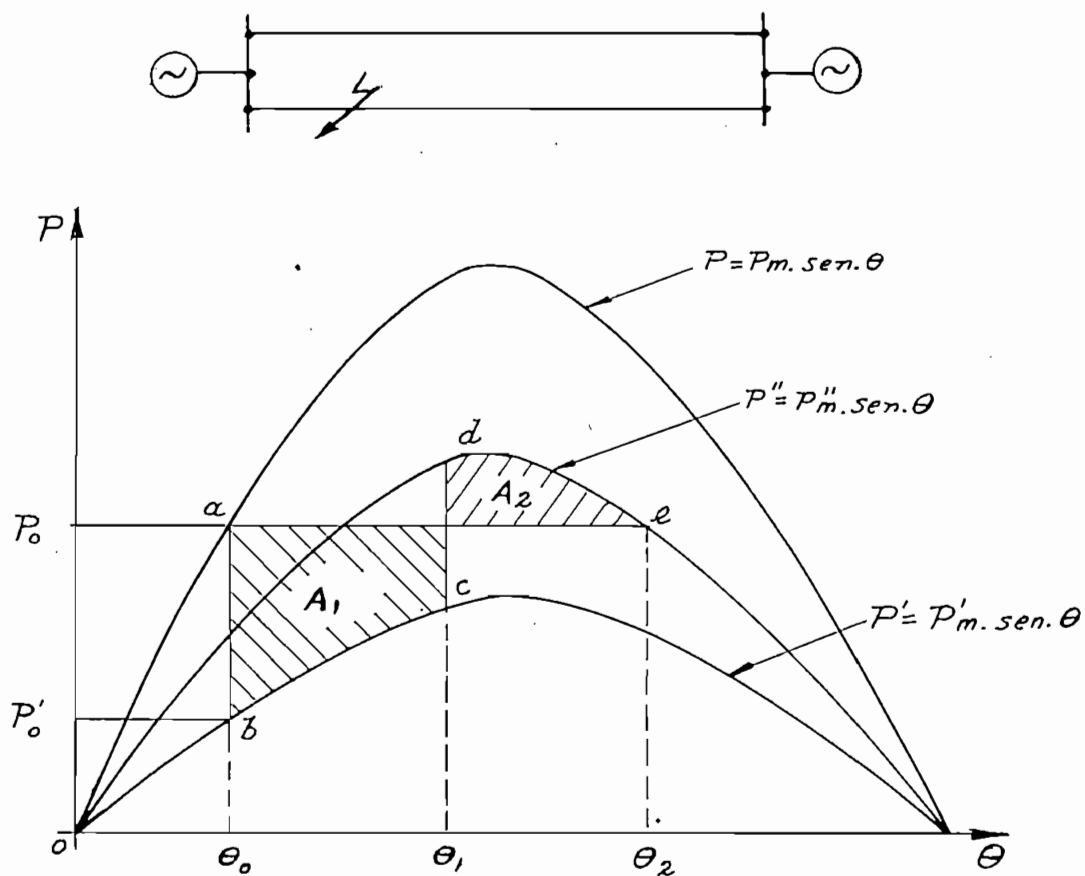


FIG. 12

En el momento en que se desconecta la línea, el punto operativo vuelve a la primera sinusoide trasladándose, en consecuencia de la inercia, hacia valores de θ_1 .

Aplicando el criterio de la igualdad de áreas a las dos sinusoides, se tiene:

$$P_o(\theta_2 - \theta_o) = \int_{\theta_o}^{\theta_1} P'_m \cdot \text{sen}\theta \cdot d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} P_m \cdot \text{sen}\theta \cdot d\theta \quad (14)$$

y haciendo:

$$(\theta_2)_{\text{máx}} = (\pi - \theta_o) :$$

$$(\pi - 2\theta_o)P_m \cdot \text{sen}\theta_o = P_m(r \int_{\theta_o}^{\theta_1} \text{sen}\theta \cdot d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \text{sen}\theta \cdot d\theta)$$

integrando el miembro de la derecha, se tiene:

$$\begin{aligned} (\pi - 2\theta)\text{sen}\theta_o &= r(\cos\theta_o - \cos\theta_1) + \cos\theta_o + \cos\theta_1 \\ &= (1 + r)\cos\theta_o + (1 - r)\cos\theta_1 \end{aligned}$$

con lo que resulta:

$$\cos\theta_{1\text{crit.}} = \frac{(\pi - 2\theta_o)\text{sen}\theta_o - (1+r)\cos\theta_o}{(1 - r)} \quad (15)$$

Es decir que para conservar el sincronismo, los interruptores tienen que actuar antes que el punto operativo llegue al valor de $\theta_{1\text{crit.}}$

d) Corto-circuitos en líneas que forman la interconexión:

Después de la actuación de los interruptores y de la separación de la línea que ha fallado, la impedancia del sistema toma un valor distinto de la condición anterior a la falla; por tanto, este caso difiere del visto en el párrafo (c). En consecuencia, intervienen en el análisis tres curvas de potencia, que corresponden a las condiciones:

- 1.- Anterior a la falla o normal
- 2.- Durante la falla, y
- 3.- Después de la falla

La indicación de estas tres curvas se han trazado en el diagrama "potencia-ángulo" de la Fig. 12.

Al producirse la falla, el sistema funciona con la potencia P_0 y el ángulo θ_0 . El defecto traslada el punto operativo a hasta b de la segunda sinusoides. El sistema continúa funcionando según la curva:

$$P' = r_1 \cdot P_m \cdot \text{sen} \theta$$

hasta el punto c en que la línea en falla se desconecta. Al desconectarse la línea, el punto operativo pasa a la sinusoides P'' al punto d. La inercia de las partes rotantes sigue aumentando el ángulo θ y el sincronismo se puede mantener solamente si las áreas A_1 y A_2 son iguales (Fig. 12).

Esta condición se cumplirá solamente si la línea en falla se desconecta antes de que el punto operativo b sobre la sinusoides P' alcance un valor:

$$\theta_1 \geq (\theta)_{\text{crít.}}$$

este valor puede definirse mediante las siguientes consideraciones:

Siendo:

$$\text{Sen}\theta_2 = \frac{P_0}{P''_m} = \frac{P_m \cdot \text{sen}\theta_0}{r_2 \cdot P_m} = \frac{\text{Sen}\theta_0}{r_2} \quad (16a)$$

y existiendo la relación:

$$(\theta_2)_{\text{máx.}} = \pi - (\text{arcsen} \frac{\text{sen}\theta_0}{r_2}) \quad (16b)$$

que para $r_2 = 1$, se transforma en:

$$(\theta_2)_{\text{máx.}} = \pi - \theta_0$$

con lo cual resulta la siguiente ecuación dictada por el criterio de la igualdad de áreas:

$$\int_{\theta_0}^{\theta_1} (P_0 - P'_m \cdot \text{sen}\theta) d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} (P_0 - P'' \cdot \text{sen}\theta) d\theta = 0 \quad (17a)$$

que efectuando la integración, se tiene:

$$\begin{aligned} (P_0)(\theta_1 - \theta_2) - r_1 \cdot P_m (\cos\theta_0 - \cos\theta_1) + \\ (P_0)(\theta_2 - \theta_1) - r_2 \cdot P_m (\cos\theta_1 - \cos\theta_2) = 0 \end{aligned} \quad (17b)$$

Obtenemos el máximo valor de $(\theta_1)_{\text{crít.}}$ haciendo:

$$P_0 = P_m \cdot \text{sen}\theta_0$$

en la ecuación (17b). La línea en defecto debe desconectarse para mantener el sincronismo, es decir que tienen que actuar los interrup

tores antes de que el punto operativo llegue al valor del ángulo $(\theta_1)_{crit.}$, por tanto se tiene la siguiente ecuación:

$$(\cos\theta_1)_{crit.} = \frac{(\theta_2 - \theta_0)\text{sen}\theta_0 - r_1 \cdot \cos\theta_0 + r_2 \cdot \cos\theta_2}{r_2 - r_1}$$

es decir, que se tiene:

$$(\cos\theta_1)_{crit.} = \frac{\text{sen}\theta_0(\pi - \theta_0 - \arcsen \frac{\text{sen}\theta_0}{r_2}) - r_1 \cos\theta_0 - \sqrt{r_2^2 - \text{sen}^2\theta_0}}{r_2 - r_1}$$

(18)

Como una última aplicación al criterio de la igualdad de áreas, se considera la siguiente:

e) Falla de línea con el subsiguiente despeje:

Para este caso

son necesarias tres curvas del ángulo de potencia:

- 1.- Para la condición normal o "anterior a la falla"
- 2.- Para la condición "durante la falla", y
- 3.- Para la condición "después de la falla" con la línea en falla desconectada.

La indicación del trazo de estas curvas están en el diagrama "potencia-ángulo" de la Fig. 13.

Como en el caso (a), el ángulo inicial θ_0 es determinado por la intersección de las curvas de la energía de entrada y de la curva de energía de salida "anterior" a la falla (punto a), aplicando los casos de falla, el punto de operación cae desde a hacia b y la potencia aceleratriz produce el movimiento a lo largo de la curva de b a c. En este punto, los interruptores se habren despejando la falla, entonces el punto de operación salta a e en la curva de la energía de salida posterior a la falla y recorre a lo largo de ésta hacia f donde el área A_1 es igual al área A_2 .

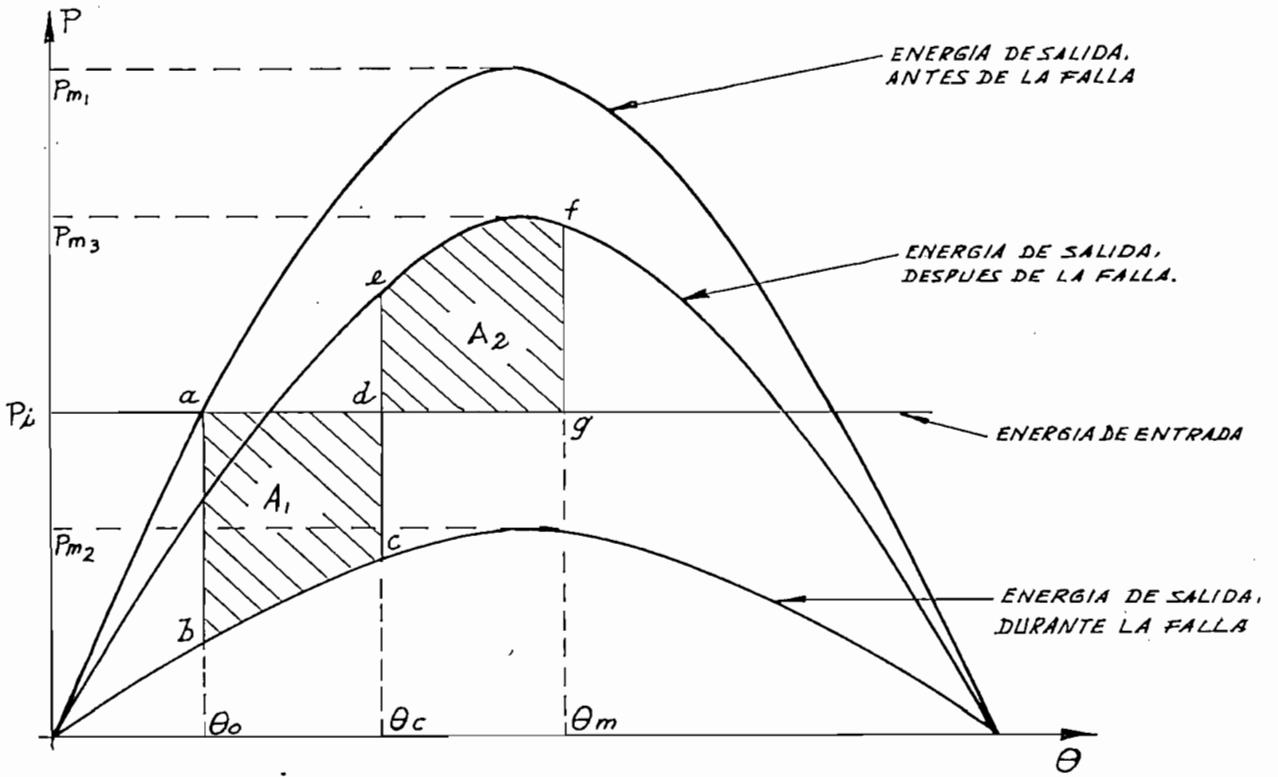


FIG. 13

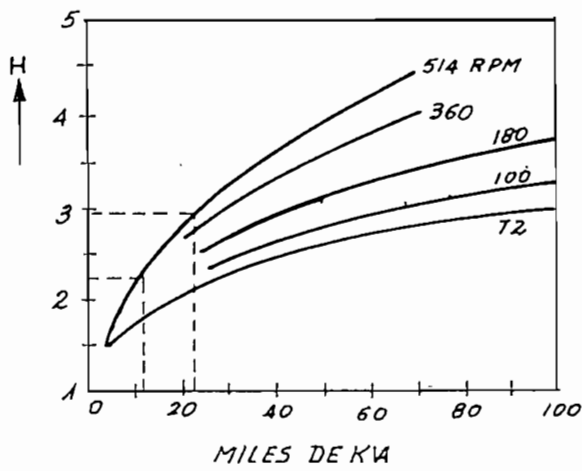


FIG. 15

Con un incremento del tiempo de despeje de la falla, resultando un ángulo mayor de despeje θ_0 , causaría el movimiento del punto f a la derecha. Se debe anotar que para una carga inicial dada, hay un ángulo crítico de despeje. Si el ángulo actual de despeje es más pequeño que el valor crítico, el sistema es estable; si es más grande, el sistema es inestable.

Generalmente el ángulo de despeje θ_0 no se conoce de una manera directa, pero en cambio se conoce el tiempo de despeje que es la suma del tiempo de operación del relé y del tiempo de operación del interruptor.

B.- Método "Paso por Paso".-

Todas las consideraciones que se hagan respecto a este método, se aplicarán al sistema de una sola máquina ya que éste es equivalente al sistema de dos máquinas, en el cual una máquina es o se supone ser de inercia infinita.

La Fig. # 14 indica, para una máquina particular, la variación de la aceleración, velocidad y cambios de ángulo del rotor con respecto a la otra máquina, la cual se admite ser de inercia infinita. Se indican también tres intervalos en el método "paso por paso" y se supone que ocurre un cambio en el circuito al final del tercer intervalo. Se admite que las velocidades W_1 , W_2 y W_3 permanecen constantes a través de los tres intervalos. En cambio se supone que la aceleración permanece constante desde la mitad de un intervalo hasta la mitad del siguiente intervalo. Por esta razón, como se indica en la representación gráfica de la curva, la aceleración se escoje ser alternativamente más grande y menor que el actual valor o valor inicial.

Los cálculos se indican en forma tabular en la Tabla "A". Estos cálculos para una sola máquina están relacionados con aquéllos para la otra máquina, como se indica en la columna # 11 de la tabulación, la cual se obtiene de la columna # 10 de la tabulación para la otra máquina. Si una de las máquinas se supone ser de inercia infinita, el problema se reduce al sistema de una sola máquina y se requiere una sola tabulación, como $\Delta \theta'$; el cambio angular de la otra máquina puede tomarse como cero.

La aceleración a_{0+} es calculada del flujo de potencia correspondiente para la posición de fase a la iniciación del disturbio transitorio, el cual tiene lugar a $t = 0$. Esta aceleración se usará para la mitad del primer intervalo de tiempo Δt para determinar la velocidad W_1 , la cual se supone constante a través del intervalo. El cambio angular $\Delta \theta_1$, para la máquina particular, es entonces calculado del incremento de velocidad durante el intervalo. Similares cálculos se hacen para la otra máquina para determinar el cambio angular $\Delta \theta'_1$ durante el mismo intervalo. El ángulo al final del primer intervalo θ_1 es la suma del ángulo inicial θ_0 y el desplazamiento angular $\Delta \theta_1$ y $\Delta \theta'_1$ para las dos máquinas.

Los cálculos para el segundo intervalo, se realizan de la misma manera. La aceleración a_1 es calculada con la ayuda del ángulo θ_1 obtenido al final del primer intervalo. El próximo incremento en velocidad es obtenido suponiendo la aceleración a_1 constante a través del intervalo Δt . Esta velocidad es entonces usada para calcular el cambio en ángulo que tiene lugar a través del segundo intervalo, el cual es igual a la velocidad W_2 veces el incremento del tiempo Δt .

Este proceso se repite para cada paso a lo largo de cualquier período para el cual el circuito no se cambia o para el cual se usa el mismo intervalo de tiempo. Si hay cambio de cualquier condición, es necesario calcular después un término de corrección de velocidad.

Las velocidades son calculadas para la mitad del intervalo, mientras que la aceleración y el desplazamiento angular son calculados para el final del intervalo. Para este caso, como se indica en la Fig. # 14, el circuito se supone que cambia al final del tercer período. Consecuentemente, es necesario añadir un término de corrección V_0 a la velocidad W_3 para obtener la velocidad al final del tercer intervalo.

El cuarto y siguientes intervalos pueden calcularse como para el primero y siguientes intervalos. Para distinguir entre las proporciones de aceleración correspondientes al comienzo de un intervalo o al final del intervalo anterior, la práctica ha seguido el uso de los signos + y - respectivamente. Este procedimiento puede aplicarse para

este caso bajo consideración usando los términos α_{o-} y α_{o+} al tiempo cero.

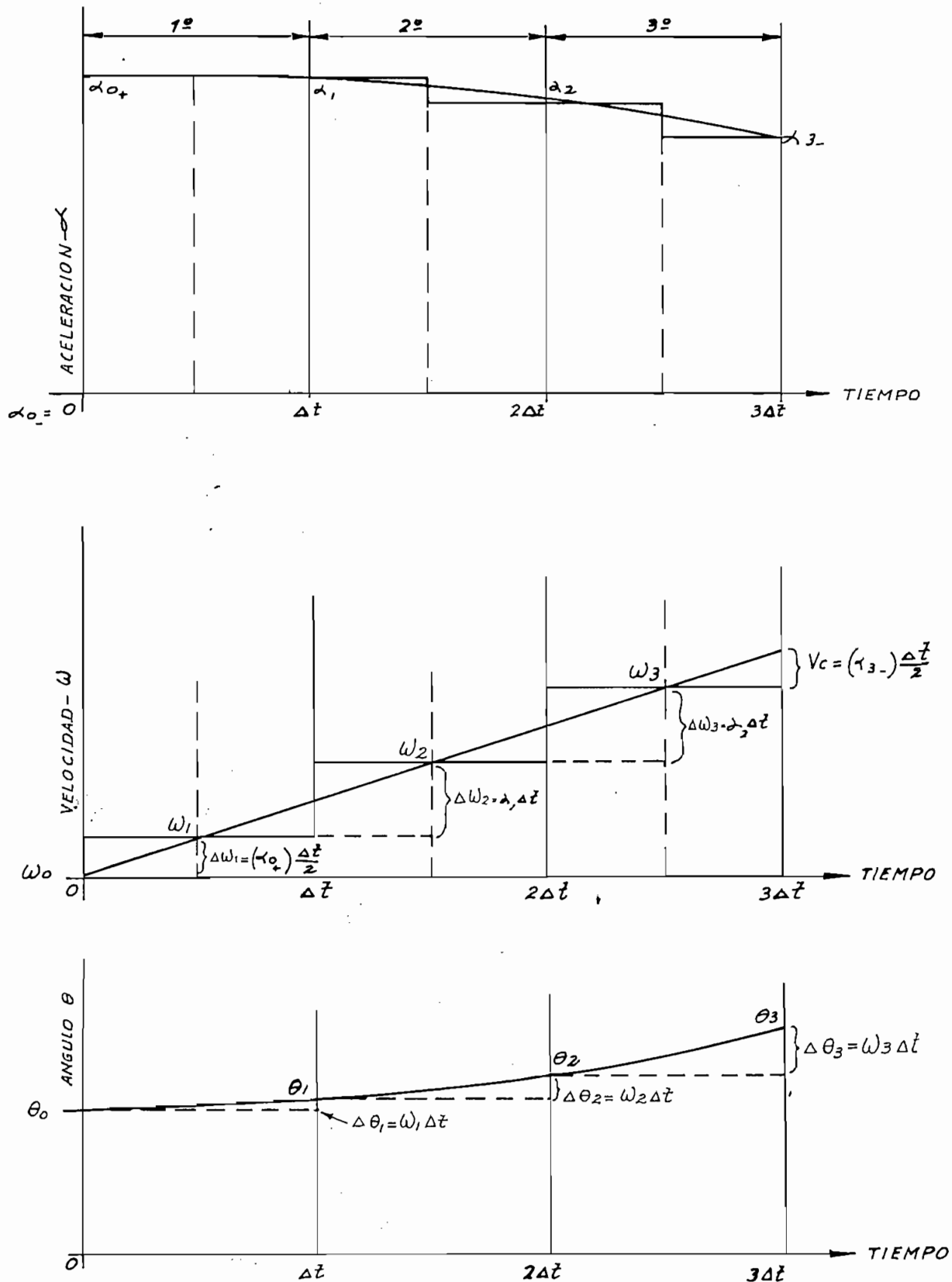


FIG. 14

El término α_{3-} da la aceleración al final del tercer intervalo anterior al cambio de circuito y el término α_{3+} da la aceleración si-

guiente al cambio de circuito. Ordinariamente los signos + y - pueden ser suprimidos y en este caso el término se sobrentiende para dar la aceleración al final del intervalo indicado por el subíndice. El intervalo de tiempo a usarse en este método, es cuestión de juicio y conveniencia. Casi siempre, en problemas de estabilidad, el intervalo no debe ser mayor que 0.1 segundos, el cual es un intervalo conveniente ya que se toma el tiempo en un igual número de ciclos. Para algunos casos es conveniente acortar el intervalo a 0.05 segundos, el cual corresponde a 3 ciclos. El intervalo de tiempo puede ser cambiado de punto a punto a lo largo de la perturbación transitoria. Por ejemplo, si durante una parte de un complicado disturbio, hay algún cambio de circuito, puede ser un cambio relativamente pequeño en la posición angular, pueden admitirse intervalos relativamente largos. Recíprocamente, otra condición transitoria puede introducir grandes cambios en ángulo durante un intervalo. Como una cuestión práctica, la longitud del intervalo siempre está decreciendo si los resultados cambian en una oscilación angular de 20 á 30 grados en un solo intervalo.

Con los resultados del cálculo, se pueden trazar las curvas velocidad-ángulo para el sistema que se analice.

El trabajo de hacer un cálculo "paso por paso" se reducirá grandemente disponiendo éste en forma tabular, trazando los cálculos de tal manera que las curvas puedan dibujarse claramente.

Por razones de claridad en el resultado de los cálculos de la estabilidad, su manera tabulada de obtención que presta gran facilidad en el trazo de las curvas potencia-ángulo para las condiciones anterior, durante y después de la falla y el trazo de las curvas ángulo-tiempo o de balanceo que reúnen los resultados necesarios para la determinación de la estabilidad del sistema que nos ocupa en este estudio, se escogerá este método de "paso por paso" en la aplicación de los datos del sistema de Cumbayá, materia de esta tesis, haciendo uso naturalmente de algunos conceptos fundamentales necesarios y fórmulas del método de la "igualdad de áreas", visto anteriormente.

001521

C A P I T U L O I I

Análisis de la estabilidad en estado transitorio, con máxima carga, para los siguientes tipos de falla:

- a.- Línea a línea: después de las barras colectoras
- b.- Tres líneas: después de las barras colectoras
- c.- Una línea a tierra: a la salida
- c'.- Una línea a tierra: a la llegada
- d.- Dos líneas a tierra: a la salida
- d'.- Dos líneas a tierra: a la llegada
- e.- Tres líneas a tierra: a la salida, y
- e'.- Tres líneas a tierra: a la llegada.

=====

La estabilidad en estado transitorio, se refiere al "límite de estabilidad", que determina la cantidad de energía que puede ser transmitida con estabilidad cuando el sistema es sujeto a una perturbación, disturbio o falla.

El más severo tipo de disturbio al cual el sistema de fuerza está sujeto, en un corto circuito. Por esto, el efecto de corto circuitos(o fallas, como se llaman a menudo) vamos a determinar más adelante.

Si el sistema es estable durante las fallas, ésto dependerá no solamente del sistema mismo, sino también del tipo de falla, rapidez y método de despeje de la falla, o sea si es despejada por operaciones sucesivas de dos o más interruptores o por apertura si - multánea y si la línea que ha fallado es reconectada o no. Para cualesquiera de estas condiciones, si se quiere saber si el sistemas es estable, dependerá de la cantidad de potencia que estuvo transmitiendo antes de que ocurra la falla; es decir que, para una perturbación específica, hay un valor de potencia, llamado "límite de estabilidad transitoria", bajo el cual el sistema es estable y sobre el cual es inestable.

La cantidad de energía que puede ser transmitida, sin pérdida de sincronismo de los generadores, cuando el sistema es sujeto a una falla, dependerá de la duración de ésta.

El límite de estabilidad transitoria de un sistema puede ser incrementado por decremento del tiempo de despeje de la falla. Frecuentemente, un sistema que es inestable para un tipo particular de falla, puede hacerse estable por la alteración de los relés existentes o por la modernización de los interruptores automáticos, así como por la disminución del tiempo de despeje. La rapidez de operación de los relés e interruptores es uno de los más efectivos e importantes medios para corregir la estabilidad del sistema de fuerza.

En el presente capítulo se analizará la estabilidad en estado transitorio con máxima carga, es decir que se considera en funcionamiento los dos grupos de generadores con una capacidad total en generación de 20.000 Kw.

Las características generales del sistema y los datos necesarios para el estudio de la estabilidad, han sido ya anotados en el Capítulo anterior, datos que han sido suministrados de "Test Record" de INTECO, los mismos que reposan en los archivos del Departamento Técnico de la Empresa Eléctrica "Quito" S.A.

El diagrama eléctrico unifilar del sistema de Cumbayá desde la casa de máquinas hasta la llegada a la Subestación Norte, se ha trazado en la Fig. # 4.

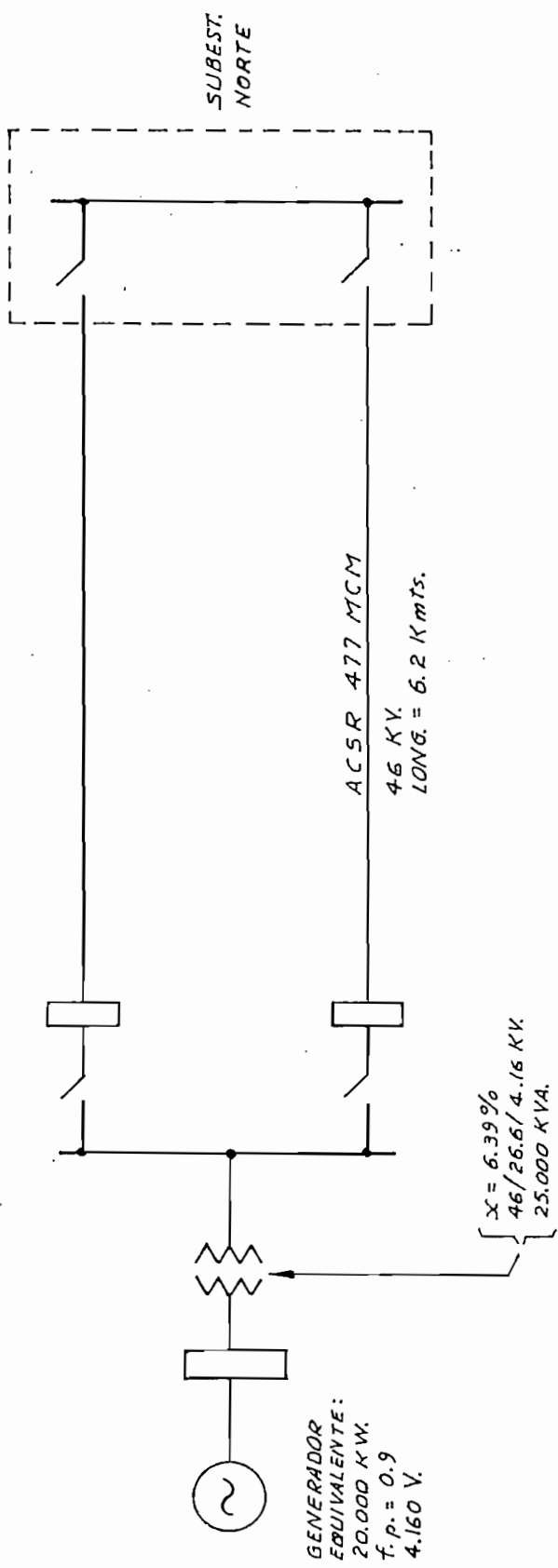
A continuación se determinan las constantes del circuito, calculando la corriente, el voltaje e impedancia normales:

$$I_n = 22.222 \text{ KVA} / \sqrt{3} \text{ 46 Kv.} = 280 \text{ Amps.}$$

$$V_n = 46 \text{ Kv} / \sqrt{3} = 26,6 \text{ Kv.}$$

$$Z_n = 26,6 \times 10^3 / 280 = 95 \text{ ohmios}$$

El diagrama eléctrico unifilar del sistema de Cumbayá, según las consideraciones anotadas anteriormente, se puede trazar en la siguiente forma:



El primer paso en el cálculo, es la determinación de las reactancias de secuencia positiva, negativa y cero en PU de los diferentes elementos del sistema, haciendo uso de los datos del sistema, que se han anotado anteriormente.

La notación de las reactancias se marcará con la letra X seguida de los subíndices 1, 2 y 0 según se trate de reactancias de secuencia positiva, negativa y cero, respectivamente.

Valores de las reactancias:

a) GENERADORES:

$$X_1 = 0,325 \text{ PU}$$

$$X_2 = 0,1964 \text{ PU}$$

Para el cálculo no interviene la reactancia de secuencia cero (X_0) de los generadores, ya que la conexión de los transformadores es Delta/Estrella y para X_0 la conexión queda abierta en el lado de alta tensión.

b) TRANSFORMADORES:

$$X_1 = X_2 = X_0 = 0,0639 \text{ PU}$$

Ya que se tiene como dato que la reactancia de los transformadores, expresada en porcentaje tiene un valor de 6,39%, lo cual traduciendo a valores de PU y escogiendo como bases 25.000 KVA y 46 Kv, se tiene:

$$X_{pu} = X(\text{del transformador}) \cdot \text{KVA}_b / \text{KVA}_{\text{transf.}}$$

reemplazando valores, se tiene:

$$X_{pu} = 0,0639 \times 25.000 / 25.000 = 0,0639 \text{ PU}$$

c) LINEA DE TRANSMISION:

$$X_{pu} = X \cdot KVA_p / Kv^2 \cdot 10^3 \quad (19)$$

en donde X = impedancia del conductor

$$= \sqrt{R^2 + X_a^2}; \quad R = \text{resistencia conductor}$$

X_a = reactancia inductiva del conductor + reactancia debida a la separación entre conductores.

Valores: R = 0,206 ohmios/milla

$$X_a = 0,424 \text{ ohmios/milla} + 0,2794 \text{ ohmios/milla}$$

$$= 0,703 \text{ ohmios/milla}$$

luego:

$$X = \sqrt{0,206^2 + 0,703^2} = 0,73 \text{ ohmios/milla} \\ = 0,453 \text{ ohmios/kmt}$$

longitud línea de transmisión = 6,2 kmts.,

$$X = 0,453 \times 6,2 = 2,81 \text{ ohmios}$$

Reemplazando valores en ecuación (19), se tiene:

$$X_{pu} = 2,81 \times 25.000 / 46^2 \times 10^3 \\ = 0,0331 \text{ FU, es decir que:}$$

$$X_1 = X_2 = 0,0331 \text{ FU}$$

La reactancia de secuencia cero (X_0), será según T & D, Cap. 2, págs. 28:

$$X_0 = X_a + X_e - \frac{2}{3} (X_d \text{ para } ab + X_d \text{ para } bc + X_d \text{ para } ca) \quad (20)$$

siendo ab, bc y ca la distancia entre conductores. Aplicando la ecuación (20) y consultando las Tablas N^{os}. 2^a para el valor de X_a y la Tabla N^o 7 para el valor de X_e (de Electrical Transmission and Distribution Reference Book), se tiene:

$$\begin{aligned} \Delta_0 &= 0,424 + 2,888 - 2/3 (0,2498 + 0,2498 + 0,3286) \\ &= 3,312 - 2/3 (0,8282) \\ &= 3,312 - 2(0,2761) \\ &= 3,312 - 0,5522 \\ &= 2,7598 \text{ ohmios/milla} \end{aligned}$$

que expresado en ohmios: $X_0 = 10,63$, y en PU:

$$X_0 = 0,126 \text{ PU}$$

d) CARGA:

En el presente capítulo, se considera con la máxima carga de 20.000 Kw. aplicada al extremo de la línea de transmisión, es decir que debido a esta carga y a la distancia desde la central a la Subestación Norte, va a existir una caída de tensión en el lado de recepción, o sea al extremo de la línea de transmisión; por tanto se calcula el porcentaje de caída de tensión en este punto:

Se dispone de los datos siguientes: Longitud = 6.2 Kmts., distancia equivalente de conductores = 10'; $R = 0,216$ ohmios/milla, $X_a = 0,703$ ohmios/milla, que expresando en ohmios/Kmt., se tiene:

$$R = 0,134 \text{ ohmios/Kmt}$$

$$X_a = 0,437 \text{ ohmios/Kmt}$$

La caída de tensión:

$$e = IL\sqrt{3} (R\cos\varphi + X_a\sin\varphi)$$

que reemplazando valores, se tiene:

$$\begin{aligned} e &= 279,2 \times 6,2 \times 1,73 (0,134 \times 0,9 + 0,437 \times 0,44) \\ &= 2.995,8 (0,121 + 0,192) \\ &= 2.995,8 \times 0,313 \\ &= 938 \text{ voltios, o sea } e/\% = 2,03\% \end{aligned}$$

es decir que al extremo se tiene un voltaje de $46.000 - 938 = 45.062$ voltios, con lo que se tiene un voltaje normal de:

$$45/\sqrt{3} = 26 \text{ Kv.}; \text{ la impedancia de la carga en Pu}$$

se conoce que tiene un valor de $X_{pu} = X / X_b$, el valor de X (impedancia de la carga en ohmios), tendrá un valor de:

$$X = 26 \times 10^3 / 280 = 93 \text{ ohmios, y el valor de}$$

X_b (impedancia base en ohmios, de la carga), tendrá un valor:

$$X_b = 46^2 \times 10^3 / 20.000 = 105,8 \text{ ohmios, luego}$$

$$X_{pu} = 93/105,8 = 0,879 \text{ PU}$$

Por tanto, los valores de las reactancias en las tres secuencias, serán:

$$X_1 = X_2 = X_0 = \underline{\underline{0,879 \text{ PU}}}$$

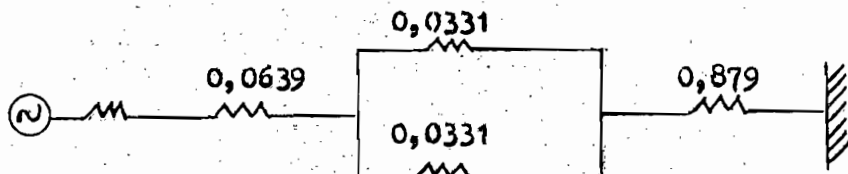
En los cálculos de la estabilidad en estado transitorio, se admite generalmente un voltaje determinado constante en el lado de recepción para las condiciones anterior, durante y después de la falla. En el presente caso, en la barra de bajo voltaje en el lado de recepción, se supone que este voltaje se mantiene constante con un valor de 0,95 PU, o sea que se está suponiendo que se mantiene constante a 95% del voltaje nominal.

También se admite o se supone que el voltaje interno de los generadores se mantiene constante para las tres condiciones anotadas, y por último se admite que no varía la potencia de entrada, cuyo valor será:

$P_i = 22.222 / 25.000 = \underline{\underline{0,888 \text{ PU}}}$ a factor de potencia 90%; de acuerdo con esto, la corriente en el sistema tendrá un valor de:

$$I = 0,888 / 0,95 = 0,935 \text{ PU}$$
$$= 262 \text{ Amps.}$$

Voltaje de terminales en el lado de generación:



$$X = 0,0639 + 0,0166 + 0,879$$
$$= 0,96$$

$$V_s = 0,95 + 0,935(j0,96)$$
$$= 0,95 + j0,875$$

El voltaje interno del generador, o voltaje tras la reactancia transitoria, es el vector suma del voltaje de terminales de la máquina y el voltaje necesario para llevar la corriente de carga a través de la reactancia transitoria, lo designamos con la notación $V's$, y tiene un valor de:

$$\begin{aligned} V's &= 0,95 + j0,875 + 0,935(j0,325) \\ &= 0,95 + j1,179 \\ &= 1,514 \cdot e^{j51,2^\circ} \text{ PU} \\ & \text{=====} \end{aligned}$$

Este valor se considerará constante e invariable para el cálculo de la estabilidad transitoria.

En el cálculo de la estabilidad transitoria, se determinará el tiempo máximo permisible entre la iniciación de la falla y la apertura de los interruptores del circuito para el cual se puede mantener la estabilidad. Este tiempo así determinado no corresponde al tiempo de operación del interruptor que sería usado normalmente, sino que se refiere al tiempo máximo de operación el cual permita conservar la estabilidad.

El paso a seguirse consiste en calcular y trazar los diagramas "potencia-ángulo", para las condiciones siguientes:

- a.- Condición inicial o normal antes de la iniciación de la falla
- b.- Condición durante la falla, y
- c.- Condición después de la falla.

Como se ha considerado que el receptor tiene inercia infinita, su posición angular permanece fija y por tanto es necesario calcular solamente los diagramas "potencia-ángulo" para el lado de generación. La ecuación relativa para esta potencia se reduce a la siguiente:

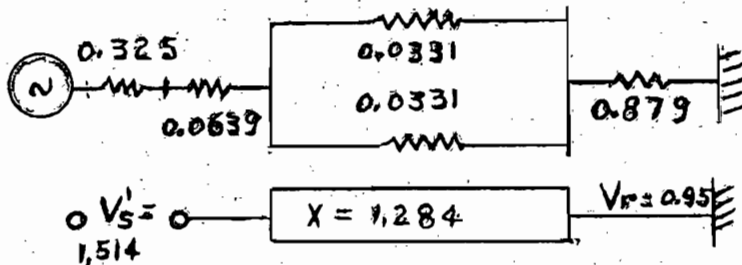
$$P_s = - \frac{V's \cdot V_r}{X} \cos (90 + \theta) \text{ PU}$$

en donde θ es el ángulo entre los voltaje internos $V's$ y V_r . Como se dijo anteriormente, los diagramas "potencia-ángulo" se van a determinar para las condiciones transitorias, por tanto el valor de X se obtendrá calculando la reactancia equivalente del sistema para las diferentes conexiones de las secuencias según el tipo de falla.

Se seguirá la siguiente notación de las potencias de salida:

- a.- Para la condición anterior a la falla, con P_s .
- b.- Para la condición durante la falla, con P'_s , y
- c.- Para la condición después de la falla, con P''_s .

El circuito a usarse en el cálculo de la potencia de salida para la condición anterior a la falla, o condición normal, es el siguiente:



cuyo valor será:

$$P_s = - \frac{(1.514)(0.95)}{1.284} \cos(90 + \theta) \text{ PU}$$

$$= - 1.12 \cos(90 + \theta) \text{ PU}$$

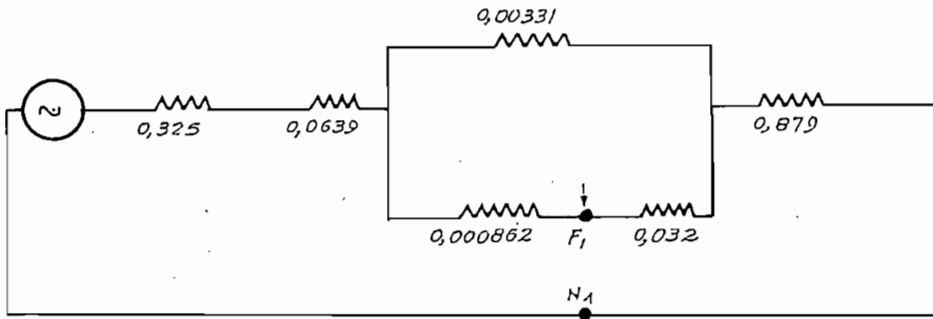
Antes de proceder al cálculo de estabilidad para los diferentes tipos de falla, conviene representar los diagramas de reactancias en PU para las tres secuencias, para lo cual se ha representado por la letra N una barra de potencial cero y por F el sitio en el cual se produce la falla, a estas notaciones se añaden los subíndices 1, 2 y 0 según se trate del circuito correspondiente a la secuencia positiva, negativa o cero, respectivamente, del sistema en estudio.

En cuanto a la localización de las fallas, cuando se trate de fallas a "la salida" o "después de las barras colectoras", éstas se suponen que tienen lugar a una distancia de 0,1 milla de los generadores y al tratarse de fallas a "la llegada", la distancia será la misma pero a partir de la Subestación Norte.

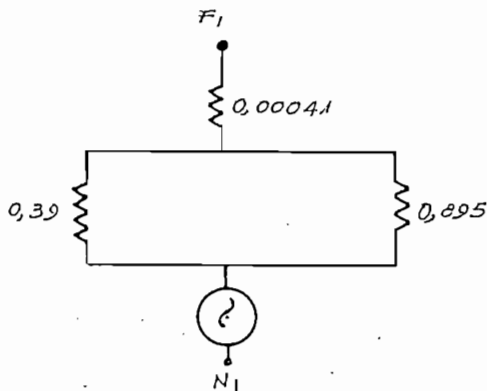
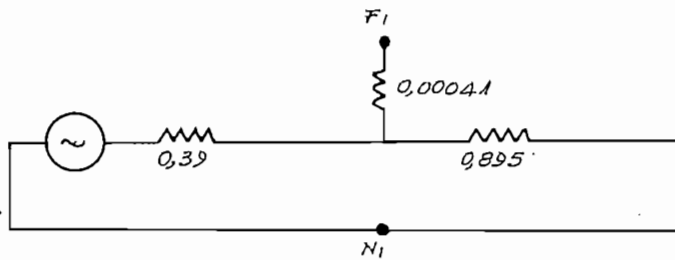
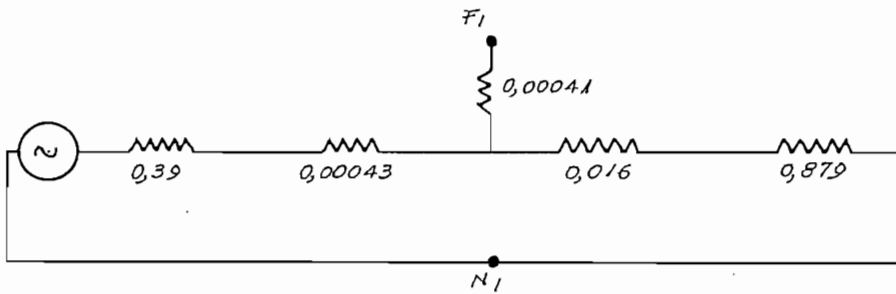
Los diagramas de reactancias de cada una de las secuencias se irán haciendo las respectivas reducciones para obtener al final una reactancia equivalente a utilizarse en el cálculo. A continuación los valores de las reactancias de secuencia positiva, negativa y cero pa-

ra los tipos de falla que tengan lugar "después de las barras colectoras" o "a la salida":

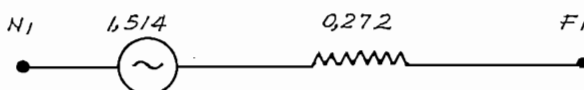
SECUENCIA POSITIVA



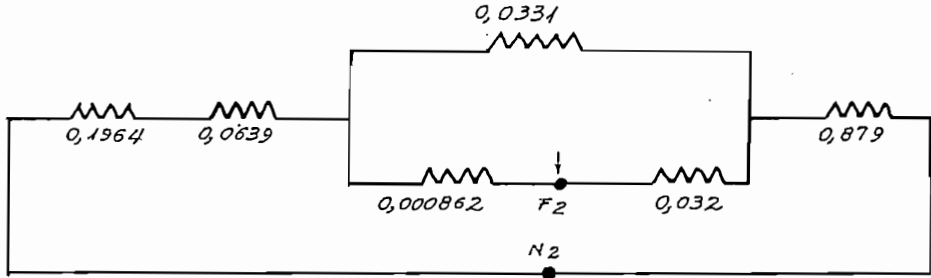
EFFECTUANDO LA CONVERSION TRIANGULO A ESTRELLA



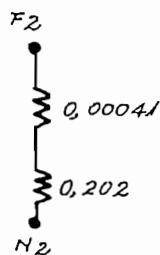
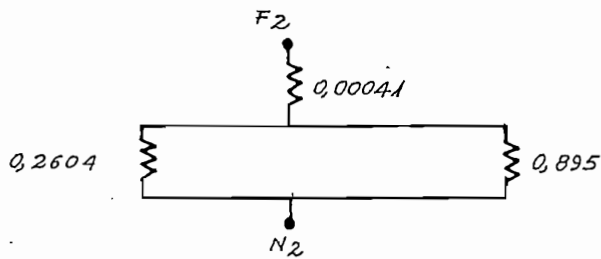
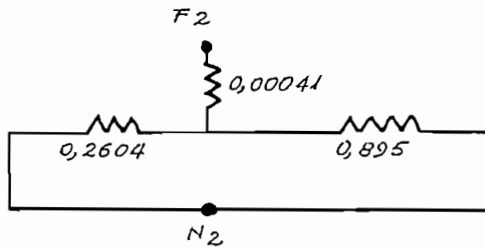
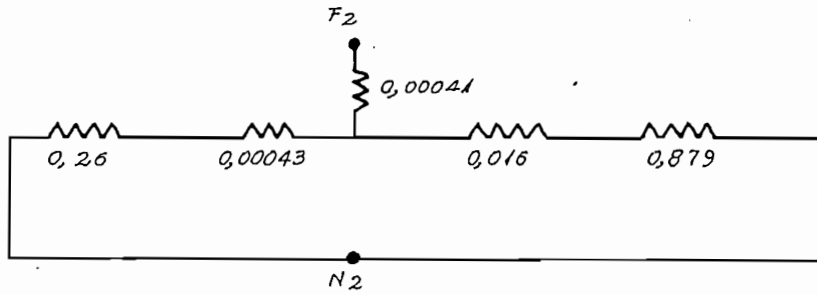
LA REACTANCIA EQUIVALENTE DE SECUENCIA POSITIVA, SERA:



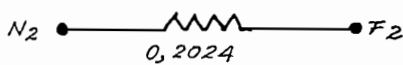
SECUENCIA NEGATIVA



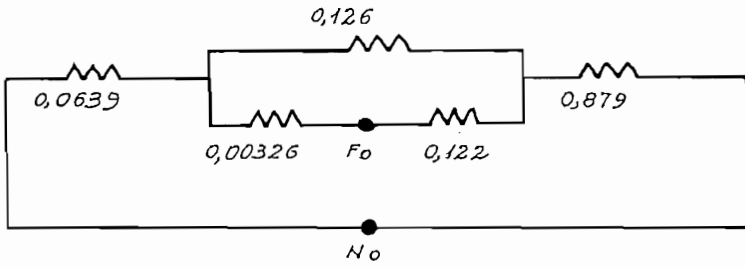
EFFECTUANDO LA CONVERSION TRIANGULO A ESTRELLA



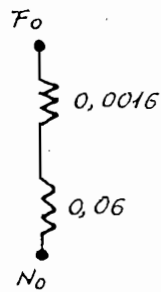
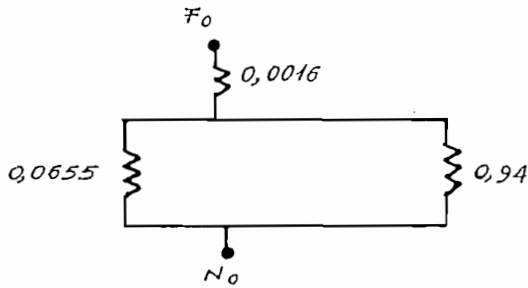
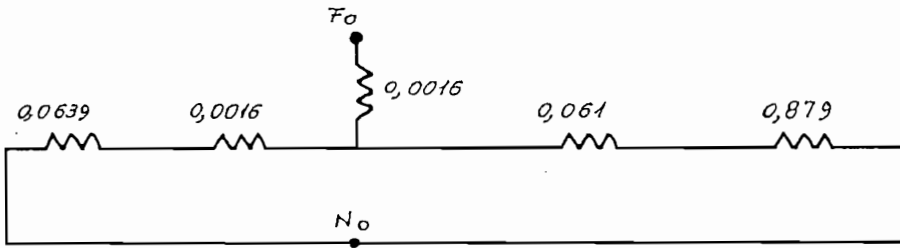
LA REACTANCIA EQUIVALENTE DE SECUENCIA NEGATIVA, SERA:



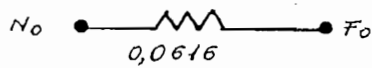
SECUENCIA CERO



EFFECTUANDO LA CONVERSION TRIANGULO A ESTRELLA



LA REACTANCIA EQUIVALENTE DE SECUENCIA CERO, SERA:



a.- Falla de LINEA A LINEA, después de las barras colectoras:

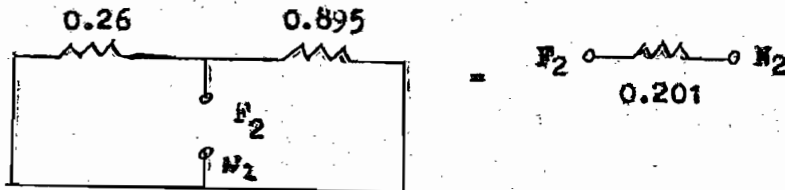
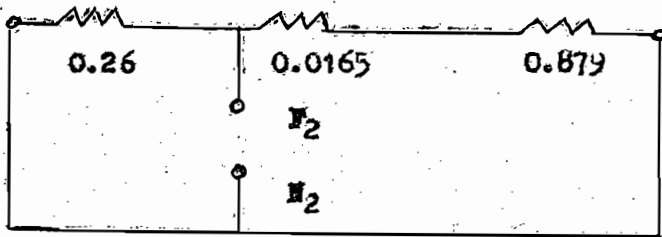
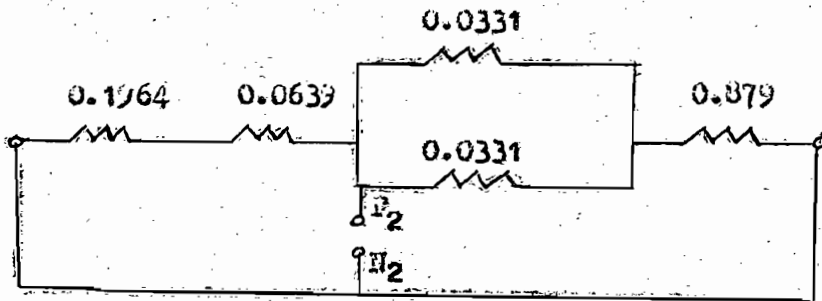
1.- Condición anterior a la falla:

$$P_a = \frac{1.12 \cos(90 + \theta)}{\dots} \text{ PU}$$

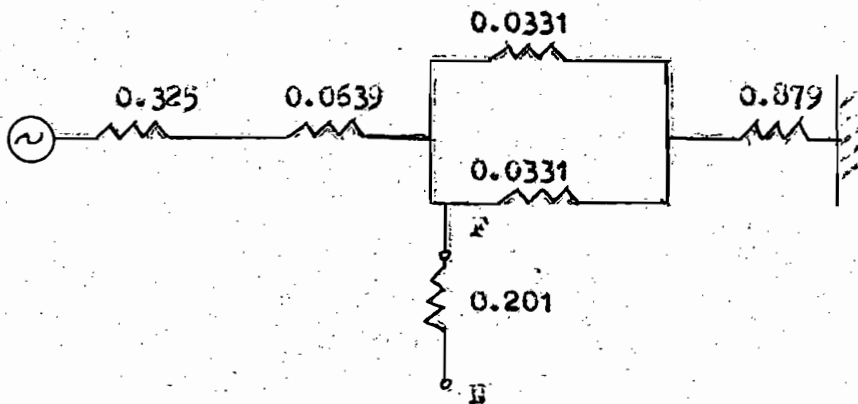
2.- Condición "durante" la falla:

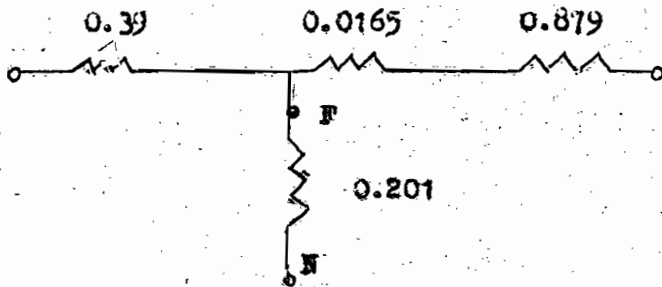
Para este tipo de falla, intervienen las reactancias de secuencia positiva y negativa conectadas en paralelo.

Secuencia negativa:

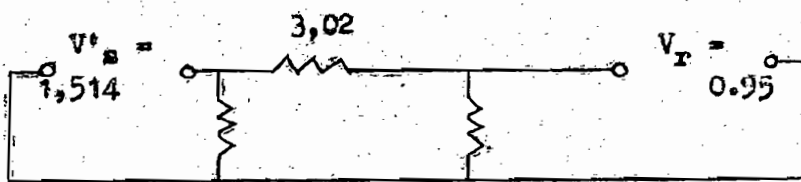


La conexión de las secuencias, será:





que es un sistema en estrella; haciendo la conversión a triángulo, se tiene:



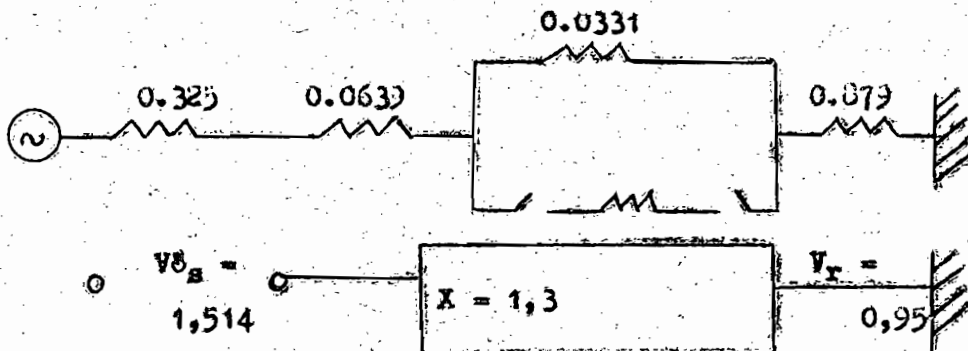
Por tanto, la potencia eléctrica de salida, para la condición "durante" la falla de línea a línea, será:

$$P'_B = - \frac{(1,514)(0,95)}{3,02} \cos(90+\theta) \text{ PU}$$

$$= - \underline{\underline{0,48 \cos(90 + \theta) \text{ PU}}}$$

3.- Condición "después" de la falla:

El diagrama de reactancias que se utiliza para esta condición, será el siguiente:



La potencia de salida para la condición "después" de la falla será igual para todos los tipos de falla siempre que se trate de la condición con "máxima carga", que es la que se está analizando en el presente capítulo, por tanto esta potencia tendrá un valor de:

$$P''_s = - \frac{(1,514)(0,95)}{1,3} \cos (90 + \theta) \text{ PU}$$
$$= - 1,1 \cos (90 + \theta) \text{ PU}$$

El paso a seguirse consiste en el trazo de las "diagramas potencia-ángulo", para lo cual es necesario conocer, a más de las potencias eléctricas de salida para las tres condiciones, los ángulos θ_0 que es el ángulo inicial de operación antes de que ocurra la falla; θ_1 que representa el ángulo máximo al cual la falla debe despejarse para mantener la estabilidad y θ_2 ó ángulo "crítico" al cual la máquina puede oscilar o balancear después que la falla haya sido aislada, sin pérdida de estabilidad.

Para el ángulo inicial de operación, θ_0 :

resolviendo la ecuación de P_s para un valor de 0,888, que representa la intersección de la potencia de entrada con la potencia eléctrica de salida para la condición anterior a la falla, se tiene:

$$0,888 = - 1,12 \cos (90 + \theta)$$

$$0,888 / 1,12 = \text{sen } \theta$$

$$0,7928 = \text{sen } \theta, \text{ de donde:}$$

$$\theta_0 = 52,4^\circ$$

El ángulo máximo o ángulo "Crítico" al cual la máquina puede balancear después que la falla haya sido aislada, sin pérdida de estabilidad, está definido por la intersección de la potencia de entrada con la curva de la potencia de salida para la condición después que la falla se ha despejado, luego:

$$0,888 = -1,1 \cos(90 + \theta) \quad \text{PU}$$

$$0,888/1,1 = \text{sen}\theta$$

$$0,8072 = \text{sen } \theta, \quad \text{de donde:}$$

$$\theta_2 = 126.4^\circ$$

Este es el valor máximo que θ puede alcanzar, con la condición de mantener la estabilidad en el sistema.

Por el método de "la igualdad de áreas", descrito anteriormente, un ángulo de aproximadamente 72° se selecciona como ángulo máximo al cual la falla puede ser aislada manteniendo la estabilidad, para lo cual se aplica la ecuación (18):

$$\cos \theta_1 = \frac{\text{sen}\theta_0(\pi - \theta_0 - \arcsen \frac{\text{sen}\theta_0}{r_2}) - r_1 \cos\theta - \sqrt{r_2^2 - \text{sen}^2\theta_0}}{r_2 - r_1}$$

$$\text{en donde: } r_1 = X_s/X's; \quad \text{y} \quad r_2 = X_s/X''s$$

siendo X_s = reactancia equivalente del circuito para la condición "antes" de que ocurra la falla; $X's$ = reactancia equivalente del circuito para la condición "durante" la falla y $X''s$ = reactancia equivalente del circuito para la condición "después" que se ha despejado la falla.

Para el presente caso:

$$X_s = 1,284$$

$$X's = 3,02$$

$$X''s = 1,3$$

Por tanto, se tienen los valores de:

$$r_1 = 1,284/3,02 = 0,425$$

$$r_2 = 1,284/1,3 = 0,988$$

El valor encontrado de r_2 será el mismo para todos los casos que se trate en el presente capítulo, ya que tanto el valor de X_s como el de $X''s$ no varían.

Reemplazando valores, se tiene:

$$\begin{aligned}\cos\theta_1 &= \frac{0,7928(180^\circ - 52,4^\circ - 53,4^\circ) - 0,425 \times 0,61 - 0,59}{0,988 - 0,425} \\ &= \frac{1,023 - 0,259 - 0,59}{0,563} \\ &= \frac{0,174}{0,563} \\ &= 0,309\end{aligned}$$

de donde:

$$\theta_1 = 72^\circ$$

Con los valores ya calculados y que se han anotado de la potencia de entrada(que como se supuso permanece constante), de las potencias de salida para las condiciones "anterior", "durante" y "después" de la falla, así como con los valores de los ángulos θ_0 , θ_1 y θ_2 , se trazan los diagramas "potencia-ángulo", los mismos que servirán de referencia, en la comprobación de la estabilidad cuando se haga uso del criterio de la igualdad de áreas, ya que como se puede ver en la Fig. "a" al trazar las curvas de potencia, se han formado las áreas A_1 y A_2 , las mismas que deben ser iguales para que se conserve el sincronismo de los alternadores, lo cual se comprobará por integración de dichas áreas, como se ha explicado anteriormente al analizar el criterio de la igualdad de áreas para estabilidad.

DIAGRAMAS "POTENCIA-ANGULO"

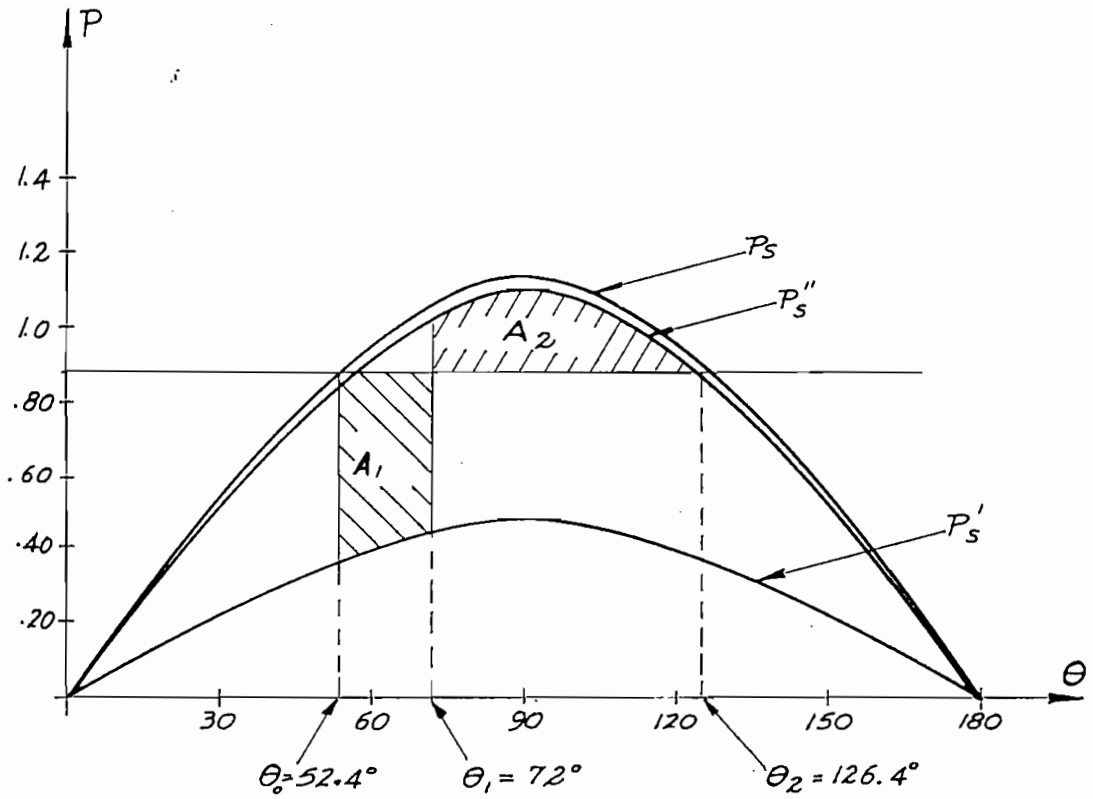


FIG "a"

DIAGRAMAS "ANGULO-TIEMPO"

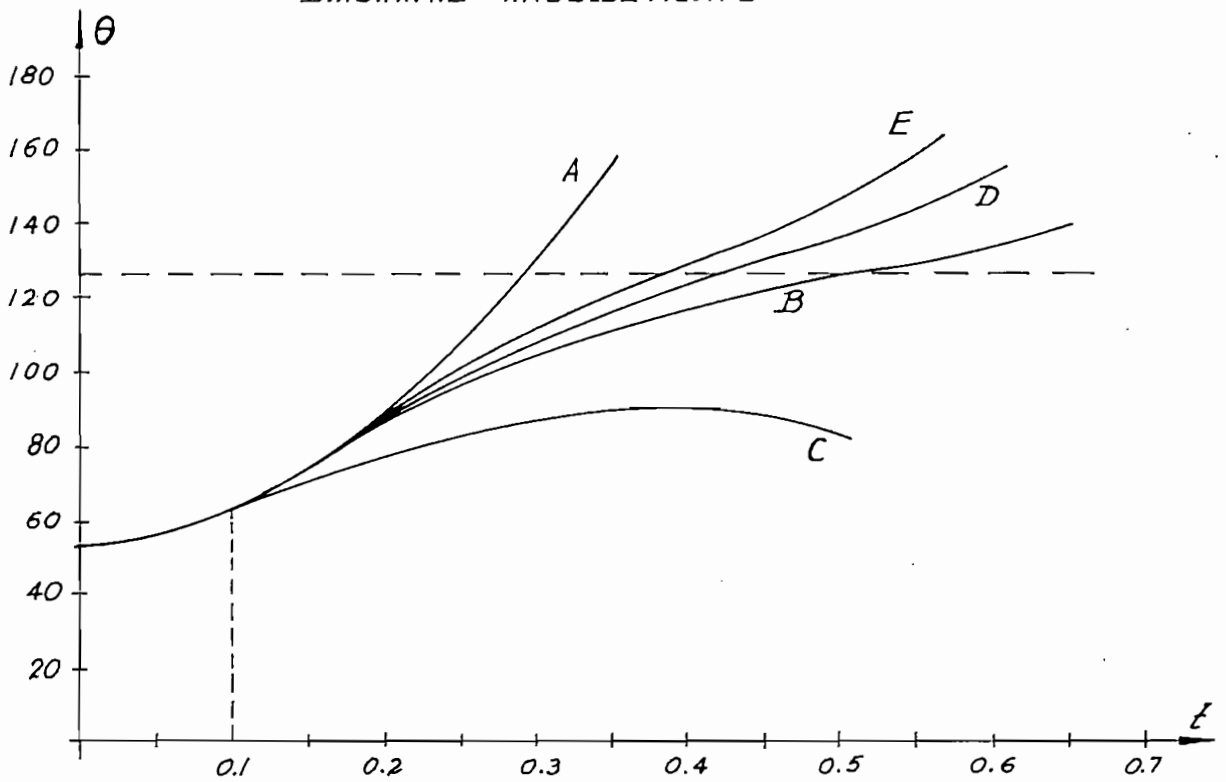


FIG. a'

Con todos estos datos ya calculados, el siguiente paso es trazar las curvas "ángulo-tiempo" o de "oscilación" o "balanceo", con el fin de determinar el tiempo de despeje de la falla correspondiente a θ_1 . Para lo cual θ se determina como una función del tiempo por el método "paso por paso", siendo un medio conveniente de calcular usando la forma tabulada como se explica en la Tabla "A".

Pero antes de esto, conviene dar una breve explicación de la ecuación de balanceo, del "momento angular" y de la constante "H", ya que para el trazado de las curvas "ángulo-tiempo", se hará referencia a estos conceptos.

Ecuación de balanceo.-

Las leyes de rotación aplicadas al movimiento de máquinas sinorónicas, nos dicen que el torque es igual al producto de la aceleración angular por el momento de inercia:

$$T = I \cdot \alpha \quad (21)$$

$$T = I(d^2\theta/dt^2) \quad (22)$$

en donde T es el torque neto o suma algébrica de todos los torques que actúan sobre la máquina, inclusive el torque del eje (debido a la turbina del generador o a la carga sobre el rotor), torque debido a las pérdidas por rotación (fricción, ventilación, pérdidas del núcleo) y torque electromagnético; éste puede ser subdividido en torques debidos a la acción sinorónica y a la acción asinorónica (inducción).

De esta manera:

T_1 = torque del eje, corregido para el torque debido a las pérdidas por rotación, y

T_u = torque electromagnético.

El torque neto que produce la aceleración, es la diferencia algébrica del torque aceleratriz al eje y el torque electromagnético al eje:

$$T_a = T_1 - T_u \quad (23)$$

En estado estable, esta diferencia es cero y no hay aceleración. Durante disturbios considerados en estabilidad transitoria,

hay una aceleración o una retardación, dependiendo si el torque neto "T_a" es positivo o negativo, respectivamente.

Para encontrar la posición angular θ del rotor de la máquina como una función del tiempo "t", se debe resolver la ecuación (22). Sin embargo, es más conveniente medir la posición angular con respecto a un eje de referencia que rota sincrónicamente con respecto a un eje estacionario. De aquí se tiene:

$$\delta = \theta - W_1 t \quad (24)$$

en donde W_1 es la velocidad sincrónica nominal.

Luego, si tomamos derivadas con respecto al tiempo, se tiene:

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{d\theta}{dt} - W_1, \text{ y } \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

Sustituyendo este valor en la ecuación (22), se tiene:

$$T = I \left(\frac{d^2\delta}{dt^2} \right)$$

Escribiendo el torque como en la ecuación (23):

$$I \left(\frac{d^2\delta}{dt^2} \right) = T_a = T_i - T_u \quad (25)$$

Multiplicando esta ecuación por la velocidad angular W , se tiene:

$$M \left(\frac{d^2\delta}{dt^2} \right) = P_a = P_i - P_u \quad (26)$$

en donde:

$M = I.W$ = momento angular

$P_i = T_i.W$ = potencia de entrada al eje, corregida considerando las pérdidas por rotación.

$P_u = T_u.W$ = potencia eléctrica de salida, corregida considerando las pérdidas eléctricas.

$P_a = P_i - P_u$ = potencia aceleratriz, o diferencia entre las potencias de entrada y salida, cada una corregida considerando las pérdidas.

La ecuación (26) se llama "Ecuación de balanceo" y una ecuación de este tipo puede escribirse para cada máquina de un sistema.

El momento angular M no es estrictamente constante, porque la velocidad varía un poco durante la oscilación que sigue a una

perturbación.

En casos prácticos, el cambio de velocidad angular \dot{W} antes de perder el sincronismo, es tan pequeño en comparación a la velocidad normal W_1 y se comete muy poco error si se supone M constante. Este valor de M se conoce como la "Constante de inercia" de la máquina, tiene un valor de:

$$M = I.W; \text{ pero}$$

$$W = 2\pi n/60$$

$$I = GD^2/4g$$

luego:

$$M = \frac{GD^2}{4g} \cdot \frac{2\pi n}{60} \quad (27)$$

en donde:

$GD^2/4g$ = momento giratorio, en Kgm^2

I = momento de inercia de las partes rotantes

g = aceleración de la gravedad, 9.81 m/s

n = número de revoluciones por minuto (RPM)

W = velocidad, en radianes por segundo

G = capacidad nominal de la máquina, en MVA

Si M se multiplica por la aceleración angular de las partes rotantes, se obtiene la "potencia mecánica de la máquina propulsora":

$$P_p = M \cdot \dot{W} \quad ; \text{ donde } \dot{W} = dW/dt$$

En lugar de M , puede introducirse el concepto de "energía cinética específica", expresada en KW seg., definida por:

$$H = \frac{1}{2} \frac{I (2\pi n/60)^2}{N_n} \quad (28)$$

en donde N_n es la potencia aparente normal del grupo electrógeno. La constante H es prácticamente dependiente sólo de la potencia del grupo.

La constante H es igual a la energía cinética a velocidad nominal dividida para la potencia nominal aparente de la máquina:

$$H = \frac{N}{G} \quad (28)$$

en donde:

N = energía cinética, en megajoules

$$= 2,31 \times 10^{-10} \times WR^2 n^2$$

G = capacidad nominal, en MVA

La constante "H" tiene la propiedad conveniente que, su valor diferente de N, no varía gradualmente con los KVA y velocidad de la máquina, pero en cambio tiene un valor característico o "set" de valores para cada clase de máquina.

Quando se carece de mayor información en cuanto a la obtención de datos de un sistema, se puede determinar el valor de H de las curvas "Potencia-Velocidad" de las máquinas.

Para el presente caso se han tomado como referencia las curvas anotadas en la Fig. 15; ^(Ver fig. 212) las mismas que han sido trazadas de acuerdo a la Fig. 75 de "Transmission and Distribution", página 189.

Como en el presente capítulo se está considerando el caso de máxima carga admitiendo la capacidad total de generación de 22.222 KVA y sabiendo que la velocidad de éstos es de 514 RPM, según la Fig. 15 mencionada, se ha escogido un valor aproximadamente igual a 3 para H, que viene dado en Kw.seg/MVA.

Como se verá más después, para la tabulación de los valores en el análisis de la estabilidad en estado transitorio por el método seleccionado de "paso por paso", es necesario determinar el valor de la constante "k" que está en relación directa con el valor de la frecuencia (f) y en razón inversa con el valor de H, por tanto:

$$\begin{aligned} k &= 180.f/H \\ &= 180 \times 60 / 3 \\ &= \underline{\underline{3.600}} \end{aligned}$$

Significado de cada una de las columnas en la tabulación de valores:

- Columna 1 : Tiempo en segundos al comienzo del intervalo (t).
- Columna 2 : Angulo θ al comienzo del intervalo (θ)
- Columna 3 : Potencia eléctrica de salida, en PU (P_s)
- Columna 4 : Potencia mecánica de entrada menos potencia eléctrica de salida, (ΔP).
- Columna 5 : Aceleración, en grados por seg. por seg., (columna 4 x k), (α).
- Columna 6 : Incremento tiempo de aceleración, en seg. (Δt).
- Columna 7 : Cambio de velocidad, grados por segundo, (columna 5 x columna 6), (ΔW).
- Columna 8 : Velocidad, grados por segundo, (columna 7 + columna 8_{n-1}), (W).
- Columna 9 : Incremento ángulo-tiempo, (Δt).
- Columna 10 : Cambio angular, en grados, (columna 8 x columna 9), ($\Delta \theta$).
- Columna 11 : Angulo final, en grados, (θ).

En la primera parte de la tabla se va a suponer que la falla no se aísla, por tanto para el cálculo de la potencia eléctrica de salida que se anota en la columna # 3, se utilizará el valor de la potencia eléctrica de salida para la condición "durante" la falla, o sea el valor de P'_s .

En la segunda parte de la tabla se supone que la falla se aísla a un tiempo correspondiente al ángulo θ_1 calculado como el ángulo máximo de aislación o despeje de la falla para mantener la estabilidad, por tanto en este caso interviene la potencia eléctrica de salida para la condición posterior a la falla o sea cuando ésta se ha despejado, es decir el valor de P''_s .

A continuación se calcula la tabulación de los valores que servirán, como se dijo, para el trazo de las curvas ángulo-tiempo.

TABLA N^o 1.-

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
t	θ	P_{θ}	ΔP	d	Δt	ΔW	W	Δt	$\Delta \theta$	θ
0.0	52.4	0.380	0.503	1829	0.025	45.7	45.7	0.05	2.3	54.7
0.05	54.7	0.392	0.496	1786	0.05	89.3	135.0	0.05	6.7	61.4
0.10	61.4	0.421	0.467	1681	0.05	84.0	219.0	0.05	10.9	72.3
0.15	72.3	0.457	0.431	1552	0.05	77.6	296.6	0.05	14.8	87.1
0.20	87.1	0.479	0.409	1472	0.05	73.6	370.2	0.05	18.5	105.6
0.25	105.6	0.462	0.426	1534	0.05	76.7	446.9	0.05	22.3	127.9
0.30	127.9	0.379	0.509	1832	0.05	91.6	538.5	0.05	26.9	154.3
0.35	154.8									

Falla aislada a 0.15 seg.

-0.15	72.3	0.457	0.431	1552	0.025	30.8	257.6			
+0.15	72.3	1.048	-0.160	-576	0.025	-14.4	243.4	0.05	12.2	84.5
0.20	84.5	1.095	-0.207	-745	0.05	-37.2	206.2	0.05	10.3	94.8
0.25	94.8	1.096	-0.208	-749	0.05	-37.5	168.7	0.05	8.4	103.2
0.30	103.2	1.071	-0.183	-659	0.05	-33.0	135.7	0.05	6.8	110.0
0.35	110.0	1.034	-0.146	-526	0.05	-26.3	109.4	0.05	5.5	115.5
0.40	115.5	0.993	-0.105	-378	0.05	-18.9	90.5	0.05	4.5	120.0
0.45	120.0	0.953	-0.065	-234	0.05	-11.7	78.8	0.05	3.9	123.9
0.50	123.9	0.913	-0.025	-90	0.05	-4.5	74.3	0.05	3.7	127.6
0.55	127.6	0.871	0.017	61	0.05	3.0	77.3	0.05	3.9	131.5
0.60	131.5	0.824	0.064	230	0.05	11.5	88.8	0.05	4.4	135.9
0.65	135.9									

Como se dijo, en la primera parte de la tabla se supone que la falla no se aísla; el rápido incremento de θ indica la rapidez que el sistema llega a ser inestable bajo estas condiciones.

Se nota que la baja constante de inercia $H = 3 \text{ Kw seg/KVA}$ de los generadores, les permite cambiar la posición angular rápidamente, de tal manera que para el cálculo se escogen pequeños intervalos de tiempo, como 0.05 seg.

Como explicación previa, se asume que la velocidad es constante; pero se supone que la aceleración es constante de la mitad de un período a la mitad del siguiente (como se indica en la columna 6).

En la segunda parte de la Tabla N^o 1, se supone que la falla se aísla a 0.15 seg.; pero al despejar la falla a este tiempo, el valor del ángulo θ (columna 2) llega a tener un valor superior al valor máximo que puede alcanzar θ para mantener la estabilidad (θ_1) y por tanto no se mantiene la estabilidad del sistema (curva B de la Fig. a').

Por el método "paso por paso" se ha realizado la tabulación de valores que están indicados en la Tabla N^o 1, y por el mismo método se tabularán los valores para el trazo de las curvas C, D y E.

Como se ha explicado en la página 46 el significado y modo de obtención de cada una de las columnas para la tabulación de valores, escogemos como ejemplo la determinación de los valores anotados en la Tabla N^o 1 correspondientes al tiempo de 0.05 segundos:

Columna 1.- $t = 0.05$ seg. ; tiempo al comienzo del intervalo.

Columna 2.- $\theta = 54.7^\circ$; ángulo al comienzo del intervalo.

Columna 3.- Potencia de salida: $P_s = 0.48 \text{ sen} \theta = 0.48 \times 0.81614 = 0.392$ PU.

Columna 4.- $\Delta P = 0.888 - 0.392 = 0.496$ PU.

Columna 5.- Columna (4) $\times k = 0.496 \times 3.600 = 1786$; aceleración α

Columna 6.- $\Delta t = 0.05$ seg.; incremento tiempo de aceleración

Columna 7.- Columna (5) \times (6), cambio de velocidad: $\Delta W = 1786 \times 0.05 = 89.3$ grados por seg.

Columna 8.- Velocidad, $W = 89.3 + 45.7 = 135.0$ grados por seg.

Columna 9.- Incremento ángulo-tiempo, $\Delta t = 0.05$ seg.

Columna 10.- Cambio angular, (columna 8 \times columna 9): $135 \times 0.05 = 6.7$ grados, $\Delta \theta$.

Columna 11.- Ángulo final: columna 10 + columna 2, $\theta = 6.7 + 54.7 = 61.4$ grados.

b.- Falla de TRÁS LÍNEAS, después de las barras colectoras:

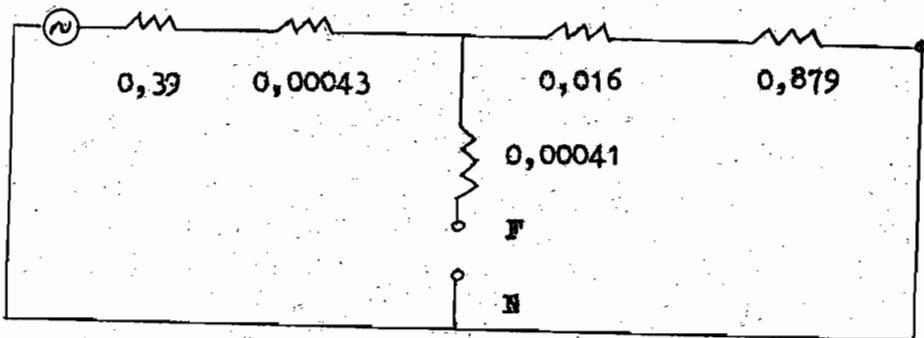
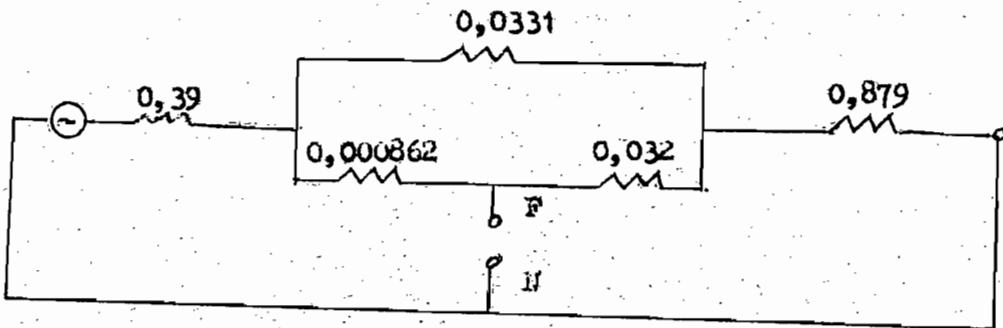
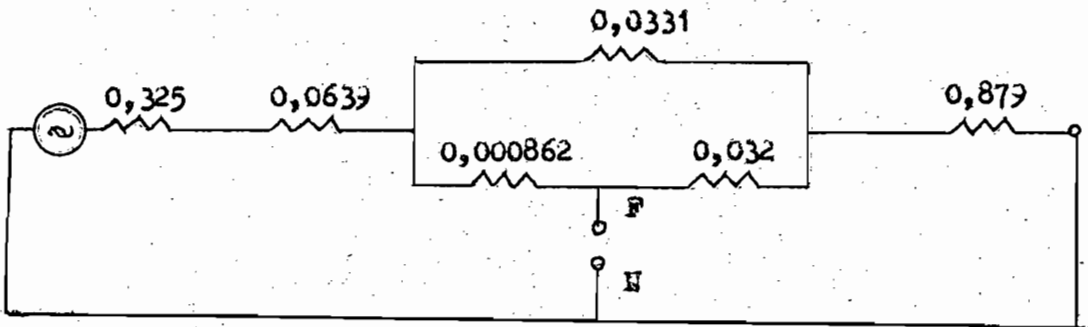
1.- Condición anterior a la falla:

$$\underline{P_s = - 1,12 \cos(90 + \theta) \text{ PU}}$$

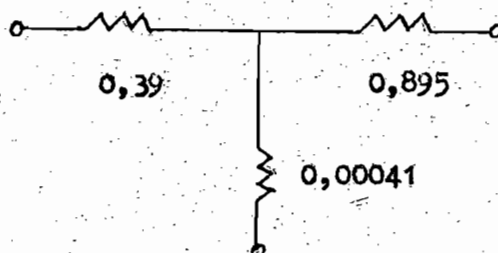
2.- Condición "durante" la falla:

Para este tipo de falla, no hay conexión de las secuencias y la que interviene en el cálculo de la potencia eléctrica de salida es la reactancia equivalente de secuencia positiva.

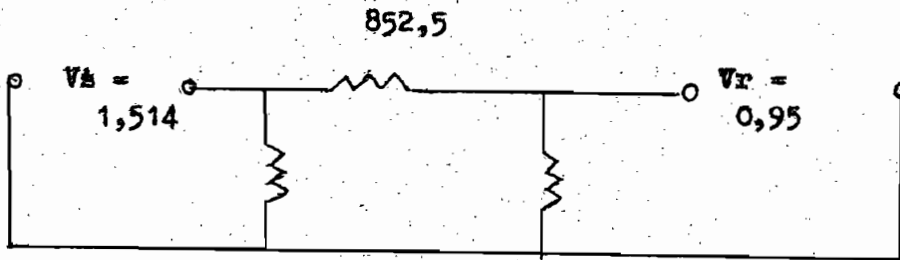
Secuencia positiva:



Se tiene un sistema de reactancias en estrella:



que efectuando la conversión de estrella a triángulo, se tiene:



Por tanto, la potencia eléctrica de salida para la condición "durante" la falla, será:

$$P''_s = - \frac{(1,514)(0,95)}{852,5} \cos(90+\theta) \text{ PU}$$

$$= - 0,0017 \cos(90+\theta) \text{ PU}$$

3.- Condición "después de la falla":

$$P''_s = - 1,1 \cos(90+\theta) \text{ PU}$$

Se ha calculado el ángulo inicial de operación $\theta_0 = 52,4^\circ$, de igual manera que el ángulo máximo $\theta_2 = 126,4^\circ$, ahora bien, para cada tipo de falla, se debe calcular el ángulo de "aislación" de la falla θ_1 , para lo cual se sigue el método explicado anteriormente, luego:

$$r_1 = 1,284/852,5 = 0,0015$$

$$\cos \theta_1 = \frac{1,023 - 0,0015 \times 0,61 - 0,59}{0,988 - 0,0015}$$

$$= \frac{1,023 - 0,000915 - 0,59}{0,986}$$

$$= \frac{0,432}{0,986} = 0,4381, \text{ de donde:}$$

$$\theta_1 = 64^\circ$$

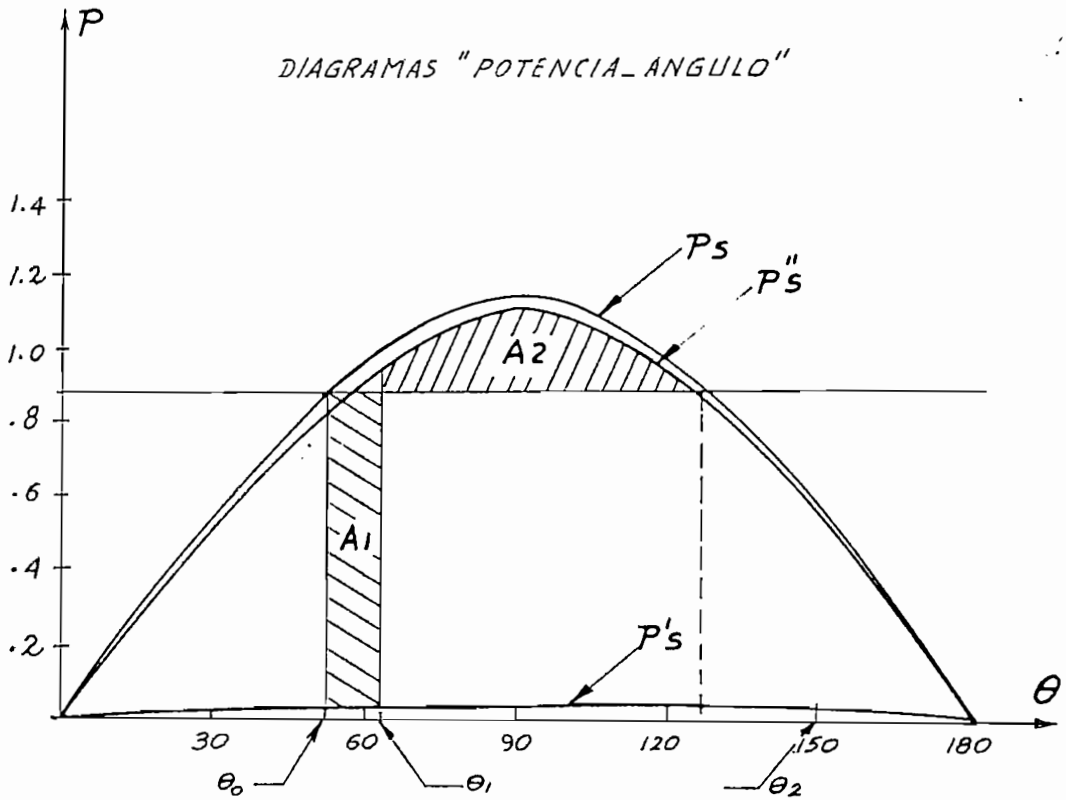


FIGURA "b"

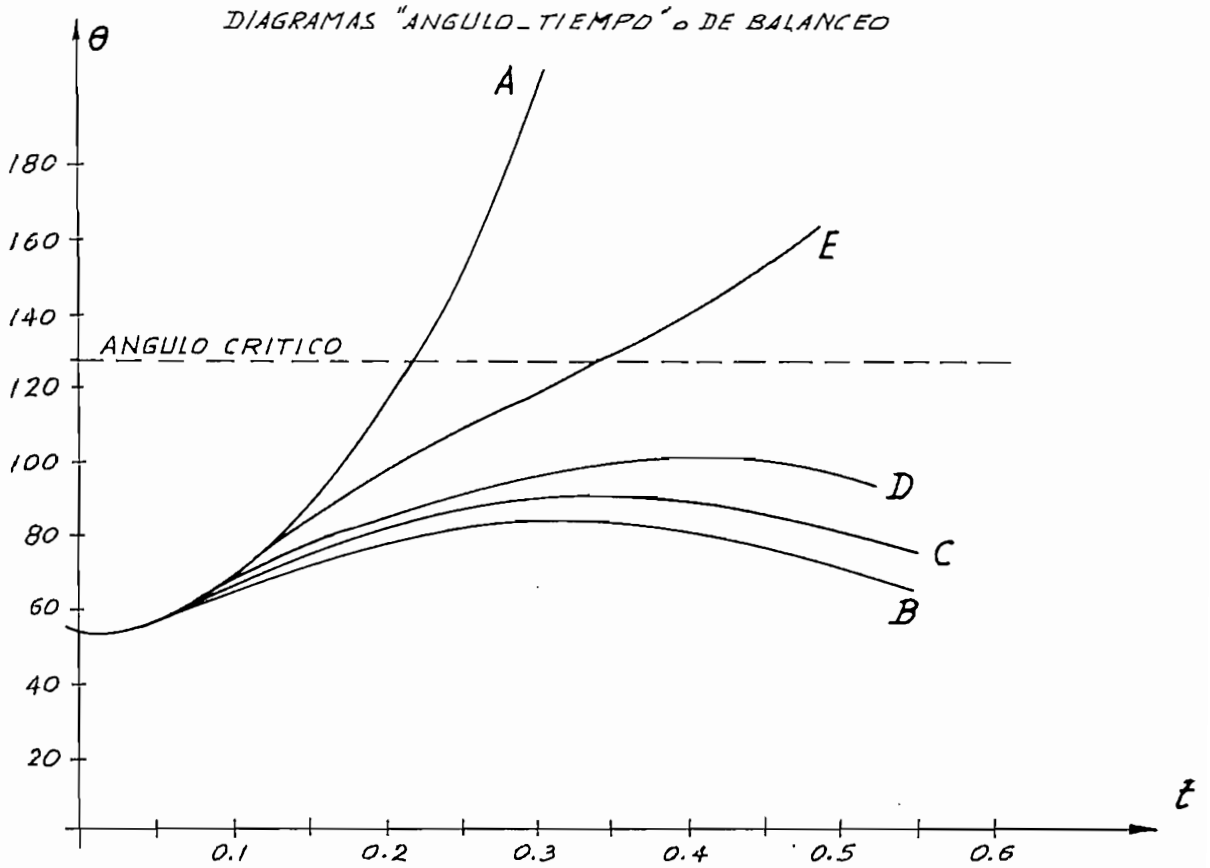


FIGURA b'

Las curvas C y D de la Fig. b', corresponden a tiempos de aislación de la falla de 0.06 seg. y 0.07 seg., respectivamente, e indican que se sigue manteniendo la estabilidad ya que en ningún caso el valor de θ alcanza a un valor superior al del ángulo crítico, sino más bien, comienza a regresar al ángulo de operación inicial.

Para la curva C:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
t	θ	P_s	ΔP	α	Δt	ΔW	W	Δt	$\Delta \theta$	θ
-0.06	57.5	0.0014	0.887	3193	0.025	79.8	191.5			
+0.06	57.5	0.928	-0.040	-144	0.025	-3.6	187.9	0.05	9.4	66.9
0.11	66.9	1.012	-0.124	-446	0.05	-22.3	165.6	0.05	8.3	75.2
0.16	75.2	1.063	-0.175	-630	0.05	-31.5	134.1	0.05	6.7	81.9
0.21	81.9	1.089	-0.201	-724	0.05	-36.2	97.9	0.05	4.9	86.8
0.26	86.8	1.098	-0.210	-756	0.05	-37.8	60.1	0.05	3.0	89.8
0.31	89.8	1.100	-0.212	-763	0.05	-38.2	21.9	0.05	1.1	90.9
0.36	90.9	1.100	-0.212	-763	0.05	-38.2	-16.3	0.05	-0.8	90.1
0.41	90.1	1.100	-0.212	-763	0.05	-38.2	-54.5	0.05	-2.7	87.4
0.46	87.4									

Para la curva D:

-0.07	59.3	0.0015	0.886	3190	0.025	79.8	223.5			
+0.07	59.3	0.946	-0.058	-203	0.025	-5.2	218.3	0.05	10.9	70.2
0.12	70.2	1.035	-0.147	-529	0.05	-26.4	191.9	0.05	9.6	79.8
0.17	79.8	1.082	-0.194	-698	0.05	-34.9	157.0	0.05	7.9	87.7
0.22	87.7	1.099	-0.211	-760	0.05	-38.0	119.0	0.05	6.0	93.7
0.27	93.7	1.097	-0.209	-752	0.05	-37.6	81.4	0.05	4.1	97.8
0.32	97.8	1.090	-0.202	-727	0.05	-36.3	45.1	0.05	2.3	100.1
0.37	100.1	1.083	-0.195	-702	0.05	-35.1	10.0	0.05	0.5	100.6
0.42	100.6	1.081	-0.193	-695	0.05	-34.7	-24.7	0.05	-1.2	99.4
0.47	99.4									

Pero al despejar la falla a un tiempo mayor de 0.07 seg., digamos a 0.10 seg. (curva E de la Fig. b'), se pierde la estabilidad. La tabulación de valores para el trazo de esta curva, se indica a continuación.

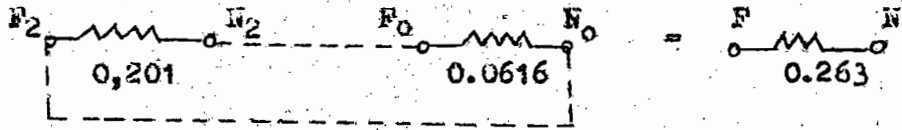
c.- Falla de UNA LINEA A TIERRA, a la salida:

1.- Condición anterior a la falla:

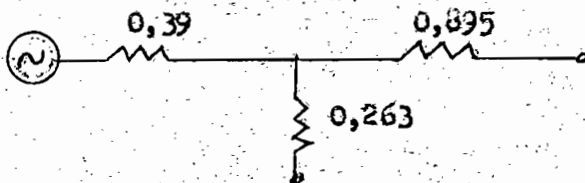
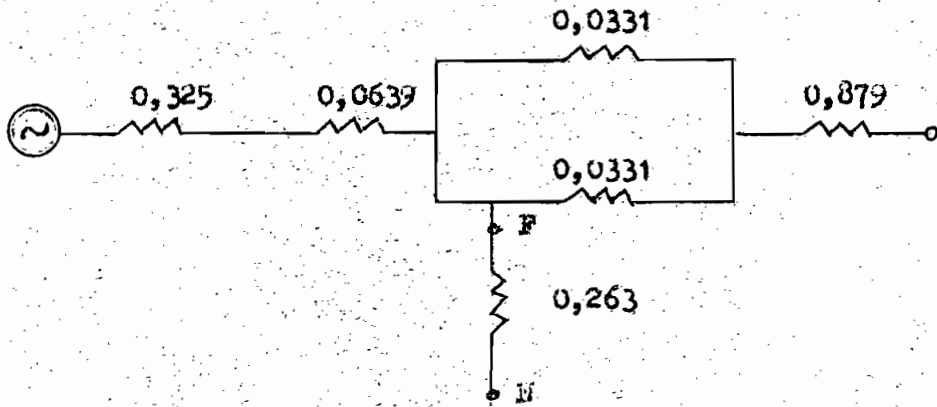
$$P_s = -1.12 \cos(90 + \theta) \text{ PU}$$

2.- Condición "durante" la falla:

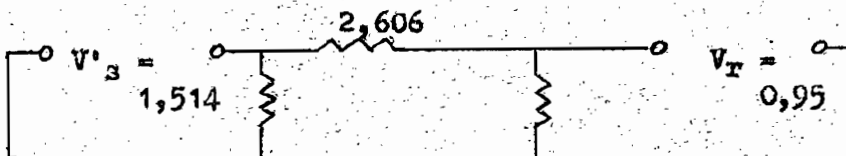
Reactancias de secuencia negativa y secuencia cero, conectadas en serie:



La conexión del circuito para la condición "durante" la falla de una línea a tierra, será la siguiente:



Efectuando la conversión de estrella a triángulo:



Por tanto:

$$P'_s = - \frac{(1.514)(0.95)}{2.61} \cos(90 + \theta) \text{ PU}$$

$$= - 0.55 \cos(90 + \theta) \text{ PU}$$

3.- Condición "después" de la falla:

$$P''_s = - 1,1 \cos(90 + \theta) \text{ PU}$$

Aplicando los valores anteriormente encontrados, se selecciona el ángulo máximo al cual la falla puede ser aislada o ángulo de aislación de la falla (θ_1):

$$r_1 = 1,284/2,61 = 0,492$$

$$\cos \theta_1 = \frac{1,023 - 0,492 \times 0,61 - 0,59}{0,988 - 0,492}$$

$$= \frac{1,023 - 0,3 - 0,59}{0,496}$$

$$= \frac{0,133}{0,496}$$

$$= 0,2681, \text{ de donde:}$$

$$\theta_1 = 74.4^\circ$$

Es decir que a un ángulo aproximadamente igual a 74.4° se despeja la falla para mantener la estabilidad. Ahora bien, siguiendo el mismo proceso que en los casos anteriores, se dibujará los diagramas "potencia - ángulo" y se calcularán las curvas ángulo-tiempo o de "balanceo" por el mismo método "paso por paso", tabulando dichos valores para estar en posibilidades de trazar estas curvas, con lo cual, como se ha visto, se determinará el tiempo de despeje de la falla correspondiente al ángulo de despeje de la falla θ_1 ya calculado.

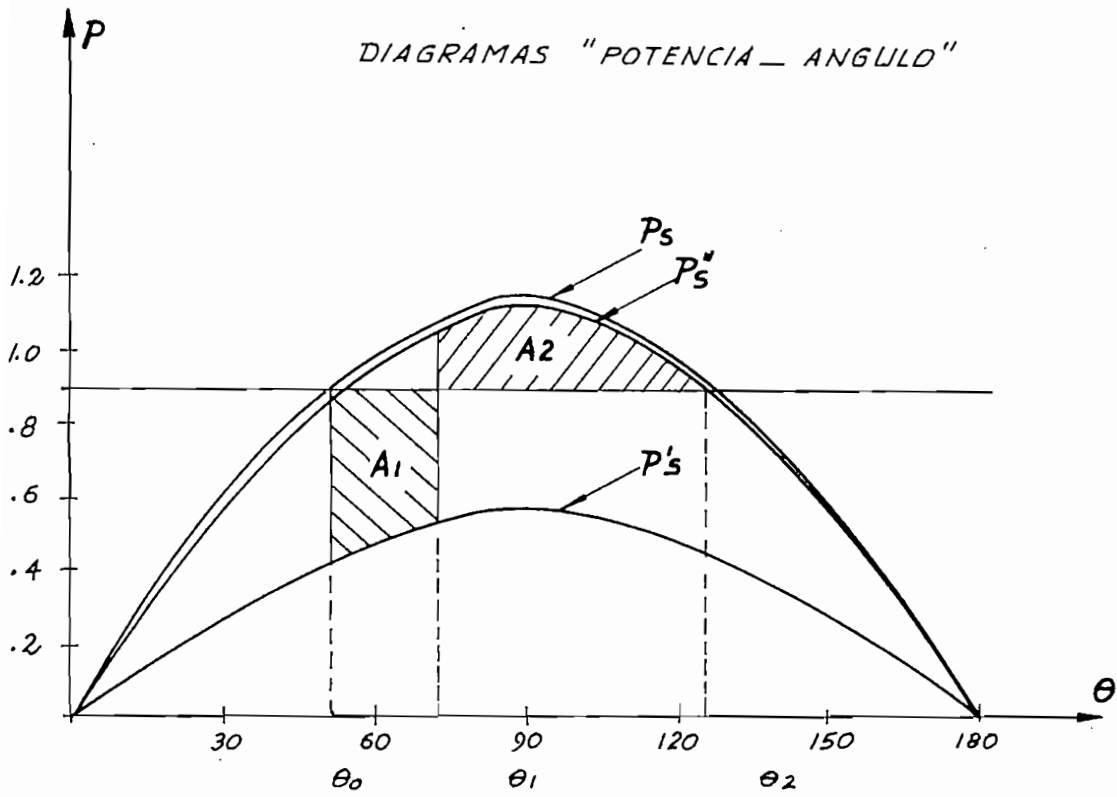


FIGURA "C"

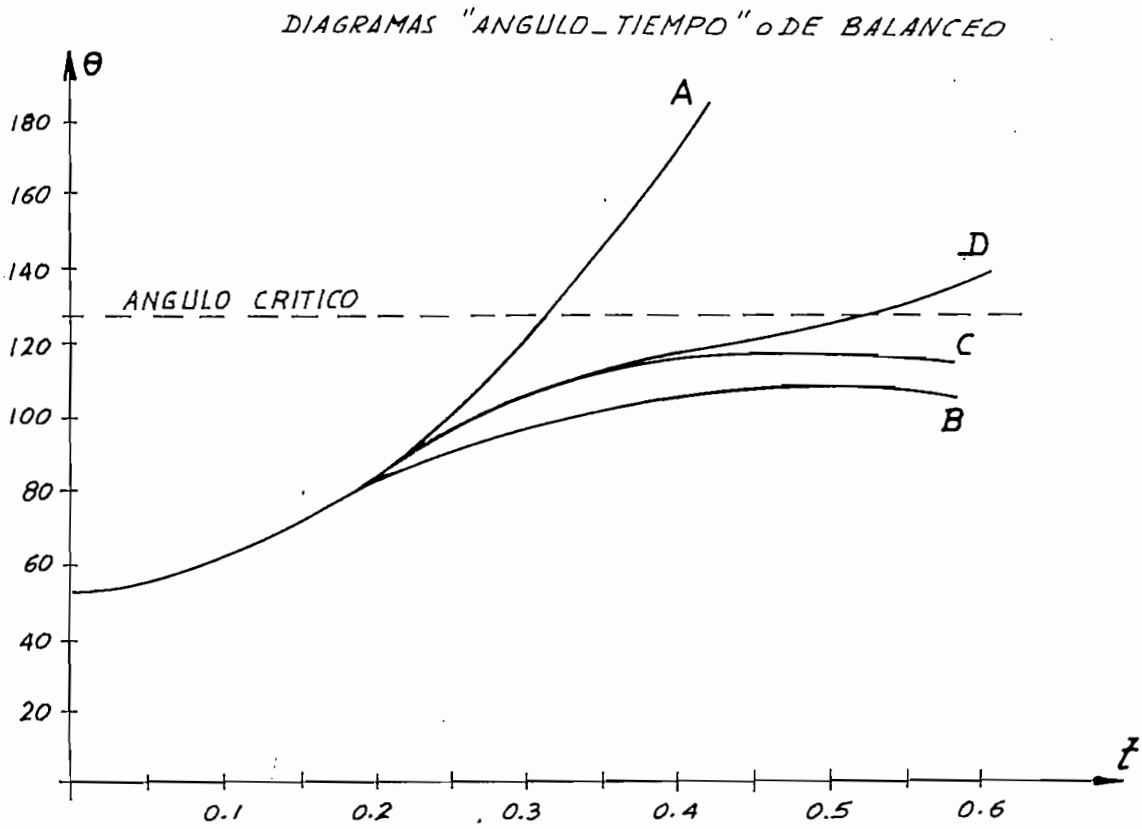


FIGURA C'

En la Fig. "o" se han trazado los "diagramas potencia-ángulo", los mismos que servirán para determinar la estabilidad del sistema por el criterio de la "igualdad de áreas", que se tratará en el último capítulo.

La curva A de la Fig. o' indica que se pierde la estabilidad si la falla no se aísla, pero si ésta se despeja a 0.15 seg. (curva B), se logra mantener la estabilidad ya que θ comienza a regresar a su valor inicial de operación y no llega al valor crítico de 126.4° sobre el cual el sistema es inestable y con valores inferiores a aquél, el sistema conserva la estabilidad. En la Tabla # 3 se tabulan estos valores para el trazado de las curvas A y B. En la misma Figura, la curva C indica que se sigue manteniendo la estabilidad a pesar de despejar la falla a 0.16 seg., pero si ésta se despeja a 0.17 seg. (curva D), el valor del ángulo θ llega a un valor mayor del ángulo crítico y por lo tanto se pierde la estabilidad del sistema.

Tabla # 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
t	θ	P_a	ΔP	ω	Δt	ΔW	W	Δt	$\Delta \theta$	θ
0.0	52.4	0.436	0.452	1627	0.025	40.7	40.7	0.05	2.0	54.4
0.05	54.4	0.447	0.441	1588	0.05	79.4	120.1	0.05	6.0	60.4
0.10	60.4	0.478	0.410	1476	0.05	73.8	193.9	0.05	9.7	70.1
0.15	70.1	0.517	0.371	1336	0.05	66.8	260.7	0.05	13.0	83.1
0.20	83.1	0.546	0.342	1231	0.05	61.6	322.3	0.05	16.1	99.2
0.25	99.2	0.543	0.345	1242	0.05	62.1	384.4	0.05	19.4	118.6
0.30	118.6	0.483	0.405	1458	0.05	72.9	457.3	0.05	22.9	141.5
0.35	141.5	0.342	0.546	1966	0.05	98.3	555.6	0.05	27.8	169.3
0.40	169.3	0.102	0.786	2830	0.05	141.5	697.1	0.05	34.8	204.1
0.45	204.1									

Como se puede apreciar en la tabulación que antecede, al aislar la falla a 0.15 seg., corresponde a un valor de θ (columna 2) de 70.1° que está muy cerca del valor calculado de $\theta_1 = 74.4^\circ$ seleccionado como ángulo máximo de aislación de la falla. La segunda parte de la Tabla # 3, supone que la falla se aísla a 0.15 seg.:

Falla aislada a 0.15 seg. (curva B)

t	θ	P _B	ΔP	d	Δt	ΔW	W	Δt	Δθ	θ
-0.15	70.1	0.517	0.371	1336	0.025	33.4	227.3			
+0.15	70.1	1.034	-0.146	-526	0.025	-13.2	214.1	0.05	10.7	80.8
0.20	80.8	1.086	-0.198	-713	0.05	-35.7	178.4	0.05	8.9	89.7
0.25	89.7	1.100	-0.212	-763	0.05	-33.2	140.2	0.05	7.0	96.7
0.30	96.7	1.092	-0.204	-734	0.05	-36.7	103.5	0.05	5.2	101.9
0.35	101.9	1.076	-0.183	-677	0.05	-33.9	69.6	0.05	3.5	105.4
0.40	105.4	1.061	-0.173	-623	0.05	-31.2	38.4	0.05	1.9	107.3
0.45	107.3	1.050	-0.162	-583	0.05	-29.2	9.2	0.05	0.5	107.8
0.50	107.8	1.047	-0.159	-572	0.05	-28.6	-19.4	0.05	-1.0	106.8
0.55	106.8	1.053	-0.165	-594	0.05	-29.7	-49.1	0.05	-2.5	104.3
0.60	104.3	1.066	-0.178	-641	0.05	-32.1	-81.2	0.05	-4.1	100.2
0.65	100.2									

Falla aislada a 0.16 seg. (curva C):

-0.16	72.2	0.524	0.364	1310	0.025	32.7	240.0			
+0.16	72.2	1.047	-0.159	-572	0.025	-14.3	225.7	0.05	11.3	83.5
0.21	83.5	1.093	-0.205	-738	0.05	-36.9	188.8	0.05	9.4	92.9
0.26	92.9	1.098	-0.210	-756	0.05	-37.8	151.0	0.05	7.6	100.5
0.31	100.5	1.081	-0.193	-694	0.05	-34.7	116.3	0.05	5.8	106.3
0.36	106.3	1.056	-0.168	-605	0.05	-30.2	86.1	0.05	4.3	110.7
0.41	110.7	1.029	-0.141	-508	0.05	-25.4	60.7	0.05	3.0	113.7
0.46	113.7	1.007	-0.119	-428	0.05	-21.4	39.3	0.05	2.0	115.7
0.51	115.7	0.991	-0.103	-371	0.05	-18.5	20.8	0.05	1.0	116.7
0.56	116.7	0.983	-0.095	-342	0.05	-17.1	3.7	0.05	0.2	116.9
0.61	116.9	0.981	-0.093	-335	0.05	-16.7	-13.0	0.05	-0.6	116.3
0.66	116.3	0.986	-0.098	-353	0.05	-17.6	-30.6	0.05	-1.5	114.8
0.71	114.8									

Como se puede ver, el ángulo θ no llega a tener un valor superior del ángulo crítico o máximo de 126.4° calculado como ángulo máximo al cual θ puede alcanzar sin que el sistema se vuelva inestable. A continuación la tabulación correspondiente para un tiempo de despeje de la falla de 0.17 seg., con cuyos valores se ha trazado la curva D:

Falla aislada a 0.17 seg. (curva D)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
t	θ	Ps	ΔP	d	Δt	ΔW	W	Δt	$\Delta \theta$	θ
-0.17	74.5	0.530	0.358	1289	0.025	32.2	252.8			
+0.17	74.5	1.060	-0.172	-619	0.025	-15.5	237.3	0.05	11.9	86.4
0.22	86.4	1.098	-0.210	-756	0.05	-37.8	199.5	0.05	10.0	96.4
0.27	96.4	1.093	-0.205	-738	0.05	-36.9	162.6	0.05	8.1	104.5
0.32	104.5	1.065	-0.177	-637	0.05	-31.8	130.8	0.05	6.5	111.0
0.37	111.0	1.027	-0.139	-500	0.05	-25.0	105.8	0.05	5.3	116.3
0.42	116.3	0.986	-0.098	-353	0.05	-17.6	88.2	0.05	4.4	120.7
0.47	120.7	0.946	-0.058	-209	0.05	-10.4	77.3	0.05	3.9	124.6
0.52	124.6	0.905	-0.017	-61	0.05	-3.0	74.8	0.05	3.7	128.3
0.57	128.3	0.863	0.025	90	0.05	4.5	79.3	0.05	4.0	132.3
0.62	132.3									

Como se puede ver, el ángulo θ llega a tener un valor superior al ángulo $\theta_2 = 126.4^\circ$ que es el máximo valor que puede tener θ sin que el sistema se vuelva inestable; por tanto al despejar la falla a 0.17 seg. se pierde la estabilidad del sistema.

c'.-- Falla de UNA LÍNEA A TIERRA, a la llegada:

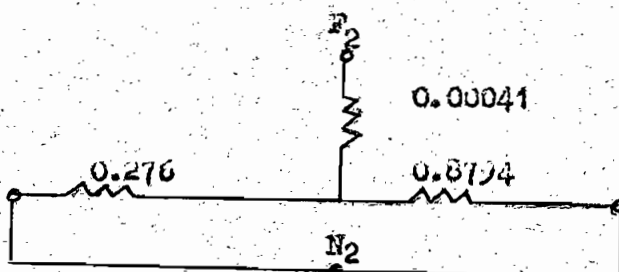
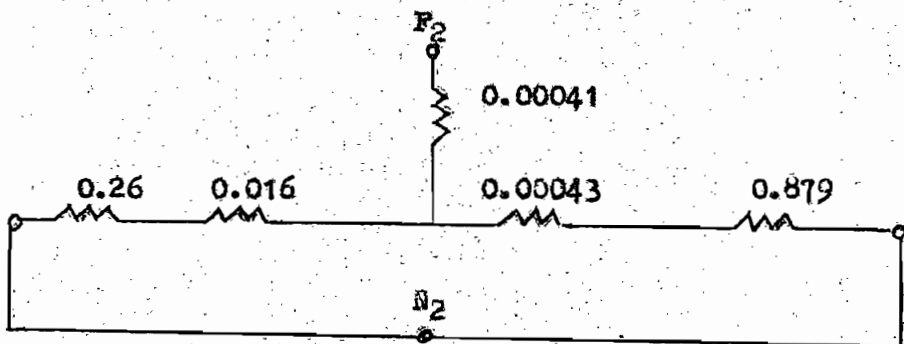
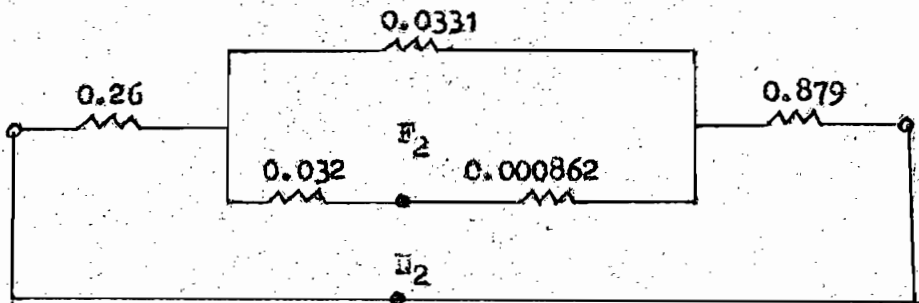
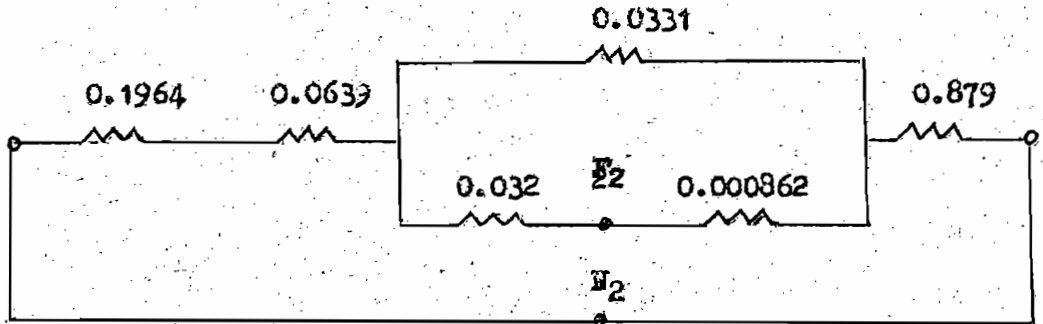
1.-- Condición "anterior" a la falla:

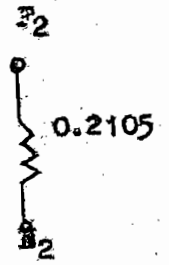
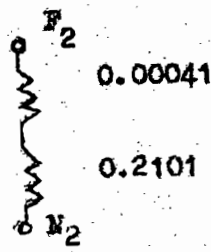
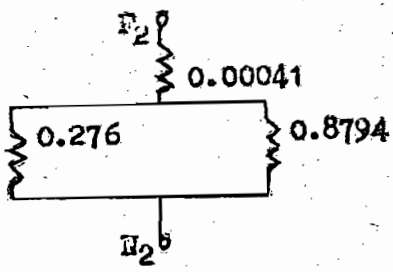
$$E_s = \underline{\underline{- 1.12 \cos (90 + \theta) \text{ PU}}}$$

2.-- Condición "durante" la falla:

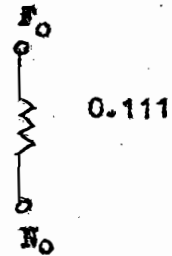
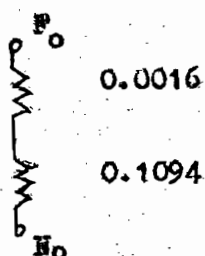
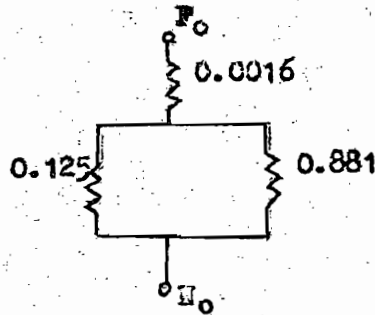
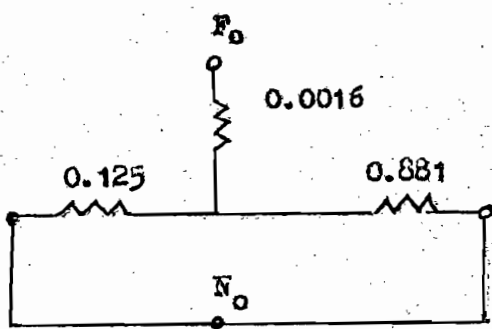
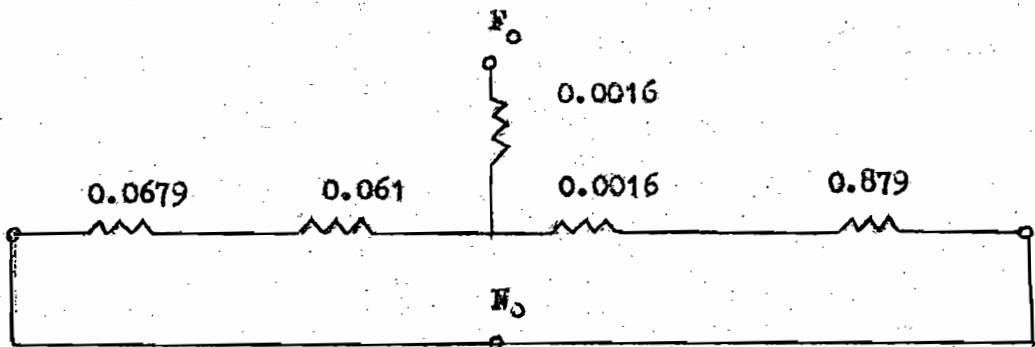
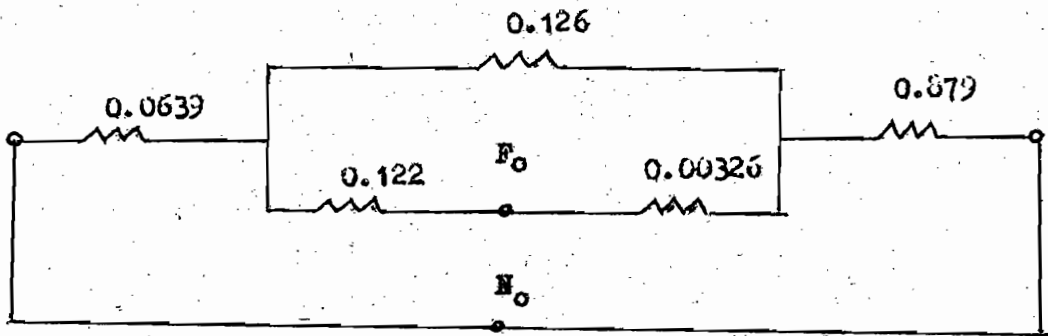
Por tratarse del mismo tipo de falla que el caso anterior, la conexión de las secuencia se tiene en serie, pero cambian un tanto sus valores ya que la localización de la falla también cambia.

Secuencia negativa:

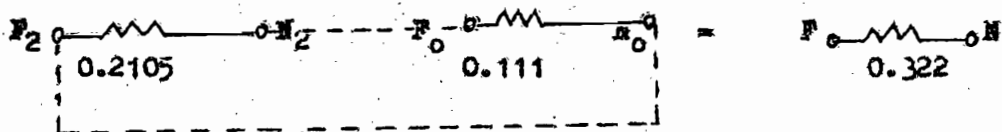




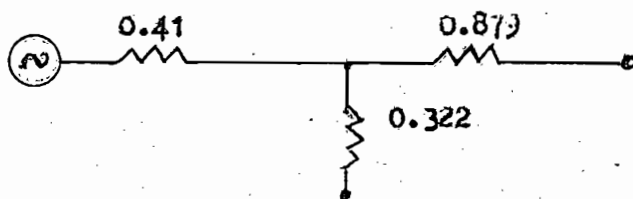
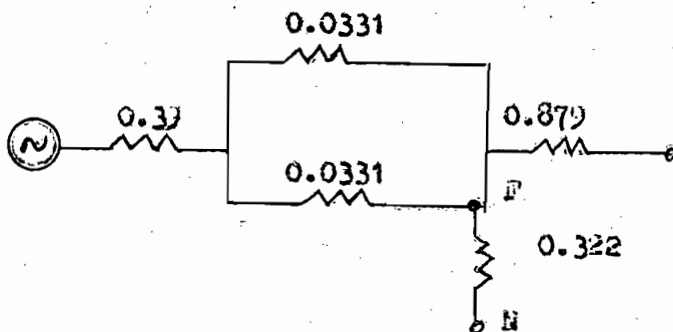
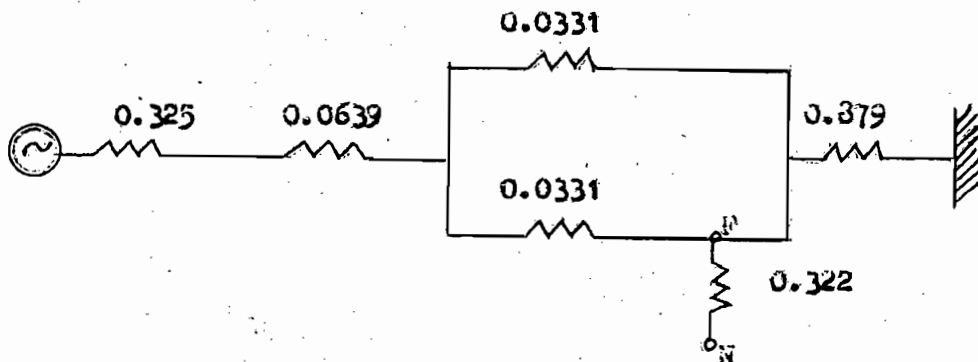
Secuencia cero:



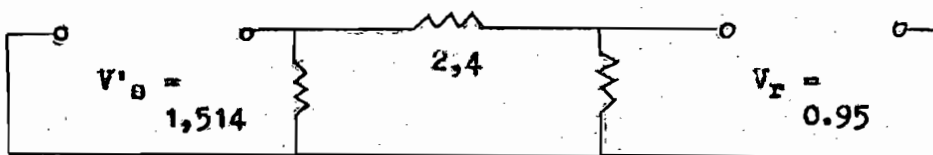
La reactancia equivalente serie será:



Efectuando la conexión de las secuencias para la condición "durante" la falla de una línea a tierra, se tiene:



Efectuando la conversión de estrella a triángulo:



Por tanto:

$$P'_s = - \frac{(1,514)(0,25)}{2,4} \cos(90 + \theta) \text{ PU}$$

$$= - 0,6 \cos(90 + \theta) \text{ PU}$$

3.- Condición "después" de la falla:

$$P''_H = \frac{1,1 \cos(90 + \theta)}{\dots\dots\dots} \text{ PU}$$

Cálculo del ángulo de despeje de la falla:

$$r_1 = 1,284 / 2,4 = 0,535$$

$$\cos \theta_1 = \frac{1,023 - 0,535 \times 0,61 - 0,59}{0,988 - 0,535}$$

$$= \frac{1,023 - 0,326 - 0,59}{0,453}$$

$$= \frac{1,023 - 0,916}{0,453}$$

$$= \frac{0,107}{0,453}$$

$$= 0,2362, \quad \text{de donde:}$$

$$\theta_1 = \underline{\underline{76,3^\circ}}$$

Este ángulo se selecciona como valor máximo del ángulo de despeje de la falla para mantener la estabilidad. Se sigue el mismo procedimiento que en los casos anteriores para el dibujo de las curvas "ángulo-tiempo" y "potencia-ángulo".

DIAGRAMAS "PCTENCIA-ANGULO"

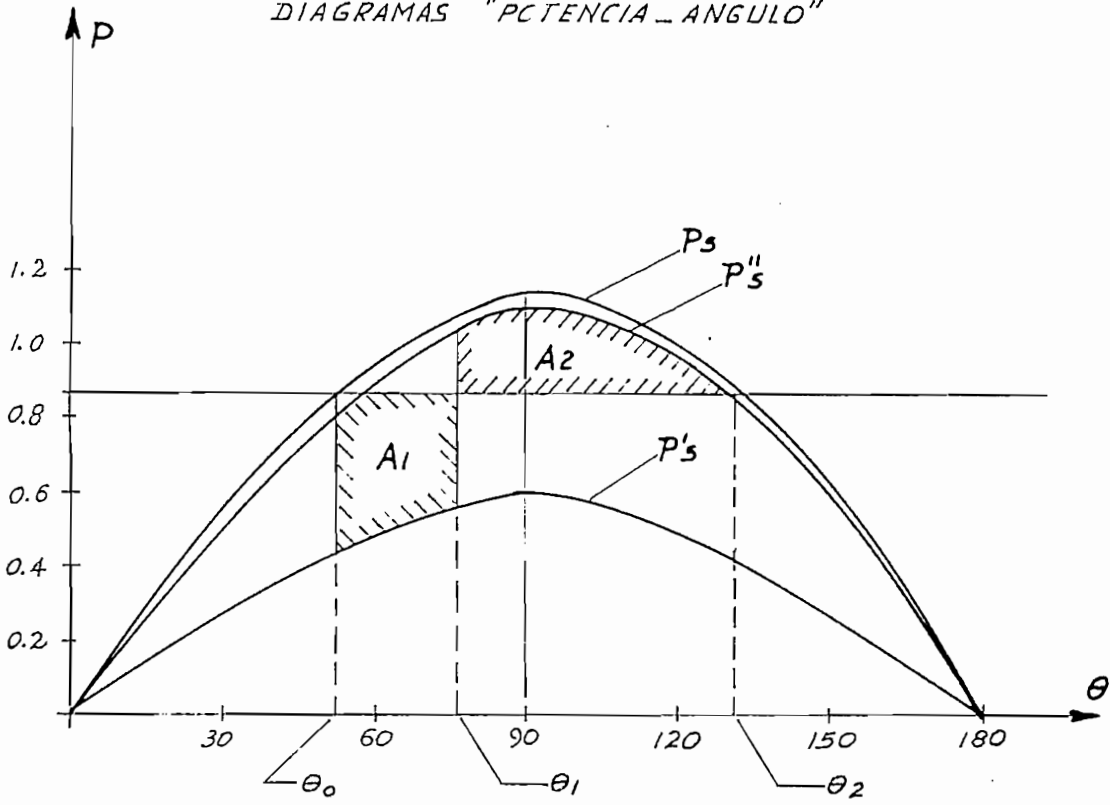


FIGURA d''

DIAGRAMAS "ANGULO-TIEMPO"

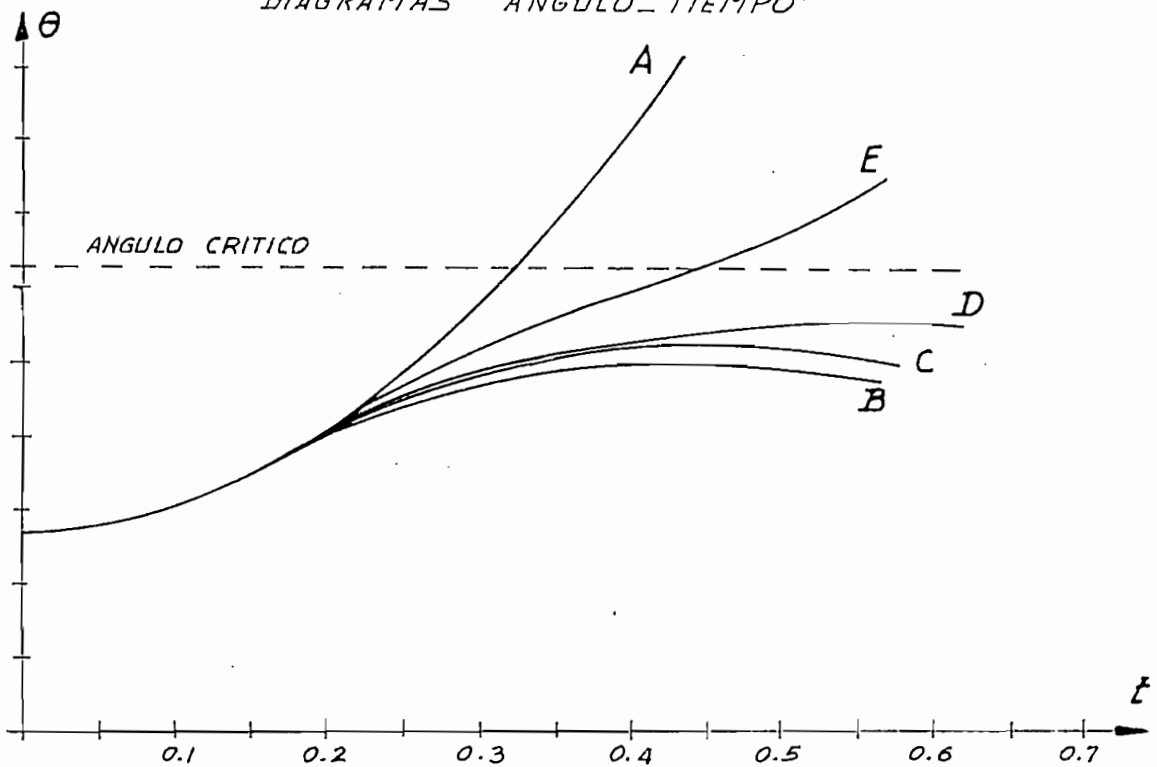


FIGURA d'

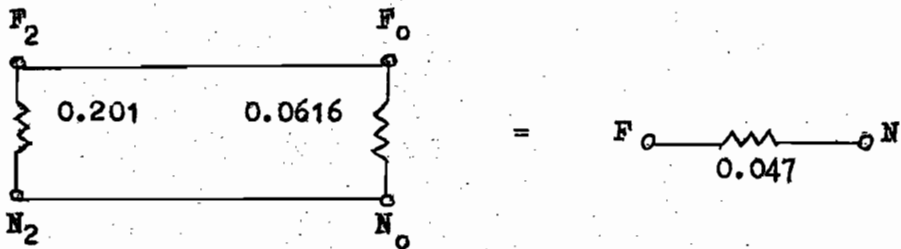
d.- Falla de DOS LINEAS A TIERRA, a la salida:

1.- Condición "anterior" a la falla:

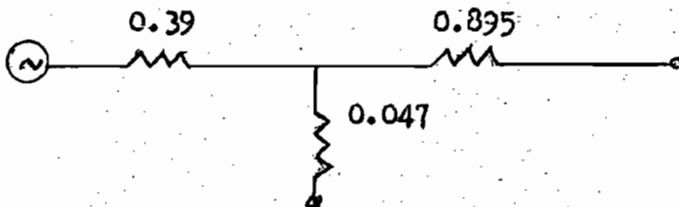
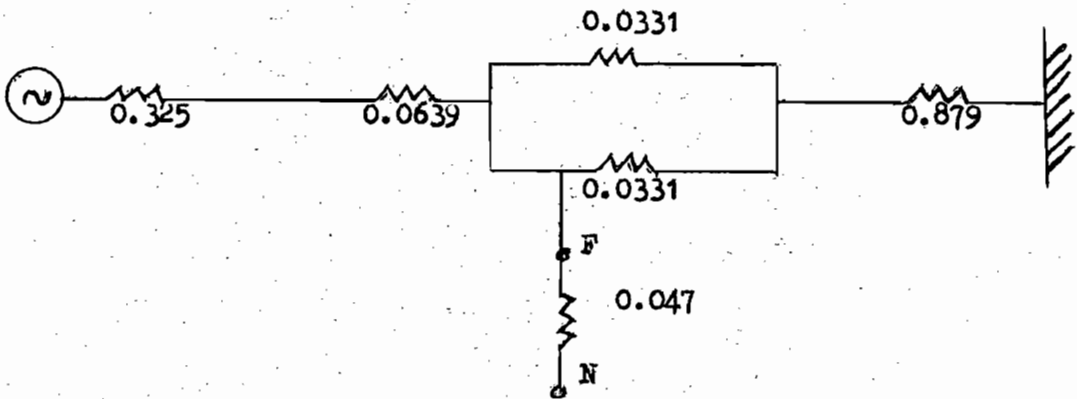
$$P_g = \frac{1.12 \cos(90 + \theta)}{\text{-----}} \text{ PU}$$

2.- Condición "durante" la falla:

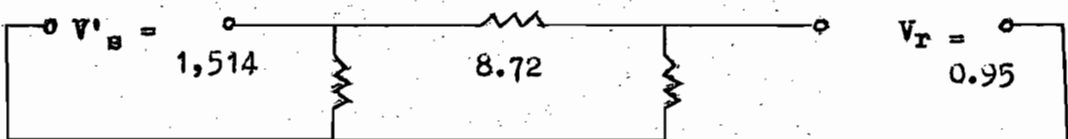
La conexión de las reactancias de secuencia positiva, negativa y cero, para este tipo de falla, deben conectarse en paralelo, por tanto:



Es decir, que el diagrama de reactancias del circuito para la condición de falla de "dos líneas a tierra", será:



Efectuando la conversión estrella a triángulo, se tiene:



La potencia eléctrica de salida para la condición "durante la falla de dos líneas a tierra", a la salida, tendrá el siguiente valor:

$$P'_s = - \frac{(1,514)(0,95)}{8,72} \cos(90 + \theta) \text{ PU}$$
$$= - \frac{0,16 \cos(90 + \theta)}{\text{=====}} \text{ PU}$$

3.- Condición "después" de la falla:

$$P''_s = - \frac{1,1 \cos(90 + \theta)}{\text{=====}} \text{ PU}$$

Cálculo del ángulo máximo de despeje de la falla:

$$r_1 = 1,284 / 8,72$$
$$= 0,1472$$

$$\cos \theta_1 = \frac{1,023 - 0,1472 \times 0,61 - 0,59}{0,988 - 0,1472}$$
$$= \frac{1,023 - 0,09 - 0,59}{0,851}$$
$$= \frac{0,343}{0,851}$$
$$= 0,403 ; \text{ de donde:}$$

$$\theta_1 = 66.2^\circ$$
$$\text{=====}$$

Este es el valor máximo del ángulo de aislación de la falla para mantener la estabilidad y por el método "paso por paso" seleccionado en el estudio, se determinará el tiempo en que debe ser aislada la falla.

Con los valores ya calculados, se trazan a continuación los diagramas "potencia - ángulo" y "ángulo - tiempo":

DIAGRAMAS "POTENCIA - ANGULO"

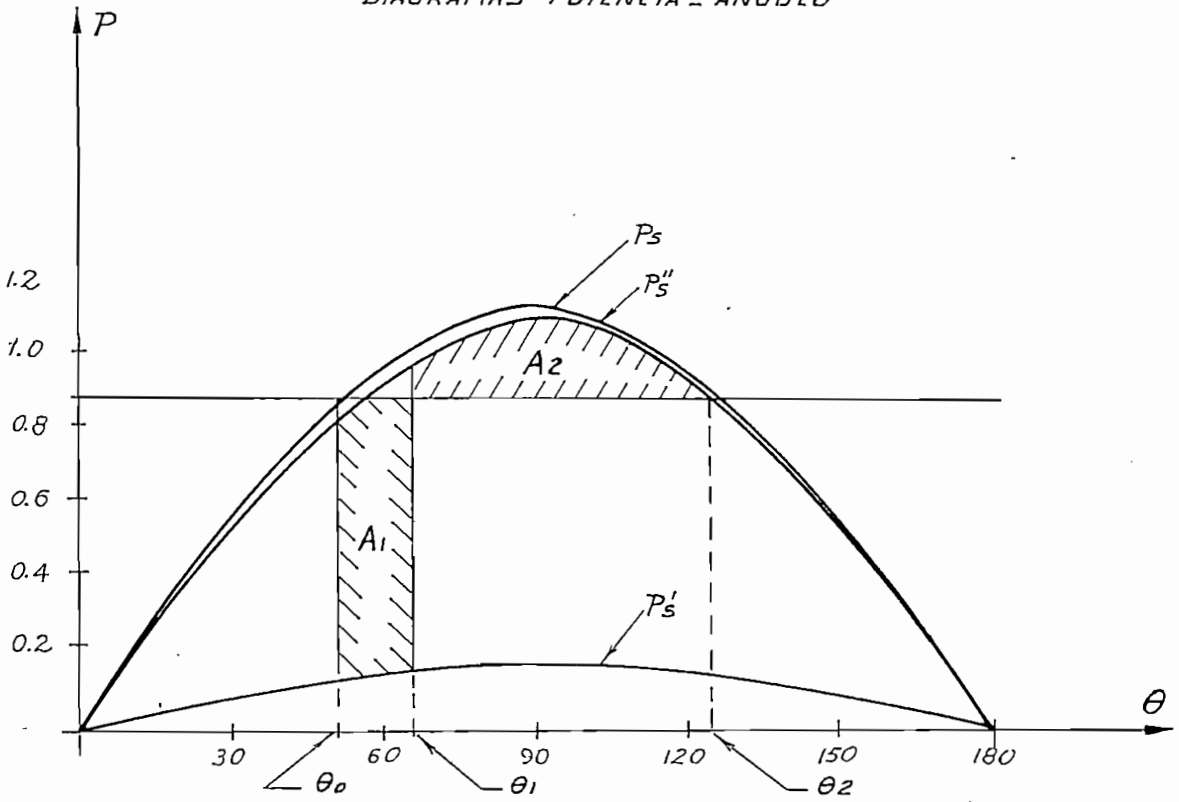


FIG. "e"

DIAGRAMAS "ANGULO - TIEMPO"

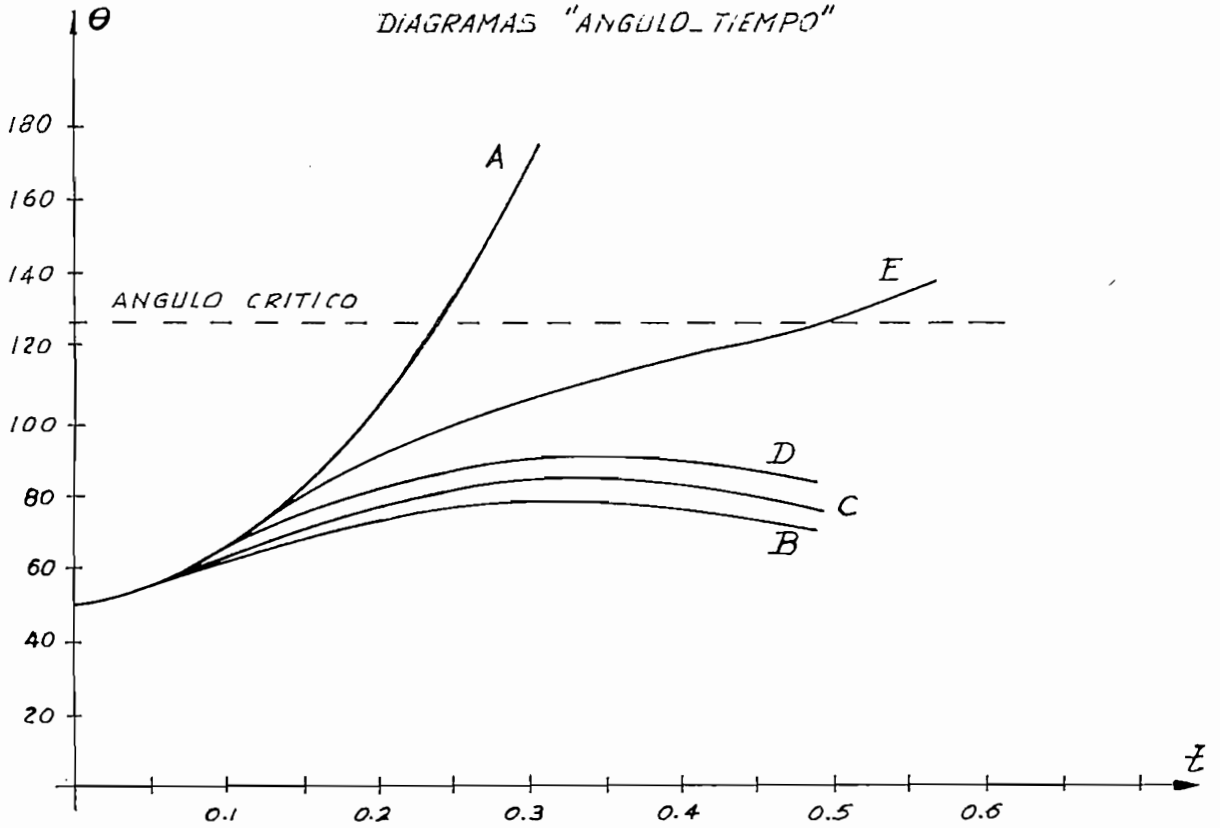


FIG. e'

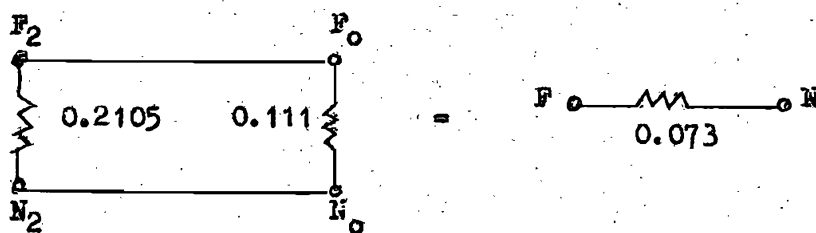
d'.- Falla de DOS LINEAS A TIERRA, a la llegada:

1.- Condición "anterior" a la falla:

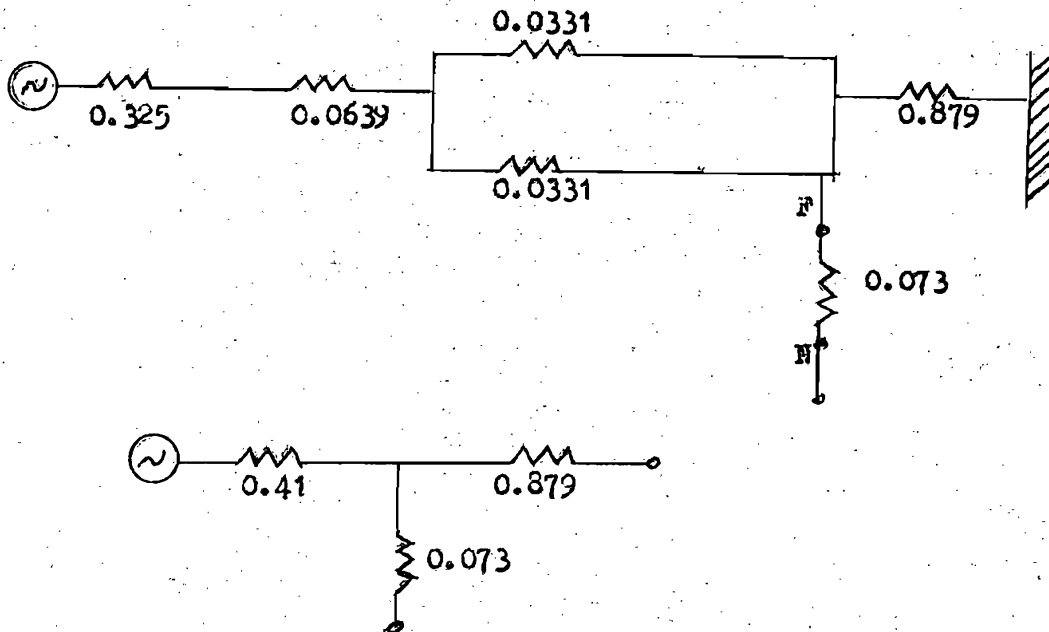
$$P_s = \underline{\underline{- 1.12 \cos(90 + \theta) \text{ PU}}}$$

2.- Condición "durante" la falla:

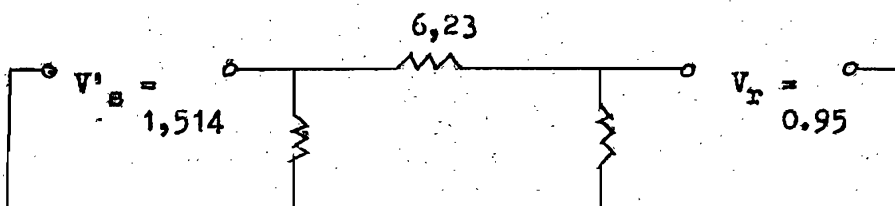
Lo mismo que en el caso anterior, por tratarse del mismo tipo de falla, la conexión de las secuencias están en paralelo:



Por tanto el diagrama de reactancias del circuito para la condición "durante la falla de dos líneas a tierra", será:



Efectuando la conversión de estrella a triángulo, se tiene:



La potencia eléctrica de salida, para la condición "durante la falla de dos líneas a tierra", será:

$$P'_s = \frac{(1,514)(0,95)}{6,23} \cos(90 + \theta) \text{ PU}$$
$$= \frac{0,23 \cos(90 + \theta)}{\text{=====}} \text{ PU}$$

3.- Condición "después" de la falla:

$$P''_s = \frac{1,1 \cos(90 + \theta)}{\text{=====}} \text{ PU}$$

Cálculo del ángulo de aislación de la falla:

$$r_1 = 1,284 / 6,23$$
$$= 0,206$$

$$\cos \theta = \frac{1,023 - 0,206 \times 0,61 - 0,59}{0,988 - 0,206}$$
$$= \frac{1,023 - 0,126 - 0,59}{0,782}$$
$$= \frac{0,307}{0,782}$$
$$= 0,3925; \text{ de donde:}$$

$$\theta_1 = \frac{66,9^\circ}{\text{=====}}$$

Este es el valor del ángulo máximo de despeje de la falla para permitir la estabilidad, mediante el cual, al calcular la tabulación de valores, se determinará el tiempo de aislación de la falla, correspondiente a un valor del ángulo de despeje aproximadamente igual al calculado para θ_1 .

A continuación se trazan los diagramas "potencia - ángulo" y "ángulo - tiempo":

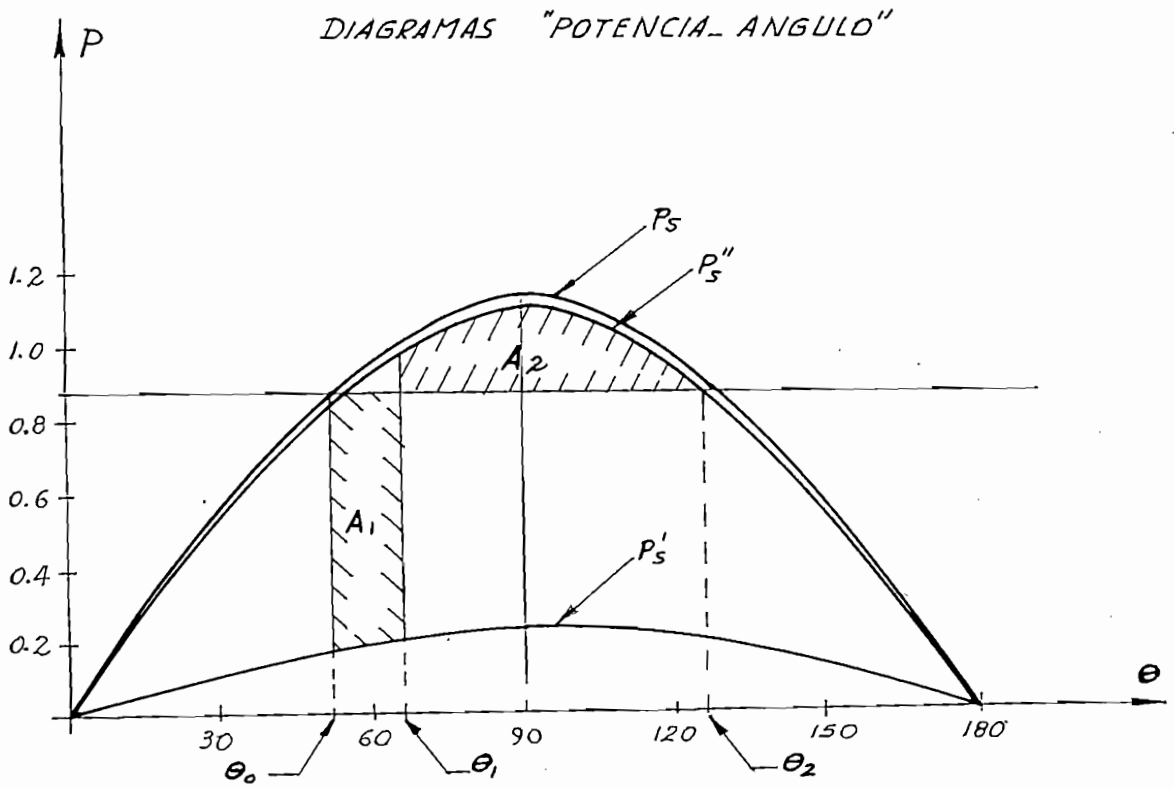


FIG. "f"

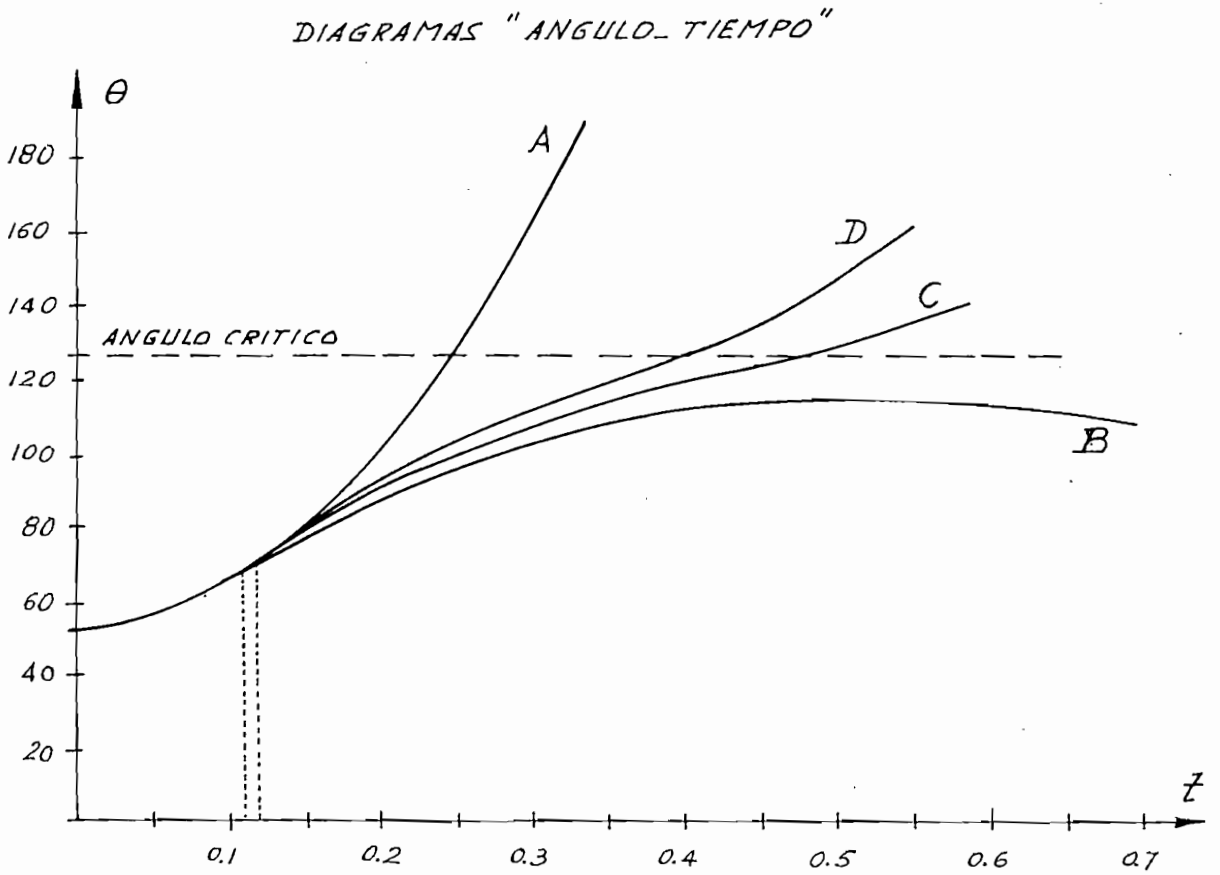


FIG. f'

Falla aislada a 0.11 seg. (curva 0):

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
t	θ	P_s	ΔP	α	Δt	ΔW	W	Δt	ΔQ	θ
-0.11	67.2	0.212	0.676	2434	0.025	60.8	274.6			
+0.11	67.2	1.014	-0.126	-454	0.025	-11.3	263.3	0.05	13.2	80.4
0.16	80.4	1.084	-0.196	-706	0.05	-35.3	228.0	0.05	11.4	91.8
0.21	91.8	1.099	-0.211	-760	0.05	-38.0	190.0	0.05	9.5	101.3
0.26	101.3	1.079	-0.191	-688	0.05	-34.4	155.6	0.05	7.8	109.1
0.31	109.1	1.039	-0.151	-544	0.05	-27.2	128.4	0.05	6.4	115.5
0.36	115.5	0.993	-0.105	-378	0.05	-18.9	109.5	0.05	5.5	121.0
0.41	121.0	0.943	-0.055	-198	0.05	-9.9	99.6	0.05	5.0	126.0
0.46	126.0	0.889	-0.001	-4	0.05	-0.2	99.4	0.05	5.0	131.0
0.51	131.0	0.830	0.058	209	0.05	10.4	109.8	0.05	5.5	136.5
0.56	136.5									

Falla aislada a 0.12 seg. (curva D):

-0.12	69.9	0.216	0.672	2419	0.025	60.5	298.8			
+0.12	69.9	1.033	-0.145	-522	0.025	-13.0	285.8	0.05	14.3	84.2
0.17	84.2	1.094	-0.206	-742	0.05	-37.1	248.7	0.05	12.4	96.6
0.22	96.6	1.093	-0.205	-738	0.05	-36.9	211.8	0.05	10.6	107.2
0.27	107.2	1.051	-0.163	-587	0.05	-29.3	182.5	0.05	9.1	116.3
0.32	116.3	0.986	-0.098	-353	0.05	-17.6	164.9	0.05	8.2	124.5
0.37	124.5	0.906	-0.018	-65	0.05	-3.2	161.7	0.05	8.1	132.6
0.42	132.6	0.810	0.078	281	0.05	14.0	175.7	0.05	8.8	141.4
0.47	141.4	0.686	0.202	727	0.05	36.3	212.0	0.05	10.6	152.0
0.52	152.0									

Por tanto, para el presente caso, la falla debe ser aislada a un tiempo de 0.10 seg. y nunca a un tiempo mayor que éste, ya que, como se concluye de las tablas precedentes, se pierde la estabilidad por cuanto el valor de θ (columna 2) sobrepasa el valor del ángulo crítico de 126.4° ya calculado anteriormente.

e.- Falla de TRES LINEAS A TIERRA, a la salida:

1.- Condición anterior a la falla:

$$P_s = \frac{- 1.12 \cos(90 + \theta)}{\text{=====}} \text{ PU}$$

2.- Condición "durante" la falla:

Para este tipo de falla, no hay conexión entre las secuencias y la que interviene en el cálculo de la potencia eléctrica de salida es la reactancia equivalente de secuencia positiva que ya se calculó anteriormente en el caso que se analizó de falla de tres líneas, después de las barras colectoras, tratado en el literal b de la página 51, por tanto:

$$P'_s = \frac{- 0,0017 \cos(90 + \theta)}{\text{=====}} \text{ PU}$$

3.- Condición "posterior" a la falla:

$$P''_s = \frac{- 1,1 \cos(90 + \theta)}{\text{=====}} \text{ PU}$$

El ángulo máximo de aislación de la falla para mantener la estabilidad, tendrá un valor igual que para el caso b ya que todos los valores calculados para el mencionado caso, son iguales que para el presente, por tanto:

$$\theta_1 = \frac{64^\circ}{\text{=====}}$$

Los diagramas "potencia-ángulo" y "ángulo-tiempo" corresponden a los trazados en las figuras "b" y "b'", respectivamente para el caso b de la página 53. La tabulación de los valores calculados por el método paso por paso para el presente caso, corresponde a los valores ya calculados anotados en la Tabla # 2.

Por tanto, para el tipo de falla de tres líneas a tierra a la salida, se harán las mismas anotaciones y conclusiones que se han hecho para el caso ya estudiado de falla de tres líneas, caso b.

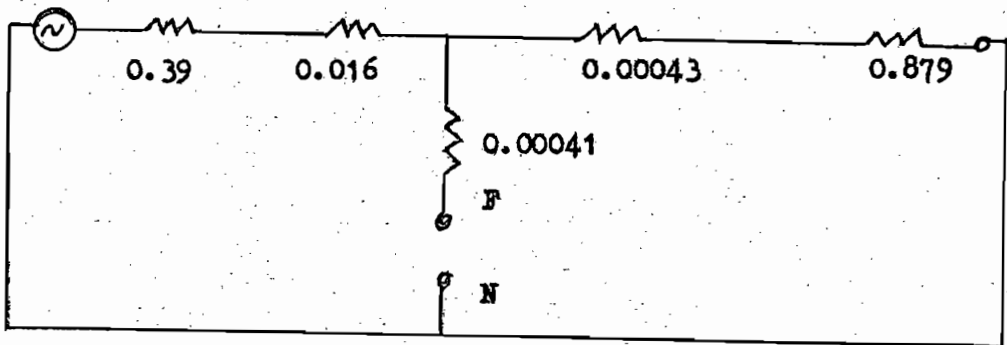
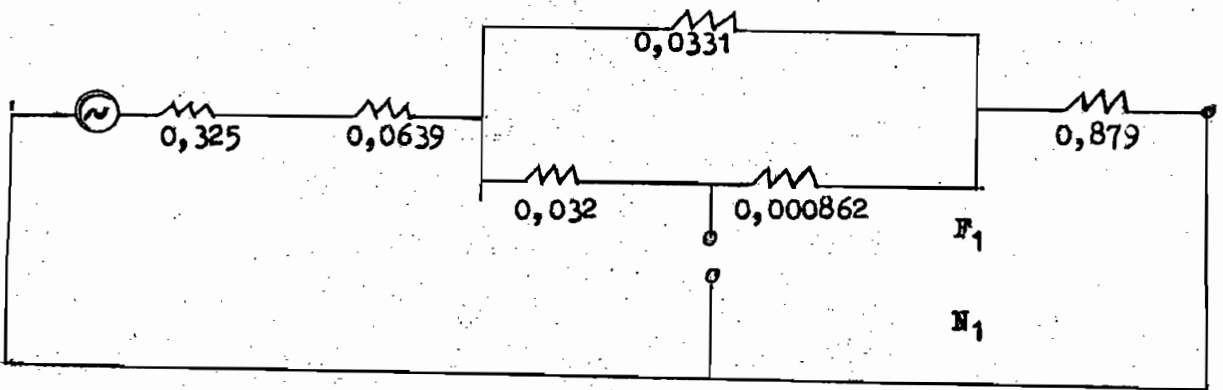
e'.- Falla de TRES LINEAS A TIERRA, a la llegada:

1.- Condición "anterior" a la falla:

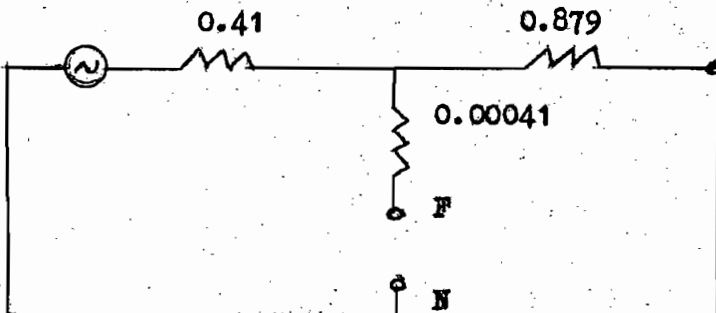
$$P_s = \frac{-1,12 \cos(90 + \theta)}{\text{-----}} \text{ PU}$$

2.- Condición "durante" la falla:

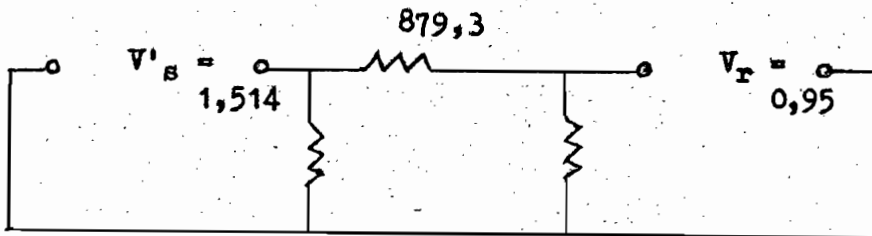
Para este tipo de falla la que interviene en el cálculo de la potencia eléctrica de salida es la reactancia equivalente de secuencia positiva:



que representa una conexión en estrella:



efectuando la conversión a triángulo, se tiene:



Por tanto:

$$P'_S = - \frac{(1,514)(0,95)}{879,3} \cos(90 + \theta) \quad \text{PU}$$
$$= - \underline{\underline{0,0016 \cos(90 + \theta) \quad \text{PU}}}$$

3.- Condición "después" de la falla:

$$P''_S = - \underline{\underline{1,1 \cos(90 + \theta) \quad \text{PU}}}$$

Cálculo de aislación de la falla:

$$r_1 = 1,284 / 879,3$$
$$= 0,0014$$

$$\cos \theta_1 = \frac{1,023 - 0,0014 \times 0,61 - 0,59}{0,988 - 0,0014}$$
$$= \frac{1,023 - 0,0008 - 0,59}{0,987}$$
$$= \frac{0,432}{0,987}$$
$$= 0,4376 ; \text{ de donde:}$$

$$\underline{\underline{\theta_1 = 64,1^\circ}}$$

Este es el valor máximo del ángulo de despeje para mantener la estabilidad. Con los valores ya calculados, se trazan a continuación los diagramas "potencia-ángulo" y "ángulo-tiempo".

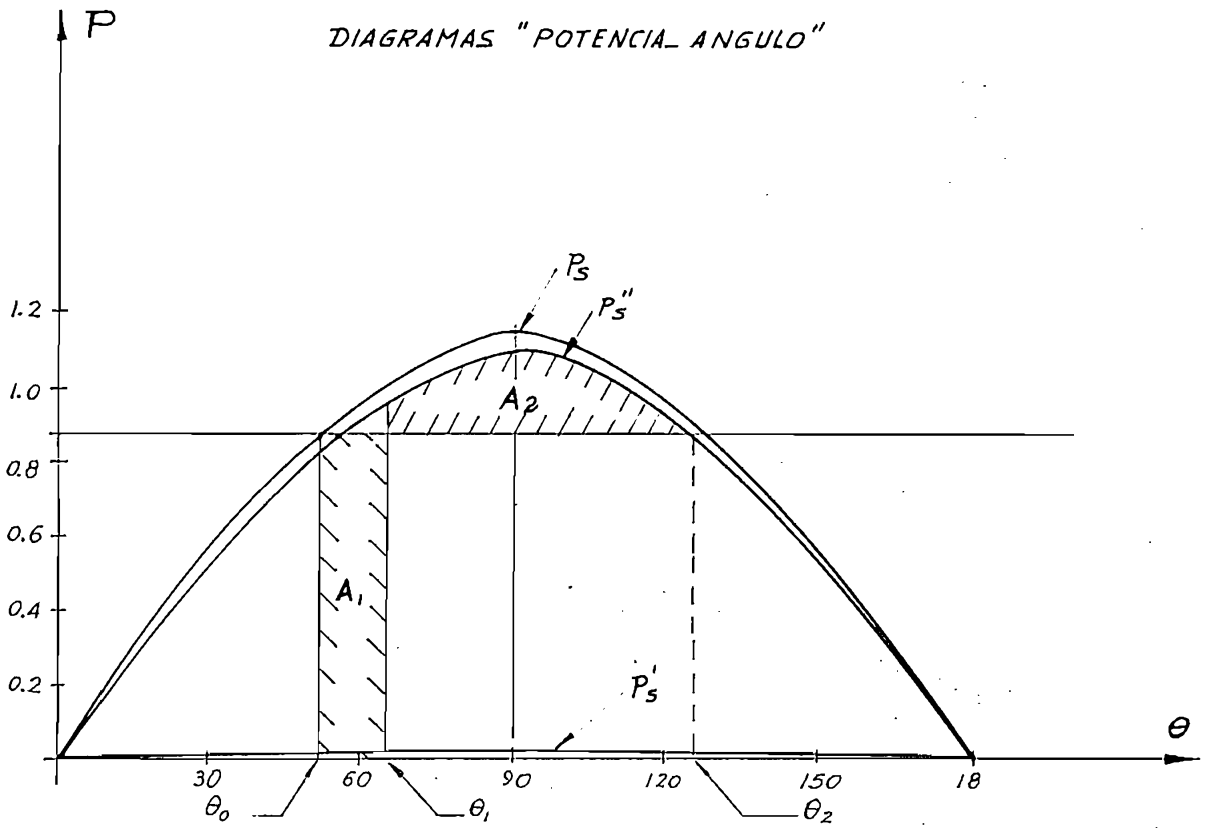


FIG. "g"

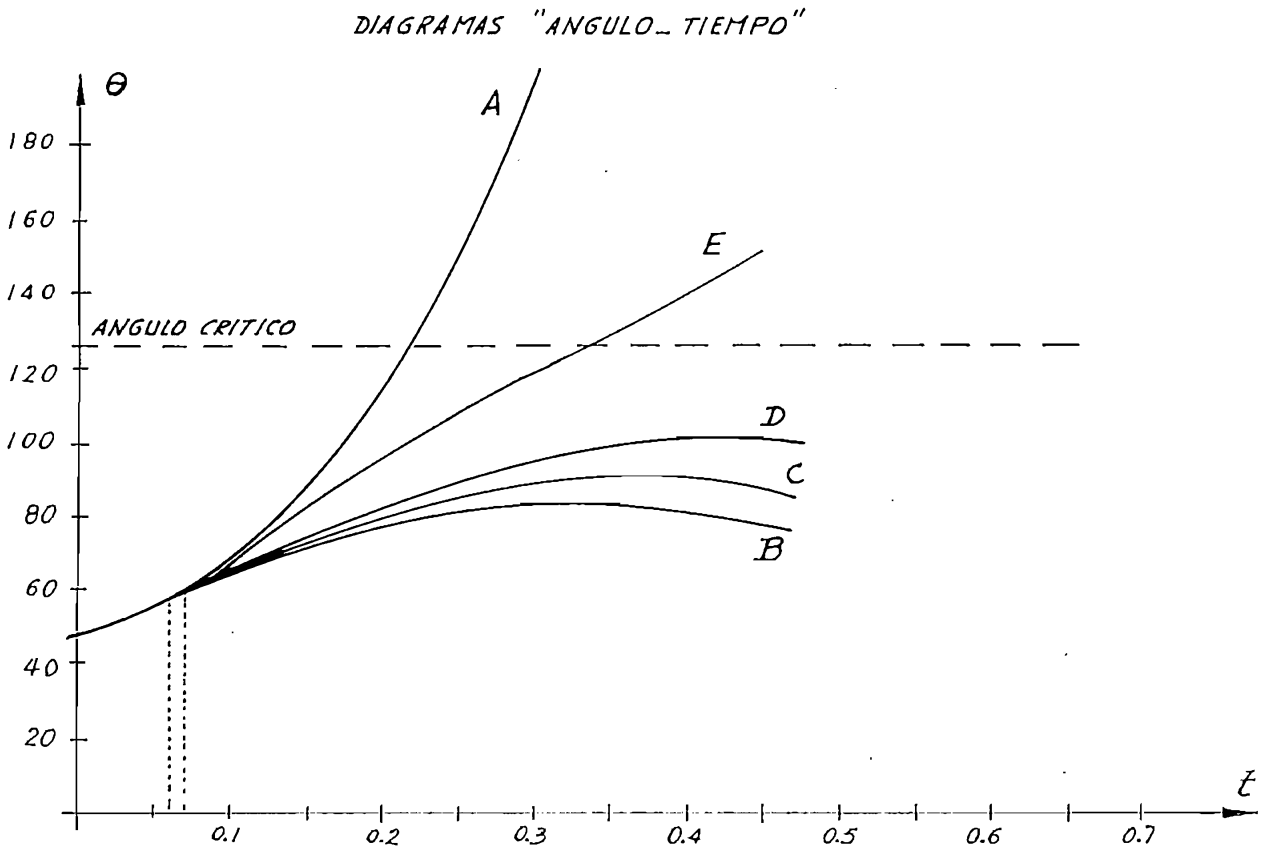


FIG. g'

La tabulación de valores de la Tabla # 7, sirven para el trazo de las curvas A y B de la Fig. g'. La primera parte de la curva se supone que la falla no se aísla (curva A) y por tanto existe inestabilidad en el sistema. Por el mismo método paso por paso se han calculado las curvas B, C y D que indican que la estabilidad se mantiene a pesar de aislar la falla desde los 0.05 seg. á 0.07 seg.; pero si ésta se despeja a tiempo mayor, digamos a 0.10 seg. (curva E), se pierde la estabilidad del sistema ya que el valor del ángulo θ es superior al del ángulo crítico.

Tabla # 7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
t	θ	P _s	ΔP	d	Δt	ΔW	W	Δt	$\Delta \theta$	θ
0.0	52.4	0.0013	0.887	3193	0.025	79.8	79.8	0.05	4.0	56.4
0.05	56.4	0.0013	0.887	3193	0.05	159.7	239.5	0.05	12.0	68.4
0.10	68.4	0.0015	0.886	3190	0.05	159.5	399.0	0.05	19.9	88.3
0.15	88.3	0.0016	0.886	3190	0.05	159.5	558.5	0.05	27.9	116.2
0.20	116.2	0.0014	0.887	3193	0.05	159.7	718.2	0.05	35.9	152.1
0.25	152.1	0.0007	0.887	3193	0.05	159.7	877.9	0.05	43.9	196.0
0.30	196.0									

Falla aislada a 0.05 seg. (curva B):

-0.05	56.4	0.0013	0.887	3193	0.025	79.8	159.6			
+0.05	56.4	0.916	-0.028	-101	0.025	-2.5	157.1	0.05	7.8	64.2
0.10	64.2	0.990	-0.102	-367	0.05	-18.4	138.7	0.05	6.9	71.1
0.15	71.1	1.041	-0.153	-551	0.05	-27.6	111.1	0.05	5.6	76.7
0.20	76.7	1.070	-0.182	-655	0.05	-32.7	78.4	0.05	3.9	80.6
0.25	80.6	1.085	-0.197	-709	0.05	-35.4	43.0	0.05	2.2	82.8
0.30	82.8	1.091	-0.203	-731	0.05	-36.6	6.4	0.05	0.3	83.1
0.35	83.1	1.092	-0.204	-734	0.05	-36.7	-30.3	0.05	-1.5	81.6
0.40	81.6	1.088	-0.200	-720	0.05	-36.0	-66.3	0.05	-3.3	78.3
0.45	78.3									

Como se puede ver, al aislar la falla a 0.05 seg., se mantiene la estabilidad ya que el ángulo θ en ningún momento llega a tener un valor ^{mayor} del ángulo crítico, lo mismo sucede si la falla se despeja a 0.06 y 0.07 seg.:

Falla aislada a 0.06 seg.(curva C):

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
t	θ	P_s	ΔP	d	Δt	ΔW	W	Δt	$\Delta \theta$	θ
-0.06	57.5	0.0013	0.887	3193	0.025	79.8	191.5			
+0.06	57.5	0.928	-0.040	-144	0.025	-3.6	187.9	0.05	9.4	66.9
0.11	66.9	1.012	-0.124	-446	0.05	-22.3	165.6	0.05	8.3	75.2
0.16	75.2	1.063	-0.175	-630	0.05	-31.5	134.1	0.05	6.7	81.9
0.21	81.9	1.089	-0.201	-724	0.05	-36.2	97.9	0.05	4.9	86.8
0.26	86.8	1.098	-0.210	-756	0.05	-37.8	60.1	0.05	3.0	89.8
0.31	89.8	1.100	-0.212	-763	0.05	-38.2	21.9	0.05	1.1	90.9
0.36	90.9	1.100	-0.212	-763	0.05	-38.2	-16.3	0.05	-0.8	90.1
0.41	90.1	1.100	-0.212	-763	0.05	-38.2	-54.5	0.05	-2.7	87.4
0.46	87.4									

Falla aislada a 0.07 seg.(curva D):

-0.07	59.3	0.0014	0.887	3193	0.025	79.8	223.5			
+0.07	59.3	0.946	-0.058	-209	0.025	-5.2	218.3	0.05	10.9	70.2
0.12	70.2	1.035	-0.147	-529	0.05	-26.4	191.9	0.05	9.6	79.8
0.17	79.8	1.083	-0.195	-702	0.05	-35.1	156.8	0.05	7.8	87.6
0.22	87.6	1.099	-0.211	-760	0.05	-38.0	118.8	0.05	5.9	93.5
0.27	93.5	1.098	-0.210	-756	0.05	-37.8	81.0	0.05	4.1	97.6
0.32	97.6	1.090	-0.202	-727	0.05	-36.3	44.7	0.05	2.2	99.8
0.37	99.8	1.084	-0.196	-706	0.05	-35.3	9.4	0.05	0.5	100.3
0.42	100.3	1.082	-0.194	-698	0.05	-34.9	-25.5	0.05	-1.3	99.0
0.47	99.0									

Falla aislada a 0.10 seg.(curva E):

-0.10	68.4	0.0015	0.886	3190	0.025	79.8	319.3			
+0.10	68.4	1.023	-0.135	-486	0.025	-12.2	307.1	0.05	15.4	83.8
0.15	83.8	1.094	-0.206	-742	0.05	-37.1	270.0	0.05	13.5	97.3
0.20	97.3	1.091	-0.203	-731	0.05	-36.6	233.4	0.05	11.7	109.0
0.25	109.0	1.040	-0.152	-547	0.05	-27.4	206.0	0.05	10.3	119.3
0.30	119.3	0.959	-0.071	-256	0.05	-12.8	193.2	0.05	9.7	129.0
0.35	129.0	0.855	0.033	119	0.05	5.9	199.1	0.05	10.0	139.0
0.40	139.0									

Por tanto, la falla se puede aislar en un tiempo de 0.05 seg. a 0.07 seg., pero no ha un tiempo de 0.10 seg. ó mayor.

C A P I T U L O I I I

Análisis de la estabilidad en estado transitorio, con mínima carga, para los siguientes tipos de falla:

- a.- Línea a línea: después de las barras colectoras
- b.- Tres líneas: después de las barras colectoras
- c.- Una línea a tierra: a la salida
- c'.- Una línea a tierra: a la llegada
- d.- Dos líneas a tierras: a la salida
- d'.- Dos líneas a tierras: a la llegada
- e.- Tres líneas a tierras: a la salida, y
- e'.- Tres líneas a tierra: a la llegada.

=====

En el presente capítulo se analizará la estabilidad en estado transitorio con "mínima carga". Se ha escogida que esta carga sea de 4.000 Kw. correspondiente al registro del día 12 de Febrero/64 a las 4 am.

Para el presente caso, se considera, que la capacidad total de generación es de 11.111 KVA, es decir un solo generador en funcionamiento.

Se tomará en cuenta el mismo diagrama eléctrico unifilar del sistema que para el caso anterior, solo con la modificación del lado de generación en que se toma la capacidad de 11.111 KVA y para el lado de recepción se considera la reactancia equivalente a una carga aplicada de 4.000 Kw. Por tanto, las "constantes del circuito", serán:

$$I_n = 11.111 / \sqrt{3} \times 46 \text{ Kv.} = 139.6 \text{ Amps.}$$

$$V_n = 46 / \sqrt{3} = 26.6 \text{ Kv.}$$

$$Z_n = 26.6 \times 10^3 / 139.6 = 190.5 \text{ ohmios}$$

El primer paso es la determinación de las reactancias del circuito, cuyos valores, para más claridad en el cálculo y facilidad en el manejo de las cantidades, se tomarán como en el caso anterior, en PU.

Valores de las reactivancias:

a) GENERADOR:

$$X_1 = 0.325 \text{ PU}$$

$$X_2 = 0.1964 \text{ PU}$$

b) TRANSFORMADOR:

Bases: $KVA_b = 10.000 \text{ KVA}$

$$Kv_b = 46 \text{ Kv.}$$

Luego:

$$X_{Pu} = \frac{0.0639 \times 10.000}{10.000}$$

$$= 0.0639 \text{ PU}$$

$$X_1 = X_2 = X_0 = \underline{0.0639 \text{ PU}}$$

c) LINEA DE TRANSMISION:

En la página 29 se calculó el valor de la impedancia en ohmios/kmt, cuyo valor es 0.453; por tanto expresando en valores por unidad (PU) con las bases adoptadas para el presente caso, se tiene:

$$X_{pu} = \frac{0.453 \times 10.000}{46^2 \times 1.000}$$

$$= 4,53/2116$$

$$= 0,00214 \text{ PU/kmt.}$$

ya que la línea de transmisión tiene una longitud aproximada de 6,2 Kmt, se determina el valor de las reactivancias en PU:

$$X_{pu} = 0,00214 \times 6,2 = 0,0133 \text{ PU}$$

luego:

$$X_1 = X_2 = \underline{0,0133 \text{ PU}}$$

Para el valor de la reactivancia de secuencia cero, X_0 , se ha calculado en la página 30 el valor en ohmios: $X_0 = 10,63$ ohmios, por tanto:

$$X_0 = \frac{10,63 \times 10.000}{46^2 \times 10^3}$$
$$= \underline{\underline{0,05 \text{ PU}}}$$

d) CARGA:

$$X_{pu} = X / X_b$$
$$X_b = \frac{46^2 \times 10^3}{10.000}$$
$$= 211,6 \text{ ohmios; luego:}$$

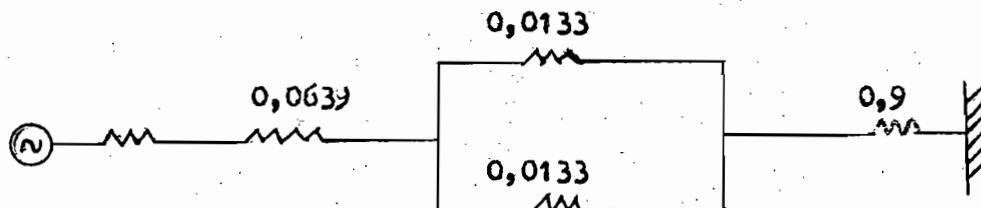
$$X_1 = X_2 = X_0 = 190,5/211,6$$
$$= \underline{\underline{0,9 \text{ PU}}}$$

Como se anotó en el capítulo anterior, se admite un voltaje constante en el lado de recepción para las condiciones anterior, durante y después de la falla, cuyo valor se ha supuesto ser de 0,95 PU. Se calculará a continuación los valores que también se supone permanecen constantes, como son el valor de la potencia de entrada (P_i) y el valor del voltaje interno del generador.

$P_i = 4.444 / 10.000 = 0,44 \text{ FU}$ a factor de potencia 90%; de acuerdo a esto, la corriente en el sistema, será:

$$I = 0,44 / 0,95 = 0,46 \text{ PU}$$
$$= 64,2 \text{ Amps.}$$

El voltaje de terminales en el lado de generación:



El valor de la reactancia que determinará este voltaje, será:

$$X = 0,0639 + 0,0066 + 0,9$$
$$= 0,97$$

Por tanto, el valor del voltaje de terminales en el lado de generación, será:

$$\begin{aligned} V_g &= 0,95 + 0,46(j 0,97) \\ &= 0,95 + j 0,45 \end{aligned}$$

El "voltaje interno del generador", o voltaje tras la reactancia transitoria, es el vector suma del voltaje de terminales de la máquina y el voltaje necesario para llevar la corriente de carga a través de la reactancia transitoria; tendrá un valor de:

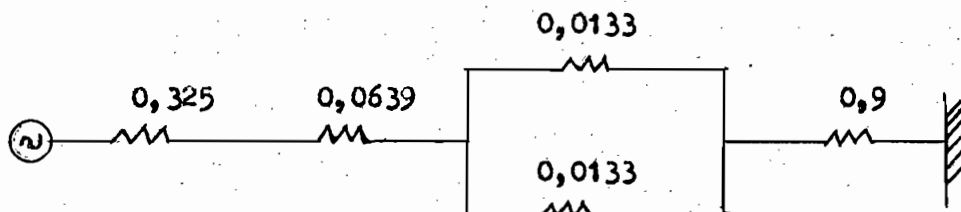
$$\begin{aligned} V'_g &= 0,95 + j 0,45 + 0,46(j 0,325) \\ &= 0,95 + j 0,599 \\ &= \underline{\underline{1,125 \cdot e^{j 32.3^\circ} \text{ PU}}} \end{aligned}$$

En el cálculo de la estabilidad transitoria, se determinará el tiempo máximo permisible entre la iniciación de la falla y la apertura de los interruptores del circuito, para el cual se pueda mantener la estabilidad. Este tiempo no corresponde al tiempo de operación del interruptor que sería usado normalmente, sino que se refiere al tiempo máximo de operación el cual permita conservar la estabilidad.

Se determinará, como en el capítulo anterior, las potencias de salida P_g , P'_g y P''_g para las condiciones correspondientemente de

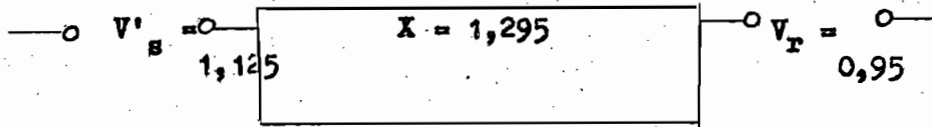
- a.- Inicial o normal "antes" de la iniciación de la falla,
- b.- Durante la falla, y
- c.- Después de la falla.

El circuito de reactancias a utilizarse en el cálculo de la potencia de salida para la condición normal o "anterior" a la falla, será:



Reduciendo este circuito, se tiene el valor de la reactancia equivalente del sistema, la que determinará el valor de la potencia de sa-

lida para la condición "anterior" a la falla:



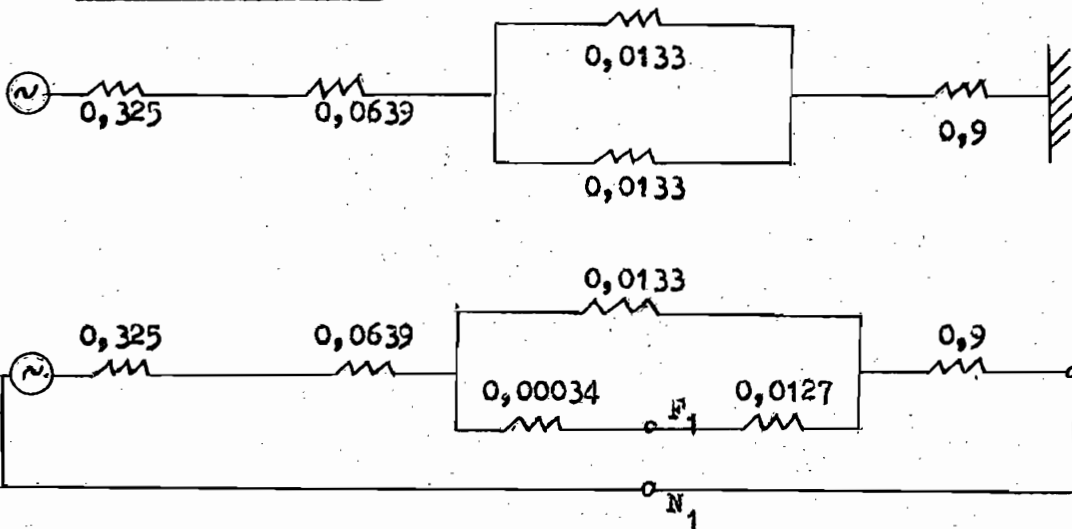
por tanto:

$$\begin{aligned}
 P_S &= \frac{1,125)(0,95)}{1,295} \cos(90+\theta) \text{ PU} \\
 &= \frac{1,069}{1,295} \cos(90+\theta) \text{ PU} \\
 &= \underline{\underline{0,83 \cos(90+\theta) \text{ PU}}}
 \end{aligned}$$

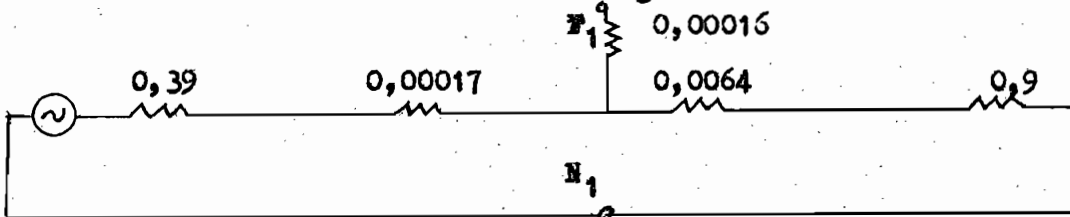
Antes de calcular la estabilidad para los diferentes tipos de falla y localización de las mismas, se determinan a continuación los diagramas de reactancia para las secuencias negativa, positiva y cero.

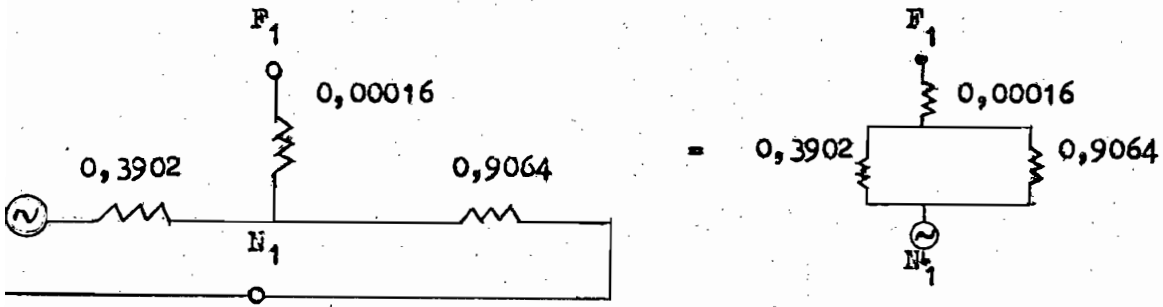
Para fallas localizadas "después de las barras colectoras" ó "a la salida":

Secuencia Positiva:

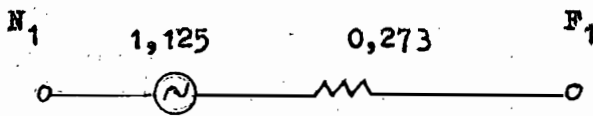


Efectuando la conversión triángulo a estrella:

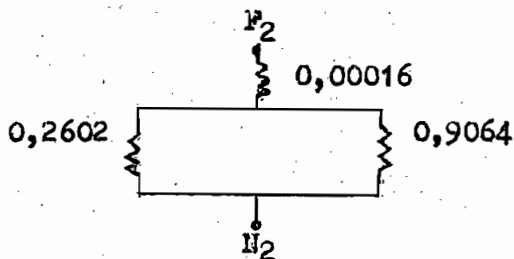
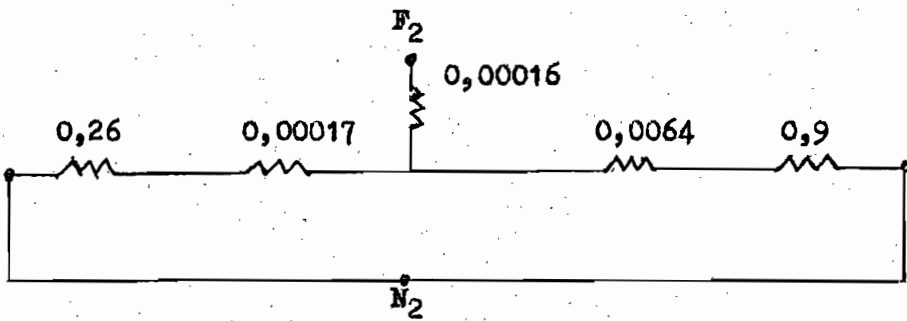
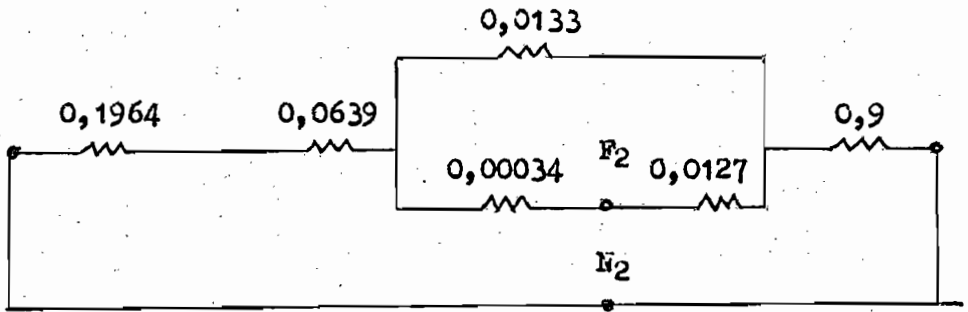




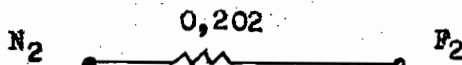
La reactancia equivalente de secuencia positiva, será:



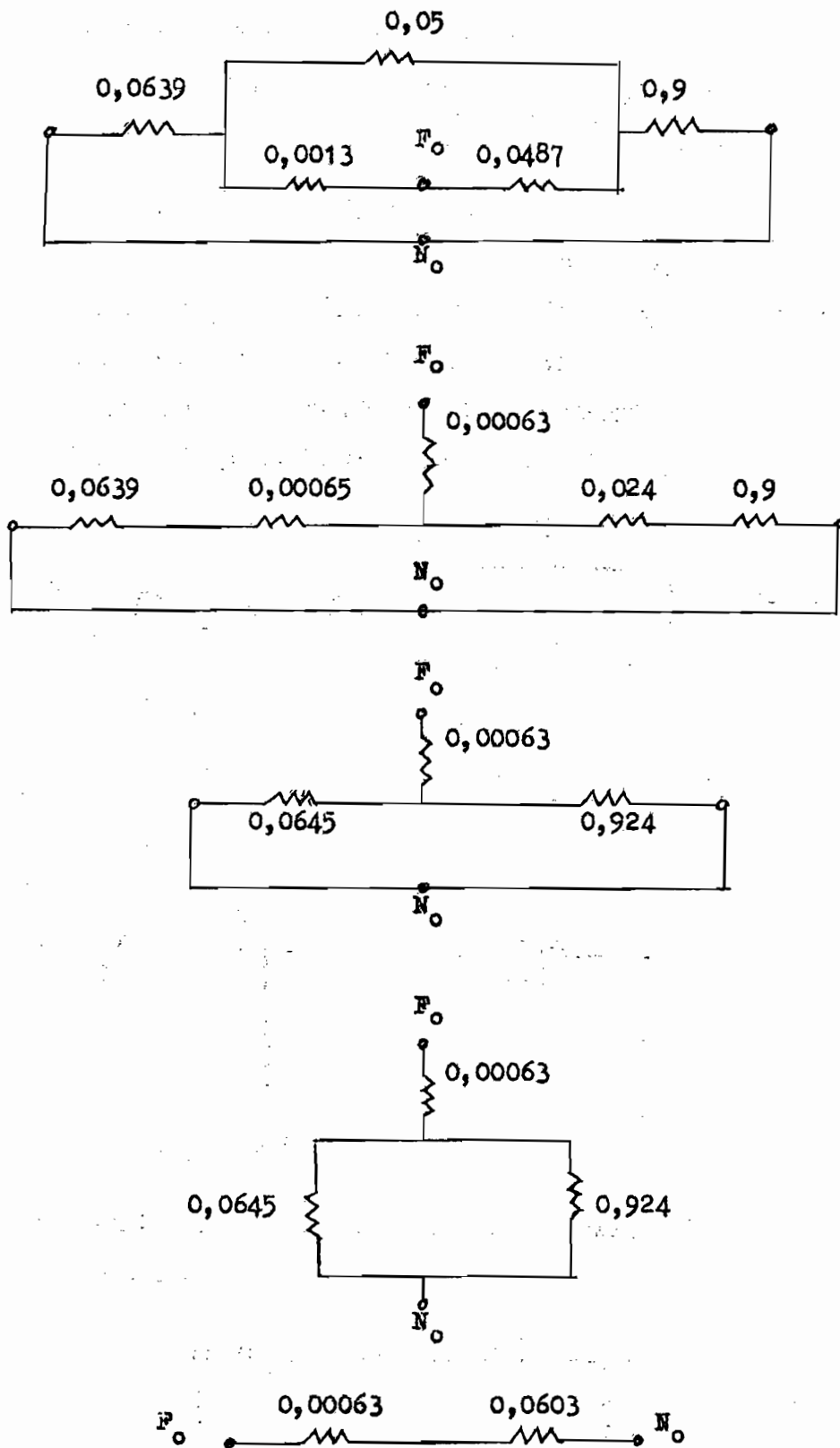
Secuencia Negativa:



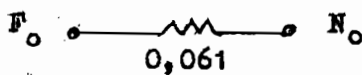
La reactancia equivalente de secuencia negativa, será:



Secuencia Cero:



La reactancia equivalente de secuencia negativa, será:



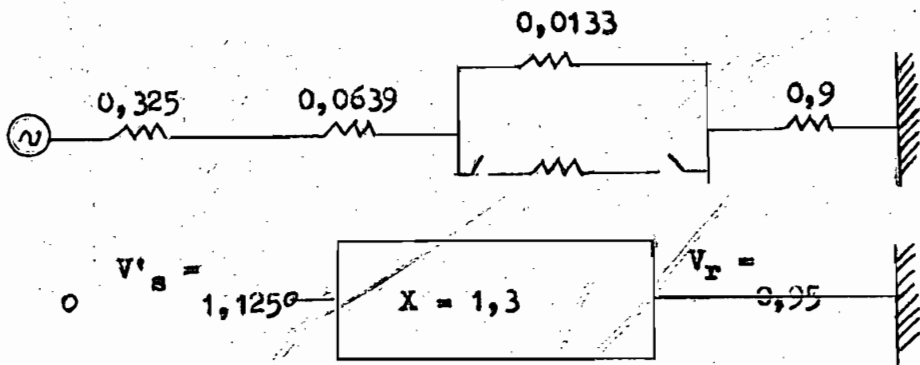
Por tanto, la potencia eléctrica de salida, para la condición "durante la falla de línea a línea después de las barras colectoras", será :

$$P'_s = \frac{(1,125)(0,95)}{3,05} \cos(90+\theta) \text{ PU}$$

$$= \frac{0,35 \cos(90 + \theta)}{\text{=====}} \text{ PU}$$

3.- Condición "después" de la falla:

El diagrama de reactancias que se utiliza para esta condición, será el siguiente:



Por tanto, la potencia eléctrica de salida para la condición "después" que la falla se ha despejado, tendrá un valor de:

$$P''_s = \frac{(1,125)(0,95)}{1,3} \cos(90 + \theta) \text{ PU}$$

$$= \frac{0,82 \cos(90 + \theta)}{\text{=====}} \text{ PU}$$

El paso a seguirse consiste en el trazo de los "diagramas potencia-ángulo"; para lo cual es necesario conocer, a más de las potencias eléctricas de salida para las tres condiciones ya calculadas, los ángulos θ_0 que es el ángulo inicial de operación antes de que ocurra la falla; θ_1 que representa el ángulo máximo al cual la falla debe aislarse para mantener la estabilidad y el valor de θ_2 ó ángulo "crítico" al cual la máquina puede oscilar después que la falla haya sido despejada, sin pérdida de la estabilidad del sistema.

Resolviendo la ecuación de P_s para un valor de 0,44, que representa la intersección de las curvas de la potencia de entrada con la potencia de salida para la condición anterior a la falla, se obtiene el valor de θ_0 :

$$0,44 = - 0,83 \cos(90 + \theta)$$

$$0,44/0,83 = \text{sen } \theta_0$$

$$0,5301 = \text{sen } \theta_0, \text{ de donde:}$$

$$\underline{\underline{\theta_0 = 32.0^\circ}}$$

indica que antes de que la falla ocurra, el sistema estuvo operando un ángulo aproximadamente igual a 32.0° .

El ángulo máximo ó ángulo "crítico" (θ_2) al cual la máquina puede oscilar sin pérdida de estabilidad, está definido por la intersección de las curvas de la potencia de entrada con la curva de la potencia de salida para la condición "después" que se ha despejado la falla, luego:

$$0,44 = - 0,82 \cos(90 + \theta)$$

$$0,44/0,82 = \text{sen } \theta_2$$

$$0,5365 = \text{sen } \theta_2, \text{ de donde:}$$

$$\underline{\underline{\theta_2 = 147.5^\circ}}$$

Este es el valor máximo que puede alcanzar θ , con la condición de mantener la estabilidad del sistema.

Por el método de "la igualdad de áreas", descrito anteriormente, un ángulo aproximadamente de 103.7° se selecciona como ángulo máximo al cual la falla puede ser aislada manteniendo la estabilidad, para lo cual se aplica la ecuación (18):

$$\text{Cos } \theta_1 = \frac{\text{sen } \theta_0 (\pi - \theta_0 - \text{arc sen } \frac{\text{sen } \theta_0}{r_2}) - r_1 \cos \theta_0 - \sqrt{r_2^2 - \text{sen}^2 \theta_0}}{r_2 - r_1}$$

Valores:

$$\text{Sen } \theta_0 = 0,5301$$

$$\text{cos } \theta_0 = 0,8479$$

$$\text{sen}^2 \theta_0 = 0,281$$

$$\text{arcsen } \frac{\text{sen} \theta_0}{r_2} = 32,2^\circ$$

$$\begin{aligned} \theta_0 = 32^\circ, \quad r_1 = 1,295/3,05, \quad r_2 = 1,295/1,3 \\ = 0,4246 \quad \quad \quad = 0,996 \end{aligned}$$

Reemplazando valores, se tiene:

$$\begin{aligned} \text{Cos } \theta_1 &= \frac{0,5301(180^\circ - 32^\circ - 32,2^\circ) - 0,4246 \times 0,8479 - 0,843}{0,996 - 0,4246} \\ &= \frac{0,5301(115,8^\circ) - 0,36 - 0,843}{0,571} \\ &= \frac{0,5301(2,015) - 1,203}{0,571} \\ &= \frac{1,068 - 1,203}{0,571} \\ &= \frac{-0,135}{0,571} \\ &= -0,2364, \text{ de donde:} \end{aligned}$$

$$\theta_1 = 103.7^\circ$$

Este es el máximo valor que puede llegar θ para aislar la falla con la condición de mantener la estabilidad, con el valor de este ángulo se determinará luego el tiempo en que debe aislarse la falla para mantener la estabilidad del sistema.

Con los valores ya calculados de potencia de entrada, potencias eléctricas de salida para las condiciones anterior, durante y después de la falla, así como con los valores de los ángulos θ_0 , θ_1 y θ_2 , se pueden trazar los diagramas "potencia-ángulo" en el cual los ángulos θ_0 y θ_2 no varían su valor para todos los casos que se consideren en el presente capítulo, lo mismo que permanecen constantes la potencia de entrada y las potencias de salida para las condiciones anterior y después de la falla (P_g y P''_g); por tanto, lo único que varía para cada tipo de falla será la potencia de salida para la condición "du-

rante la falla (P'_g) y el valor del ángulo de aislación de la falla (θ_1).

Como en todos los demás casos vistos anteriormente, con los valores ya encontrados de potencias de salida para las tres condiciones y los ángulos de operación inicial (θ_0), ángulo de despeje de la falla para mantener la estabilidad (θ_1) y el valor máximo que puede alcanzar θ , que es el ángulo (θ_2) o ángulo crítico, se han trazado los diagramas "Potencia-ángulo" que se han dibujado en la Fig. "h".

En esta figura, al igual que a las anotadas anteriormente, se forman dos áreas: A_1 que es positiva con el valor de la potencia de entrada mayor que el valor de la potencia de salida para la condición "durante" la falla (P'_g) y el área A_2 negativa con el valor de la potencia de entrada menor que la potencia de salida para la misma condición "durante" la falla. Por tanto, por el método de la "igualdad de áreas", se chequeará más adelante si el sistema conserva la estabilidad para el presente caso, para lo cual, como se ha explicado, se efectuará la integración de las dos áreas y solamente si éstas son iguales, se mantendrá el sincronismo de las máquinas.

Por el método "paso por paso" se realiza a continuación la tabulación de valores anotados en la Tabla No 8, con lo cual se está en posibilidad de trazar los diagramas "ángulo-tiempo" o de "oscilación" (ver Fig. h'), para lo cual θ se determina como una función del tiempo y por el mismo método se calcula el tiempo en que la falla debe despejarse para poder mantener la estabilidad; claro que este tiempo no corresponde al que deben actuar los interruptores del circuito, sino que éste debe sumarse al tiempo de apertura de los relés destinados para protección contra fallas, es decir que el tiempo de operación del interruptor más el tiempo de operación de los relés determina el tiempo de despeje de la falla que debe ser igual o si es posible menor al tiempo calculado para aislar la falla, lo cual se explicará en el último capítulo al tratar de las "conclusiones" de este estudio.

DIAGRAMAS "POTENCIA-ANGULO"

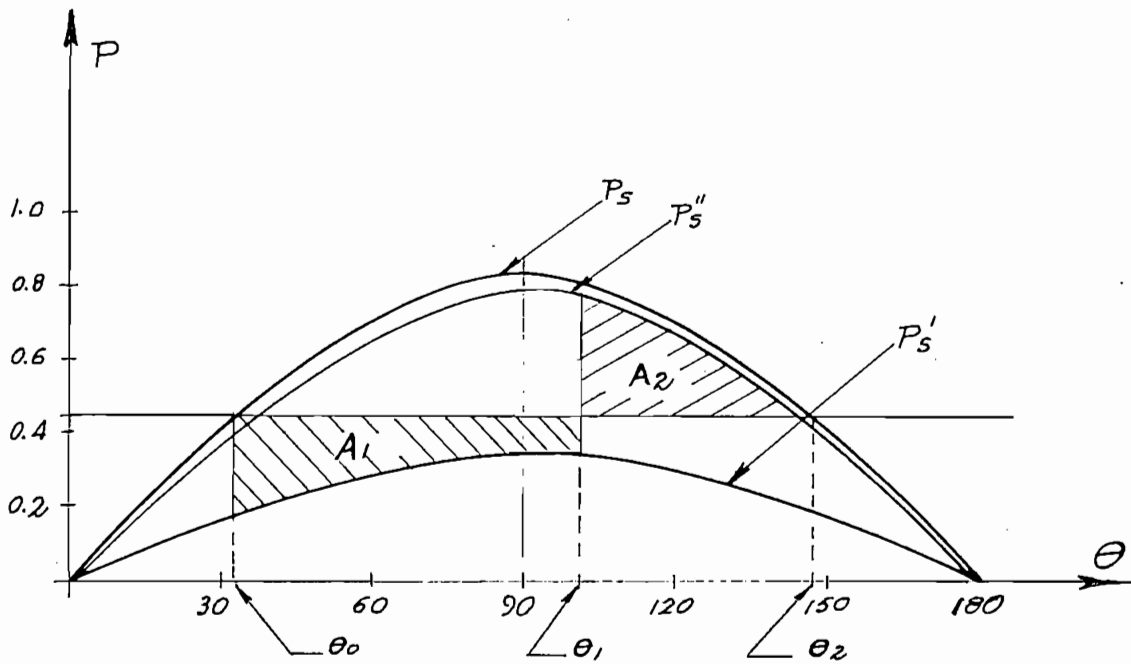


FIG. "h"

CURVAS "ANGULO-TIEMPO"

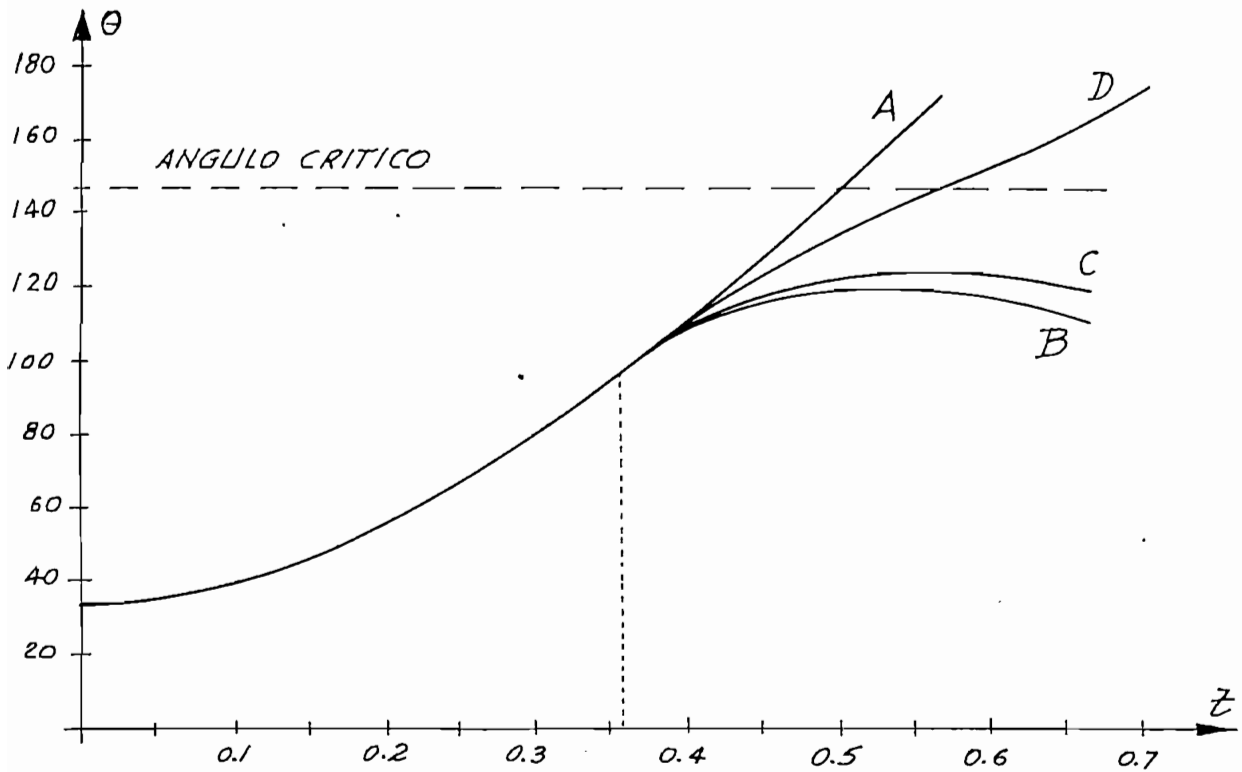


FIG. h'

Para el presente caso del análisis de la estabilidad en estado transitorio se ha considerado que un solo generador está en funcionamiento, con una capacidad en generación de 11.111 KVA, por tanto de acuerdo a esta capacidad se determina en la Fig. # 15 de la página 45 una constante de inercia aproximadamente igual a 2,2 Kw.seg/MVA, con lo que se calcula el factor de multiplicación "k" para la tabulación de valores que se determinará a continuación.

$$k = 180 \times 60 / 2,2$$

$$= \underline{\underline{4.910}}$$

TABLA Nº 8.-

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
t	θ	P_g	ΔP	d	Δt	ΔW	W	Δt	$\Delta \theta$	θ
0.0	32.0	0.185	0.255	1252	0.025	31.3	31.3	0.05	1.6	33.6
0.05	33.6	0.194	0.246	1208	0.05	60.4	91.7	0.05	4.6	38.2
0.10	38.2	0.216	0.224	1100	0.05	55.0	146.7	0.05	7.3	45.5
0.15	45.5	0.250	0.190	933	0.05	46.6	193.3	0.05	9.7	55.2
0.20	55.2	0.287	0.153	751	0.05	37.6	230.9	0.05	11.5	66.7
0.25	66.7	0.321	0.119	584	0.05	29.2	260.1	0.05	13.0	79.7
0.30	79.7	0.344	0.096	471	0.05	23.6	283.7	0.05	14.2	93.3
0.35	93.9	0.349	0.091	447	0.05	22.4	306.1	0.05	15.3	109.2
0.40	109.2	0.330	0.110	540	0.05	27.0	333.1	0.05	16.7	125.9
0.45	125.9	0.283	0.157	771	0.05	38.6	371.7	0.05	18.6	144.5
0.50	144.5	0.203	0.237	1164	0.05	58.2	429.9	0.05	21.5	166.0
0.55	166.0	0.085	0.355	1743	0.05	87.2	517.7	0.05	25.9	191.9
0.60	191.9									

A continuación se realiza la tabulación de la segunda parte de la Tabla Nº 8; se supone que la falla se aísla a 0.35 seg. que corresponde un ángulo de aislación de la falla de 93.9° que es el más próximo al valor calculado de 103.7°, ángulo máximo de aislación de la falla para mantener la estabilidad.

Examinando la Fig. h', en que se han trazado las curvas "ángulo-tiempo" o de "oscilación", indica que se pierde la estabilidad si la falla no se aísla (curva A), cuyos valores están anotados en la primera parte de la Tabla N.º 8, ya que el valor del ángulo θ llegará a ser superior del ángulo crítico (θ_2).

Las curvas B y C indican que se mantiene la estabilidad al despejar la falla a 0.35 seg. y a 0.36 seg., respectivamente, pero si la falla se aísla a un tiempo un poco mayor, digamos a 0.40 seg. (curva D) el ángulo θ sobrepasa el valor del ángulo crítico y por consiguiente se pierde la estabilidad. Por tanto, para este tipo de falla conviene aislar ésta a un tiempo de 0.35 ó 0.36 seg. y no a 0.40 seg. o más, ya que para estos tiempos de despeje de la falla de 0.35 y 0.36 seg. el ángulo máximo de aislación de la falla corresponde a un valor de 93.9° y 96.8° respectivamente, que están por debajo del valor calculado de 103.7° como ángulo máximo de aislación de la falla (θ_1) para mantener la estabilidad.

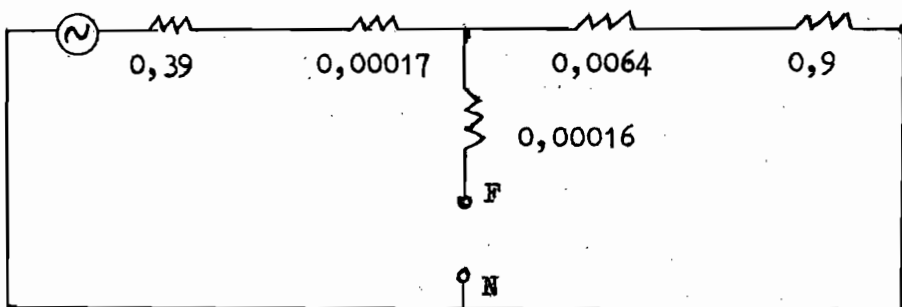
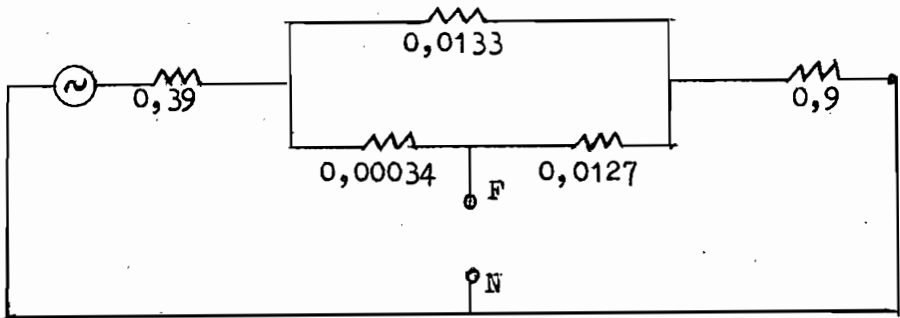
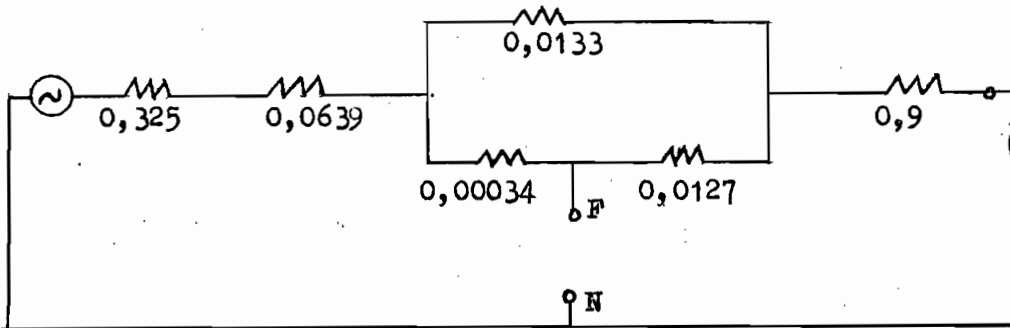
b.- Falla de TRES LINEAS, después de las barras colectoras:

1.- Condición anterior a la falla:

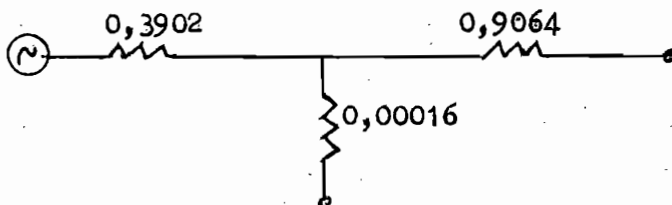
$$P_s = \frac{-0,83 \cos(90 + \theta)}{\text{-----}} \text{ PU}$$

2.- Condición "durante" la falla:

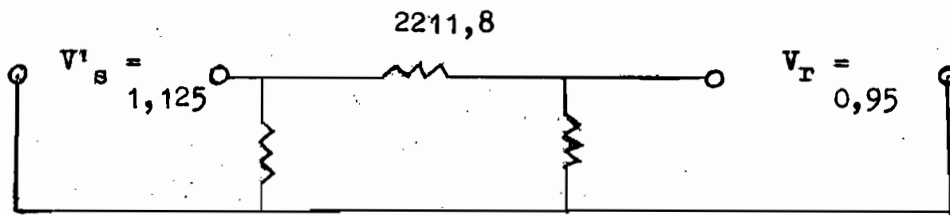
La reactancia que se aplicará para este tipo de falla es la reactancia equivalente de secuencia positiva.



Se tiene un sistema de reactancias en estrella:



Efectuando la conversión a triángulo, se tiene:



Por tanto, la potencia eléctrica de salida para la condición "durante la falla de tres líneas", será:

$$P'_s = - \frac{(1,125)(0,95)}{2211,8} \cos(90 + \theta) \text{ PU}$$

$$= - \frac{0,00048 \cos(90 + \theta)}{\text{=====}} \text{ PU}$$

3.- Condición "después" de la falla:

$$P''_s = - \frac{0,82 \cos(90 + \theta)}{\text{=====}} \text{ PU}$$

Se han calculado ya los valores de los ángulos $\theta_0 = 32^\circ$ ó ángulo inicial de operación y $\theta_2 = 147,5^\circ$ ó ángulo máximo que puede tener θ , sobre el cual el sistema es inestable y para valores menores, el sistema conserva la estabilidad. Ahora bien, para cada tipo de falla varía el valor del ángulo de "aislación" de la falla θ_1 :

$$r_1 = 1,295/2211,8 = 0,0006$$

los demás valores son ya conocidos, por tanto:

$$\begin{aligned} \cos \theta_1 &= \frac{1,068 - 0,0006 \times 0,8479 - 0,843}{0,996 - 0,0006} \\ &= \frac{1,068 - 0,0005 - 0,843}{0,995} \\ &= \frac{0,224}{0,995} \\ &= 0,2251; \text{ de donde:} \end{aligned}$$

$$\theta_1 = 77^\circ$$

=====

A continuación se trazan los diagramas "potencia-ángulo" y "ángulo-tiempo".

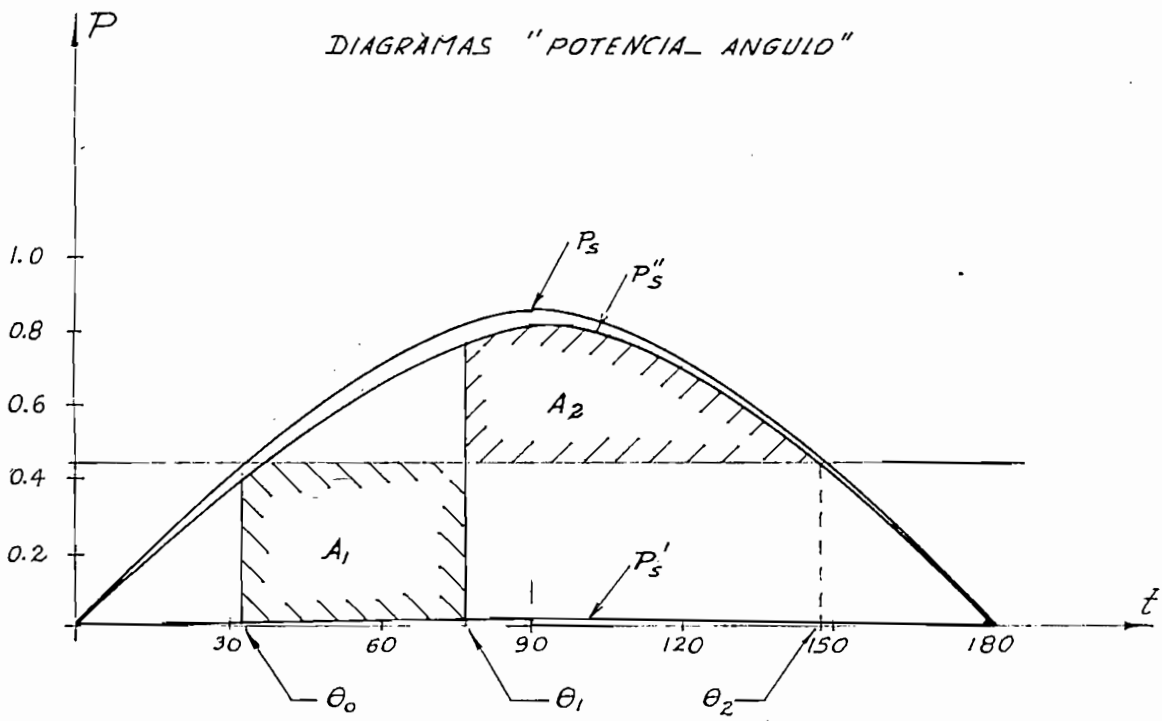


FIG. "L"

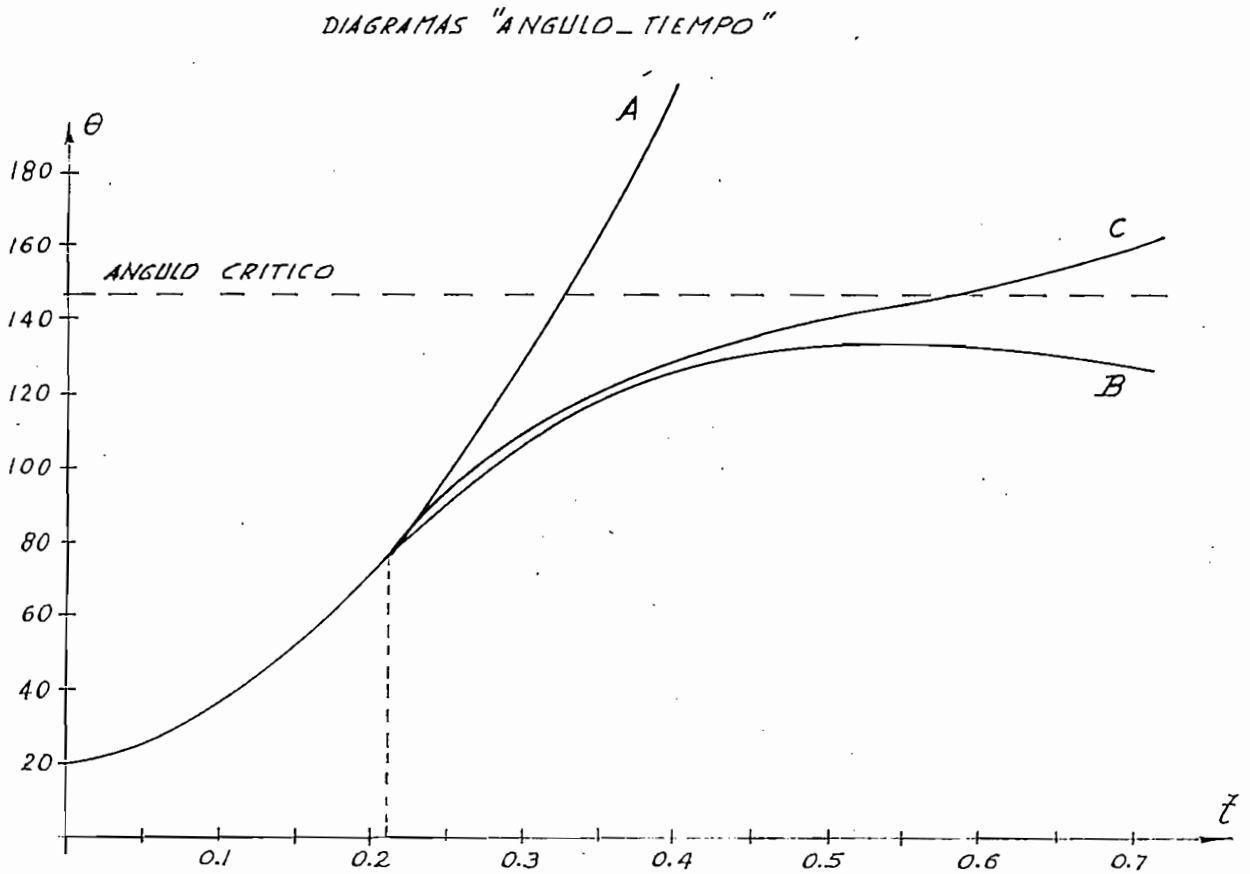


FIG. "L'

En la Fig. i' se han trazado los diagramas "ángulo-tiempo" o de "oscilación" por el método "paso por paso", cuya tabulación de valores están en la Tabla N^o 9. Se puede ver si la falla no se aísla (curva A), se pierde la estabilidad, pero en la segunda parte de la Tabla se considera que se aísla la falla a 0.20 seg. (curva B) que corresponde a un ángulo de aislación de la falla de 75.1° que está muy cerca del valor de $\theta_1 = 77^\circ$ seleccionado como ángulo máximo para aislar la falla con la condición de mantener la estabilidad. Si la falla se aísla a un tiempo mayor de 0.20 seg., digamos a 0.21 seg. (curva C), el ángulo θ llega a tener un valor superior del ángulo crítico $\theta_2 = 147.5^\circ$ y por tanto se pierde la estabilidad del sistema, por tanto la falla debe aislarse a un tiempo máximo de 0.20 seg.

TABLA N^o 9:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
t	θ	P_s	ΔP	d	Δt	ΔW	W	Δt	$\Delta \theta$	θ
0.0	32.0	0.0003	0.439	2155	0.025	53.9	53.9	0.05	2.7	34.7
0.05	34.7	0.0003	0.439	2155	0.05	107.7	161.6	0.05	8.1	42.8
0.10	42.8	0.0003	0.439	2155	0.05	107.7	269.3	0.05	13.5	56.3
0.15	56.3	0.0004	0.439	2155	0.05	107.7	377.0	0.05	18.8	75.1
0.20	75.1	0.0005	0.439	2155	0.05	107.7	484.7	0.05	24.2	99.3
0.25	99.3	0.0005	0.439	2155	0.05	107.7	592.4	0.05	29.6	128.9
0.30	128.9	0.0004	0.439	2155	0.05	107.7	700.1	0.05	35.0	163.9
0.35	163.9	0.0001	0.440	2160	0.05	108.0	808.1	0.05	40.4	204.3
0.40	204.3									

En esta primera parte de la Tabla se ha supuesto que la falla no se aísla y el cálculo se ha llevado suficientemente lejos para hacer notar que el ángulo θ sigue aumentando en su valor y sobrepasa el valor del ángulo crítico de 147.5°, por tanto se pierde la estabilidad del sistema (curva A). En la segunda parte de la Tabla, que se pondrá a continuación, se supone que la falla se despeja a un tiempo de 0.20 seg.

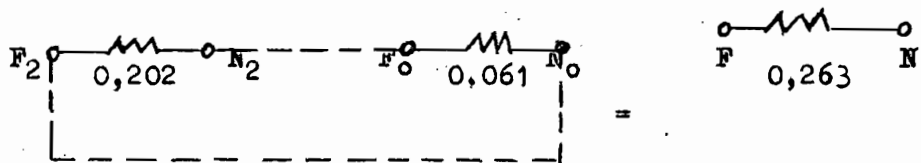
c.- Falla de UNA LINEA A TIERRA, a la salida:

1.- Condición "anterior" a la falla:

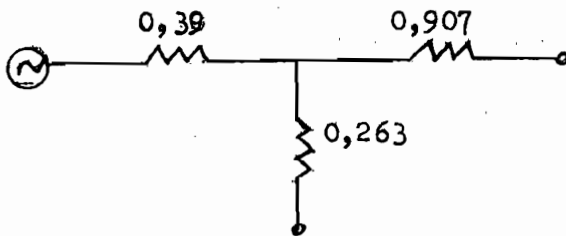
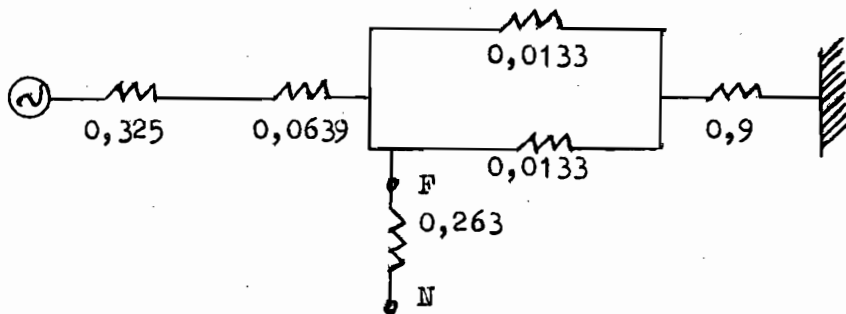
$$P_s = \underline{\underline{0,83 \cos(90 + \theta) \text{ PU}}}$$

2.- Condición "durante" la falla:

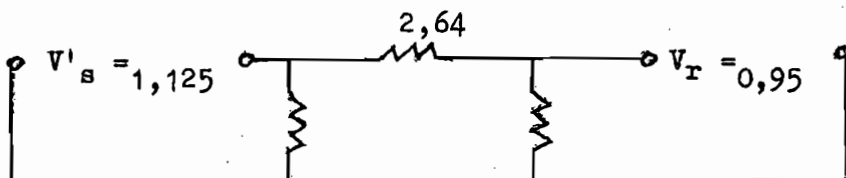
Para este tipo de falla, la conexión de las reactancias están en serie.



El circuito correspondiente para la condición "durante la falla de una línea a tierra", será el siguiente:



Efectuando la conversión de estrella a triángulo, se tiene:



La potencia de salida para la condición "durante" la falla, será:

$$P'_s = \frac{(1,125)(0,95)}{2,64} \cos(90 + \theta) \text{ PU}$$

$$= \underline{\underline{0,40 \cos(90 + \theta) \text{ PU}}}$$

3.- Condición "después" de la falla:

$$P''_s = \frac{-0,82 \cos(90 + \theta)}{\text{=====}} \text{ PU}$$

Cálculo del ángulo máximo de aislación de la falla para mantener la estabilidad:

Aplicando los valores encontrados anteriormente y calculando el valor de la relación r_1 para el presente caso, se determina el valor del ángulo θ_1 :

$$\begin{aligned} r_1 &= \frac{1,295}{2,64} \\ &= 0,49 \end{aligned}$$

Por tanto, se tiene:

$$\begin{aligned} \cos \theta_1 &= \frac{1,068 - 0,49 \times 0,8479 - 0,843}{0,996 - 0,49} \\ &= \frac{1,068 - 0,415 - 0,843}{0,506} \\ &= \frac{1,068 - 1,258}{0,506} \\ &= -\frac{0,190}{0,506} \\ &= -0,3755; \text{ de donde:} \end{aligned}$$

$$\theta_1 = \frac{112,1^\circ}{\text{=====}}$$

Es decir, que a un ángulo aproximadamente igual a $112,1^\circ$ se debe despejar la falla para mantener la estabilidad.

A continuación se trazan las curvas "potencia-ángulo" y "ángulo-tiempo" y se determinará el tiempo en que la falla debe aislarse para mantener la estabilidad.

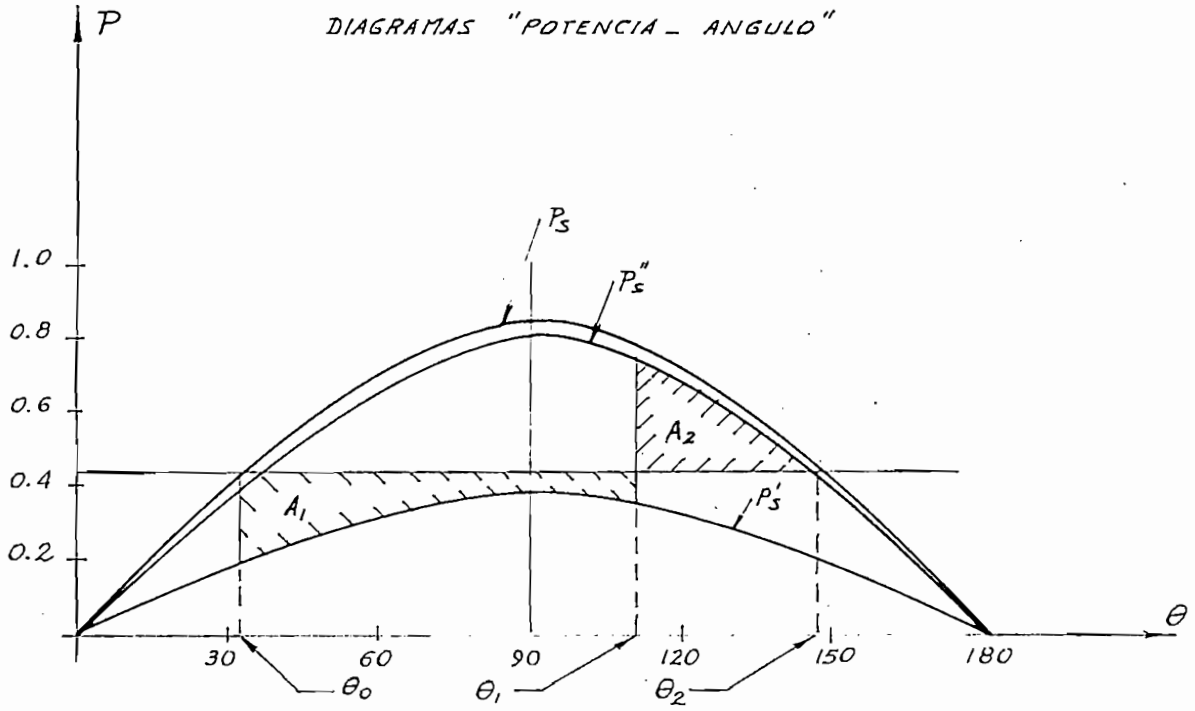


FIG. "j"

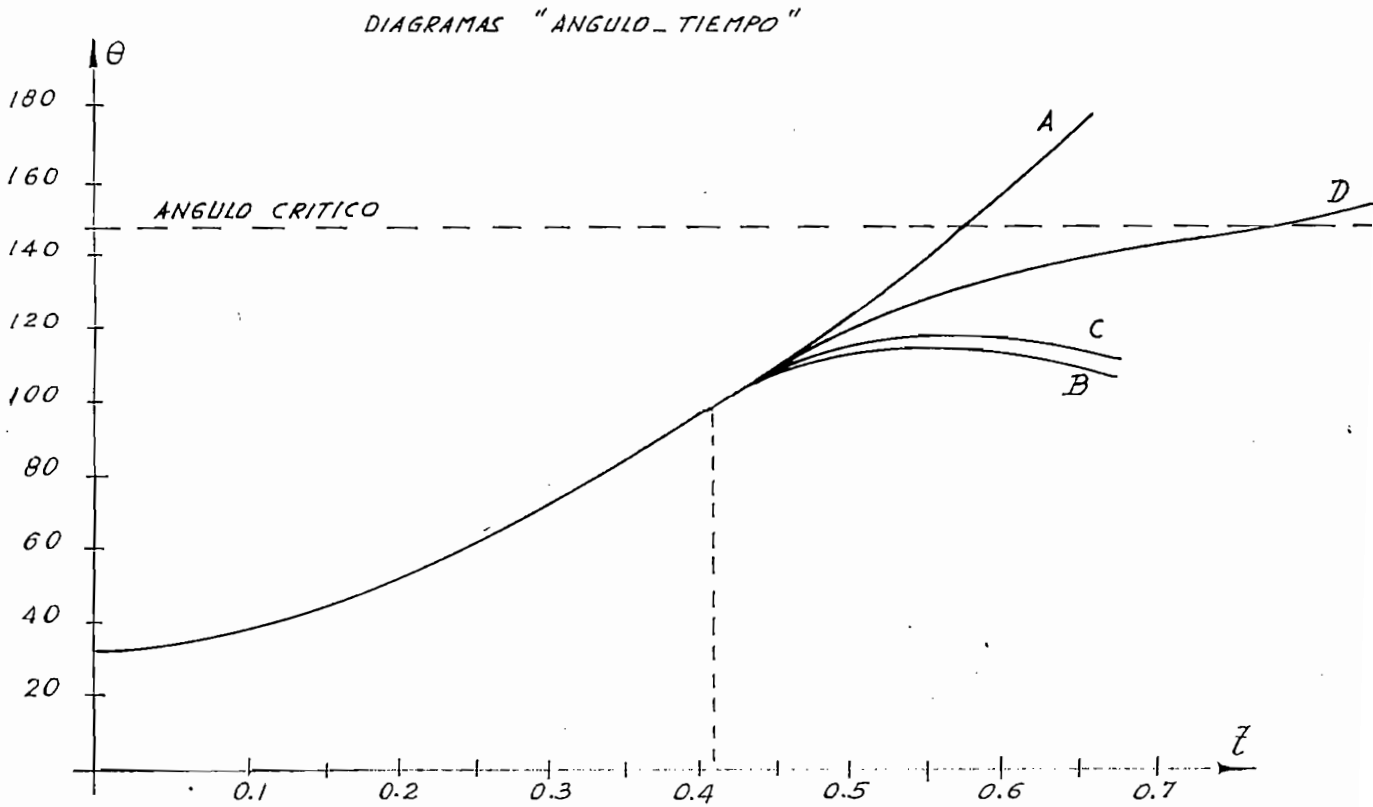


FIG. j'

La curva A de la Fig. j' es el resultado del cálculo llevado a cabo por el método "paso por paso" de la Tabla 10 e indica que se pier de la estabilidad si la falla no se aísla, pero si ésta se aísla a 0.40 ó a 0.41 seg. (curvas B y C), la estabilidad se conserva lo que no sucede si la falla se despeja a 0.45 seg. (curva D).

TABLA N^o 10:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
t	θ	P_B	ΔP	d	Δt	ΔW	W	Δt	$\Delta \theta$	θ
0.0	32.0	0.212	0.228	1119	0.025	28.0	28.0	0.05	1.4	33.4
0.05	33.4	0.220	0.220	1080	0.05	54.0	82.0	0.05	4.1	37.5
0.10	37.5	0.243	0.197	967	0.05	48.4	130.4	0.05	6.5	44.0
0.15	44.0	0.278	0.162	795	0.05	39.8	170.2	0.05	8.5	52.5
0.20	52.5	0.317	0.123	604	0.05	30.2	200.4	0.05	10.0	62.5
0.25	62.5	0.355	0.085	417	0.05	20.9	221.3	0.05	11.1	73.6
0.30	73.6	0.384	0.056	275	0.05	13.8	235.1	0.05	11.8	85.4
0.35	85.4	0.398	0.042	206	0.05	10.3	245.4	0.05	12.3	97.7
0.40	97.7	0.396	0.044	216	0.05	10.8	256.2	0.05	12.8	110.5
0.45	110.5	0.375	0.065	319	0.05	15.9	272.1	0.05	13.6	124.1
0.50	124.1	0.331	0.109	535	0.05	26.8	298.9	0.05	14.9	139.0
0.55	139.0	0.262	0.178	874	0.05	43.7	342.6	0.05	17.1	156.1
0.60	156.1	0.162	0.278	1365	0.05	68.3	410.9	0.05	20.5	176.6
0.65	176.6									

Falla aislada a 0.40 seg. (curva B):

-0.40	97.7	0.396	0.044	216	0.025	5.4	250.8			
+0.40	97.7	0.813	-0.373	-1831	0.025	-45.8	205.0	0.05	10.2	107.9
0.45	107.9	0.780	-0.340	-1669	0.05	-83.5	121.5	0.05	6.1	114.0
0.50	114.0	0.749	-0.309	-1517	0.05	-75.9	45.6	0.05	2.3	116.3
0.55	116.3	0.735	-0.295	-1448	0.05	-72.4	-26.8	0.05	-1.3	115.0
0.60	115.0	0.743	-0.303	-1488	0.05	-74.4	-101.2	0.05	-5.1	109.9
0.65	109.9									

Se aísla la falla a 0.40 seg. y se mantiene la estabilidad ya que el ángulo θ (columna 2) comienza a regresar a su valor inicial de operación.

Falla aislada a 0.41 seg.(curva C):

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
t	θ	P_S	ΔP	α	Δt	ΔW	W	Δt	$\Delta \theta$	θ
-0.41	100.2	0.394	0.046	226	0.025	5.7	253.3			
+0.41	100.2	0.807	-0.367	-1802	0.025	-45.0	298.3	0.05	10.4	110.6
0.46	110.6	0.767	-0.327	-1605	0.05	-80.2	128.1	0.05	6.4	117.0
0.51	117.0	0.731	-0.291	-1429	0.05	-71.4	56.7	0.05	2.8	119.8
0.56	119.8	0.711	-0.271	-1331	0.05	-66.5	-9.8	0.05	-0.5	119.3
0.61	119.3	0.715	-0.275	-1350	0.05	-67.5	-77.3	0.05	-3.9	115.4
0.66	115.4									

Falla aislada a 0.45 seg.(curva D):

-0.45	110.5	0.375	0.065	1319	0.025	8.0	264.2			
+0.45	110.5	0.768	-0.328	-1610	0.025	-40.3	223.9	0.05	11.2	121.7
0.50	121.7	0.698	-0.258	-1267	0.05	-63.3	160.6	0.05	8.0	129.7
0.55	129.7	0.631	-0.191	-938	0.05	-46.9	113.7	0.05	5.7	135.4
0.60	135.4	0.576	-0.136	-668	0.05	-33.4	80.3	0.05	4.0	139.4
0.65	139.4	0.534	-0.094	-462	0.05	-23.1	57.2	0.05	2.9	142.3
0.70	142.3	0.501	-0.061	-300	0.05	-15.0	42.2	0.05	2.1	144.4
0.75	144.4	0.477	-0.037	-182	0.05	-9.1	33.1	0.05	1.6	146.0
0.80	146.0	0.458	-0.018	-88	0.05	-4.4	28.7	0.05	1.4	147.4
0.85	147.4	0.442	-0.002	-10	0.05	-0.5	28.2	0.05	1.4	148.8
0.90	148.8	0.425	0.015	74	0.05	3.7	31.9	0.05	1.6	150.4
0.95	150.4									

Se han tabulado los valores correspondientes para el trazo de las curvas "ángulo-tiempo" de "oscilación" de la Fig. j' que indican que la estabilidad se puede conservar si la falla se aísla a 0.40 ó a 0.41 seg., pero no a un tiempo mayor como 0.45 seg.

c'.- Falla de UNA LINEA A TIERRA, a la llegada:

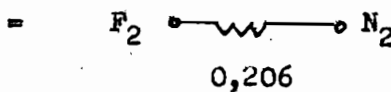
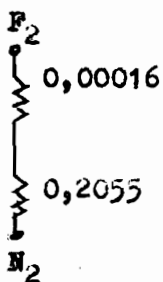
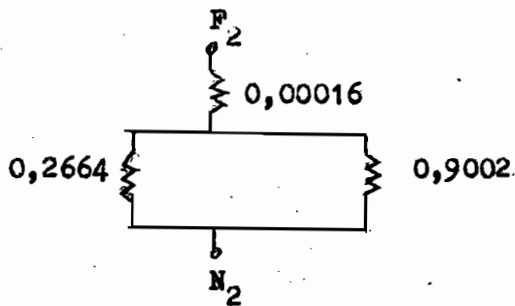
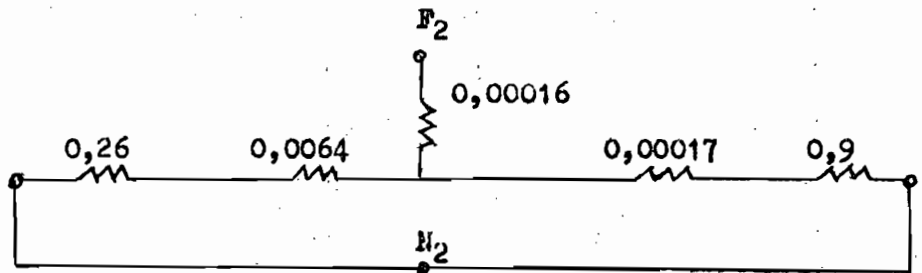
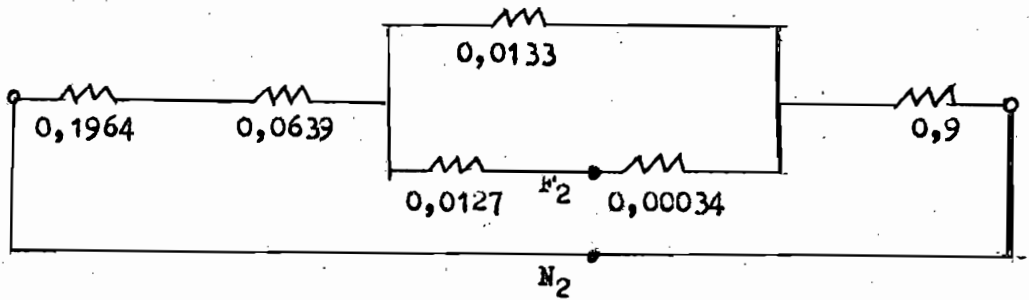
1.- Condición "anterior" a la falla:

$$P_s = \frac{0,83 \cos(90 + \theta)}{\dots} \text{ PU}$$

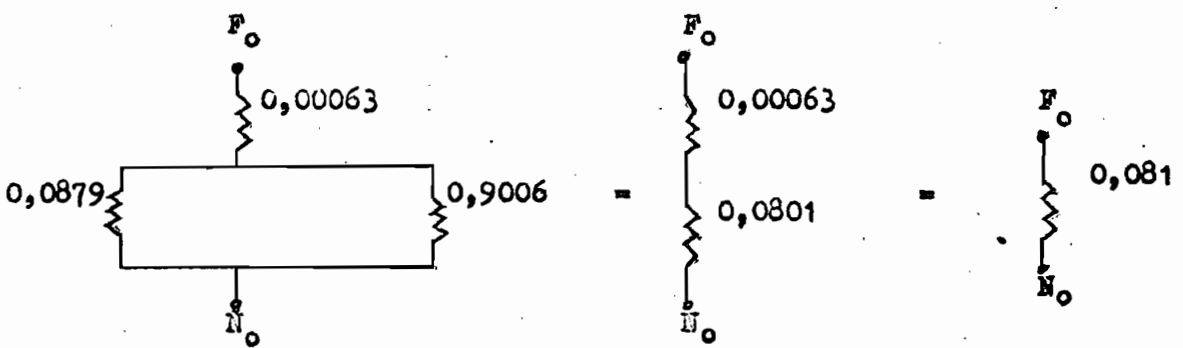
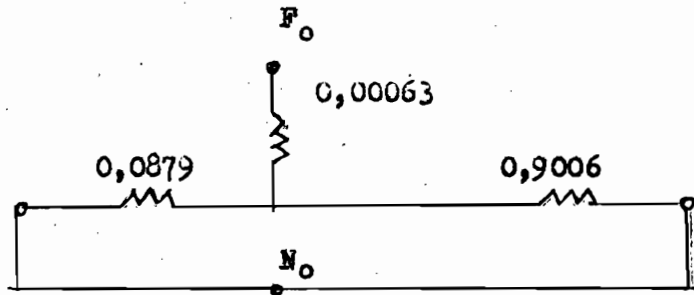
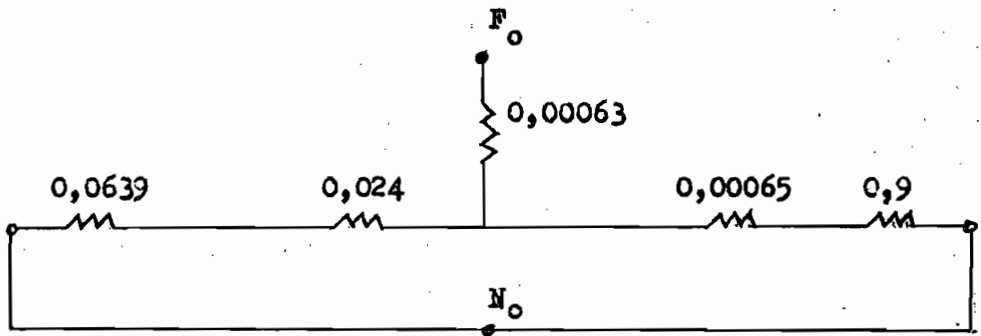
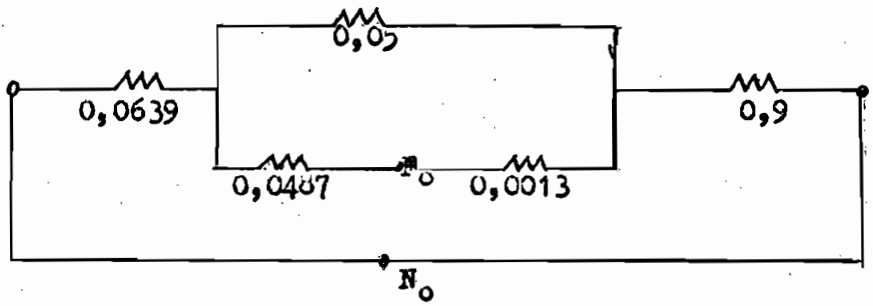
2.- Condición "durante" la falla:

Se trata del mismo tipo de falla que en el caso anterior, pero la localización cambia, por tanto se varía un poco en el valor de las reactancias y se tiene la misma conexión en serie de las secuencias; primeramente se determinan el valor de las reactancias de secuencias para fallas localizadas "a la llegada":

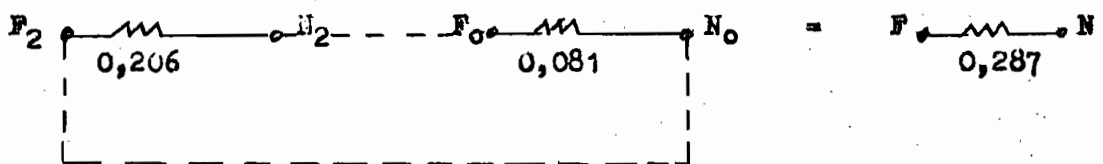
Secuencia negativa:



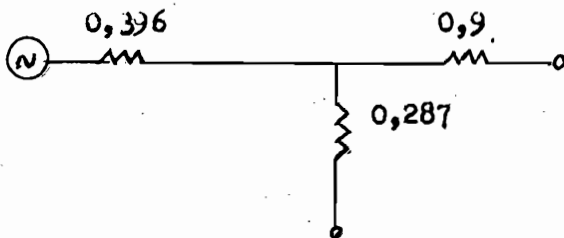
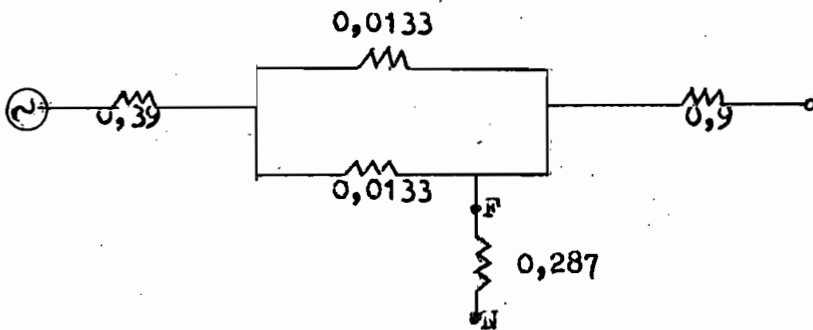
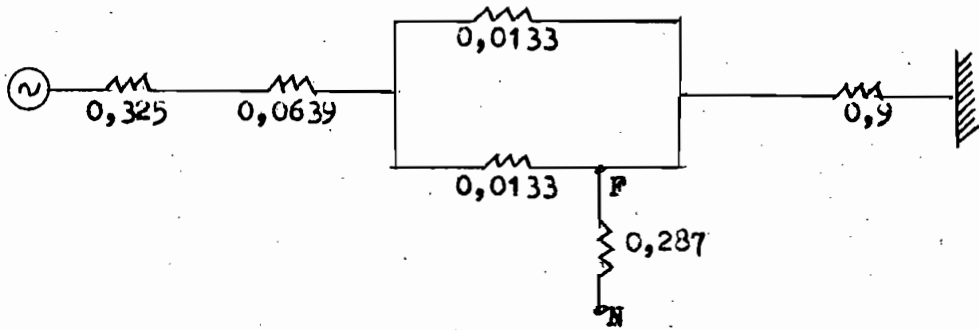
Secuencia cero:



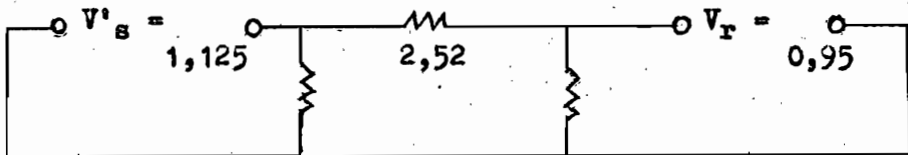
La reactancia equivalente serie:



El circuito correspondiente para la condición "durante la falla de una línea a tierra", a la llegada, será:



Efectuando la conversión de estrella a triángulo:



Por tanto:

$$P'_s = - \frac{(1,125)(0,95)}{2,52} \cos(90 + \theta) \text{ PU}$$

$$= - 0,42 \cos(90 + \theta) \text{ PU}$$

3.- Condición "después" de la falla:

$$P''_s = \frac{-0,82 \cos(90 + \theta)}{\text{-----}} \text{ PU}$$

Con los datos ya calculados de las potencias eléctricas de salida para las tres condiciones, como con el valor de sus respectivas reacciones, se calcula a continuación el ángulo de "aislación de la falla" para mantener la estabilidad y el tiempo correspondiente a este ángulo en que la falla debe despejarse.

Angulo de aislación de la falla (θ_1):

$$\begin{aligned} r_1 &= \frac{1,295}{2,52} \\ &= 0,514 \end{aligned}$$

Reemplazando valores:

$$\begin{aligned} \cos \theta_1 &= \frac{1,068 - 0,514 \times 0,8479 - 0,843}{0,996 - 0,514} \\ &= \frac{1,068 - 0,436 - 0,843}{0,482} \\ &= \frac{1,068 - 1,279}{0,482} \\ &= \frac{-0,211}{0,482} \\ &= -0,4377 ; \text{ de donde:} \end{aligned}$$

$$\theta_1 = \underline{\underline{115,9^\circ}}$$

Este es el valor máximo que puede llegar θ para despejar la falla con la condición de mantener la estabilidad.

DIAGRAMAS "POTENCIA-ANGULO"

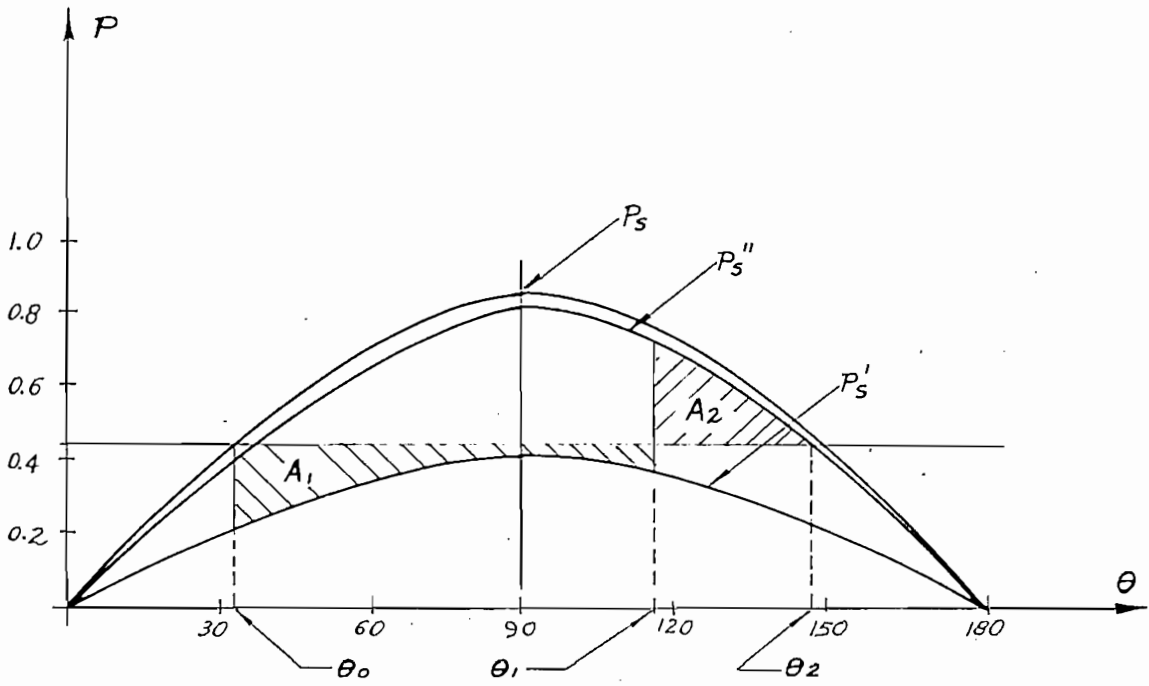


FIG. "K"

DIAGRAMAS "ANGULO-TIEMPO"

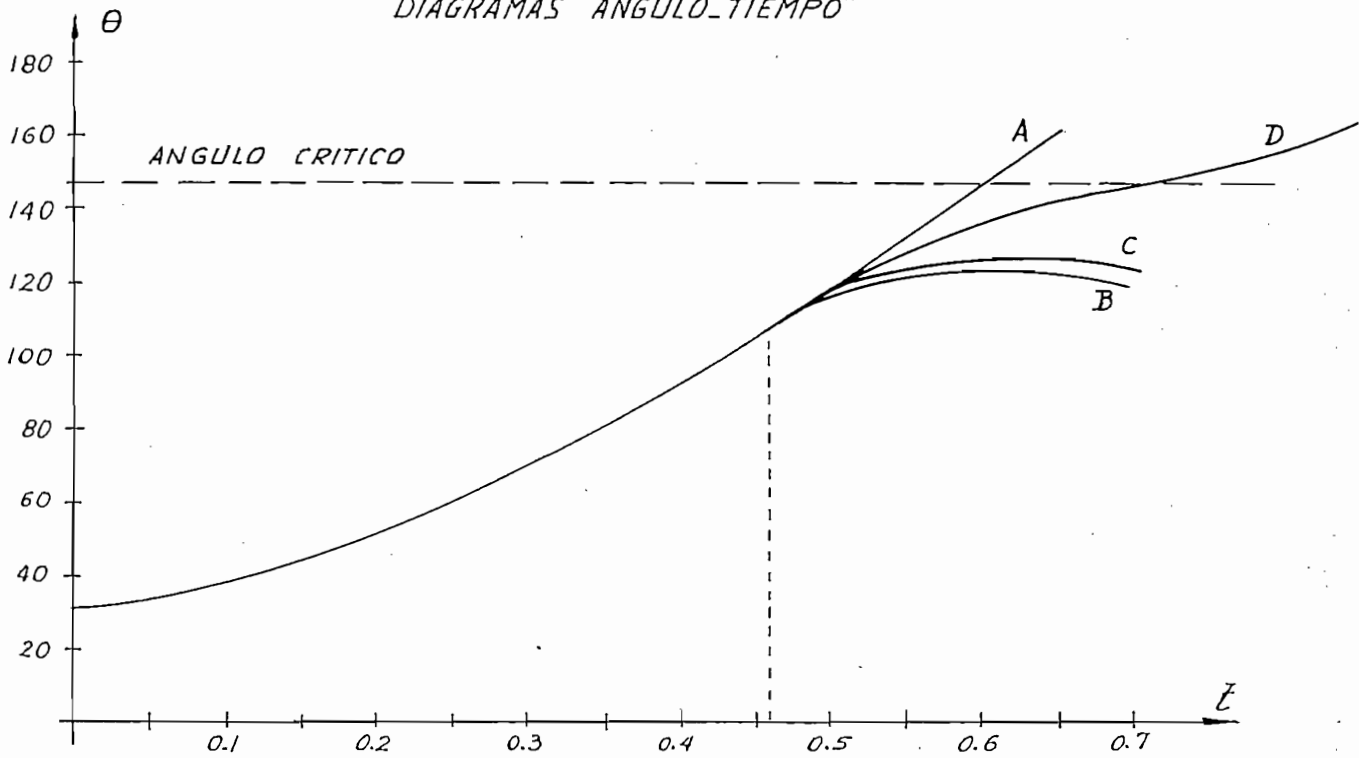


FIG. K'

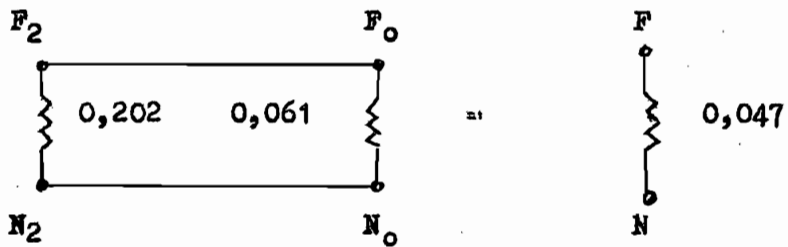
d.- Falla de DOS LINEAS A TIERRA, a la salida:

1.- Condición "anterior" a la falla:

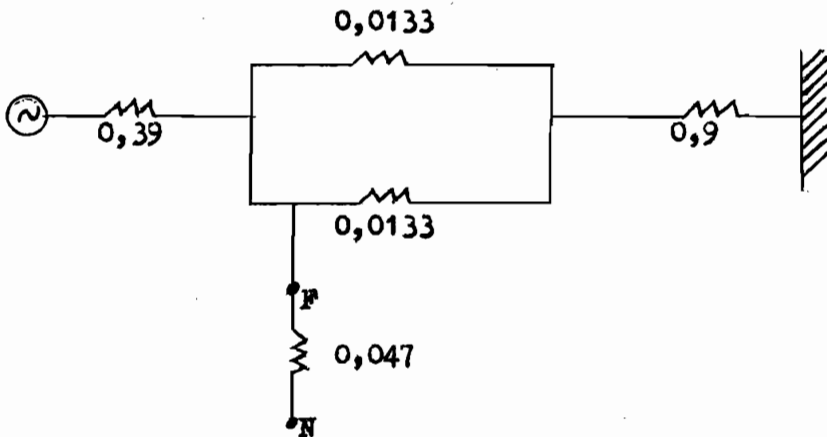
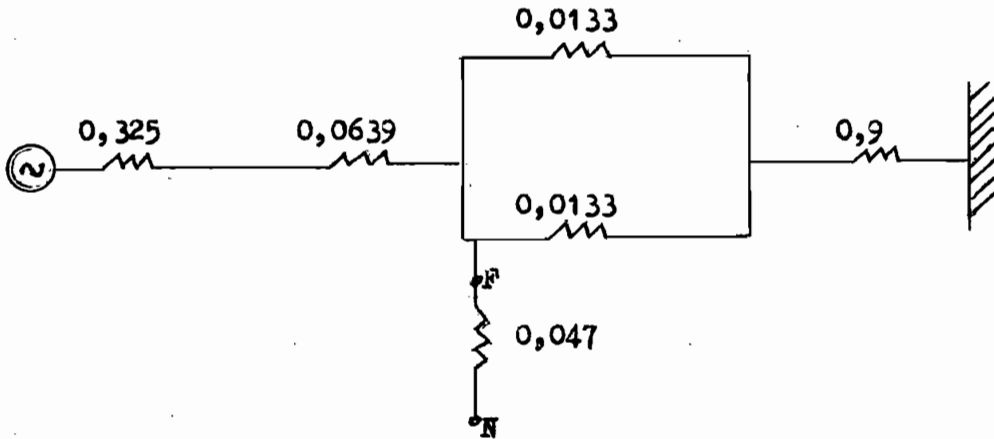
$$P_s = \frac{-0,83 \cos(90 + \theta)}{\dots} \text{ PU}$$

2.- Condición "durante" la falla:

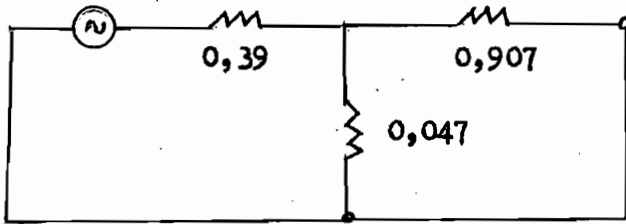
Para la falla de "dos líneas a tierra", la conexión de las secuencias positiva, negativa y cero está en paralelo:



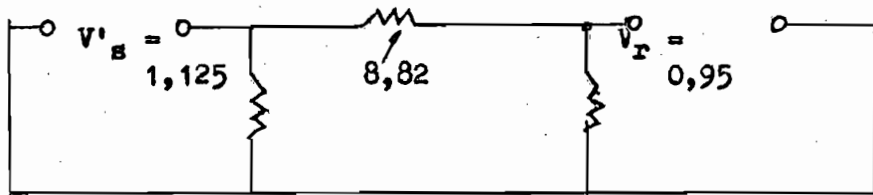
El diagrama de reactancias del circuito, será:



que equivale a un sistema en estrella:



Efectuando la conversión de estrella a triángulo, se tiene:



Por tanto, la potencia eléctrica de salida para la condición "durante" la falla de dos líneas a tierra, será:

$$P'_S = - \frac{(1,125)(0,95)}{8,82} \cos(90 + \theta) \text{ PU}$$

$$= - \frac{0,12 \cos(90 + \theta)}{\text{=====}} \text{ PU}$$

Angulo de "aislación" de la falla:

$$r_1 = 1,295/8,82$$

$$= 0,1468$$

Reemplazando valores, se tiene:

$$\cos \theta_1 = \frac{1,068 - 0,1468 \times 0,8479 - 0,843}{0,996 - 0,1468}$$

$$= \frac{1,068 - 0,124 - 0,843}{0,849}$$

$$= \frac{0,101}{0,849}$$

$$= 0,119; \text{ de donde:}$$

$$\theta_1 = 83,2^\circ$$

$$\text{=====}$$

Este es el valor del ángulo máximo que puede alcanzar θ para aislar la falla con la condición de mantener la estabilidad.

DIAGRAMAS "POTENCIA-ANGULO"

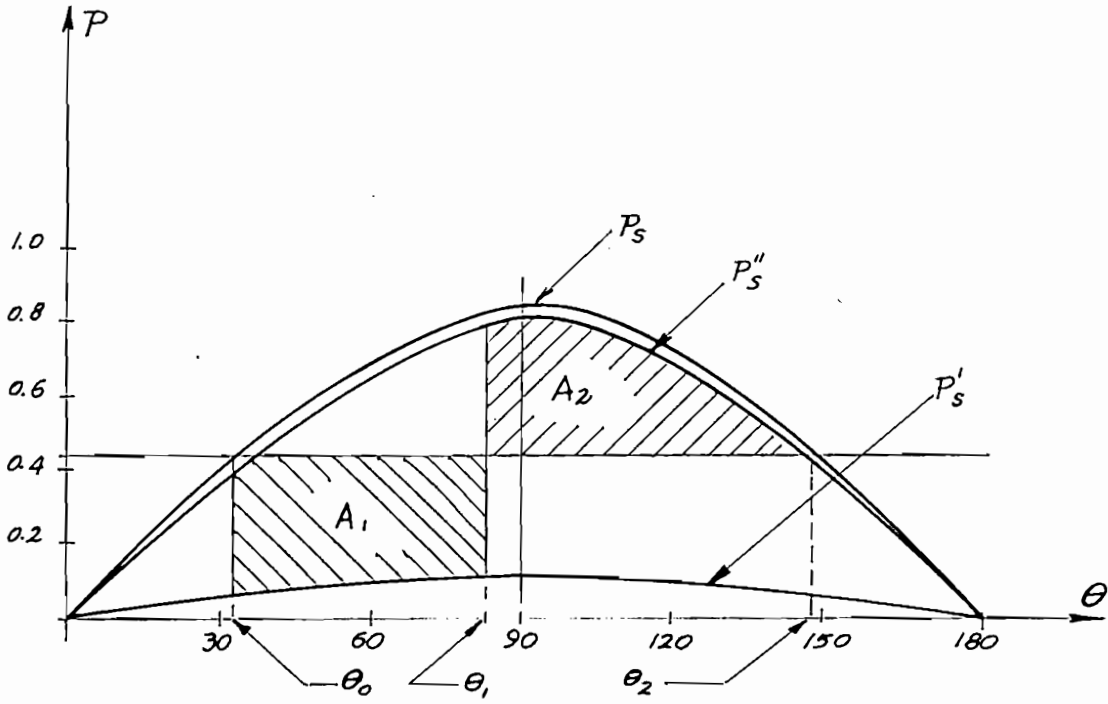


FIG. "Z"

DIAGRAMAS "ANGULO-TIEMPO"

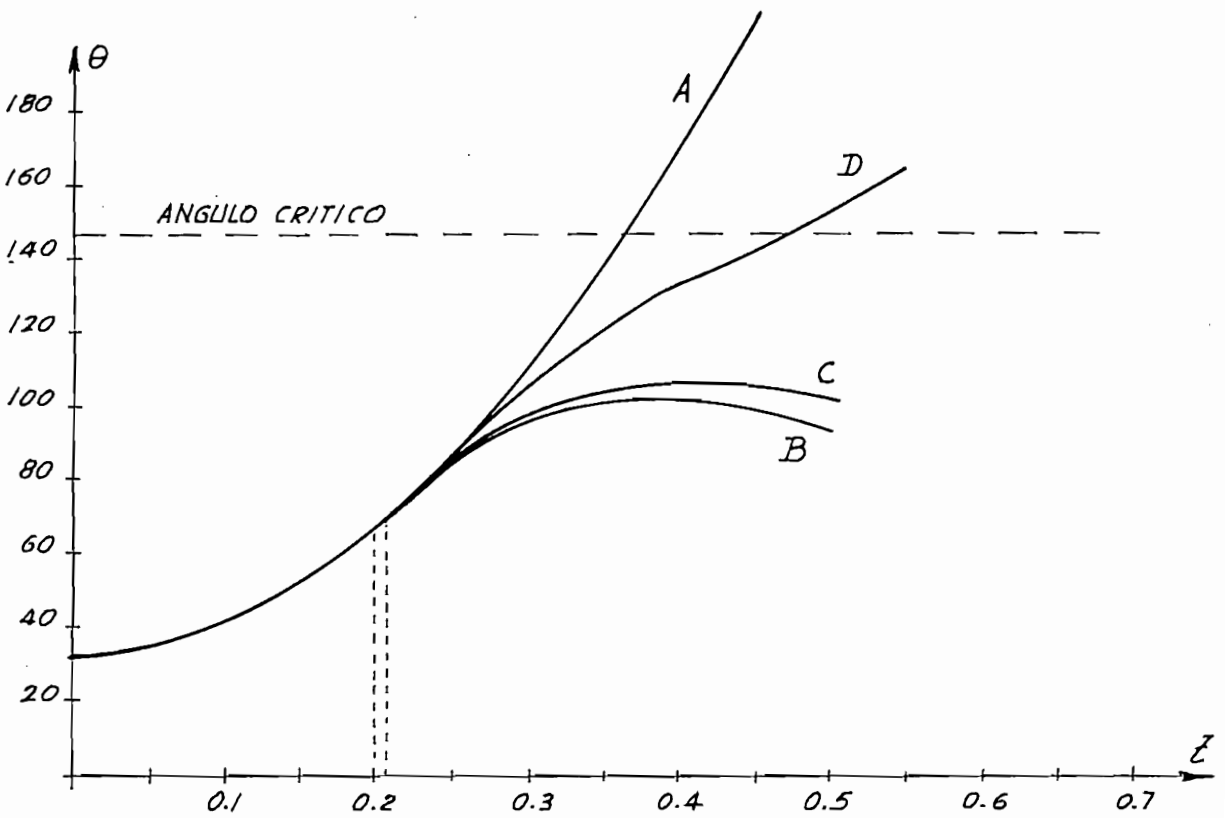


FIG. Z'

Falla aislada a 0.21 seg. (curva C):

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
t	θ	P_B	ΔP	α	Δt	ΔW	W	Δt	$\Delta \theta$	θ
-0.21	71.3	0.114	0.326	1601	0.025	40.0	367.0			
+0.21	71.3	0.777	-0.337	-1655	0.025	-41.4	325.6	0.05	16.3	87.6
0.26	87.6	0.819	-0.379	-1861	0.05	-93.0	232.6	0.05	11.6	99.2
0.31	99.2	0.809	-0.369	-1812	0.05	-90.6	142.0	0.05	7.1	106.3
0.36	106.3	0.787	-0.347	-1704	0.05	-85.2	56.8	0.05	2.8	109.1
0.41	109.1	0.775	-0.335	-1645	0.05	-82.3	-25.5	0.05	-1.3	107.8
0.46	107.8	0.781	-0.341	-1674	0.05	-83.7	-109.2	0.05	-5.5	102.3
0.51	102.3									

Falla aislada a 0.25 seg. (curva D):

-0.25	87.6	0.120	0.320	1571	0.025	39.3	430.8			
+0.25	87.6	0.819	-0.379	-1861	0.025	-46.5	384.3	0.05	19.2	106.8
0.30	106.8	0.785	-0.345	-1694	0.05	-84.7	299.6	0.05	15.0	121.8
0.35	121.8	0.697	-0.257	-1262	0.05	-63.1	236.5	0.05	11.8	133.6
0.40	133.6	0.594	-0.154	-756	0.05	-37.8	198.7	0.05	9.9	143.5
0.45	143.5	0.488	-0.048	-236	0.05	-11.8	186.9	0.05	9.3	152.8
0.50	152.8	0.375	0.065	319	0.05	15.9	202.8	0.05	10.1	162.9
0.55	162.9									

Como se puede ver, siempre que la falla se aisle a 0.25 seg. ó a un tiempo mayor, el ángulo θ llegar a tener un valor superior al valor máximo que puede alcanzar θ y por tanto se pierde la estabilidad del sistema, lo que no ocurre si la falla se aísla a 0.20 ó a 0.21 seg.

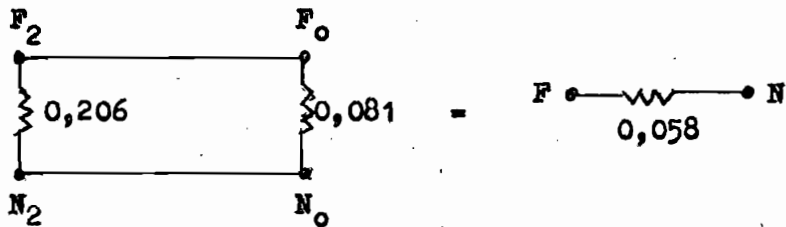
d'.- Falla de DOS LINEAS A TIERRA, a la llegada:

1.- Condición "anterior" a la falla:

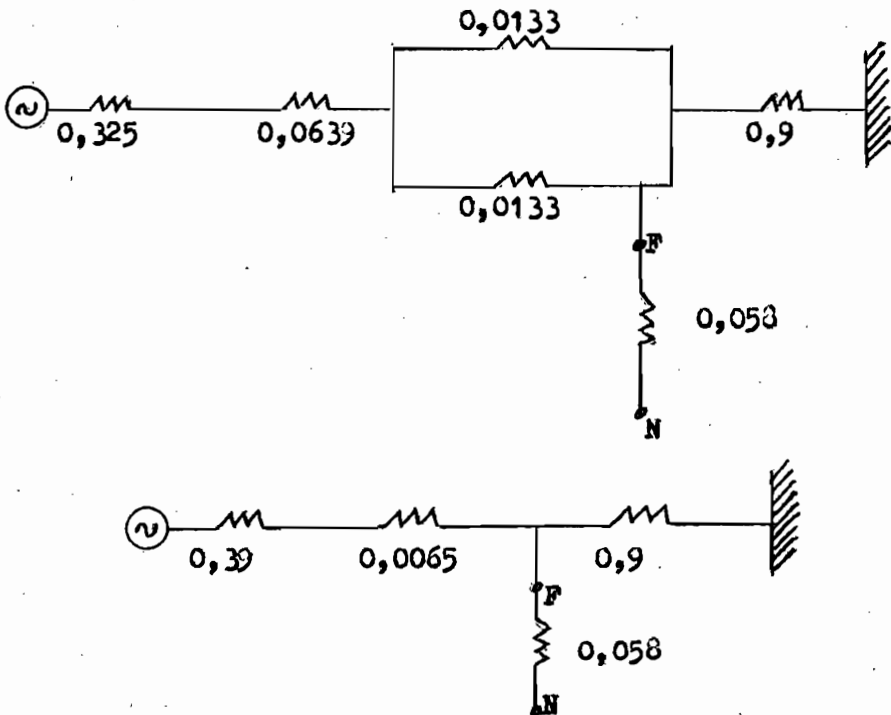
$$P_s = \frac{-0,83 \cos(90 + \theta)}{\dots} \text{ PU}$$

2.- Condición "durante" la falla:

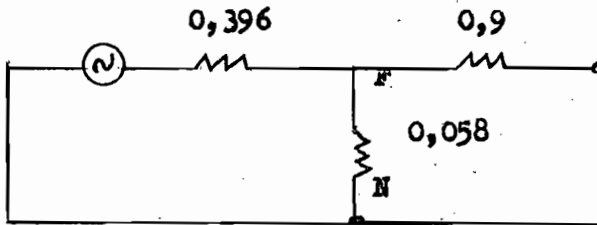
Por tratarse del mismo tipo de falla que el caso anterior, la conexión de las secuencias está en paralelo, pero las reactancias equivalentes van a variar un poco en su valor respecto al caso estudiado, ya que se trata de falla localizada a la llegada a la Subestación Norte.



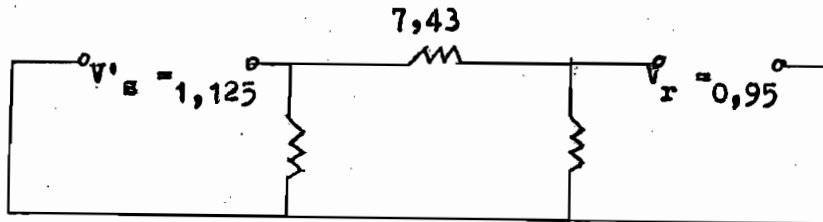
El circuito correspondiente para la condición durante la "falla de dos líneas a tierra", a la llegada, será:



Equivale a un sistema conectado en estrella:



Convirtiendo a triángulo:



Por tanto, la potencia eléctrica de salida para la condición

"durante la falla de dos líneas a tierra", a la llegada, será:

$$P'_s = - \frac{(1,125) (0,95)}{7,43} \cos(90 + \theta) \text{ PU}$$

$$= - \frac{0,14 \cos(90 + \theta)}{\text{-----}} \text{ PU}$$

Para el ángulo de "aislación de la falla":

$$r_1 = \frac{1,295}{7,43}$$

$$= 0,1740$$

Reemplazando valores:

$$\cos \theta_1 = \frac{1,068 - 0,174 \times 0,8479 - 0,843}{0,996 - 0,174}$$

$$= \frac{1,068 - 0,147 - 0,843}{0,822}$$

$$= \frac{0,078}{0,822}$$

$$= 0,0949 ; \text{ de donde:}$$

$$\theta_1 = 84,5^\circ$$

Este es el valor máximo que puede alcanzar θ para despejar la falla y permitir que se mantenga la estabilidad.

DIAGRAMAS "POTENCIA - ANGULO"

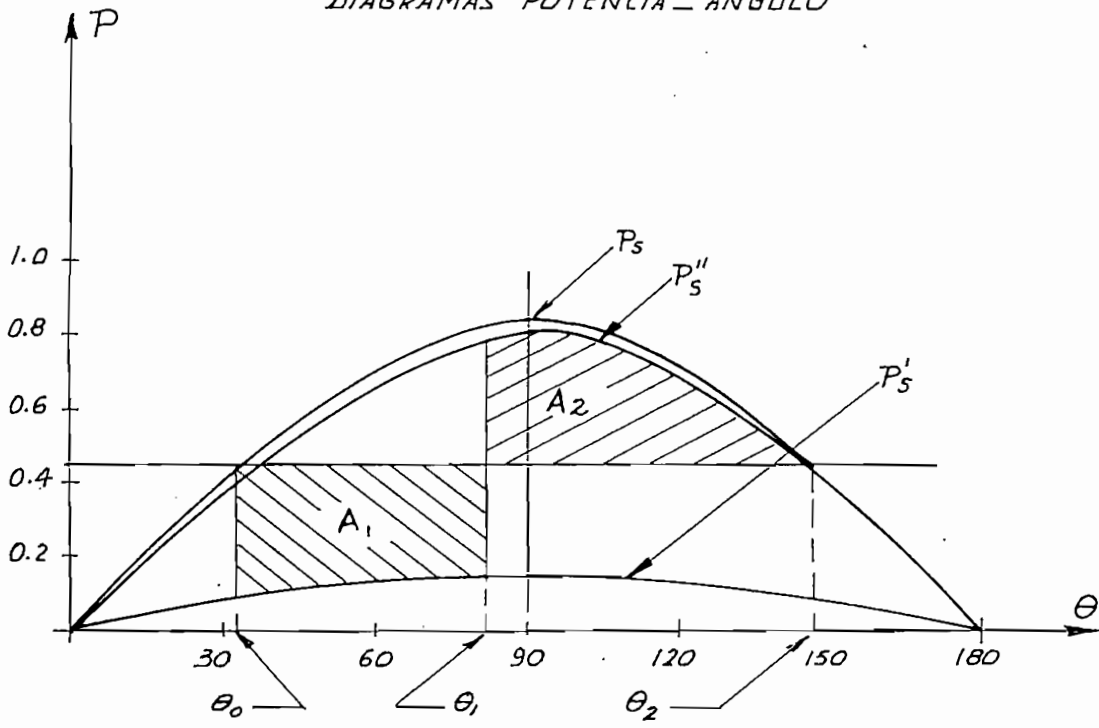


FIG. "m."

DIAGRAMAS "ANGULO - TIEMPO"

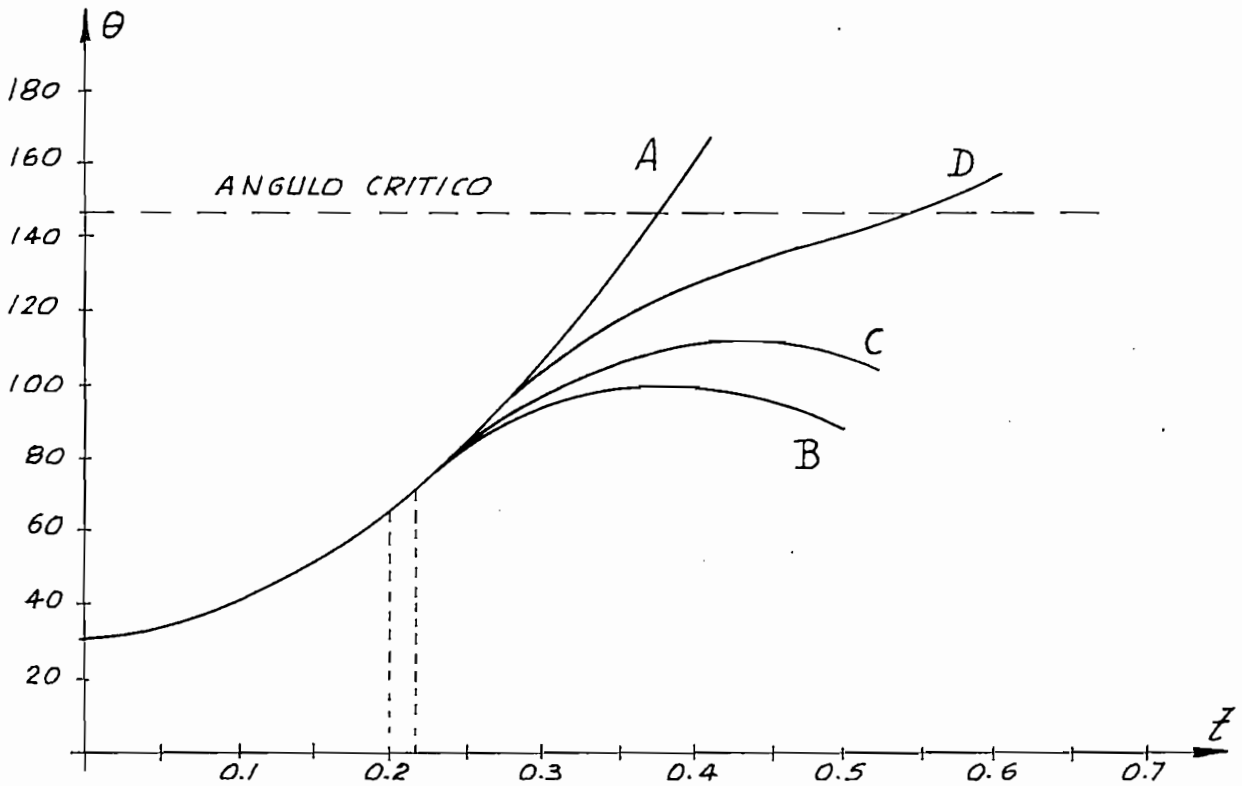


FIG. m.'

Falla aislada a 0.22 seg. (curva C):

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
t	θ	P_B	ΔP	α	Δt	ΔW	W	Δt	$\Delta \theta$	θ
-0.22	73.4	0.134	0.306	1502	0.025	37.6	368.0			
+0.22	73.4	0.786	-0.346	-1699	0.025	-42.5	325.5	0.05	16.3	89.7
0.27	89.7	0.820	-0.380	-1866	0.05	-93.3	232.2	0.05	11.6	101.3
0.32	101.3	0.804	-0.364	-1887	0.05	-89.3	142.9	0.05	7.1	108.4
0.37	108.4	0.778	-0.338	-1659	0.05	-82.9	60.0	0.05	3.0	111.4
0.42	111.4	0.763	-0.323	-1586	0.05	-79.3	-19.3	0.05	-1.0	110.4
0.47	110.4	0.768	-0.328	-1610	0.05	-80.5	-99.8	0.05	-5.0	105.4
0.52	105.4									

Falla aislada a 0.25 seg. (curva D):

-0.25	85.6	0.139	0.301	1478	0.025	36.9	413.1			
+0.25	85.6	0.817	-0.377	-1851	0.025	-46.3	366.8	0.05	18.3	103.9
0.30	103.9	0.796	-0.356	-1748	0.05	-87.4	279.4	0.05	14.0	117.9
0.35	117.9	0.725	-0.285	-1399	0.05	-70.0	209.4	0.05	10.5	128.4
0.40	128.4	0.643	-0.203	-997	0.05	-49.9	159.5	0.05	8.0	136.4
0.45	136.4	0.565	-0.125	-614	0.05	-30.7	128.8	0.05	6.4	142.8
0.50	142.8	0.497	-0.057	-280	0.05	-14.0	114.8	0.05	5.7	148.5
0.55	148.5	0.428	0.012	59	0.05	3.0	117.8	0.05	5.9	154.4
0.60	154.4									

Por tanto, la falla debe despejarse en un tiempo de 0.20 ó 0.22 seg. pero no a 0.25 seg., como se puede ver el valor del ángulo correspondiente a 0.25 seg. es de 85.6° que es superior al valor de θ_1 de 84.5° seleccionado como ángulo de aislación de la falla y el valor de θ sigue creciendo y llega a tener un valor superior del ángulo crítico y por consiguiente no se puede mantener la estabilidad del sistema.

e.- Falla de TRES LINEAS A TIERRA, a la salida:

1.- Condición "anterior" a la falla:

$$P_s = - \frac{0,83 \cos(90 + \theta)}{\text{-----}} \text{ PU}$$

2.- Condición "durante" la falla:

Es similar al caso "b" de falla de "tres líneas" después de las barras colectoras, ya que también para el presente tipo de falla, la que interviene en el cálculo de la potencia de salida para la condición "durante" la falla, es la reactancia equivalente de secuencia positiva, luego:

$$P'_s = - \frac{0,00048 \cos(90 + \theta)}{\text{-----}} \text{ PU}$$

3.- Condición "después" de la falla:

$$P''_s = - \frac{0,82 \cos(90 + \theta)}{\text{-----}} \text{ PU}$$

El ángulo de aislación de la falla para mantener la estabilidad, será igual al calculado para el caso "b", por tanto:

$$\theta_1 = \frac{77^\circ}{\text{-----}}$$

Los diagramas "potencia-ángulo" y "ángulo-tiempo" corresponden a los que se han dibujado en las Figuras "i" e "i'", respectivamente de la página 103. La tabulación de dichos valores, corresponden a los calculados en la Tabla N° 9.

Por tanto, para la falla de tres líneas a tierra a la salida, se harán las mismas anotaciones y conclusiones anotadas para el caso b.

e'.- Falla de TRES LINEAS A TIERRA, a la llegada:

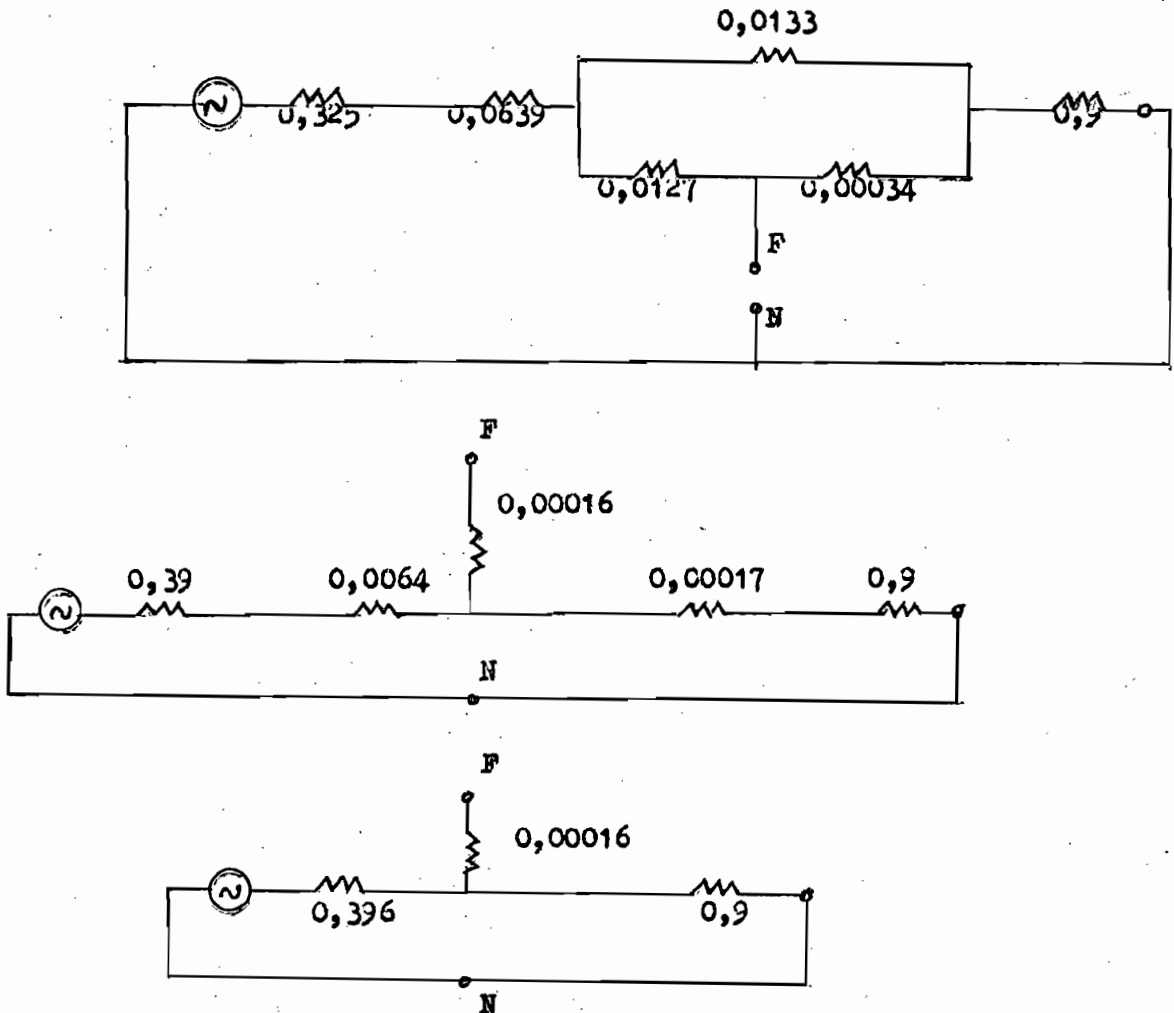
1.- Condición "anterior" a la falla:

$$P_s = \frac{-0,83 \cos(90 + \theta)}{\text{-----}} \text{ PU}$$

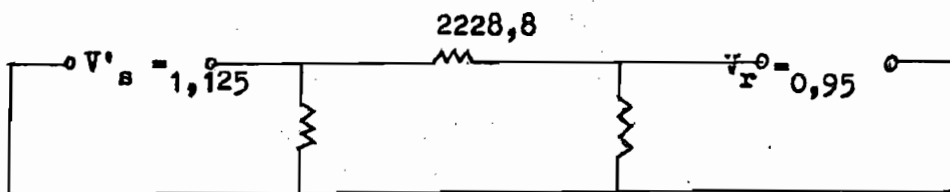
2.- Condición "durante" la falla:

La reactancia equivalente de secuencia positiva es la única que se toma en cuenta para este tipo de falla:

Secuencia positiva:



Efectuando la reducción de estrella a triángulo, se tiene:



Por tanto, la potencia eléctrica de salida para la condición "durante la falla de tres líneas a tierra", será:

$$P'_s = - \frac{(1,125)(0,95)}{2228,8} \cos(90 + \theta) \quad \text{PU}$$

$$= - \frac{0,00048 \cos(90 + \theta)}{\text{-----}} \quad \text{PU}$$

3.- Condición "después" de la falla:

$$P''_s = - \frac{0,82 \cos(90 + \theta)}{\text{-----}} \quad \text{PU}$$

Angulo de aislación de la falla:

$$r_1 = \frac{1,295}{2228,8}$$

$$= 0,0006$$

Reemplazando valores, se tiene:

$$\cos \theta_1 = \frac{1,068 - 0,0006 \times 0,8479 - 0,843}{0,996 - 0,0006}$$

$$= \frac{1,068 - 0,0005 - 0,843}{0,995}$$

$$= \frac{0,224}{0,995}$$

$$= 0,2251; \text{ de donde:}$$

$$\theta_1 = 77^\circ$$

Como se puede ver, los valores de las potencias de salida para las tres condiciones, como el valor de θ_1 son iguales a los calculados para el caso b, por tanto para el presente caso los diagramas "potencia-ángulo" y "ángulo-tiempo" son los mismos que los trazados en las Figuras "i" é "i'" de la pág. 103; por tanto, también la tabulación de valores se hará referencia a la Tabla N^o 9.

A continuación se demuestra o se chequea, por el criterio de "la igualdad de áreas", que para todos y cada uno de los tipos de falla que se ha estudiado, se mantiene la estabilidad. Para esta comprobación se tomará como referencia las curvas "potencia-ángulo" que se han dibujado anteriormente, en las que, según el criterio de la igualdad de áreas, las áreas A_1 y A_2 deben ser iguales para mantener la estabilidad del sistema. Para esto debe cumplirse la siguiente relación:

$$\int_{\theta_0}^{\theta_1} (P_0 - P'_s \text{ sen } \theta) d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} (P_0 - P''_s \text{ sen } \theta) d\theta = 0 \quad (29)$$

Efectuando la integración, se tiene:

$$0 = P_0(\theta_1 - \theta_2) - r_1 P_s (\cos \theta_0 - \cos \theta_1) + P_0(\theta_2 - \theta_1) - r_2 P_s (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \quad (30)$$

En donde:

P_0 = potencia de entrada, que se considera constante, cuyo valor se calculó ser igual a 0.833 PU para el caso de máxima carga y de 0.44 PU para el caso de mínima carga.

θ_0 = ángulo inicial de operación.

θ_1 = ángulo máximo de despeje de la falla, para mantener la estabilidad.

θ_2 = ángulo crítico ó ángulo máximo que puede alcanzar θ , sobre el cual el sistema es inestable y para valores menores el sistema es estable.

$r_1 = X_S/X'_S$, relación de las reactancias equivalentes antes y durante la falla.

$r_2 = X_S/X''_S$, relación de las reactancias equivalentes antes y después de la falla.

Como se ha calculado ya todos estos valores, se procede a reemplazarlos en la ecuación (30), haciendo referencia a los diagramas "potencia-ángulo" para cada tipo de falla.

A.- Con máxima carga:

a.- Falla de línea a línea, después de las barras colectoras:

Datos:

$$P_0 = 0.888 \text{ PU}$$

$$P_S = 1.12 \text{ PU}$$

$$\theta_0 = 52.4^\circ ; \theta_1 = 72^\circ ; \theta_2 = 126.4^\circ$$

$$r_1 = 0.425 ; r_2 = 0.988$$

Referencia: Fig. "a", página 41.

Reemplazando valores en ecuación (30), se tiene:

$$0.888(72^\circ - 52.4^\circ) - 0.425 \times 1.12(0.61 - 0.309) + \\ 0.888(126.4^\circ - 72^\circ) - 0.988 \times 1.12(0.309 + 0.59) = 0$$

efectuando valores:

$$0.888(19.6^\circ) - 0.476(0.301) + 0.888(54.4^\circ) - 1.11(0.899) = 0$$

$$0.888(0.34) - 0.143 + 0.888(0.946) - 0.998 = 0$$

$$0.302 - 0.143 + 0.84 - 0.998 = 0$$

$$1.142 - 1.141 = \underline{\underline{0.001 \approx 0}}$$

Que prácticamente se puede considerar igual a cero, por tanto el área $A_1 = A_2$ de la Fig. "a", luego se mantiene la estabilidad como se ha comprobado por el criterio de la igualdad de áreas.

Para todos los casos siguientes, se anotarán solamente los datos que varían para cada tipo de falla.

b.- Falla de tres líneas, después de las barras colectoras:

Datos:

$$\theta_1 = 64^\circ$$

$$r_1 = 0,0015$$

Referencia: Fig. "b", página 53.

Reemplazando valores, se tiene:

$$0,888(64^\circ - 52.4^\circ) - 0,0015 \times 1,12(0,61 - 0,438) + \\ 0,888(126.4^\circ - 64^\circ) - 0,988 \times 1,12(0,438 + 0,59) = 0$$

efectuando valores:

$$0,888(0,20) - 0,0017(0,172) + 0,888(1,086) - 1,11(1,028) = 0$$

$$0,178 - 0,0003 + 0,964 - 1,141 = 0$$

$$1,142 - 1,1413 = \underline{\underline{0,0007 \cong 0}}$$

c.- Falla de una línea a tierra, a la salida:

Datos:

$$\theta_1 = 74.4^\circ$$

$$r_1 = 0,492$$

Referencia: Fig. "c", página 59.

Reemplazando valores:

$$0,888(74.4^\circ - 52.4^\circ) - 0,492 \times 1,12(0,61 - 0,268) + \\ 0,888(126.4^\circ - 74.4^\circ) - 0,988 \times 1,12(0,268 + 0,59) = 0$$

efectuando valores:

$$0,888(0,383) - 0,55(0,34) + 0,888(0,905) - 1,11(0,858) = 0$$

$$0,34 - 0,187 + 0,804 - 0,952 = 0$$

$$1,144 - 1,139 = \underline{\underline{0,005 \cong 0}}$$

c'.- Falla de una línea a tierra, a la llegada:

Datos:

$$\theta_1 = 76.3^\circ$$

$$r_1 = 0,535$$

Referencia: Fig. "j", página 67.

Reemplazando valores:

$$0,888(76.3^\circ - 52.4^\circ) - 0,535 \times 1,12(0,61 - 0,236) +$$

$$0,888(126.4^\circ - 76.3^\circ) - 0,988 \times 1,12(0,236 + 0,59) = 0$$

efectuando valores:

$$0,888(0,416) - 0,599 \times 0,374 + 0,888(0,872) - 1,11(0,826) = 0$$

$$0,369 - 0,224 + 0,774 - 0,917 = 0$$

$$1,143 - 1,141 = \underline{\underline{0,002 \approx 0}}$$

d.- Falla de dos líneas a tierra, a la salida:

Datos:

$$\theta_1 = 66.2^\circ$$

$$r_1 = 0,147$$

Referencia: Fig. "e", página 72.

Reemplazando valores:

$$0,888(66.2^\circ - 52.4^\circ) - 0,147 \times 1,12(0,61 - 0,403) +$$

$$0,888(126.4^\circ - 66.2^\circ) - 0,988 \times 1,12(0,403 + 0,59) = 0$$

efectuando valores:

$$0,388(0,24) - 0,165(0,207) + 0,888(1,047) - 1,11(0,993) = 0$$

$$0,213 - 0,034 + 0,930 - 1,102 = 0$$

$$1,143 - 1,136 = \underline{\underline{0,007 \approx 0}}$$

d'.- Falla de dos líneas a tierra, a la llegada:

Datos:

$$\theta_1 = 66.9^\circ$$

$$r_1 = 0,206$$

Referencia: Fig. "f", página 77.

Reemplazando valores:

$$0,888(66.9^\circ - 52.4^\circ) - 0,206 \times 1,12(0,61 - 0,393) + \\ 0,888(126.4^\circ - 66.9^\circ) - 0,988 \times 1,12(0,393 + 0,59) = 0$$

Efectuando valores:

$$0,888(0,252) - 0,231(0,217) + 0,888(1,035) - 1,11(0,983) = 0$$

$$0,224 - 0,05 + 0,919 - 1,091 = 0$$

$$1,143 - 1,141 = \underline{\underline{0,002 \approx 0}}$$

e.- Falla de tres líneas a tierra, a la salida:

Datos:

$$\theta_1 = 64^\circ$$

$$r_1 = 0,0015$$

Referencia: Fig. "b", página 53.

Por ser estos valores iguales que para el caso b, (pág. 133), no hace falta repetir la comprobación de la estabilidad.

e'.- Falla de tres líneas a tierra, a la llegada:

Datos:

$$\theta_1 = 64.1^\circ$$

$$r_1 = 0,0014$$

Referencia: Fig. "g", página 83.

Reemplazando valores:

$$0,888(64.1^\circ - 52.4^\circ) - 0,0014 \times 1,12(0,61 - 0,438) + \\ 0,888(126.4^\circ - 64.1^\circ) - 0,988 \times 1,12(0,438 + 0,59) = 0$$

$$0,888(0,203) - 0,0016(0,172) + 0,888(1,084) - 1,11(1,028) = 0$$

$$0,180 - 0,0003 + 0,962 - 1,141 = 0$$

$$1,142 - 1,1413 = \underline{\underline{0,0007 \approx 0}}$$

B.- Con mínima carga:

Datos:

$$P_o = 0,44 \text{ PU}$$

$$P_g = 0,83 \text{ PU}$$

$$\theta_o = 32^\circ ; \theta_1 = 103.7^\circ ; \theta_2 = 147.5^\circ$$

$$r_1 = 0,4246 ; r_2 = 0,996$$

Referencia: Fig. "h", página 97.

Reemplazando valores en ecuación (30), se tiene:

$$0,44(103.7^\circ - 32^\circ) - 0,4246 \times 0,83(0,85 + 0,236) + \\ 0,44(147.5^\circ - 103.7^\circ) - 0,996 \times 0,83(-0,236 + 0,84) = 0$$

Efectuando valores:

$$0,44(1,247) - 0,352(1,086) + 0,44(0,762) - 0,827(0,604) = 0$$

$$0,549 - 0,382 + 0,335 - 0,499 = 0$$

$$0,884 - 0,881 = \underline{\underline{0,003 \approx 0}}$$

b.- Falla de tres líneas, después de las barras colectoras:

Datos:

$$\theta_1 = 77^\circ$$

$$r_1 = 0,0006 ; \text{ Referencia: Fig. "i", pág. 103.}$$

Reemplazando valores:

$$0,44(77^\circ - 32^\circ) - 0,0006 \times 0,83(0,85 - 0,225) + \\ 0,44(147.5^\circ - 77^\circ) - 0,996 \times 0,83(0,225 + 0,84) = 0$$

Efectuando valores:

$$0,44(0,783) - 0,0005(0,625) + 0,44(1,227 - 0,827(1,065)) = 0$$

$$0,344 - 0,0003 + 0,54 - 0,881 = 0$$

$$0,884 - 0,8813 = \underline{\underline{0,0027 \approx 0}}$$

c.- Falla de una línea a tierra, a la salida:

Datos:

$$\theta_1 = 112.1^\circ ; r_1 = 0,49 ; \text{ Ref. Fig. "j", pág. 108.}$$

Reemplazando valores:

$$0,44(112.1^\circ - 32^\circ) - 0,49 \times 0,83(0,85 + 0,375) + \\ 0,44(147.5^\circ - 112.1^\circ) - 0,996 \times 0,83(-0,375 + 0,84) = 0$$

Efectuando valores:

$$0,44(1,394) - 0,407(1,225) + 0,44(0,616) - 0,827(0,465) =$$

$$\underline{\underline{0,884 - 0,884 = 0}}$$

c'.-- Falla de una línea a tierra, a la llegada:

Datos:

$$\theta_1 = 115.9^\circ$$

$$r_1 = 0,514$$

Referencia: Fig. "k", página 115.

Reemplazando valores:

$$0,44(115.9^\circ - 32^\circ) - 0,514 \times 0,83(0,85 + 0,438) +$$

$$0,44(147.5^\circ - 115.9^\circ) - 0,996 \times 0,83(-0,438 + 0,84) = 0$$

efectuando valores:

$$0,44(1,46) - 0,427(1,288) + 0,44(0,55) - 0,827(0,402) = 0$$

$$0,642 - 0,55 + 0,242 - 0,332 = 0$$

$$0,884 - 0,882 = \underline{\underline{0,002 \approx 0}}$$

d.- Falla de dos líneas a tierra, a la salida:

Datos:

$$\theta_1 = 83.2^\circ$$

$$r_1 = 0,147$$

Referencia: Fig. "l", página 120.

Reemplazando valores:

$$0,44(83.2^\circ - 32^\circ) - 0,147 \times 0,83(0,85 - 0,119) +$$

$$0,44(147.5^\circ - 83.2^\circ) - 0,996 \times 0,83(0,119 + 0,84) = 0$$

efectuando valores:

$$0,44(0,891) - 0,122(0,731) + 0,44(1,12) - 0,827(0,959) = 0$$

$$0,392 - 0,089 + 0,493 - 0,793 = 0$$

$$0,885 - 0,882 = \underline{\underline{0,003 \approx 0}}$$

d'.- Falla de dos líneas a tierra, a la llegada:

Datos:

$$\theta_1 = 84.5^\circ$$

$$r_1 = 0,174$$

Referencia: Fig. "M", página 125.

Reemplazando valores:

$$0,44(84.5^\circ - 32^\circ) - 0,174 \times 0,83(0,85 - 0,095) +$$

$$0,44(147.5^\circ - 84.5^\circ) - 0,996 \times 0,83(0,095 + 0,84) = 0$$

Efectuando valores:

$$0,44(0,914) - 0,144(0,755) + 0,44(1,096) - 0,827(0,935) = 0$$

$$0,402 - 0,109 + 0,482 - 0,773 = 0$$

$$0,884 - 0,882 = \underline{\underline{0,002 \approx 0}}$$

e.- Falla de tres líneas a tierra, a la salida:

Datos:

$$\theta_1 = 77^\circ$$

$$r_1 = 0,0006$$

Referencia: Fig. "I", página 103.

Por ser estos valores iguales que para el caso b, pág. 136, no es necesario repetir el chequeo de la estabilidad.

e'.- Falla de tres líneas a tierra, a la llegada:

Datos:

$$\theta_1 = 77^\circ$$

$$r_1 = 0,0006$$

Referencia: Fig. "I", página 103.

Por tanto, también para este caso, se puede ver que son iguales los valores a los calculados para el caso b de la página 136, cuyo resultado del chequeo era el siguiente:

$$0,884 - 0,8813 = \underline{\underline{0,0027 \approx 0}}$$

C A P I T U L O I V

Conclusiones.-

El estudio realizado ha tenido por objeto el análisis de la estabilidad en estado transitorio del sistema de Cumbyá; se ha calculado las potencias de salida para las condiciones "anterior", "durante" y "después" de la falla y se ha determinado el ángulo de aislación de la falla, al cual corresponde el "tiempo" en que ésta debe ser aislada para mantener la estabilidad. Este tiempo se calculó ser el siguiente:

- 0.10 seg. para falla de LINEA A LINEA, después de las barras colectoras, con máxima carga.
- 0.05 seg. para falla de TRES LINEAS, después de las barras colectoras, con máxima carga.
- 0.15 seg. para falla de UNA LINEA A TIERRA, a la salida, con máx. carga.
- 0.15 seg. para falla de UNA LINEA A TIERRA, a la llegada, " " "
- 0.05 seg. para falla de DOS LINEAS A TIERRA, a la salida, " " "
- 0.10 seg. para falla de DOS LINEAS A TIERRA, a la llegada, " " "
- 0.05 seg. para falla de TRES LINEAS A TIERRA, a la salida, " " "
- 0.05 seg. para falla de TRES LINEAS A TIERRA, a la llegada, " " "

Caso de Mínima carga:

- 0.35 seg. para falla de LINEA A LINEA, después de las barras colectoras.
- 0.20 seg. para falla de TRES LINEAS, después de las barras colectoras.
- 0.40 seg. para falla de UNA LINEA A TIERRA, a la salida.
- 0.45 seg. para falla de UNA LINEA A TIERRA, a la llegada.
- 0.20 seg. para falla de DOS LINEAS A TIERRA, a la salida.
- 0.20 seg. para falla de DOS LINEAS A TIERRA, a la llegada.
- 0.20 seg. para falla de TRES LINEAS A TIERRA, a la salida.
- 0.20 seg. para falla de TRES LINEAS A TIERRA, a la llegada.

Como se puede ver, el tiempo mínimo para aislar la falla es de 0.05 seg. (3 ciclos) que corresponde a la falla de tres líneas, después de las barras colectoras y de dos líneas a tierra a la salida, para el caso de máxima carga y de 0.20 seg. (12 ciclos) para el caso de mínima carga.

Respecto a los disyuntores, a más de las características anotadas en la página 7, se debe tomar en cuenta el "tiempo necesario de operación", que es de 8 ciclos, es decir que corresponde a 0.133 seg. sobre la base de 60 ciclos/seg. Estos disyuntores están previstos para operar eléctricamente en casos de emergencia o también pueden operar manualmente.

Pero para determinar qué tipos de fallas pueden aislarse o despejarse del sistema para los tiempos calculados, conviene anotar el tiempo mínimo de operación que requieran los relés destinados para protección de fallas entre fases o a tierra, y para el presente estudio se han determinado las características del "Relé de distancia", tipo CXS3D, forma DU3Q; carga nominal continua de 5 amperios, 115 voltios, 60 ciclos/seg.; permite un rápido recierre, tiene un tiempo de operación aproximadamente igual a 1 ciclo (0.017 seg.), de alta velocidad. Su función primordial es disminuir al mínimo la influencia y efectos de una avería causada por corto-circuitos o fallas; además tiene una función esencialmente selectiva para aislar la falla solamente en el tramo que ha fallado, es decir es del tipo de "impedancia".

En resumen, el tiempo mínimo requerido para aislar la falla será la suma de los tiempos de operación del disyuntor (8 ciclos) y del relé de distancia (1 ciclo), por tanto se tiene un tiempo de operación del conjunto de protección de 9 ciclos, o sea 0.15 seg.; es decir, que para los siguientes tipos de falla no se puede mantener la estabilidad ya que tienen un tiempo de aislación de la falla menor de 0.15 seg. requerido:

- 1.- Tipo a): Falla de LINEA A LINEA, después de las barras colectoras, ya que el tiempo calculado para aislar la falla y poder mantener la estabilidad es de 0.10 seg. (6 ciclos), que es un tiempo inferior al que están en capacidad los dispositivos de protección instalados en Cumbayá para despejar fallas o corto-circuitos.

- 2.- Tipo b): Falla de TRES LINEAS, o falla trifásica, después de las barras colectoras, con un tiempo de aislación de la falla de 0.05 seg. (3 ciclos).
- 3.- Tipo d): Falla de DOS LINEAS A TIERRA, a la salida, también con un tiempo de aislación de 0.05 seg.
- 4.- Tipo d'): Falla de DOS LINEAS A TIERRA, a la llegada, con un tiempo para despejar la falla de 0.10 seg. (6 ciclos).
- 5.- Tipo e): Falla de TRES LINEAS A TIERRA, a la salida, con un tiempo de aislación de la falla de 0.05 seg. (3 ciclos).
- 6.- Tipo e'): Falla de TRES LINEAS A TIERRA, a la llegada, con un tiempo para despejar la falla de 0.05 seg. (3 ciclos).

Todos estos tipos de falla corresponden al caso de "máxima carga", pero para el caso de mínima carga se puede ver que los tiempos calculados para aislar la falla, tienen valores superiores al mínimo de 0.15 seg. requerido para aislar la falla, por tanto para todos estos casos se puede mantener la estabilidad y aún más, si la falla se aísla a un tiempo menor que el calculado, se consigue disminuir la posibilidad de causar daños en el equipo por ocurrencia de fallas, garantizando de esta manera la conservación de la estabilidad del sistema. Luego, para que el sistema sea estable para todos los tipos de falla analizados tanto para mínima como para máxima carga, conviene disminuir el tiempo de operación de los disyuntores o combinarlos con los relés de protección de tal manera que se logre conseguir el mismo efecto sobre el tiempo de operación del conjunto de protección.

Conviene anotar que en la práctica se van a obtener resultados algo diferentes que los calculados, ya que actualmente el sistema de Cum-bayá se encuentra interconectado con el resto del sistema eléctrico de transmisión y distribución de Quito, y para el presente estudio se ha considerado el caso más simple sin tomar en cuenta ninguna interconexión con el resto del sistema; por lo tanto, el presente trabajo ha tenido por finalidad la iniciación o introducción en el "análisis del problema de la estabilidad transitoria" para sistemas de potencia.-

BIBLIOGRAFIA

CENTRALES Y REDES ELECTRICAS,

TH. Buchheld

Editorial Labor, S.A. 1.959

ELECTRICAL TRANSMISSION AND DISTRIBUTION

Reference Book

Copyright 1.950, by

Westinghouse Electric Corporation

East Pittsburgh, Pa.

ELECTRIC POWER TRANSMISSION

Copyright, 1.948 by

The Macmillan Company.

LINEAS Y REDES ELECTRICAS

P. Marcelic

Copyright by EDIAR, Soc. Anónima, Editores, Buenos Aires, 1.957.

MANUAL STANDARD DEL INGENIERO ELECTRICISTA

A.E. Knowlton

Editorial Labor, S.A., 1.962.

POWER SYSTEM STABILITY

Edward Wilson Kimbark

Copyright, 1.948.

REDES ELECTRICAS, FUNCIONAMIENTO Y PROTECCION

Pierre Henriot

Editorial Mayo, Madrid, 1.961

SILENT SENTINELS

Westinghouse Protective Relays

Copyright 1.950, by

Westinghouse Electric Corporation.

TEST RECORD

Tokyo Shibaura Electric CO. L T D .

Agosto de 1.959

MAINTENANCE GUIDE FOR PROTECTION RELAYS

Tokyo Shibaura Electric CO. L T D

Toshiba.

Instrucciones de Operación para Equipos de Control y Mando,
suministrados por la Casa TOSHIBA a la Central
Hidroeléctrica de Cumbayá.

INFORME DE TRABAJO: Chequeo mecánico y eléctrico

de los relés de la Central de Cumbayá

Mayo de 1.961.

CUMBAYA PROJECT

Specifications for Control Boards and Electrical Equipment

R.J. Tipton Associated Engineers, Inc.,

Consulting Engineers,

Octubre de 1.958.