



Universidad Nacional Autónoma de México

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES

“ ARAGON ”

INGENIERIA

85

SISTEMAS DE TRANSMISION
HEXAFASICA

Sol. 29243

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A N

JAIME MEZA GOMEZ

JOSE LUIS YAÑEZ PLATA

SAN JUAN DE ARAGON, EDO. DE MEX. 1985



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
ARAGON
DIRECCION

JAIME MEZA GOMEZ
P R E S E N T E .

En contestación a la solicitud de fecha 31 de enero del año en curso, presentada por José Luis Yañez Plata y usted, relativa a la autorización que se les debe conceder para que el señor profesor, Ing. PASCUAL RIVERA MUÑOZ pueda dirigirles el trabajo de Tesis denominado " SISTEMAS DE TRANSMISION HEXAFASICA ", con fundamento en el punto 6 y siguientes, del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Escuela, y toda vez que la documentación presentada por ustedes reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento; me permito comunicarle que ha sido aprobada su solicitud.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para reiterar a usted las bondades de mi distinguida consideración.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
San Juan de Aragón, Mex., febrero 18 de 1985.
EL DIRECTOR

LIC. SERGIO ROSAS ROMERO

c.c.p. Coordinación de Ingeniería (26).
Unidad Académica.
Departamento de Servicios Escolares.
Asesor de Tesis.

A MIS PADRES:

Jaime e Isabel

A MIS HERMANOS:

Ma. Margarita

Estela

Rosalía

Miguel

Ma. Isabel

y

Amigos.

Que con su apoyo y comprensión me ayudaron a concluir una etapa importante más en mi vida y a todas aquellas personas que en -- alguna u otra forma me motivaron y auxiliaron en la realización y conclusión del presente trabajo, así como la valiosa colaboración del Ing. Pascual Rivera Muñoz.

A MIS PADRES:

José y Asensión

Con todo mi agradecimiento, cariño, respeto y por todo su apoyo, porque su ejemplo significó el mayor de los impulsos para lograr la meta a la que hoy llego.

A MIS HERMANOS:

Ernesto, Jaime, Alejandro y Liz, con cariño por su comprensión y ayuda para lograr este objetivo.

A NORMA:

Con todo mi amor, admiración y respeto por todo su apoyo, cariño y comprensión.

I N D I C E

	PAG.
INTRODUCCION.	1
I VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA TRANSMISION HEXAFASICAS	3
II PARAMETROS ELECTRICOS Y CARACTERISTICAS DE FUNCIONAMIENTO DE SISTEMAS HEXAFASICOS.	
2.1 Introducción.	28
2.2 Parámetros Eléctricos.	28
2.2.1 Componentes Simetricos.	28
2.2.2 Impedancias en Líneas de Transmisión - - Hexafásicas.	39
2.2.3 Impedancias de Secuencia en Líneas de - - Transmisión Hexafásica.	42
2.2.4 Impedancias de Secuencia en Líneas de - - Transmisión Hexafásica con un Hilo de - - Guarda.	44
2.3 Evaluación de las Características de la Línea - de Transmisión.	51
2.3.1 Características Independientes de la Lon- gitud de la Línea.	52
2.3.2 Características Dependientes de la Dis- tancia.	53

	PAG.
III SELECCION DEL TRANSFORMADOR TRIFASICO/HEXAFASICO.	
3.1 Introducción.	59
3.2 Transformadores Trifásicos/Hexafasicos	60
3.2.1 Transformador Delta/Estrella	64
3.2.2 Transformador Ye/Estrella	75
3.2.3 Transformador Ye/Hexágono	79
3.2.4 Autotransformador Conectado en Estrella.	83
IV ANALISIS DE CORTO CIRCUITO EN SISTEMAS HEXAFASICOS.	
4.1 Introducción.	89
4.2 Falla de Línea a Tierra.	91
4.3 Falla Trifásica a Tierra.	96
4.4 Falla Pentafásica a Tierra.	100
4.5 Falla Pentafásica.	106
4.6 Falla Hexafásica a Tierra.	108
4.7 Falla Hexafásica.	111
4.8 Falla Bifásica	111
4.8.1 Falla Bifásica a 120°	111
4.8.2 Falla Bifásica a 180°	115
4.8.3 Falla Bifásica a 60°	120
CONCLUSIONES	124
APENDICE	
A. COMPONENTES SIMETRICAS.	127

	PAG.
B. IMPEDANCIAS EN LINEAS DE TRANSMISION TRIFASICAS.	
B.1 Línea de Carson.	141
B.2 Impedancias de Fase en Líneas de Transmisión.	143
 BIBLIOGRAFIA.	 150

I N T R O D U C C I O N

El objetivo de este trabajo es introducir el concepto de la transmisión Multifásica en términos de líneas de seis - fases (hexafásicas) y conocer las ventajas que plantea este - nuevo concepto, el cual puede ser utilizado como una herra- - mienta más en la planeación de sistemas, para satisfacer gran - des demandas de carga, especialmente cuando el derecho de vía es limitado.

El continuo crecimiento y la demanda de potencia en - los próximos años, indica un gran aumento de energía eléctrica, de tal forma que surge el problema de como incrementar es - ta potencia sin aumentar las fuentes de energía (hidráulica, - térmica, geotérmica, etc.) marcando una diferencia notable en cuanto al costo de generación de esta potencia.

Una perspectiva al problema sería analizar las venta- - jas que ofrece una línea de transmisión hexafásica, la cual - con su arreglo ofrece más potencia de transmisión con el mis- - mo derecho de vía que de un sistema de doble circuito trifási- - co o bien para futuras líneas.

El concepto de usar 6, 9 ó hasta 36 fases más, en lu- - gar de la convencional trifásica para líneas de transmisión - fue propuesta en 1972 en CIGRE por BARTHOL y BARNES.

A raíz de esto, cuatro años más tarde (1976), se ha interesado también la WEST VIRGINIA UNIVERSITY and POWER TECHNOLOGIES INC., sobre las ventajas que ofrece este sistema.

Sin embargo, este estudio no está aún completo por que se encuentra aún en etapa de investigación, pero se han logrado avances considerables, para hacerlo cada vez una realidad.

La planeación realizada para desarrollar el presente trabajo, permitió ordenar la información recabada en cuatro capítulos los mismos que exponen los resultados obtenidos en los términos siguientes:

En el primer capítulo, se discute las principales ventajas y desventajas de la transmisión multifásica en términos de seis fases con respecto a la trifásica.

En el segundo capítulo se tratará una evaluación analítica de los principales parámetros y características de las líneas hexafásicas.

El tercer capítulo, se enfoca principalmente a la selección del equipo terminal, entendiéndose esto como la mejor selección para la transformación trifásica-hexafásica y hexafásica - trifásica.

En el cuarto capítulo, se presenta el análisis de operación en corto circuito y los avances en el análisis del mismo.

Las conclusiones se presentan al final de este trabajo así como las referencias bibliograficas utilizadas en la elaboración del mismo.

CAPITULO I

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA TRANSMISION HEXAFASICA

El concepto de la transmisión multifásica es vista actualmente como una herramienta más en la planeación de la transmisión de energía, en esta sección son analizadas algunas ventajas de la transmisión hexafásica:

(1) Incremento en la Capacidad de transmisión.

La potencia Natural de la línea (SIL) es aproximadamente proporcional al número de fases, mientras la carga térmica (THL) es directamente proporcional al número de fases -- por la tensión de línea a neutro y la corriente de línea que son constantes.

Con la ayuda de un ejemplo esto puede verse más claro.

Al considerar tres tipos de línea de 230 KV, un sólo-circuito, un doble circuito trifásico y un circuito hexafásico. El tipo de conductor utilizado para estas líneas es ACSR 900 MCM y la disposición de los conductores para 3 fases 1 -- circuito se ilustra en la figura 1(a) y para 3 fases 2 circuitos y 6 fases 1 circuito, que es la misma, se ilustra en la figura 1(b). Los parámetros de la línea, la SIL y THL para estas líneas se encuentran resumidos en la tabla I.1, se ob--

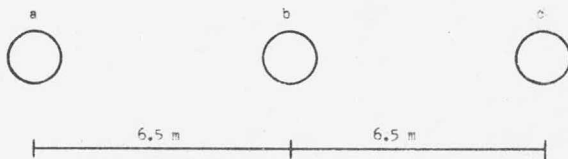


Figura 1 (a) : Disposición de los conductores para las líneas de un solo circuito trifásico de 230 KV.

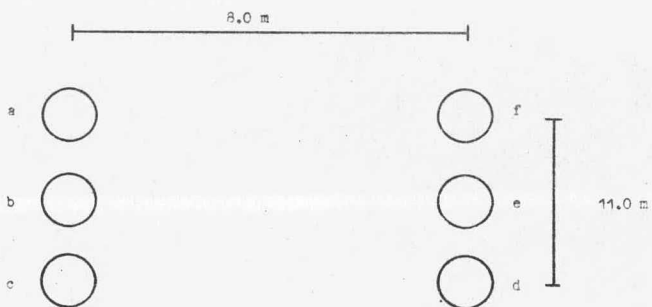


Figura 1 (b) ; Disposición de los conductores para las líneas de doble circuito trifásico y hexafásico de 230 KV.

Tipo de Línea	Impedancia Serie. ohms/ fase / milla	Admitancia Shunt ohms / fase / milla	SIL MW	THL MW
Un solo cto. 36	0.1204 + j0.7919	5.419	138.38	438
Doble cto. 36	0.0601 + j0.3852	11.18	569.98	876
Un circuito 60	0.1202 + j0.7954	5.419	828.4	1518

Tabla 1.1 : Parámetros de la línea de 230 KV y varias capacidades de líneas diferentes.

Voltaje del Sistema		Nº de fases	Nº. de Circuitos	Capacidad de - Potencia Relativa.
V_{L-L} en KV.	V_{L-N} en KV			
230	133	3	1	0.5
230	133	3	2	1.0
133	133	6	1	1.0
400	230	3	1	0.87
400	230	3	2	1.74
230	230	6	1	1.73

Tabla 1.2 : Capacidad de potencia relativa de diferentes sistemas de transmisión.

serva de esta tabla que la línea hexafásica, tiene un incremento notable en la capacidad de transmisión sobre las líneas trifásicas por lo tanto se puede concluir que a mayor número de fases mayor es la capacidad de transmisión de la línea.

(2) Incremento en la utilización del derecho de vía.

Este punto se hara con los siguientes ejemplos que -- muestran como el derecho de vía puede ser mejor utilizado en sistemas de transmisión hexafásica.

a) Esta ventaja se realiza al convertir un doble circuito trifásico existente a un sistema de seis fases.

Una línea convencional de doble circuito trifásico a 230 KV puede transmitir una potencia de: $2(\sqrt{3} \times 230 \times I_1 \cos \emptyset) = 796.74 I_1 \cos \emptyset$ MW, donde I_1 esta en KA.

Si esta misma línea es convertida a una línea hexafásica conservando al conductor, el tamaño de la torre y el derecho de vía, que seria el mismo en términos de potencia, lle varía más que el sistema trifásico; este permitiría transmi- tir una potencia de:

$(6 \times 230 \times I_1 \cos \emptyset) = 1380 I_1 \cos \emptyset$ MW, lo que signi fica que para una cantidad relativamente pequeña de costo in- cremental, para convertir la línea existente al sistema hexafásico, se obtiene un incremento de:

$(1380 I_1 \cos \emptyset / 796.74 I_1 \cos \emptyset) = 1.732$ veces, de la potencia original que puede ser transmitido por el mismo dere cho de vía.

El costo adicional de conversión se deriva del equipo terminal y de las protecciones.

Los resultados anteriores son resumidos en la tabla - I.2 con los valores correspondientes para líneas de 230 y 400 KV.

b) Este segundo ejemplo es con la intención de sacar ventaja del derecho de vía para futuras líneas.

Esto es, si se desea transmitir potencia a un centro de carga (digamos 2000 MW) pueden existir dos formas de hacerlo:

b1) Un doble circuito trifásico de 400 KV el cual -- transportaría $2(\sqrt{3} \times 400 \times I_1 \cos \theta) = 1385.64 I_1 \cos \theta$

b2) Un solo circuito hexafásico de 230 KV el cual -- puede transportar $(6 \times 230 \times I_1 \cos \theta) = 1380 I_1 \cos \theta$.

Aunque ambas alternativas son eléctricamente equivalentes, la última requiere de mucho menor derecho de vía, como se observa en las figuras I.2(a) y I.2(b).

Otra forma de observar la relación de línea a línea, a la de línea a neutro, que es la misma en el sistema hexafásico, se representa en el diagrama fasorial de tensión en la figura I.5.

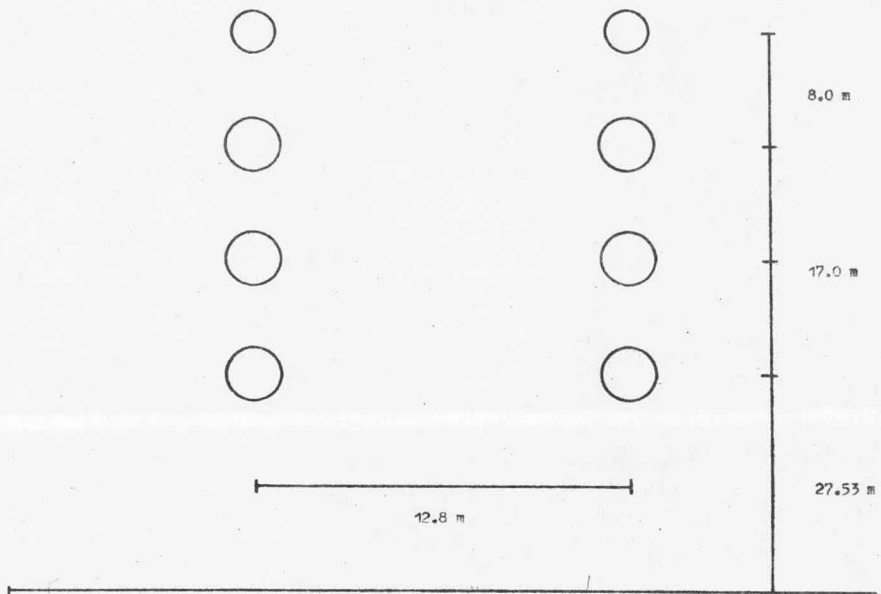


Figura 1.2 (a) : Configuración típica para líneas de doble circuito trifásico de 400 KV.

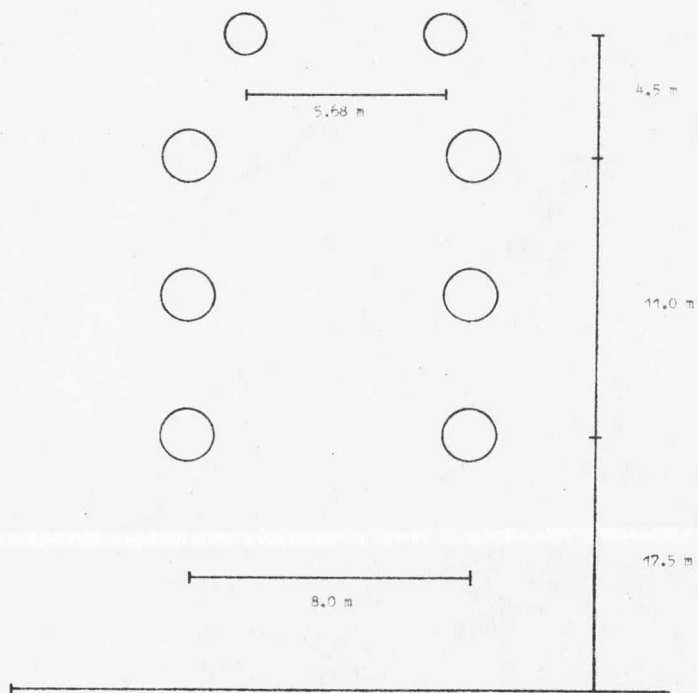


Figura 1.2 (b) : Configuración típica para líneas de seis fases de 230 KV.

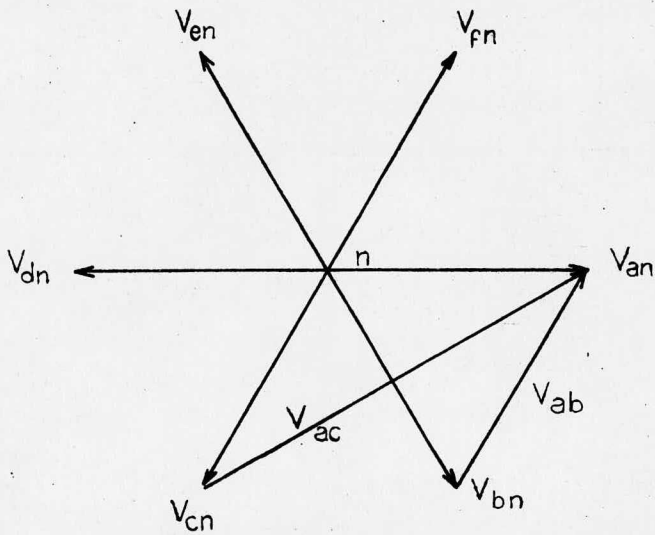


Fig.I.3; Diagrama fasorial de tensión para un sistema hexafásico.

(3) Requerimientos de Aislamiento.

La relación de tensión de línea a línea (V_{L-L}) a la tensión de línea a neutro (V_{L-N}) de un sistema de N fases está dado por:

$$\frac{V_{L-L}}{V_{L-N}} = \frac{\text{sen}(360^\circ/N)}{\text{sen}(90^\circ - 180^\circ/N)} \quad (\text{I.1})$$

Donde: $N = 3, 6, 9 \dots n$

Al referirse al sistema hexafásico, se observa en la tabla I.3, la relación $(V_{L-L})/(V_{L-N})$.

La tabla I.3, muestra esta relación para diferentes

No. de fases	$V_L - L / V_L - N$	Seguido del $V_L - N$ en KV.				No. de ctos. eqs. trifásicos.
		400	230	230	133	
3	1.732	692	400	400	230	1
6	1.00	400	230	230	133	2
9	0.643	260	150	150	85	3
12	0.518	207	119	119	69	4
15	0.416	116	96	96	55	5
18	0.347	139	80	80	46	6
21	0.293	119	69	69	40	7
24	0.261	104	60	60	35	8
27	0.232	93	53	53	31	9
30	0.209	84	48	48	28	10
33	0.190	76	44	44	25	11
36	0.174	70	40	40	23	12
39	0.161	64	37	37	21	13
42	0.149	60	34	34	20	14
45	0.139	56	32	32	18	15

Tabla 1.3 Razón ($V_L - L / V_L - N$) y Circuitos trifásicos equivalentes para diferentes Números de Fase.

números de fases; se observa que en una tensión de línea a -- neutro constante y a mayor número de fases es menor la tensión de línea a línea.

De lo anterior se puede concluir que los requerimientos de línea a línea disminuyen como se incrementa el número de fases para una tensión constante de línea a neutro.

Por ejemplo, para un sistema hexafásico los requerimientos de aislamiento para soportar una fase de otra adyacente es el mismo requerido para soportar una fase a el punto de potencial cero.

(4) Estabilidad.

Para transmitir la misma potencia, la línea hexafásica puede operar con ángulos de potencia más pequeños que una línea trifásica. Esto significa que la línea hexafásica ofrece mejor margen de estabilidad que la línea trifásica, lo anterior se puede comprobar, de la siguiente manera:

La potencia en el usuario de una línea de transmisión de N fases es:

$$P_R = \frac{N}{R^2 + X^2} \left[-R/V_R^2 + R/V_S // V_R / \cos \delta + X/V_S // V_R / \sen \delta \right] \quad (I.2)$$

Donde: V_S = Tensión en el envío en KV.

V_R = Tensión de línea a neutro en el final en KV.

δ = Angulo de potencia $\triangleleft / V_S, V_R$

R = Resistencia de la línea en ohms/fase/milla.

X = Reactancia inductiva de la línea en ohms/fase/mi
lla.

Para obtener el límite de estabilidad en estado estable $P_{m\acute{a}x.}$, la derivada $\partial P_R / \partial \delta$ deberá igualarse a cero.

$$\frac{N}{R^2 + X^2} \frac{|V_S| |V_R|}{\left[-R \sin \delta + X \cos \delta \right]} = 0$$

Diferenciando la ecuación anterior y al suponer $V_S = V_R$, se obtiene:

$$\tan \delta = \frac{X}{R} \quad \delta = \arctan \frac{X}{R}$$

De tal forma que la máxima transferencia ocurre cuando,

$$\delta_{m\acute{a}x.} = \arctan (X/R) \text{ lo cual indica:}$$

$$P_{m\acute{a}x.} = \frac{N}{R^2 + X^2} \left[\frac{-R/V_R + X/V_S \cos(\delta_{m\acute{a}x.})}{(\delta_{m\acute{a}x.})} \right] \quad (I.3)$$

Se obtiene potencia máx., para cuatro diferentes tipos de línea considerados en este trabajo.

(a) Un solo circuito trifásico a 230 KV donde:

$$V_S = V_R = (230/\sqrt{3}) = 132.79 \text{KV y } Z = 0.11473 + j0.78676 \text{ohms/fase/mi}$$

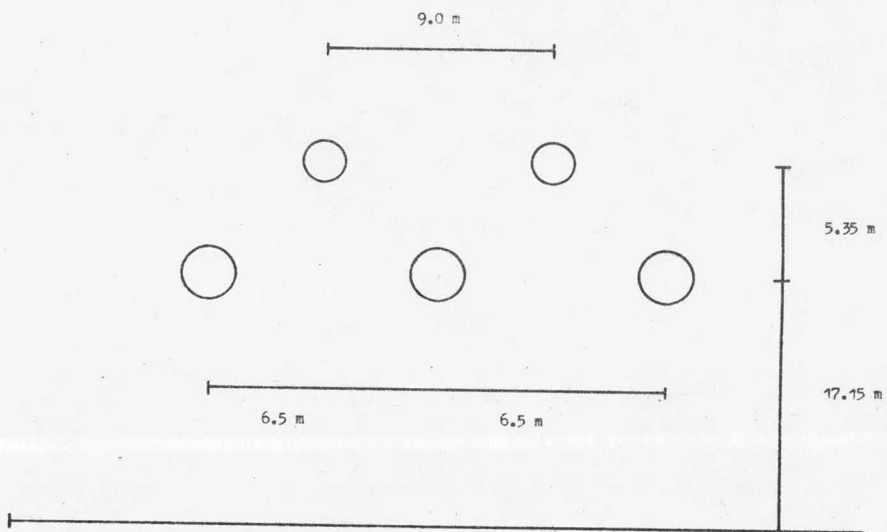


Figura 1.4 (a) : Configuración de los conductores, tipo de estructura A.1 (Datos proporcionados - por C.F.E. Configuración usada en las líneas de 230 KV para líneas de 3 fases - 1 etc.).

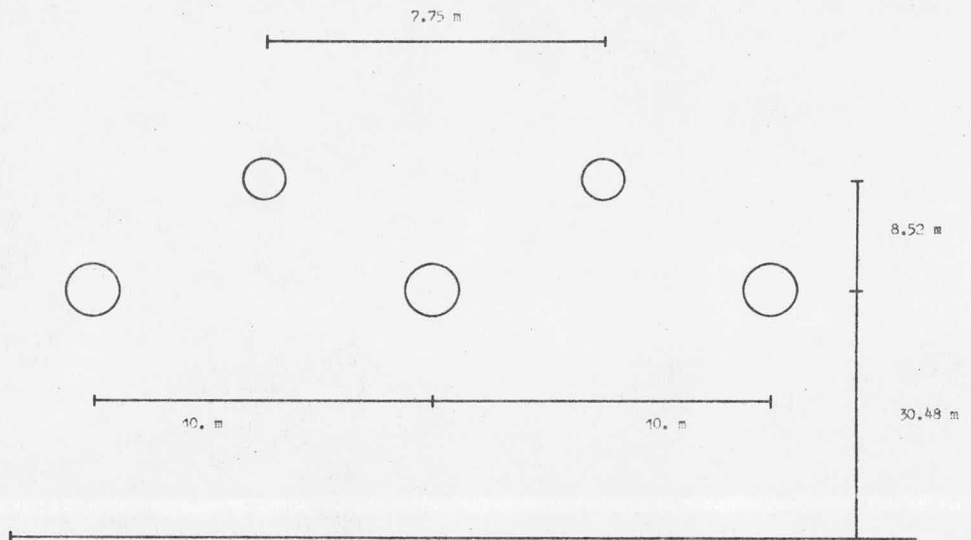


Figura 1.4 (b) : Configuración de los conductores, tipo de estructura A.2 (Datos proporcionados por - C.F.E. Configuración usada en las líneas de 400 KV para líneas - 1 circuito).

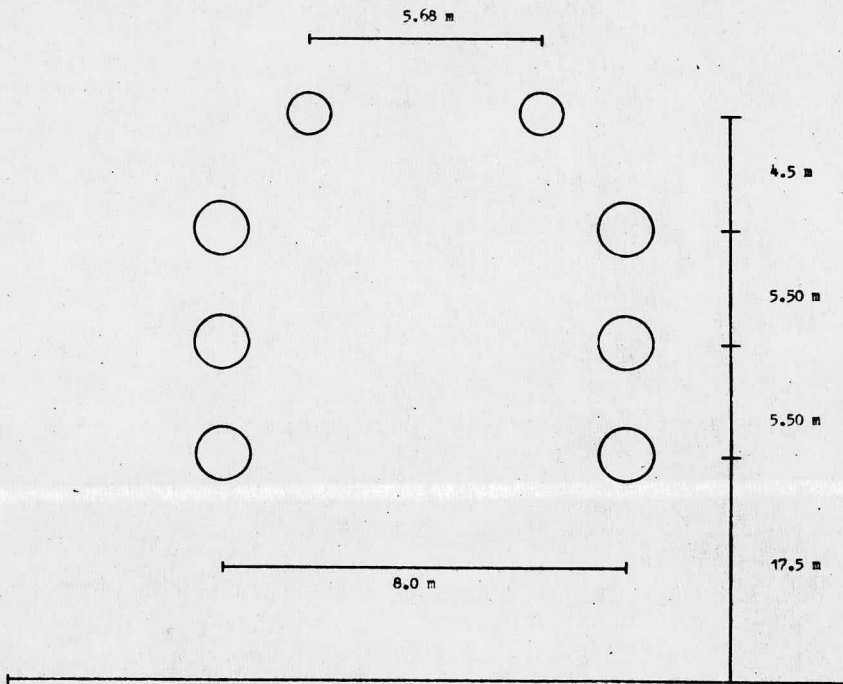


Figura 1.5 (a) : Configuración de los conductores, tipo de estructura B.1 (Datos proporcionados - por C.F.E. Configuración usada para líneas de 3 fases 2 circuitos para 230 KV).

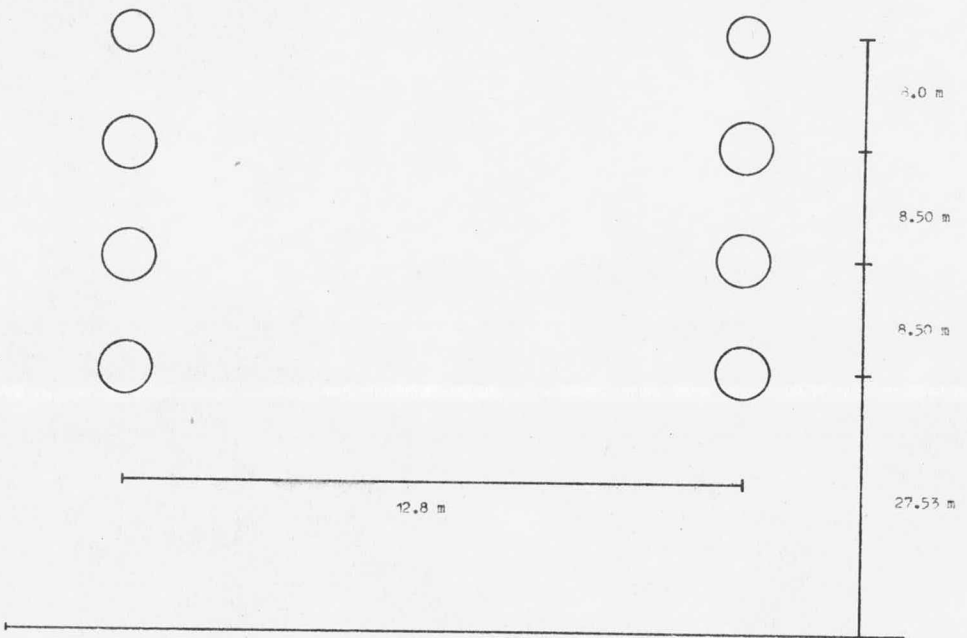


Figura 1.5 (b); Configuración de los conductores, tipo de estructura B.2 (Datos proporcionados - por C.F.E. Configuración usada para las líneas de 3 fases 2 circuitos para 400 KV.)

Tipo de estructura A_1 , descrito en la figura 1.4(a) - con un conductor de 954 MCM de ACSR.

(b) Doble circuito trifásico a 230 KV donde:

$$V_S = V_R = (230/\sqrt{3}) = 133\text{KV y } Z = 0.0493 + j0.3786 \text{ ohms/fase/mi}$$

Tipo de estructura B_1 descrito en la figura 1.5(a) - con un conductor de 1113 MCM de ACSR.

(c) Línea hexafásica a 230 KV donde:

$$V_S = V_R = 230 \text{ KV y } Z = 0.095818 + j0.788 \text{ ohms/fase/mi}$$

Tipo de estructura B.1 descrito en la figura 1.5(a) - con un conductor 1113 MCM de ACSR.

(d) Doble circuito trifásico a 400 KV donde:

$$V_S = V_R = (400/\sqrt{3}) = 230.9 \text{ KV y } Z = 0.0493 + j0.3787 \text{ ohms/fase/mi}$$

Tipo de estructura B.2 descrito en la figura 1.5(b) - con un conductor 1113 MCM de ACSR.

Ahora con la ecuación I.2, la curva del ángulo de potencia se puede dibujar para los cuatro tipos de líneas diferentes variando desde 0° a 90° .

Estas curvas se encuentran representadas en las figuras 1.6 y 1.7 y para cada una se muestra su $P_{\text{máx.}}$ de trabajo que es casi el mismo para líneas a 230 KV hexafásico y de 400 KV de doble circuito trifásico.

En la figura 1.7 se desarrolló la curva del ángulo de potencia para δ variándola de 0° a 18° , este dominio es de interés ya que es la operación normal del sistema de potencia.

GRADOS ELECTRICOS	POTENCIA MW			
	LINEA HEXAFASICA 230 KV	DOBLE CIRCUITO TRIFASICO 400 KV	DOBLE CIRCUITO TRIFASICO 230 KV	CIRCUITO TRIFASICO - SENCILLO 230 KV
0°	0	0	0	0
10°	2270.08	2373.22	788.7	377.4
20°	4424.36	4631.31	1535.26	733.4
40°	8121.38	8436.35	2813.20	1339.08
60°	10645.15	11100.15	3679.66	1745.99
80°	11691.249	12157.41	4030.14	1902.78
90°	11613.208	12054.58	3995.05	1880.48
	POT.MAX.= 11710 E _{max} = 83,072	POT.MAX.= 12171 E _{max} = 82,589	POT.MAX.= 4034 E _{max} = 82,589	POT.MAX.= 1903 E _{max} = 81,29

RESULTADOS DE LA FIGURA 1,6 (ESTOS VALORES FUERON CALCULADOS PARA UNA LONGITUD DE 30 MILLAS).

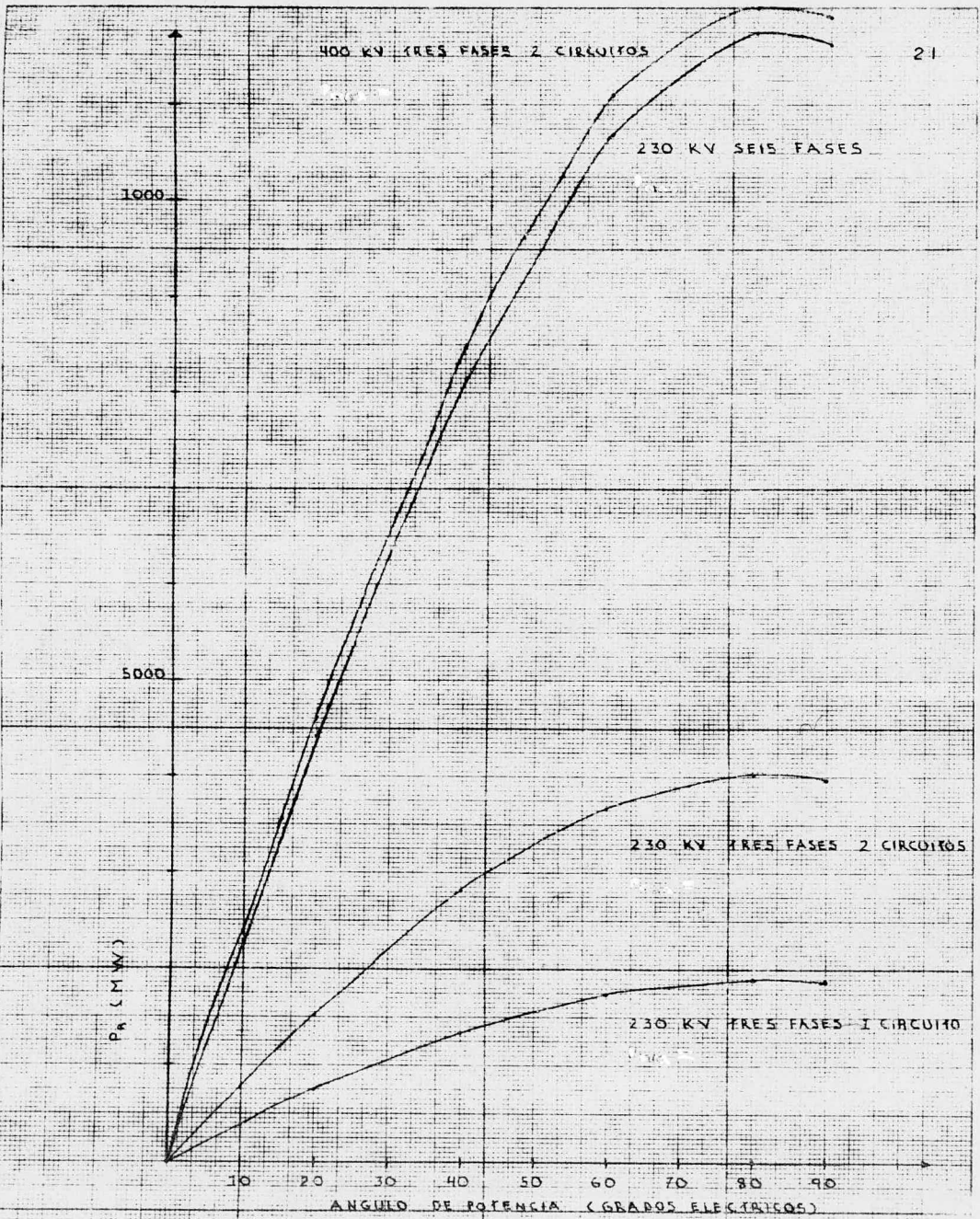


FIG. 1.6 CURVA DE ANGULO DE POTENCIA

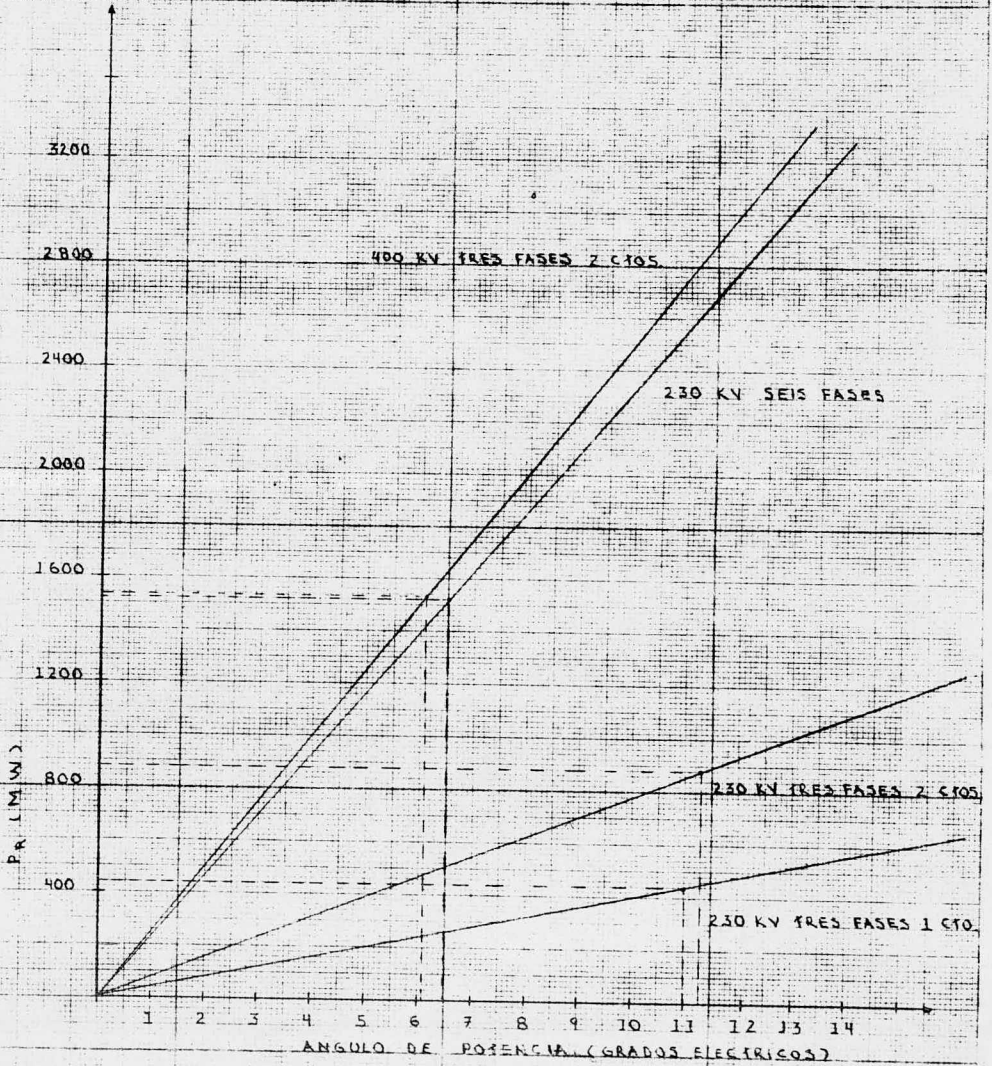


FIG. 1.7 CURVA DE ANGULO DE POTENCIA

Es posible calcular ϕ para cada una de las cuatro líneas si la potencia transmitida por la línea es la carga térmica, la cual se puede calcular por:

$$THL = N_c (N) V_{L-N} I_1 \times 10^{-3} \quad \text{MVA} \quad (1.4)$$

Donde: N_c = Número de circuitos

N = Número de fases

V_{L-N} = Voltaje de línea a neutro

I_1 = Capacidad de corriente en Amp.

El cálculo de cada uno de estos comportamientos para los cuatro tipos de líneas diferentes y para una corriente $I = 1100$ Amp., se encuentra resumida en la tabla 1.4 y de estos resultados se concluye que una línea de 230 KV de seis fases puede operar con un ángulo de potencia menor (6.5°) que un doble circuito trifásico a 230 KV (11.3°), cuando ambas líneas sean llevadas a transmitir su respectiva capacidad térmica.

Al analizar de otra manera la explicación anterior tenemos: las líneas hexafásicas se espera que sean más estables que las líneas de doble circuito trifásico, con una falla de línea a tierra en una línea hexafásica, esta puede funcionar como una línea de cinco fases, $5/6$ de la potencia, sin hacer peligrar seriamente el sistema de estabilidad, con el mismo tipo de falla en la línea trifásica, esta sólo puede funcionar como una línea de transmisión de dos fases transportando menos potencia.

TIPO DE LINEA	POTENCIA MAXIMA MW	CAPACIDAD TERMICA MW	ANGULO DE POTENCIA (grade electrico)
230 KV - (6 - 1cto)	11710	1518	6.5
230 KV - (3o - 2cto)	4034	876	11.3
230 KV - (3o - 1cto)	1903	438	11.8
400 KV - (3o - 2cto)	12171	1524	6.1

TABLA I.4 ANGULOS DE POTENCIA PARA CUATRO TIPOS DE LINEA.

(5) Efecto Corona.

En un conductor de radio constante, la tensión disminuye cuando el número de fases se incrementa.

La reducción de la tensión por incrementar el número de fases reduce la radiointerferencia.

(6) Arreglos Simétricos del Conductor.

Barnes propuso un tipo hexagonal para el sistema hexafásico, este por ser simétrico puede esperarse que exista menor desbalance que el que existe en líneas trifásicas, el cual se observa en la fig. 1.8.

(7) Regulación de Voltaje.

Estudios de flujo de carga preliminares conducidos por el equipo de investigaciones de la WEST VIRGINIA UNIVERSITY en un sistema combinado trifásico-hexafásico, mostró mucho mejor regulación de voltaje para las líneas hexafásicas que para las líneas de doble circuito trifásico.

Este punto se trata en el capítulo dos de este trabajo.

(8) Eficiencia.

En estudios de flujo de carga también se demostró que la eficiencia se eleva con el uso de líneas hexafásicas que para las líneas de doble circuito trifásico.

Para conocer la demanda incrementada utilizable se tienen dos alternativas:



Figura 1.8 Arreglo simétrico del conductor.

a) Conversión de las líneas de doble circuito de 230 KV a líneas hexafásicas a 230 KV ó.

b) Subir el nivel de tensión a 400 KV en líneas de -
doble circuito trifásico, las cuales son eléctricamente equi-
valentes a las líneas hexafásicas de un sólo circuito a 230 -
KV. El último puede requerir menos derecho de vía y también-
puede guiar a menos pérdidas por efecto corona, el ruido y ra-
diointerferencia, en términos de eficiencia.

C A P I T U L O I I

PARAMETROS ELECTRICOS Y CARACTERISTICAS DE FUNCIONAMIENTO DE
SISTEMAS HEXAFASICOS

2.1 Introducción.

La evaluación analítica de ciertas características y comportamientos para sistemas de transmisión son importantes para el diseño y la planeación de sistemas. Estas características son:

(1) Carga Térmica, (2) Impedancia Característica, (3) Regulación de voltaje, (4) Eficiencia, (5) Capacidad de la Máxima Potencia de transmisión en la línea.

En este capítulo se calculan estas características para cinco líneas diferentes de transmisión, usando las configuraciones mostradas en el capítulo anterior:

- (1) 230 KV tres fases, un circuito.
- (2) 230 KV tres fases, dos circuitos.
- (3) 230 KV seis fases, un circuito.
- (4) 400 KV tres fases, un circuito.
- (5) 400 KV tres fases, dos circuitos.

2.2 Parámetros Elécticos.

2.2.1 Componentes Simétricas.

Para aplicar el método de las componentes simétricas-

a un sistema hexafásico en desequilibrio se utiliza el operador "b". Este operador es un número complejo que gira cualquier vector 60° sin alterar su magnitud. La figura 2.1 muestra el diagrama fasorial de diferentes potencias del operador "b".

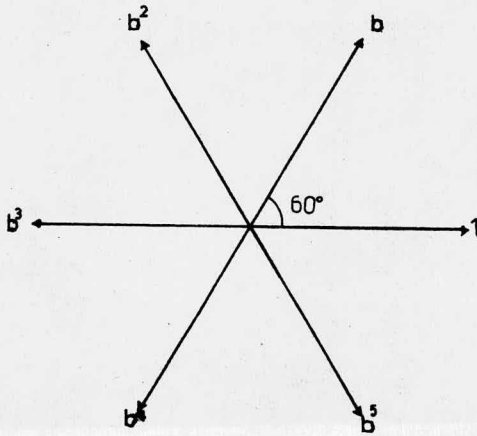


Figura 2.1

En la ecuación (2.1) se sintetizan las funciones más importantes del operador "b" y su relación con el operador "a".

$$\begin{aligned}
 b &= 1 \angle 60^\circ = 0.5 + j 0.866 = -a^2 = (b^5)^* \\
 b^2 &= 1 \angle 120^\circ = -0.5 + j 0.866 = a = (b^4)^* \\
 b^3 &= 1 \angle 180^\circ = -1 \\
 b^4 &= 1 \angle 240^\circ = -0.5 - j 0.866 = a^2 \\
 b^5 &= 1 \angle 300^\circ = 0.5 - j 0.866 = -a
 \end{aligned}$$

(2.1)

$$1 + b + b^2 + b^3 + b^4 + b^5 = 0$$

$$1 + b^3 = 0$$

$$1 + b^2 + b^4 = 1 + a + a^2 = 0$$

$$b + b^3 + b^5 = 0$$

El método de las componentes simétricas sirve para -- simplificar el análisis de sistemas eléctricos desequilibrados^{1/}.

Al aplicar el método a un sistema hexafásico desequilibrado, se divide en seis subsistemas balanceados llamados:

- a) Secuencia primera ó Secuencia positiva.
- b) Secuencia segunda.
- c) Secuencia tercera.
- d) Secuencia cuarta.
- e) Secuencia quinta ó Secuencia negativa.
- f) Secuencia sexta ó Secuencia cero.

El subsistema de secuencia positiva consiste de seis-fasores de igual magnitud desfasados 60° y con secuencia de-rotación a, b, c, d, e, f.

En la figura 2.2 se representa un sistema de fasores-de secuencia positiva.

^{1/} Ver Apéndice A.

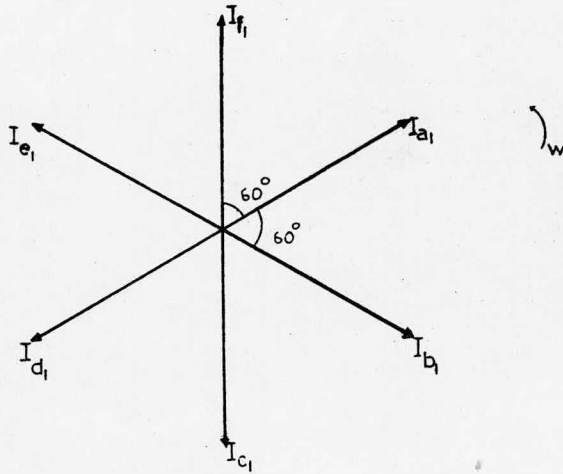


Figura 2.2 Secuencia Positiva.

Utilizando el operador "b" se deduce:

$$I_{a1} = I_{a1}$$

$$I_{b1} = b^5 I_{a1}$$

$$I_{c1} = b^4 I_{a1}$$

$$I_{d1} = b^3 I_{a1}$$

$$I_{e1} = b^2 I_{a1}$$

$$I_{f1} = b I_{a1}$$

El subsistema de secuencia segunda consiste de seis -
fasores de igual magnitud, existiendo un desfase de - -
120° en la secuencia de rotación ad, be, cf.

En la figura 2.3 se representa un sistema de fasores de secuencia segunda.

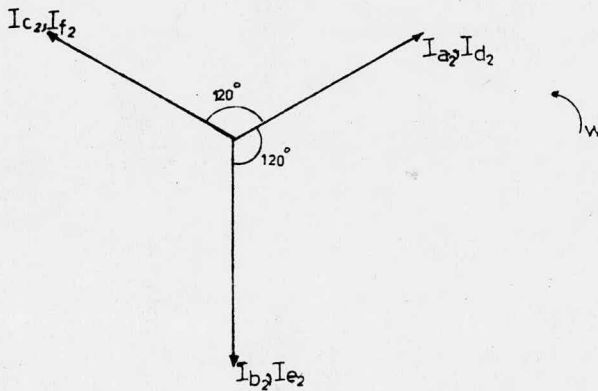


Figura 2.3 Secuencia Segunda

Utilizando el operador "b" tenemos:

$$I_{a2} = I_{a2}$$

$$I_{b2} = b^4 I_{a2}$$

$$I_{c2} = b^2 I_{a2}$$

$$I_{d2} = I_{a2}$$

$$I_{e2} = b^4 I_{a2}$$

$$I_{f2} = b^2 I_{a2}$$

El subsistema de secuencia tercera consiste de seis - fasores de igual magnitud, existiendo un desfase de 180° en el sentido de rotación ace, bdf.

En la figura 2.4 se representa un sistema de fasores de secuencia tercera.

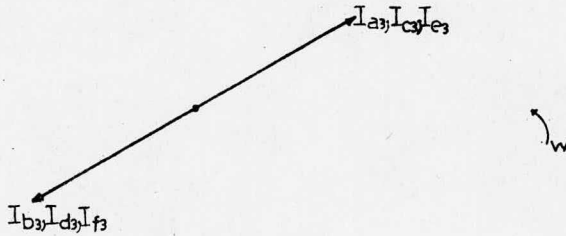


Figura 2.4 Secuencia Tercera

Utilizando el operador "b" tenemos:

$$I_{a3} = I_{c3} = I_{e3}$$

$$I_{b3} = I_{f3} = I_{d3} = b^3 I_{a3}$$

El subsistema de secuencia cuarta consiste de seis fasores de igual magnitud y con sentido de rotación contrario a la secuencia segunda ad, cf, be.

En la figura 2.5 se representa un sistema de fasores de secuencia cuarta.

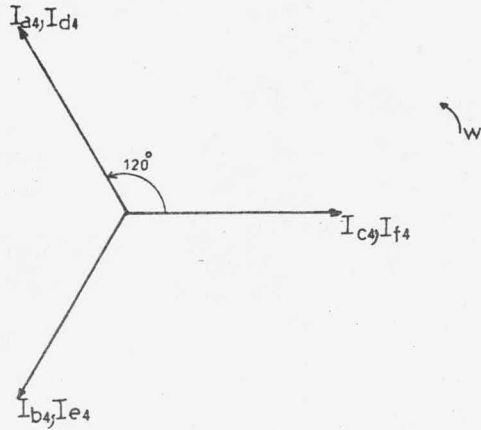


Figura 2.5 . Secuencia Cuarta

Al utilizar el operador "b" tenemos:

$$I_{a4} = I_{a4}$$

$$I_{b4} = b^2 I_{a4}$$

$$I_{c4} = b^4 I_{a4}$$

$$I_{d4} = I_{a4}$$

$$I_{e4} = b^2 I_{a4}$$

$$I_{f4} = b^4 I_{a4}$$

El subsistema de secuencia negativa consiste de seis-fasores de igual magnitud defasados 60° y con sentido de rotación contrario a la secuencia positiva a, f, e, d, c, b.

En la figura 2.6 se representa un sistema de fasores de secuencia negativa.

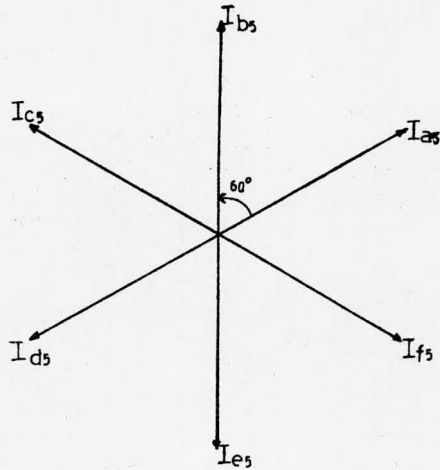


Figura 2.6 Secuencia Negativa

Al utilizar el operador "b" tenemos:

$$I_{a5} = I_{a5}$$

$$I_{b5} = b I_{a5}$$

$$I_{c5} = b^2 I_{a5}$$

$$I_{d5} = b^3 I_{a5}$$

$$I_{e5} = b^4 I_{a5}$$

$$I_{f5} = b^5 I_{a5}$$

El subsistema de secuencia cero consiste de seis fasores de igual magnitud y en fase.

En la figura 2.7 se representa un sistema de fasores de secuencia cero.

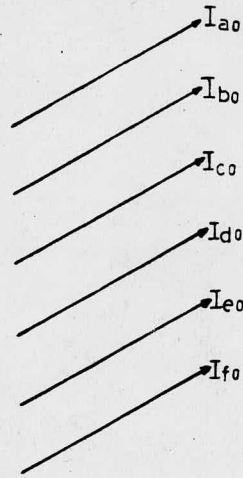


Figura 2.7 Secuencia Cero

$$I_{a0} = I_{b0} = I_{c0} = I_{d0} = I_{e0} = I_{f0}$$

Como cada uno de los fasores desequilibrados originales es igual a la suma de sus componentes, los fasores originales expresados en función de sus componentes son:

$$I_a = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} + I_{a3} + I_{a4} + I_{a5}$$

$$I_b = I_{b0} + I_{b1} + I_{b2} + I_{b3} + I_{b4} + I_{b5}$$

$$I_c = I_{c0} + I_{c1} + I_{c2} + I_{c3} + I_{c4} + I_{c5}$$

$$I_d = I_{d0} + I_{d1} + I_{d2} + I_{d3} + I_{d4} + I_{d5}$$

$$I_e = I_{e0} + I_{e1} + I_{e2} + I_{e3} + I_{e4} + I_{e5}$$

$$I_f = I_{f0} + I_{f1} + I_{f2} + I_{f3} + I_{f4} + I_{f5}$$

(2.2)

Al utilizar el operador "b" la ecuación (2.2) se escribe de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 I_a &= I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} + I_{a3} + I_{a4} + I_{a5} \\
 I_b &= I_{a0} + b^5 I_{a1} + b^4 I_{a2} + b^3 I_{a3} + b^2 I_{a4} + b I_{a5} \\
 I_c &= I_{a0} + b^4 I_{a1} + b^2 I_{a2} + I_{a3} + b^4 I_{a4} + b^2 I_{a5} \\
 I_d &= I_{a0} + b^3 I_{a1} + I_{a2} + b^3 I_{a3} + I_{a4} + b^3 I_{a5} \\
 I_e &= I_{a0} + b^2 I_{a1} + b^4 I_{a2} + I_{a3} + b^2 I_{a4} + b^4 I_{a5} \\
 I_f &= I_{a0} + b I_{a1} + b^2 I_{a2} + b^3 I_{a3} + b^4 I_{a4} + b^5 I_{a5}
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

La ecuación (2.3) en forma matricial:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_d \\ I_e \\ I_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & b^5 & b^4 & b^3 & b^2 & b \\ 1 & b^4 & b^2 & 1 & b^4 & b^2 \\ 1 & b^3 & 1 & b^3 & 1 & b^3 \\ 1 & b^2 & b^4 & 1 & b^2 & b^4 \\ 1 & b & b^2 & b^3 & b^4 & b^5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \\ I_{a3} \\ I_{a4} \\ I_{a5} \end{bmatrix}$$

ó bien en forma abreviada:

$$\begin{bmatrix} I_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \end{bmatrix} \tag{2.4}$$

Donde:

$$\begin{bmatrix} T_6 \end{bmatrix} = \text{Matriz de transformación para líneas hexafásicas.}$$

$$\begin{bmatrix} I_p \end{bmatrix} = \text{Matriz de corrientes de fase}$$

$$\begin{bmatrix} I_s \end{bmatrix} = \text{Matriz de corrientes de secuencia}$$

Por lo tanto las componentes de secuencia son:

$$\begin{bmatrix} I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_6 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I_p \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \\ I_{a3} \\ I_{a4} \\ I_{a5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & b & b^2 & b^3 & b^4 & b^5 \\ 1 & b^2 & b^4 & 1 & b^2 & b^4 \\ 1 & b^3 & 1 & b^3 & 1 & b^3 \\ 1 & b^4 & b^2 & 1 & b^4 & b^2 \\ 1 & b^5 & b^4 & b^3 & b^2 & b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_d \\ I_e \\ I_f \end{bmatrix}$$

Donde:

$$T_6^{-1} = \text{Matriz de transformación inversa}$$

Ecuaciones similares a (2.4) y (2.5) pueden ser obtenidas para las tensiones, esto es:

$$y \quad \begin{bmatrix} V_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$\begin{bmatrix} V_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_6 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_p \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

2.2.2 Impedancias en líneas de transmisión hexafásica.

El cálculo de las impedancias de los conductores de fase de una línea de transmisión hexafásica que opera en condiciones desequilibradas se realiza de la misma forma que el caso de una línea de circuito sencillo trifásico.

En la figura 2.8 se representa un sistema hexafásico con retorno por tierra.

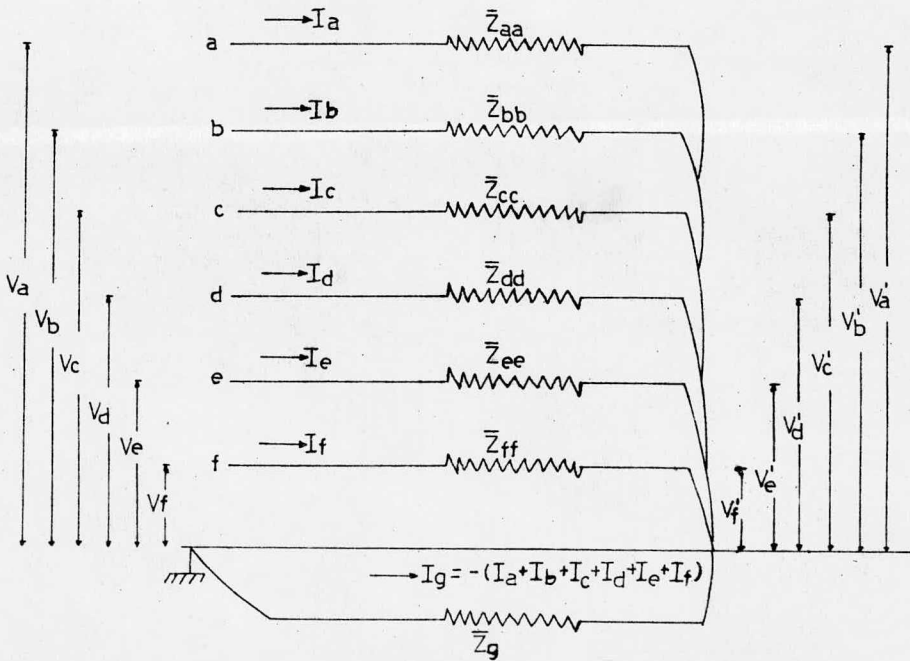


Figura 2.8 Sistema Hexafásico con Retorno por Tierra.

Del circuito tenemos:

$$\begin{array}{c}
 \boxed{V_a - V'_a} \\
 \boxed{V_b - V'_b} \\
 \boxed{V_c - V'_c} \\
 \boxed{V_d - V'_d} \\
 \boxed{V_e - V'_e} \\
 \boxed{V_f - V'_f} \\
 \boxed{V_g - V'_g}
 \end{array}
 =
 \begin{array}{c}
 \boxed{\bar{z}_{aa} \quad \bar{z}_{ab} \quad \bar{z}_{ac} \quad \bar{z}_{ad} \quad \bar{z}_{ae} \quad \bar{z}_{af} \quad \bar{z}_{ag}} \\
 \boxed{\bar{z}_{ba} \quad \bar{z}_{bb} \quad \bar{z}_{bc} \quad \bar{z}_{bd} \quad \bar{z}_{be} \quad \bar{z}_{bf} \quad \bar{z}_{bg}} \\
 \boxed{\bar{z}_{ca} \quad \bar{z}_{cb} \quad \bar{z}_{cc} \quad \bar{z}_{cd} \quad \bar{z}_{ce} \quad \bar{z}_{cf} \quad \bar{z}_{cg}} \\
 \boxed{\bar{z}_{da} \quad \bar{z}_{db} \quad \bar{z}_{dc} \quad \bar{z}_{dd} \quad \bar{z}_{de} \quad \bar{z}_{df} \quad \bar{z}_{dg}} \\
 \boxed{\bar{z}_{ea} \quad \bar{z}_{eb} \quad \bar{z}_{ec} \quad \bar{z}_{ed} \quad \bar{z}_{ee} \quad \bar{z}_{ef} \quad \bar{z}_{eg}} \\
 \boxed{\bar{z}_{fa} \quad \bar{z}_{fb} \quad \bar{z}_{fc} \quad \bar{z}_{fd} \quad \bar{z}_{fe} \quad \bar{z}_{ff} \quad \bar{z}_{fg}} \\
 \boxed{\bar{z}_{ga} \quad \bar{z}_{gb} \quad \bar{z}_{gc} \quad \bar{z}_{gd} \quad \bar{z}_{ge} \quad \bar{z}_{gf} \quad \bar{z}_{gg}}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \boxed{I_a} \\
 \boxed{I_b} \\
 \boxed{I_c} \\
 \boxed{I_d} \\
 \boxed{I_e} \\
 \boxed{I_f} \\
 \boxed{I_g}
 \end{array}$$

Ademas observamos que:

$$I_g = -(I_a + I_b + I_c + I_d + I_e + I_f) \quad V_g = 0$$

$$V'_g - V'_a = 0 \quad V'_g - V'_b = 0 \quad V'_g - V'_c = 0$$

$$V'_g - V'_d = 0 \quad V'_g - V'_e = 0 \quad V'_g - V'_f = 0$$

Aplicando el mismo procedimiento que se utiliza en -- una línea de transmisión de un sólo circuito trifásico^{2/}, es decir, restando la última ecuación a cada una de las otras -- seis restantes se obtiene:

^{2/} Ver Apéndice B.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_d \\ V_e \\ V_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{ad} & Z_{ae} & Z_{af} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{bd} & Z_{be} & Z_{bf} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{cd} & Z_{ce} & Z_{cf} \\ Z_{da} & Z_{db} & Z_{dc} & Z_{dd} & Z_{de} & Z_{df} \\ Z_{ea} & Z_{eb} & Z_{ec} & Z_{ed} & Z_{ee} & Z_{ef} \\ Z_{fa} & Z_{fb} & Z_{fc} & Z_{fd} & Z_{fe} & Z_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_d \\ I_e \\ I_f \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Donde:

$$Z_{pq} = (\bar{z}_{pp} - \bar{z}_{pg} - \bar{z}_{qg} + \bar{z}_{gg}) \quad \text{para } p, q = a, b, c, d, e, f. \quad (2.9)$$

$$Z_{pq} = (r_a + r_d) + jwk \log \frac{D_e}{D_{sa}} \quad \text{ohms/unidades de long.} \quad (2.10)$$

para $p = q = a, b, c, d, e, f.$

$$Z_{pq} = r_d + jwk \log \frac{D_e}{D_{pq}} \quad \text{ohms/unidades de long.} \quad (2.11)$$

$P \neq q \quad p, q = a, b, c, d, e, f.$

En una forma abreviada la ecuación (2.8) se representa como:

$$\begin{bmatrix} V_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_p \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Donde:

$$\begin{bmatrix} Z_p \end{bmatrix} = \text{Matriz de impedancia de fase}$$

2.2.3 Impedancias de Secuencia en Líneas de Transmisión Hexafásicas.

En el análisis para obtener la matriz de impedancia de secuencia se utiliza la ecuación (2.4) y (2.6) en (2.12).

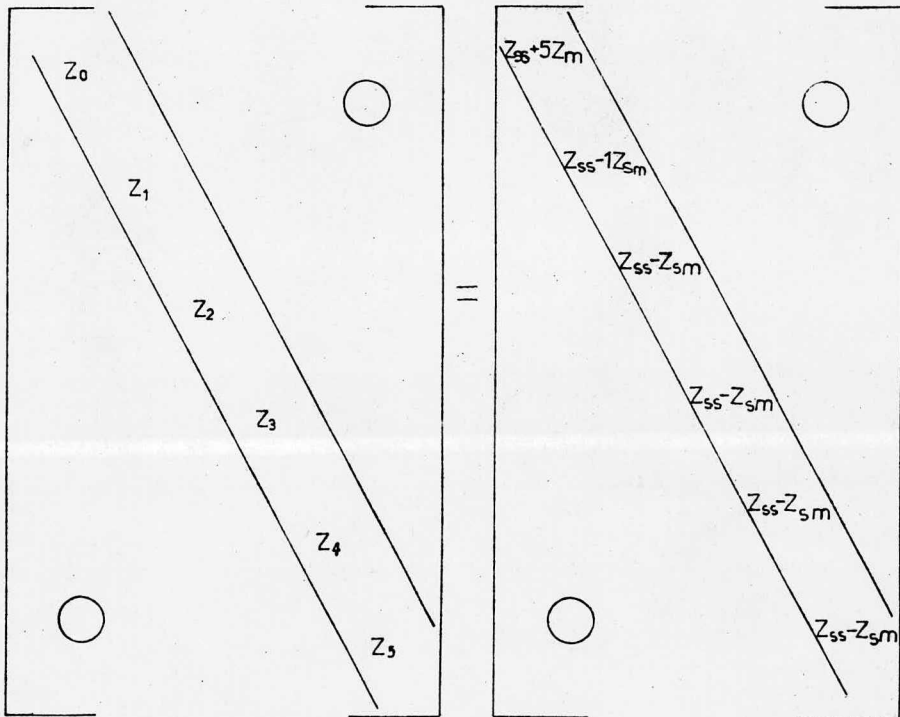
$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} T_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} Z_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} V_s \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} T_6 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Z_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} V_s \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} Z_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} Z_s \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} T_6 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Z_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_6 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{2.13}$$

La ecuación 2.13 es la expresión que se utiliza para obtener la matriz de secuencia. En una forma desarrollada tenemos:

Z_{00}	Z_{01}	Z_{02}	Z_{03}	Z_{04}	Z_{05}	= 1/6	1	1	1	1	1	Ec.2.8	Ec.2.4	
Z_{10}	Z_{11}	Z_{12}	Z_{13}	Z_{14}	Z_{15}		1	b^5	b^4	b^3	b^2			b
Z_{20}	Z_{21}	Z_{22}	Z_{23}	Z_{24}	Z_{25}		1	b^2	b^4	1	b^2			b^4
Z_{30}	Z_{31}	Z_{32}	Z_{33}	Z_{34}	Z_{35}		1	b^3	1	b^3	1			b^3
Z_{40}	Z_{41}	Z_{42}	Z_{43}	Z_{44}	Z_{45}		1	b^4	b^2	1	b^4			b^2
Z_{50}	Z_{51}	Z_{52}	Z_{53}	Z_{54}	Z_{55}		1	b	b^2	b^3	b^4			b^5

Si existen trasposiciones entre los seis conductores en cada 1/15 de longitud de la línea de transmisión, es decir, que cada conductor ocupa la posición original de cada uno de los otros conductores sobre una distancia igual, las impedancias

cias mutuas entre secuencias son iguales a cero^{3/}. Si se considera este concepto y se efectúan las operaciones respectivas se llega al resultado siguiente:



^{3/} IEEE. Six phases (MULTI-PHASE) power transmission systems (vol #3, may/june 1977).

Donde:

Z_0 = Impedancia de secuencia cero

Z_1 = Impedancia de secuencia positiva

Z_2 = Impedancia de secuencia segunda

Z_3 = Impedancia de secuencia tercera

Z_4 = Impedancia de secuencia cuarta

Z_5 = Impedancia de secuencia negativa

$$Z_0 = Z_{SS} + 5Z_m \quad (2.14)$$

$$Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z_4 = Z_5 = Z_{SS} - Z_{Sm} \quad (2.15)$$

$$Z_{SS} = 1/6 (Z_{aa} + Z_{bb} + Z_{cc} + Z_{dd} + Z_{ee} + Z_{ff}) \quad (2.16)$$

$$Z_{Sm} = 1/15 (Z_{ab} + Z_{ac} + Z_{ad} + Z_{ae} + Z_{af} + Z_{bc} \quad (2.17)$$

$$Z_{bd} + Z_{be} + Z_{bf} + Z_{cd} + Z_{ce} + Z_{cf} + Z_{de} + Z_{df} + Z_{ef})$$

2.2.4 Impedancias de secuencia en líneas de transmisión hexa fásica con un hilo de guarda.

Para proteger las líneas de transmisión contra las --
descargas directas de rayos sobre los conductores se colocan-

cables de guarda ó de tierra conectados a tierra en cada torre. La función de estos cables de guarda consiste en interceptar los rayos y descargarlos a tierra a través de las torres.

En la figura 2.9 se muestran los dos tipos de torres de transmisión más usuales y la colocación de los cables de guarda con respecto a los conductores, para obtener un blindaje eficaz.

La experiencia obtenida indica que el ángulo de proyección, que se muestra en la figura antes citada, no debe ser mayor de 30°.

La fig. 2.10 representa un sistema hexafásico con un hilo de guarda. Del circuito se obtiene las Ec. siguientes.

$$\begin{array}{c}
 \overline{V_a - V'_a} \\
 \overline{V_b - V'_b} \\
 \overline{V_c - V'_c} \\
 \overline{V_d - V'_d} \\
 \overline{V_e - V'_e} \\
 \overline{V_f - V'_f} \\
 \overline{V_w - V'_w} \\
 \overline{V_g - V'_g}
 \end{array}
 =
 \begin{array}{cccccccc}
 \overline{z_{aa}} & \overline{z_{ab}} & \overline{z_{ac}} & \overline{z_{ad}} & \overline{z_{ae}} & \overline{z_{af}} & \overline{z_{aw}} & \overline{z_{ag}} \\
 \overline{z_{ba}} & \overline{z_{bb}} & \overline{z_{bc}} & \overline{z_{bd}} & \overline{z_{be}} & \overline{z_{bf}} & \overline{z_{bw}} & \overline{z_{bg}} \\
 \overline{z_{ca}} & \overline{z_{cb}} & \overline{z_{cc}} & \overline{z_{cd}} & \overline{z_{ce}} & \overline{z_{cf}} & \overline{z_{cw}} & \overline{z_{cg}} \\
 \overline{z_{da}} & \overline{z_{db}} & \overline{z_{dc}} & \overline{z_{dd}} & \overline{z_{de}} & \overline{z_{df}} & \overline{z_{dw}} & \overline{z_{dg}} \\
 \overline{z_{ea}} & \overline{z_{eb}} & \overline{z_{ec}} & \overline{z_{ed}} & \overline{z_{ee}} & \overline{z_{ef}} & \overline{z_{ew}} & \overline{z_{eg}} \\
 \overline{z_{fa}} & \overline{z_{fb}} & \overline{z_{fc}} & \overline{z_{fd}} & \overline{z_{fe}} & \overline{z_{ff}} & \overline{z_{fw}} & \overline{z_{fg}} \\
 \overline{z_{wa}} & \overline{z_{wb}} & \overline{z_{wc}} & \overline{z_{wd}} & \overline{z_{we}} & \overline{z_{wf}} & \overline{z_{ww}} & \overline{z_{wg}} \\
 \overline{z_{ga}} & \overline{z_{gb}} & \overline{z_{gc}} & \overline{z_{gd}} & \overline{z_{ge}} & \overline{z_{gf}} & \overline{z_{gw}} & \overline{z_{gg}}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 I_a \\
 I_b \\
 I_c \\
 I_d \\
 I_e \\
 I_f \\
 I_w \\
 I_g
 \end{array}$$

Del circuito anterior tenemos:

$$I_a + I_b + I_c + I_d + I_e + I_f = -(I_g + I_w)$$

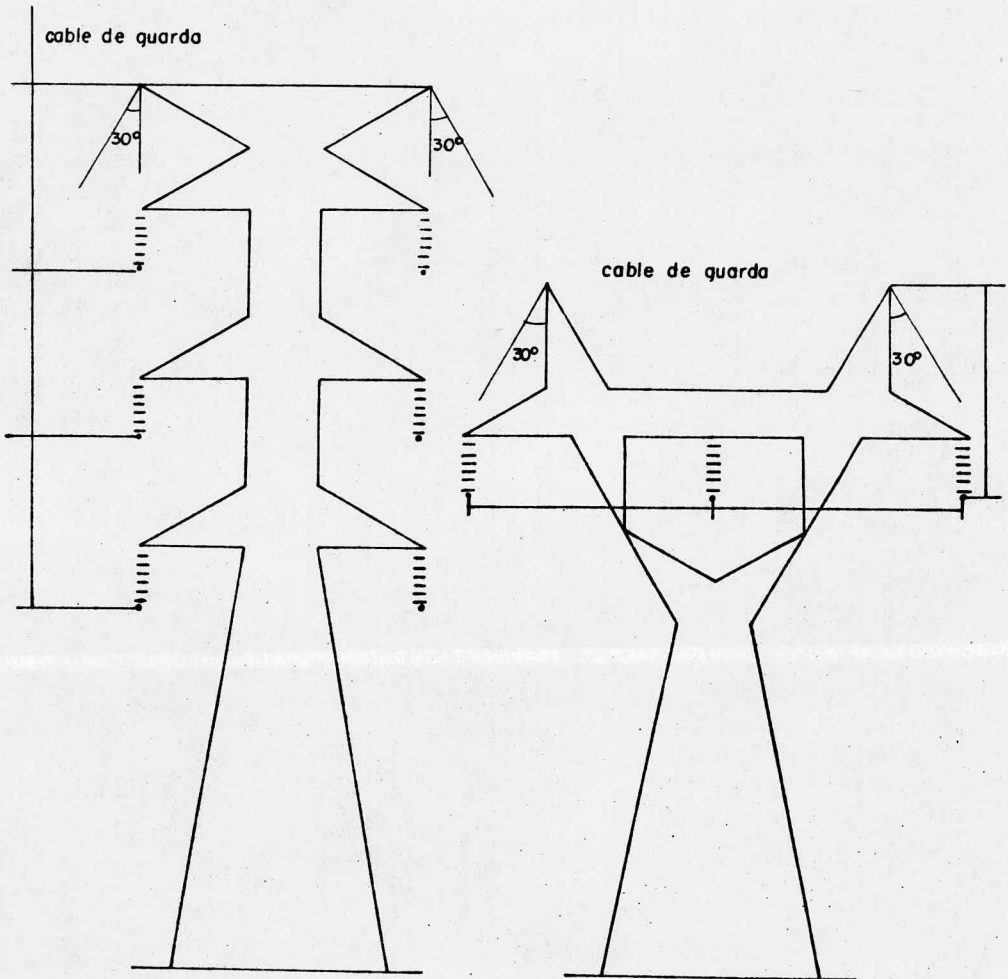


Figura 2.9 Disposición de los cables de guarda en las torres de transmisión.

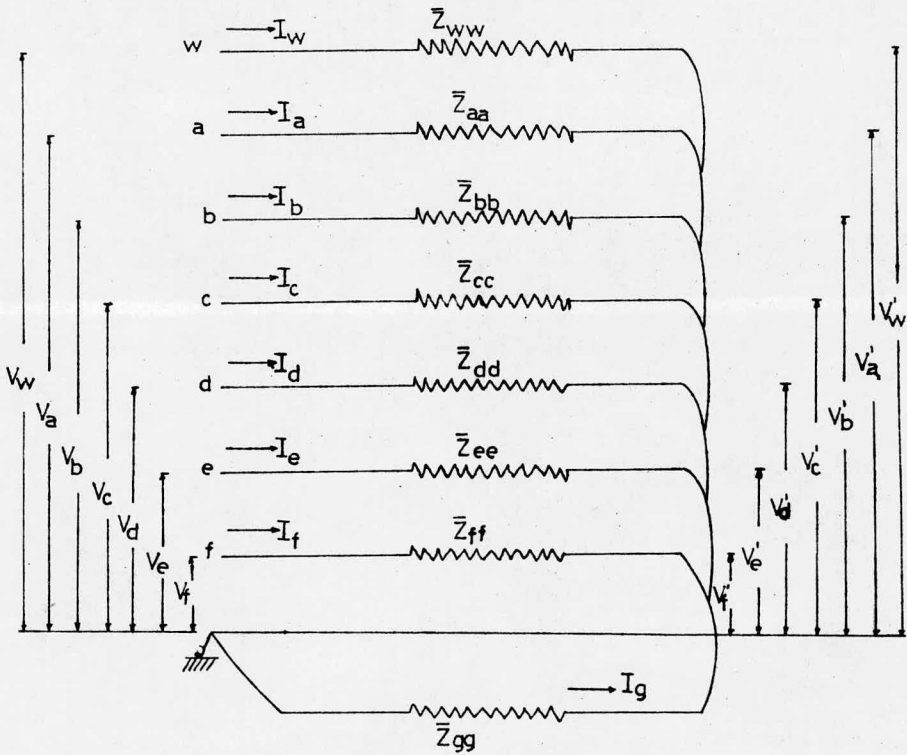


Figura 2.10 Sistema hexafásico con un hilo de guarda

$$\begin{array}{cccc}
 V'_g - V'_a = 0 & V'_g - V'_b = 0 & V'_g - V'_c = 0 & V'_g - V'_d = 0 \\
 V'_g - V'_e = 0 & V'_g - V'_f = 0 & V'_g - V'_w = 0 & V'_g = 0 \quad V'_w = 0
 \end{array}$$

De nuevo se aplica el procedimiento de restar la última ec., a las siete restantes obteniéndose:

$$\begin{array}{c}
 \boxed{V_a} \\
 \boxed{V_b} \\
 \boxed{V_c} \\
 \boxed{V_d} \\
 \boxed{V_e} \\
 \boxed{V_f} \\
 \boxed{V_w}
 \end{array}
 =
 \begin{array}{c}
 \boxed{Z_{aa}} \quad \boxed{Z_{ab}} \quad \boxed{Z_{ac}} \quad \boxed{Z_{ad}} \quad \boxed{Z_{ae}} \quad \boxed{Z_{af}} \\
 \boxed{Z_{ba}} \quad \boxed{Z_{bb}} \quad \boxed{Z_{bc}} \quad \boxed{Z_{bd}} \quad \boxed{Z_{be}} \quad \boxed{Z_{bf}} \\
 \boxed{Z_{ca}} \quad \boxed{Z_{cb}} \quad \boxed{Z_{cc}} \quad \boxed{Z_{cd}} \quad \boxed{Z_{ce}} \quad \boxed{Z_{cf}} \\
 \boxed{Z_{da}} \quad \boxed{Z_{db}} \quad \boxed{Z_{dc}} \quad \boxed{Z_{dd}} \quad \boxed{Z_{de}} \quad \boxed{Z_{df}} \\
 \boxed{Z_{ea}} \quad \boxed{Z_{eb}} \quad \boxed{Z_{ec}} \quad \boxed{Z_{ed}} \quad \boxed{Z_{ee}} \quad \boxed{Z_{ef}} \\
 \boxed{Z_{fa}} \quad \boxed{Z_{fb}} \quad \boxed{Z_{fc}} \quad \boxed{Z_{fd}} \quad \boxed{Z_{fe}} \quad \boxed{Z_{ff}} \\
 \boxed{Z_{wa}} \quad \boxed{Z_{wb}} \quad \boxed{Z_{wc}} \quad \boxed{Z_{wd}} \quad \boxed{Z_{we}} \quad \boxed{Z_{wf}}
 \end{array}
 \left| \begin{array}{c}
 \boxed{Z_{aw}} \\
 \boxed{Z_{bw}} \\
 \boxed{Z_{cw}} \\
 \boxed{Z_{dw}} \\
 \boxed{Z_{ew}} \\
 \boxed{Z_{fw}} \\
 \boxed{Z_{ww}}
 \end{array} \right.
 \begin{array}{c}
 \boxed{I_a} \\
 \boxed{I_b} \\
 \boxed{I_c} \\
 \boxed{I_d} \\
 \boxed{I_e} \\
 \boxed{I_f} \\
 \boxed{-I_w - I_d}
 \end{array}$$

(2.18)

Donde:

$$Z_{pq} = (r_a + r_d) + jwk \log \frac{D_e}{D_{sa}} \text{ ohms/u.1.} \quad (2.19)$$

para: $p = q = a, b, c, d, e, f, w$

$$Z_{ww} = (r_w + r_d) + jwk \log \frac{D_e}{D_{sw}} \text{ ohms/u.1.} \quad (2.20)$$

$$Z_{pq} = r_d + jwk \log \frac{D_e}{D_{pq}}$$

para: $p \neq q$ y $p, q = a, b, c, d, e, f, w$.

El siguiente paso para obtener la matriz de impedancias de fase de una línea de transmisión hexafásica con hilo-

de guarda, es eliminar los renglones y las columnas que corresponden al hilo de guarda, w, esto se logra por medio de la reducción de Krón^{4/} aplicada a matrices. Esto es a la matriz 7 x 7 de la ecuación (2.18), la partimos en las siguientes submatrices:

$$Z_p = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{ad} & Z_{ae} & Z_{af} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{bd} & Z_{be} & Z_{bf} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{cd} & Z_{ce} & Z_{cf} \\ Z_{da} & Z_{db} & Z_{dc} & Z_{dd} & Z_{de} & Z_{df} \\ Z_{ea} & Z_{eb} & Z_{ec} & Z_{ed} & Z_{ee} & Z_{ef} \\ Z_{fa} & Z_{fb} & Z_{fc} & Z_{fd} & Z_{fe} & Z_{ff} \end{bmatrix} \quad Z_1 = \begin{bmatrix} Z_{aw} \\ Z_{bw} \\ Z_{cw} \\ Z_{dw} \\ Z_{ew} \\ Z_{fw} \end{bmatrix}$$

$$Z_2 = \begin{bmatrix} Z_{wa} & Z_{wb} & Z_{wc} & Z_{wd} & Z_{we} & Z_{wf} \end{bmatrix} \quad Z_3 = \begin{bmatrix} Z_{ww} \end{bmatrix}$$

Al aplicar la reducción de Krón se obtiene:

$$\begin{bmatrix} \hat{Z}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_p \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Z_2 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Donde el orden de la matriz Z_p después de aplicar la reducción es de 6 x 6.

^{4/} P. Anderson; "Analysis of Faulted power System" (The -- Iowa State University Press Ames Iowa 1973).

$$\hat{Z}_p = \begin{bmatrix} \hat{z}_{aa} & \hat{z}_{ab} & \hat{z}_{ac} & \hat{z}_{ad} & \hat{z}_{as} & \hat{z}_{af} \\ \hat{z}_{ba} & \hat{z}_{bb} & \hat{z}_{bc} & \hat{z}_{bd} & \hat{z}_{bs} & \hat{z}_{bf} \\ \hat{z}_{ca} & \hat{z}_{cb} & \hat{z}_{cc} & \hat{z}_{cd} & \hat{z}_{cs} & \hat{z}_{cf} \\ \hat{z}_{da} & \hat{z}_{db} & \hat{z}_{dc} & \hat{z}_{dd} & \hat{z}_{ds} & \hat{z}_{df} \\ \hat{z}_{ea} & \hat{z}_{eb} & \hat{z}_{ec} & \hat{z}_{ed} & \hat{z}_{es} & \hat{z}_{ef} \\ \hat{z}_{fa} & \hat{z}_{fb} & \hat{z}_{fc} & \hat{z}_{fd} & \hat{z}_{fs} & \hat{z}_{ff} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Donde:

\hat{Z}_p = Matriz de impedancias de fase para una línea de transmisión hexafásica con un hilo de guarda.

$$\hat{z}_{pq} = z_{pq} - \frac{z_{pw} z_{wg}}{z_{ww}} \quad (2.24)$$

para $p, q = a, b, c, d, e, f$.

A partir de la matriz \hat{Z}_p y al aplicar las matrices de transformación se obtienen las impedancias de secuencia de -- una línea de transmisión hexafásica con hilo de guarda, esto es:

$$[Z_s] = [T_6]^{-1} [\hat{Z}_p] [T_6] \quad (2.25)$$

Al utilizar el mismo desarrollo que en el caso anterior obtenemos:

$$\begin{aligned} Z_0 &= Z_{ss} + 5Z_{sm} \\ Z_1 &= Z_2 = Z_3 = Z_4 = Z_5 = Z_{ss} - Z_{sm} \\ Z_{ss} &= 1/6 (\hat{z}_{aa} + \hat{z}_{bb} + \hat{z}_{cc} + \hat{z}_{dd} + \hat{z}_{ee} + \hat{z}_{ff}) \end{aligned} \quad (2.26)$$

$$Z_{sm} = 1/15 (\hat{Z}_{ab} + \hat{Z}_{ac} + \hat{Z}_{ad} + \hat{Z}_{ae} + \hat{Z}_{af} + \hat{Z}_{bc} + \hat{Z}_{bd} + \hat{Z}_{be} + \hat{Z}_{bf} + \hat{Z}_{cd} + \hat{Z}_{ce} + \hat{Z}_{cf} + \hat{Z}_{de} + \hat{Z}_{df} + \hat{Z}_{ef}) \quad (2.27)$$

En una línea de transmisión hexafásica con dos conductores de tierra (w,u), las impedancias de secuencia se obtienen al realizar un análisis semejante al visto anteriormente (un hilo de guarda). Por tanto:

$$\hat{Z}_p = \begin{bmatrix} \hat{Z}_{aa} & \hat{Z}_{ab} & \hat{Z}_{ac} & \hat{Z}_{ad} & \hat{Z}_{ae} & \hat{Z}_{af} \\ \hat{Z}_{ba} & \hat{Z}_{bb} & \hat{Z}_{bc} & \hat{Z}_{bd} & \hat{Z}_{be} & \hat{Z}_{bf} \\ \hat{Z}_{ca} & \hat{Z}_{cb} & \hat{Z}_{cc} & \hat{Z}_{cd} & \hat{Z}_{ce} & \hat{Z}_{cf} \\ \hat{Z}_{da} & \hat{Z}_{db} & \hat{Z}_{dc} & \hat{Z}_{dd} & \hat{Z}_{de} & \hat{Z}_{df} \\ \hat{Z}_{ea} & \hat{Z}_{eb} & \hat{Z}_{ec} & \hat{Z}_{ed} & \hat{Z}_{ee} & \hat{Z}_{ef} \\ \hat{Z}_{fa} & \hat{Z}_{fb} & \hat{Z}_{fc} & \hat{Z}_{fd} & \hat{Z}_{fe} & \hat{Z}_{ff} \end{bmatrix}$$

$$\hat{Z}_{pq} = Z_{pq} = \frac{Z_{pu}Z_{ww}Z_{uq} - Z_{pu}Z_{uw}Z_{wq} - Z_{pw}Z_{wu}Z_{uq} + Z_{pw}Z_{uu}Z_{wq}}{Z_{uu}Z_{ww} - Z_{uw}^2} \quad (2.28)$$

Para $p, q = a, b, c, d, e, f$

$$Z_0 = Z_{ss} + 5Z_{sm}$$

$$Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z_4 = Z_5 = Z_{ss} - Z_{sm}$$

2.3 Evaluación de las características de la línea de transmisión.

Se evalúan cinco características diferentes:

Como son: (1) Potencia natural de la línea y (2) Carga térmica que son independientes de la longitud de la línea. Las otras tres, (3) Regulación de tensión, (4) Eficiencia y (5) Capacidad de la máxima potencia transferida en la línea, dependientes de la longitud de la línea.

2.3.1 Características independientes de la longitud de la línea

(1) Potencia natural de la línea.

$$SIL = N (V_{L-N})^2 / SI \quad \text{MW} \quad (2.29)$$

Donde:

$$SI = \sqrt{X_1 / Y_1} \quad \text{MW}$$

N = Número de fases

V_{L-N} = Tensión de línea a neutro en KV.

SI = Impedancia característica.

X_1 = Reactancia Inductiva de secuencia positiva en -- ohms/milla.

Y_1 = Admitancia shun de secuencia positiva en ohms/milla.

(2) Carga térmica.

$$THL = N_c(N) V_{L-N} I_1 \times 10^{-3} \quad \text{MVA} \quad (1.4)$$

2.3.2 Características dependientes de la distancia.

Las tres características dependientes de la distancia se pueden evaluar, al usar el modelo π de la línea, el cual se muestra en la figura (2.11).

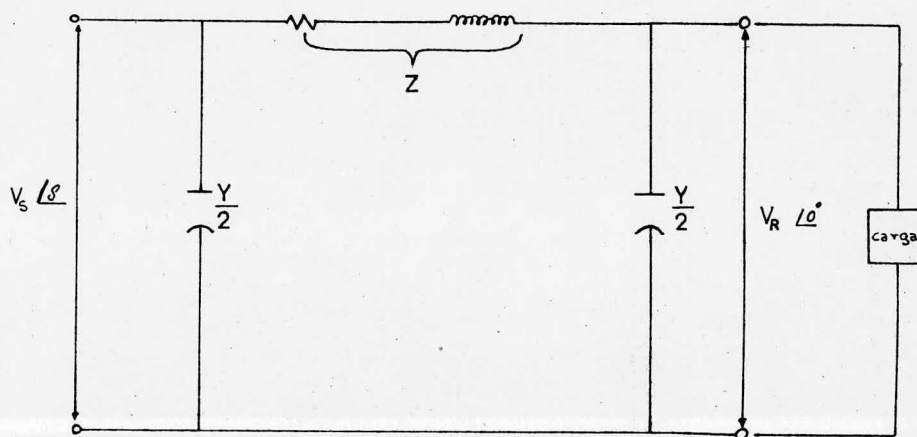


Figura 2.11 Modelo π para líneas de transmisión.

Los valores de impedancia Z y admitancia shun para -- una longitud de línea se calculan:

$$\begin{aligned} Z &= Z_1 \times L \\ Y &= Y_1 \times L \end{aligned} \quad (2.30)$$

Con estos parámetros se calculan las constantes A, B, C y D para el modelo π de la línea.

$$\begin{aligned}
 A &= 1 + (Z \times Y)/2 \\
 B &= Z \\
 C &= Y + (Z \times Y^2)/4 \\
 D &= 1 + (Z \times Y)/2
 \end{aligned}
 \tag{2.31}$$

El próximo paso es suponer las cantidades en el final de la línea.

Estas son:

- a) Tensión el cual se supone igual a la tensión del sistema.
- b) Factor de potencia de la carga al final de la línea.
- c) Potencia real al final de la línea, el cual se -- asigna a las siguientes restricciones.

$$SIL \leq \text{Potencia Real} \leq THL$$

Si la potencia real es P_1 se tiene:

$$\begin{aligned}
 \delta &= \delta_{\text{nominal}} = \text{Arcsen}(P_1 \times \text{nominal} / 3 / V / R^2) \quad (\text{para } 3\emptyset) \\
 &= \text{Arcsen}(P_1 \times \text{nominal} / 6 / V / R^2) \quad (\text{para } 6\emptyset)
 \end{aligned}
 \tag{2.32}$$

Con X_{nominal} y $/V_S/ = /V_R/$, entonces, la potencia receptora se calcula de acuerdo a la ecuación (1.2) como sigue:

$$P_R = \frac{3V_R^2}{R^2 + X^2} \left[-R + R \cos(\delta_{\text{nominal}}) + X \sin(\delta_{\text{nominal}}) \right]$$

(para $3\emptyset$)

$$P_R = \frac{6/V_R^2}{R^2 + X^2} \left[-R + R \cos(\delta_{\text{nominal}}) + X \sin(\delta_{\text{nominal}}) \right]$$

(para 6Ø)

Conocidos V_R , P_R y el factor de potencia es posible calcular la corriente final I_R ; entonces, nuestro paso siguiente es calcular la corriente, el voltaje y potencia real en el inicio de la línea como sigue:

$$V_S = AV_R + BI_R$$

$$I_S = AV_R + DI_R \quad (2.33)$$

$$P_S = \text{REAL} (3V_S I_S^*) \quad (\text{para } 3\phi)$$

$$P_S = \text{REAL} (6V_S I_S^*) \quad (\text{para } 6\phi)$$

Conocidos estos parámetros de la línea se calculan las características dependientes de la longitud de la línea.

(3) Regulación de tensión.

$$\text{Regulación de tensión} = \frac{(V_S/A - V_R)}{V_R} \times 100 \quad (2.34)$$

(4) Eficiencia de transmisión.

$$\text{Eficiencia} = \frac{P_R \times 100}{P_S} \% \quad (2.35)$$

(5) Máxima potencia transferida; conocida también como límite de estabilidad en estado estable se calcula como:

$$P_{\text{máx}} = \frac{N}{R^2 + X^2} \left[\frac{-R/V_R^2 + R/V_S // V_R / \cos(\delta_{\text{máx}}) + X/V_S // V_R / \left[\frac{\sin(\delta_{\text{máx}})}{\cos(\delta_{\text{máx}})} \right]}{\sin(\delta_{\text{máx}})} \right] \quad (2.36)$$

Donde:

$N = 3$ para 3 fases

$N = 6$ para 6 fases

Estas características de la línea de transmisión y sus parámetros eléctricos son calculados para los cinco tipos de líneas mencionadas al inicio de este capítulo y para diferentes arreglos de conductores. Estos resultados se encuentran resumidos en las tablas 2.1 y 2.2, y los diferentes arreglos de conductores utilizados se muestran en las figuras 1.1 y 1.2 del primer capítulo.

	TIPO DE LINEA Y CONFIGURACION - DE LOS CONDUCTORES.	TIPO DE CONDUCTOR	Z_{11} ohms/ph/milla	B_{11} s/ph milla	SIL MW	THL MVA	PARA UNA LONGITUD DE 30 MILLAS Y F.P. = 1.0		
							REG. DE VOLTAJE	EFICIEN CIA.	LIMITE DE ESTABILIDAD EN EDO. ESTABLE MW
1	230 KV 3 FASES - 1 CTO. CONFIGURACION A.1	ACSR 795 MCM	0.1307 + j0.7965	5.378	137	459	3.94	97.41	1913
		ACSR 900 MCM	0.1204 + j0.7919	5.419	137	386	4.11	97.43	1957
		ACSR 954 MCM	0.1147 + j0.7877	5.445	139	402	4.20	97.45	1984
		ACSR 1113 MCM	0.0988 + j0.7785	5.514	140	438	4.28	97.60	2056
2	230 KV 3 FASES - 2 CTO. CONFIGURACION B.1	ACSR 900 MCM	0.0601 + j0.3852	11.18	283	773	4.02	97.43	3999
		ACSR 954 MCM	0.0573 + j0.3834	11.23	285	805	4.11	97.45	4054
		ACSR 1113 MCM	0.0493 + j0.3786	11.38	289	876	4.18	97.61	4206
		ACSR 1113-BL MCM	0.0479 + j0.3816	11.33	287	884	4.19	97.63	4197
3	230 KV SEIS - FASES CONFIGURACION B.1	ACSR 900 MCM	0.1202 + j0.7954	5.419	824	1339	2.03	98.50	11421
		ACSR 954 MCM	0.1145 + j0.7923	5.445	832	1394	2.05	98.51	11571
		ACSR 1113 MCM	0.0986 + j0.7830	5.52	839	1518	2.04	98.60	11978
		ACSR 1113-BL MCM	0.0956 + j0.7887	5.49	834	1532	2.03	98.63	11955
4	400 KV 3 FASES - 2 CTO. CONFIGURACION B.1	ACSR 900 MCM	0.0601 + j0.3852	11.18	856	1344	1.99	98.50	11816
		ACSR 954 MCM	0.0573 + j0.3834	11.23	861	1399	2.01	98.52	11973
		ACSR 1113 MCM	0.0493 + j0.3786	11.38	874	1524	1.99	98.61	12416
		ACSR 1113-BL MCM	0.0479 + j0.3816	11.33	868	1524	1.96	98.65	12385
5	400 KV 3 FASES - 1 CTO. CONFIGURACION A.1	ACSR 795 MCM	0.1307 + j0.7965	5.378	413	624	1.96	98.49	5653
		ACSR 900 MCM	0.1204 + j0.7914	5.419	416	672	2.01	98.51	5781
		ACSR 954 MCM	0.1147 + j0.7877	5.445	419	700	2.04	98.52	5857
		ACSR 1113-BL MCM	0.0982 + j0.7785	5.514	424	762	2.03	98.61	6065

TABLA 2.1 PARAMETROS ELECTRICOS Y CARACTERISTICAS DE CINCO TIPOS DIFERENTES DE LINEA.

	TIPO DE LINEA Y CONFIGURACION - DE LOS CONDUCTORES.	TIPO DE CONDUCTOR	Z_{11} ohms/ph/milla	B_1 s/ph/milla	SIL MW	THL MVA	PARA UNA LONGITUD DE LINEA DE 30 MILLAS Y P.P = 1.0		
							REG. DE VOLTAJE	EFICIENCIA.	LIMITE DE ESTABILIDAD EN EDO. ESTABLE MW.
1	230 KV 3 FASES - 1 CTO. CONFIGURACION A.2	ACSR 795 MCM	0.1298 + j0.8493	5.0143	128	359	4.09	97.43	1823
		ACSR 900 MCM	0.1195 + j0.8412	5.050	126	386	4.29	97.45	1863
		ACSR 954 MCM	0.1138 + j0.8405	5.072	130	402	4.39	97.47	1887
		ACSR 1113 MCM	0.0979 + j0.8313	5.130	131	438	4.51	97.63	1951
2	230 KV 3 FASES - 2 CTO. CONFIGURACION A.2	ACSR 900 MCM	0.0500 + j0.4117	10.41	265	773	4.22	97.44	3797
		ACSR 954 MCM	0.0572 + j0.4099	10.45	266	805	4.32	97.46	3847
		ACSR 1113 MCM	0.0492 + j0.4053	10.58	269	876	4.42	97.61	3981
		ACSR 1113-BL MCM	0.0478 + j0.4082	10.54	268	884	4.44	97.66	3973
3	230 KV SEIS FASES CONFIGURACION B.2	ACSR 900 MCM	0.12017 + j0.8507	5.048	769	1339	2.09	98.50	10826
		ACSR 954 MCM	0.11447 + j0.8471	5.07	773	1394	2.13	98.51	10959
		ACSR 1113 MCM	0.09857 + j0.8378	5.13	783	1518	2.13	98.61	11319
		ACSR 1113-BL MCM	0.09577 + j0.8435	5.11	779	1532	2.13	98.63	11297
4	400 KV 3 FASES - 2 CTO. CONFIGURACION B.2	ACSR 900 MCM	0.0500 + j0.4117	10.41	800	1344	2.05	98.51	11206
		ACSR 954 MCM	0.0572 + j0.4099	10.45	804	1399	2.08	98.52	11348
		ACSR 1113 MCM	0.0492 + j0.4053	10.58	815	1524	2.07	98.61	11734
		ACSR 1113-BL MCM	0.0478 + j0.4082	10.54	810	1524	2.04	98.65	11707
5	400 KV 3 FASES - 1 CTO. CONFIGURACION A.2	ACSR 795 MCM	0.1298 + j0.8493	5.0143	387	624	2.00	98.50	5382
		ACSR 900 MCM	0.1195 + j0.8442	5.05	382	672	2.07	98.52	5496
		ACSR 954 MCM	0.1138 + j0.8405	5.072	394	700	2.10	98.53	5564
		ACSR 1113 MCM	0.0979 + j0.8313	5.138	396	762	2.10	98.62	5748

TABLA 2.2 PARAMETROS ELECTRICOS Y CARACTERISTICAS DE CINCO TIPOS DIFERENTES DE LINEA.

C A P I T U L O I I I

SELECCION DEL TRANSFORMADOR TRIFASICO/HEXAFASICO

3.1 Introducción.

Una realidad esencial en el estudio de la transmisión de potencia hexafásica, es que su generación y utilización -- continuará siendo trifásica, esto naturalmente plantea la necesidad de transformar la generación de tensiones trifásicas, a tensiones de transmisión hexafásica, las cuales deben ser reducidas a niveles de tensión de distribución trifásica, las transformaciones se pueden hacer con sistemas de transformadores adecuados.


Un paso importante en el uso del concepto hexafásico-- está en encontrar el mejor tipo de transformador desde el punto de vista de potencia, capacidad de manejo, costo, confiabilidad, relación de tensión y corriente, regulación de voltaje, eficiencia, las necesidades de cambio de tema y protección.

En este capítulo se trata de encontrar las mejores características para la selección de transformador trifásico/hexafásico, basados en los datos proporcionados por el laboratorio

rio de potencia de la WEST VIRGINIA UNIVERSITY, para investigar las diferentes configuraciones de transformadores posibles y obtener los modelos y evaluar sus características.

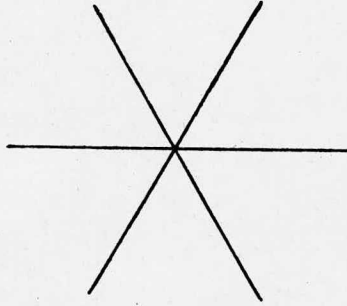
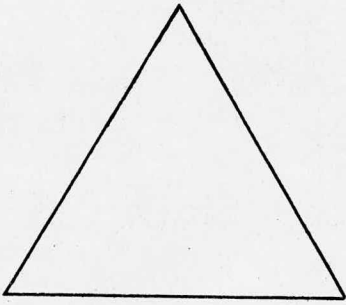
3.2 Transformadores Trifásicos/Hexafásicos.

Después de un análisis de los diferentes tipos de transformadores trifásicos/hexafásicos, se decidió enfocar la atención en los cuatro tipos específicos de transformadores los cuales están situados idealmente para el proceso de transformación de tensión. Estos se muestran en la fig. 3.1.

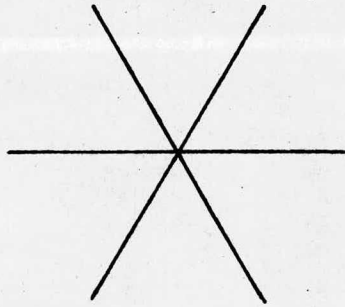
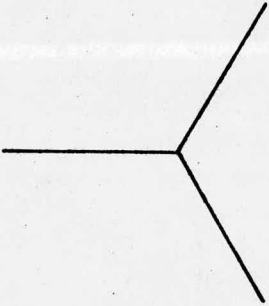
Estos transformadores no sólo transforman las tensiones, como los transformadores convencionales, sino que también la alimentación trifásica a la alimentación hexafásica y viceversa. Aunque otro tipo de conexión como, \triangle (delta),  (hexágono) son posibles, no fueron considerados debido a la falta del neutro, requerida para la protección de las líneas en cualquiera de los lados del transformador.

Con el fin de determinar el modelo y evaluar sus características constantes condicionadas, cada una de las cuatro conexiones mostradas en las fig. 3.1 se simularon en el laboratorio de potencia de la WEST VIRGINIA UNIVERSITY, usando unos transformadores trifásicos sencillos y conectándolos convenientemente.

Cada uno de estos transformadores tiene una potencia máxima de 1.5 KVA 230-115/230-115 V y 60 Hz, y su esquema se-

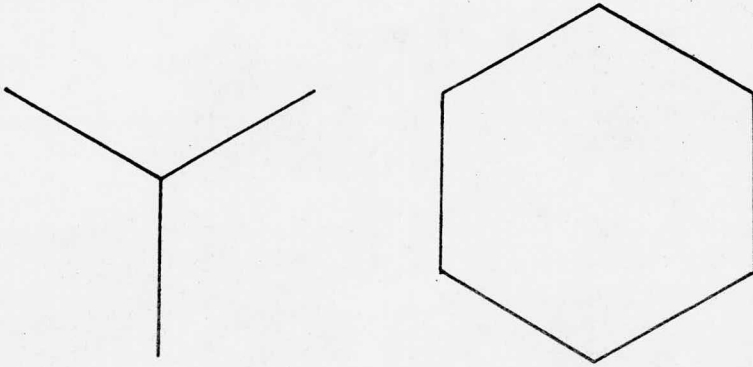


Transformador DELTA / ESTRELLA

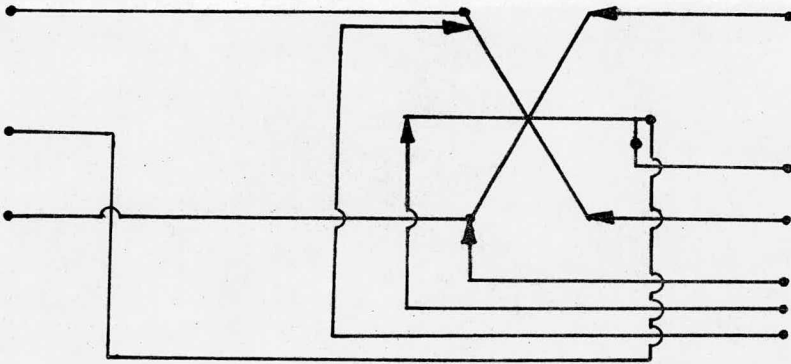


Transformador Y_e / ESTRELLA

Figura 3.1



Transformador Y_e / HEXAGONO



AUTOTRANSFORMADOR CONECTADO EN ESTRELLA

Figura 3.1

muestra en la fig. 3.2.

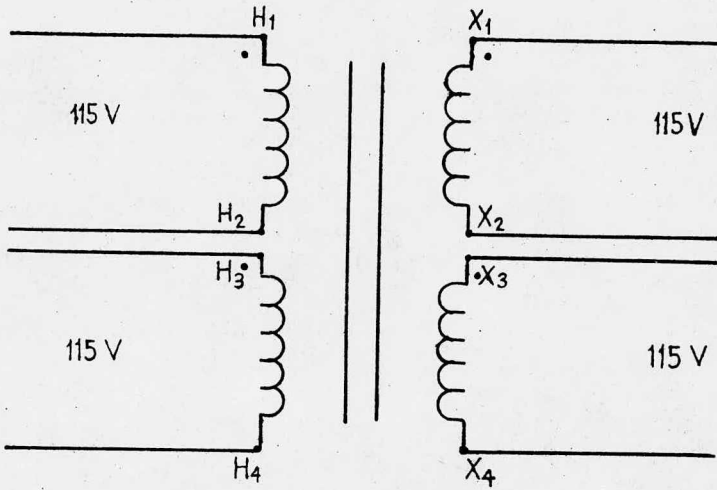


Figura 3.2 Esquema de un transformador de fase sencilla utilizada para un estudio de simulación.

Si las dos bobinas en los lados primarios y secundarios están conectados en serie, se obtienen 230 Volts. Entonces la corriente a 1.5 KVA es:

$$I = \frac{1.5 \text{ KVA}}{230 \text{ V}} = 6.52 \text{ Amp}$$

Si las otras dos bobinas están conectadas en paralelo, una puede obtener 115 Volts, en cuyo caso la relación de corriente es igual a:

$$I = \frac{1.5 \text{ KVA}}{115 \text{ V}} = 13.04 \text{ Amp}$$

A continuación se encontrarán las características, de los cuatro tipos de conexiones de transformadores, mencionadas en la sección anterior.

3.2.1 Transformador Delta - Estrella.

El esquema para esta conexión de transformador es el siguiente:

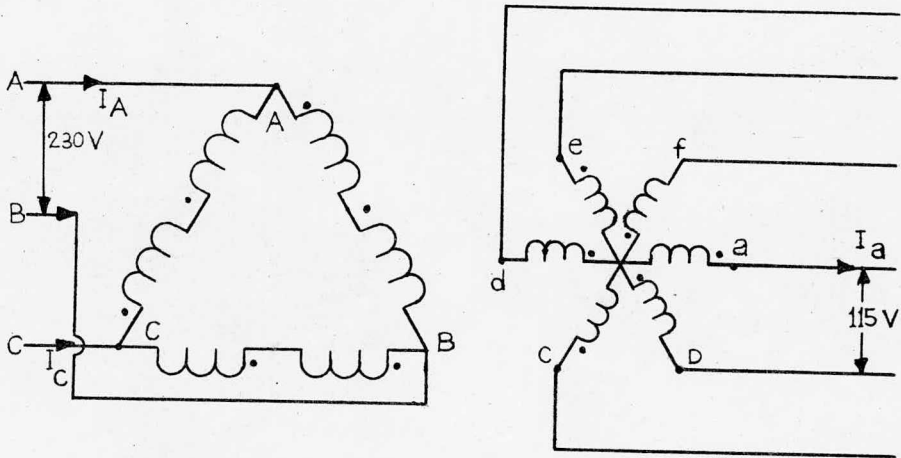


Figura 3.3 Diagrama esquemático de la conexión de un transformador Delta/Estrella.

Los valores para esta conexión son:

Trifásico

Hexafásico

Pot. en KVA = $3 \times 1.5 = 4.5$

Pot. en KVA = $6 \times 0.75 = 4.5$

Tensión de línea a línea

Tensión de línea a neutro

$$V_{AB} = 230 \text{ V}$$

$$V_{an} = 115 \text{ V}$$

Tensión de embobinado

Tensión de línea a línea entre fases adyacentes:

$$V_{AB} = 230 \text{ V}$$

$$V_{ab} = 115 \text{ V}$$

Corriente de embobinado

Corriente de embobinado

$$I_{AB} = \frac{1500}{230} = 6.52 \text{ Amp}$$

$$I_a = \frac{750}{115} = 6.52 \text{ Amp}$$

Corriente de línea

$$I_A = \sqrt{3} (6.52) = 11.29 \text{ Amp}$$

Corriente de línea

$$I_L = 6.52 \text{ Amp}$$

La relación de enrrollado entre un embobinado trifásico y un embobinado hexafásico es igual a:

$$r = \frac{230}{115} = 2$$

Por tanto, la relación es de 2:1

La razón de corriente de línea es igual a $= \frac{11.29}{6.52} = \sqrt{3}$

Por tanto, la relación es de $\sqrt{3} : 1$

El diagrama fasorial de tensión para esta conexión se muestra en la figura 3.4

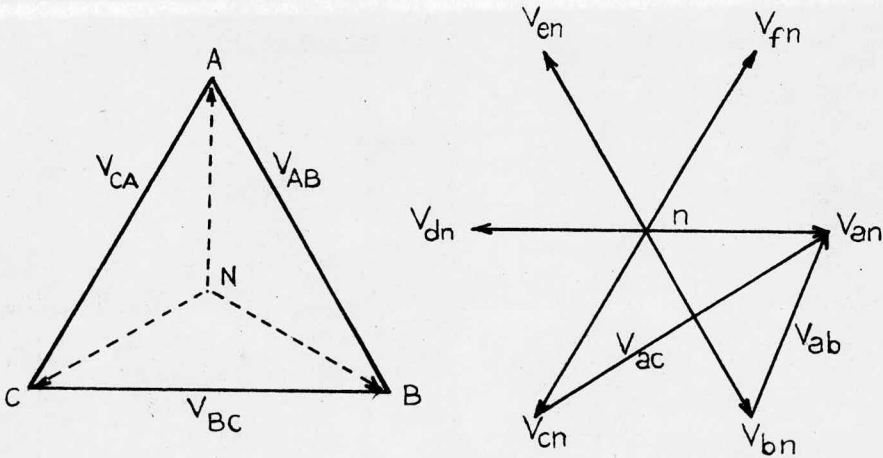


Figura 3.4. Diagrama fasorial de tensión para una conexión DELTA - ESTRELLA.

Se observa facilmente de este diagrama fasorial:

$$\begin{array}{ll}
 V_{AB} = 230 \angle 120^\circ \text{ V} & V_{an} = 115 \angle 0^\circ \text{ V} \\
 V_{BC} = 230 \angle 0^\circ \text{ V} & V_{ab} = 115 \angle 60^\circ \text{ V} \\
 V_{CA} = 230 \angle 240^\circ \text{ V} & V_{ac} = \frac{\sqrt{3}}{2} (115) (2) \angle 30^\circ \text{ V} \\
 & = 200 \angle 30^\circ \text{ V} \\
 & V_{ad} = 230 \angle 0^\circ \text{ V}
 \end{array}$$

Por tanto las relaciones del ángulo de fase entre los diferentes tensiones, primarias y secundarias son:

$$\begin{array}{ll}
 \underline{V_{AB}}, \underline{V_{an}} = 120^\circ & \underline{V_{AB}}, \underline{V_{ab}} = 60^\circ \\
 \underline{V_{AN}}, \underline{V_{an}} = 90^\circ & \underline{V_{ac}}, \underline{V_{an}} = 30^\circ
 \end{array}$$

Con el fin de determinar los circuitos equivalentes, las pruebas de corto circuito y circuito abierto fueron aplicados en este transformador. La prueba de corto circuito se aplicó tanto en el lado trifásico como en el lado hexafásico, con el fin de que exista diferencia entre los parámetros encontrados.

Aplicando una baja tensión de 5.4 V, entre las líneas del lado trifásico (delta) y poniendo en corto circuito el lado hexafásico del transformador de modo tal que las corrientes máximas, fluyen en ambos lados del transformador.

Se obtuvieron las siguientes lecturas:

Tensión entre líneas:

$$V_{AB} = 5.4 \text{ V}$$

$$P_{CC} = 36 \text{ Watts (Potencia trifásica representando las pérdidas de energía)}$$

$$I_A = 11.4 \text{ A}$$

Por tanto, para la corriente entre fases:

$$I_{AB} = \frac{11.4}{\sqrt{3}} = 6.582 \text{ A}$$

Usando estos datos los parámetros de corto circuito - asignados al lado trifásico son los siguientes:

$$Z_{CC} = \frac{V_{AB}}{I_{AB}} = \frac{5.4 \text{ V}}{6.582 \text{ A}} = 0.82 \text{ ohms/fase}$$

$$R_{CC} = \frac{P_{CC} \text{ por fase}}{I_{AB}^2} = \frac{36/3}{(6.58)^2} = 0.276 \text{ ohms/fase}$$

$$X_{CC} = \sqrt{Z_{CC}^2 - R_{CC}^2} = \sqrt{(0.82)^2 - (0.276)^2} = 0.772 \text{ ohms/fase}$$

Al poner estos parámetros en base por unidad:

$$\text{Impedancia base en el lado trifásico} = \frac{(\text{KV base})^2}{\text{MVA base}}$$

$$Z_{\text{base}} = \frac{(0.23)^2}{(1.5\text{KVA}/1000)} = 35.266 \text{ ohms}$$

$$Z_{\text{p.u.}} = \frac{Z_{\text{ohms}}}{Z_{\text{base}}}$$

$$Z_{cc} = \frac{0.82}{35.266} = 0.0232 \text{ p.u.}$$

$$R_{cc} = \frac{0.276}{35.266} = 0.0078 \text{ p.u.} \quad (3.1)$$

$$X_{cc} = \frac{0.772}{35.266} = 0.0218 \text{ p.u.}$$

Ahora al conectar en corto circuito el embobinado en delta y usando otro transformador Delta - Estrella, una alimentación hexafásica generada en el laboratorio, se aplicó en el lado de la estrella del transformador bajo prueba. Las lecturas relevantes fueron:

$$I_a = 6.1 \text{ A}$$

$$V_{ab} = V_{an} = 2.9 \text{ V}$$

$$P_{cc} = 33 \text{ Watts (potencia hexafásica)}$$

Con estos datos, los parámetros de corto circuito referidos al lado hexafásico se determinaron de la siguiente forma:

$$Z_{cc} = \frac{V_{an}}{I_a} = \frac{2.9}{6.1} = 0.475 \quad \text{ohms/fase}$$

$$R_{cc} = \frac{P_{cc} \text{ por fase}}{I_a^2} = \frac{33/6}{(6.1)^2} = 0.1478 \quad \text{ohms/fase}$$

$$X_{cc} = \sqrt{Z_{cc}^2 - R_{cc}^2} = \sqrt{(0.475)^2 - (0.1478)^2} = 0.4518 \text{ } \sim \text{/fase}$$

Encontrando la impedancia base hexafásica, para poder poner los parámetros encontrados en por unidad:

$$Z_{\text{base}} = \frac{(0.115)^2}{(0.75/1000)} = 17.6333 \quad \text{ohms}$$

Parámetros por unidad:

$$Z_{\text{CC}} = \frac{0.4754}{17.6333} = 0.02696 \quad \text{p.u.}$$

$$R_{\text{CC}} = \frac{0.1478}{17.6333} = 0.0083 \quad \text{p.u.} \quad (3.2)$$

$$X_{\text{CC}} = \frac{0.4516}{17.6333} = 0.02562 \quad \text{p.u.}$$

Al comparar las ecuaciones (3.1) y (3.2) y eliminar la pequeña diferencia debida a los errores de medición, se verifica que los valores por unidad de los parámetros de cortocircuito del transformador son los mismos en el lado trifásico ó en el lado hexafásico.

Este importante descubrimiento confirma que se pueden usar los valores de los parámetros por unidad directamente en sistemas en estudio, sin tener que preocuparse por el tipo de conexión del transformador y el número de fases.

El siguiente paso en la evaluación del modelo, es la determinación de los parámetros en el nucleo. La prueba de circuito abierto se realizó alimentando una tensión de 230 V en el lado trifásico con el embobinado en estrella mantenién-

dolo abierto.

De esta prueba se obtuvieron las siguientes lecturas:

$$V_{AB} = 230 \text{ V}$$

$$I_{AB} = 0.1039 \text{ A}$$

$$P_{ca} = 30 \text{ Watts (Potencia trifásica representando las pérdidas en el núcleo).}$$

Con estos datos, los parámetros del circuito abierto se encuentran de la siguiente manera:

$$Y_{ca} = \frac{I_{AB}}{V_{AB}} = \frac{0.1039}{230} = 0.00045 \text{ } \sphericalangle / \text{fase}$$

$$G_{ca} = \frac{P_{ca} \text{ por fase}}{(V_{AB})^2} = \frac{(30/3)}{(230)^2} = 0.000189 \text{ } \sphericalangle / \text{fase}$$

$$b_{ca} = \sqrt{Y_{ca}^2 - G_{ca}^2} = \sqrt{(0.00045)^2 - (0.000189)^2} \\ = 0.0004084 \text{ } \sphericalangle / \text{fase}$$

Al encontrar la admitancia base:

$$Y_{base} = \frac{1.5/1000}{(0.230)^2} = 0.02835 \text{ } \sphericalangle = (35.276 \text{ ohms})^{-1}$$

Los parámetros encontrados por unidad quedan de la manera siguiente:

$$Y_{ca} = \frac{0.00045}{0.02835} = 0.0159 \text{ p.u.}$$

$$G_{ca} = \frac{0.000189}{0.02835} = 0.00667 \text{ p.u.}$$

$$b_{ca} = \frac{0.0004084}{0.02835} = 0.0144 \text{ p.u.}$$

Los modelos actuales y en base por unidad son representados en la figura 3.5 y 3.6 respectivamente:

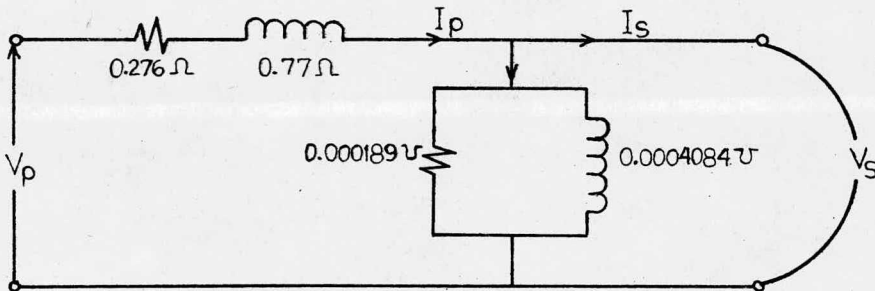


Figura 3.5. Modelo del transformador Delta - Estrella referido al lado delta.

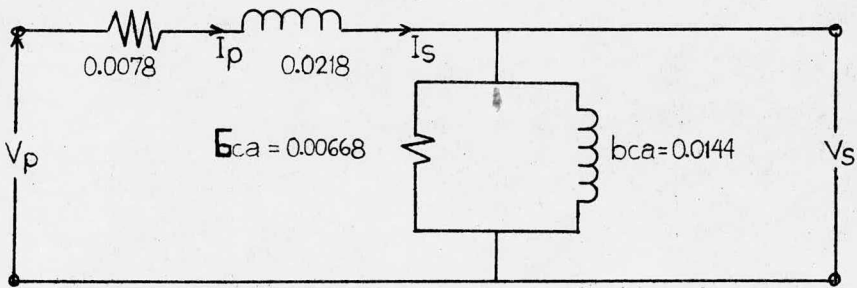


Figura 3.6 Modelo del transformador Delta - Estrella en base por unidad.

En la mayoría de estudios de sistemas de transformados, las pérdidas en el núcleo son despreciables en cuyo caso sólo se toma el diagrama simplificado en corto circuito y por unidad, el cual se observa en la figura 3.7.

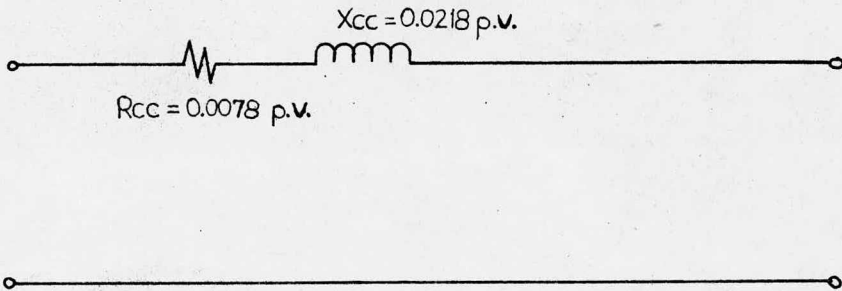


Figura 3.7 Modelo del transformador Delta - Estrella para el estudio de sistemas.

Ya obtenidos los modelos anteriores, la eficiencia y la regulación de tensión de este tipo específico de transformadores, el siguiente paso es encontrar estas características de la manera siguiente:

Eficiencia en carga total:

Asumiendo un factor de potencia de carga = 0.8 en retraso. Potencia de salida = $1500 \times 0.8 = 1200$ Watts

Pérdidas de energía = 36 Watts (de la prueba de corto circuito).

Pérdidas en el núcleo = 30 Watts (de la prueba de circuito --abierto).

Potencia de entrada = $1200 + 36 + 30 = 1266$ Watts

EFICIENCIA = $\frac{1200}{1266} = 0.9478$ p.u. = 94.78%

Regulación de Tensión en Carga Total

Nuevamente con el factor de potencia de carga en retraso igual a 0.8 f.p., y utilizando el circuito equivalente dado en la figura 3.7.

$$\begin{aligned} V_S &= V_R + I(R_{CC} + jX_{CC}) \\ &= 1.0 + j0 + 1.0(0.8 - j0.6)(0.0078 + j0.0218) \\ &= 1.0 + j0 + 0.0195 + j0.0128 \\ &= 1.0195 + j0.0128 = 1.0196 \angle 0.72^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ REGULACION DE TENSION} &= \frac{V_S - V_R}{V_R} \times 100 \\ &= \frac{1.0196 - 1}{1} \times 100 = 1.96\% \end{aligned}$$

Los cálculos realizados para las otras tres conexiones se obtienen en forma similar a partir de sus modelos respectivos, no se repetirán las operaciones para las otras conexiones.

3.2.2 Transformador Ye - Estrella.

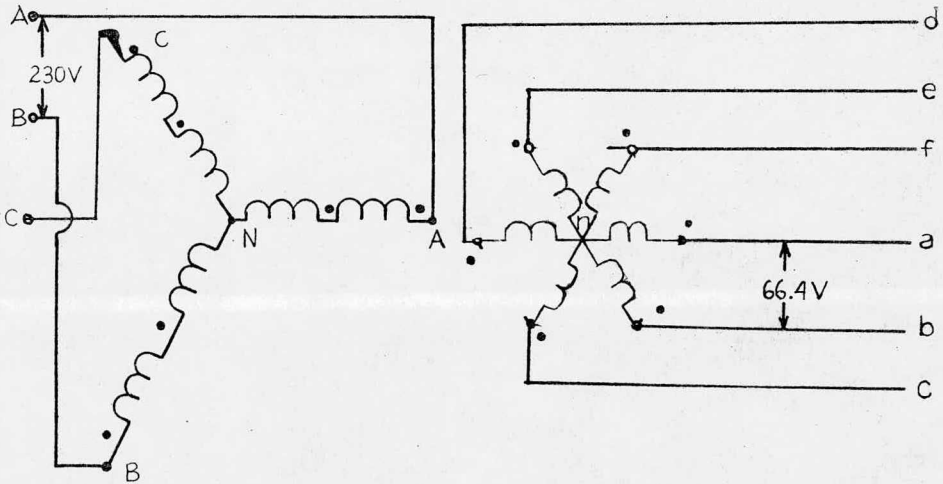


Figura 3.8 Esquema de una conexión de un transformador Ye - Estrella.

Los valores del transformador Ye - Estrella de la figura 3.8 son:

Trifásico

$$\text{Pot. en KVA} = 3 \times 1.5 = 4.5$$

Tensión de línea a línea

$$V_{AB} = 230 \text{ V (aplicado)}$$

Tensión de embobinado

$$V_{AN} = \frac{230}{\sqrt{3}} = 132.79 \text{ V}$$

Corriente de embobinado

$$I_A = \frac{1.5 \times 10^3}{132.79} = 11.29 \text{ A}$$

= Corriente de línea

Hexafásico

$$\text{Pot. en KVA} = 6 \times 0.75 = 4.5$$

Tensión de embobinado

$$V_{an} = \frac{115}{\sqrt{3}} = 66.4$$

Tensión de línea a línea

$$V_{ab} = 66.4 \text{ V}$$

Corriente de embobinado

$$I_a = \frac{750}{66.4} = 11.29 \text{ A}$$

= Corriente de línea

La relación de vueltas entre un embobinado trifásico y un embobinado hexafásico es:

$$r = \frac{132.78}{66.4} = 2 \quad \text{Por tanto la relación es de:}$$

$$2 : 1$$

$$\text{La razón de tensión de línea a línea} = \frac{230}{66.4} = 3.4638$$

Por tanto la relación es de : 3.46 : 1

$$\text{La razón de corriente de línea} = \frac{11.29}{11.29} = 1$$

Por tanto, la relación es de: 1 : 1

Los diagramas fasoriales de tensión para esta conexión son:

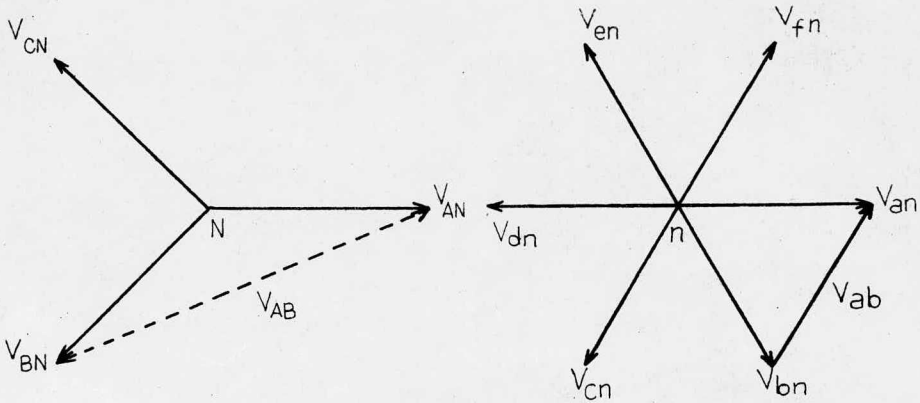


Figura 3.9 Diagrama fasorial de tensión para un transformador Y_e - Estrella.

$$\begin{array}{ll}
 V_{AN} = 132.79 \angle 0^\circ \text{ V} & V_{an} = 66.4 \angle 0^\circ \text{ V} \\
 V_{AB} = 230 \angle 30^\circ \text{ V} & V_{ab} = 66.4 \angle 60^\circ \text{ V} \\
 V_{BN} = 132.79 \angle -120^\circ \text{ V} & V_{ac} = 115 \angle 30^\circ \text{ V} \\
 & V_{ad} = 132.79 \angle 0^\circ \text{ V}
 \end{array}$$

Por tanto, las relaciones de ángulo de fase entre las tensiones diferentes primarias y secundarias son:

$$\begin{array}{ll}
 \boxed{V_{AN}, V_{an}} = 0^\circ & \boxed{V_{AB}, V_{ab}} = -30^\circ \\
 \boxed{V_{AB}, V_{AN}} = 30^\circ & \boxed{V_{ab}, V_{an}} = 60^\circ
 \end{array}$$

Para determinar el circuito equivalente, las pruebas de corto circuito y circuito abierto fueron aplicados en esta conexión del transformador Delta - Estrella. Al realizar la prueba de corto circuito, en el lado trifásico con el lado hexafásico en estrella, en corto, el valor de los parámetros son:

$$Z_{cc} = 0.842 \quad \text{ohms}$$

$$R_{cc} = 0.1622 \quad \text{ohms}$$

$$X_{cc} = 0.8262 \quad \text{ohms}$$

Estos valores por unidad se encontraron, determinando primero la base de impedancia (trifásica) como:

$$Z_{base} = \frac{230/\sqrt{3}}{11.29} = 11.76 \quad \text{ohms}$$

Por tanto los parámetros por unidad son:

$$Z_{cc} = \frac{0.842}{11.76} = 0.07159 \quad \text{p.u.}$$

$$R_{cc} = \frac{0.1622}{11.76} = 0.01379 \quad \text{p.u.} \quad (3.3)$$

$$X_{cc} = \frac{0.8262}{11.76} = 0.0702 \quad \text{p.u.}$$

La prueba de corto circuito fue repetida nuevamente - en forma similar, mientras el lado Ye trifásico esta en corto, los medidores se mantuvieron en lado hexafásico.

Los parámetros en este caso son:

$$Z_{CC} = 0.372 \quad \text{ohms.}$$

$$R_{CC} = 0.0811 \quad \text{ohms}$$

$$X_{CC} = 0.3631 \quad \text{ohms}$$

Con base de impedancia hexafásica igual a:

$$Z_{\text{base}} = \frac{66.4}{11.29} = 5.88 \quad \text{ohms}$$

Los valores por unidad son los siguientes:

$$Z_{CC} = \frac{0.372}{5.88} = 0.0632 \quad \text{p.u.}$$

$$R_{CC} = \frac{0.811}{5.88} = 0.01379 \quad \text{p.u.} \quad (3.4)$$

$$X_{CC} = \frac{0.3631}{5.88} = 0.0617 \quad \text{p.u.}$$

Los valores respectivos en (3.3) y (3.4) concuerdan bastante, las discrepancias, se pueden atribuir a errores de medición. Las pruebas en circuito abierto (valores), son encontrados en la tabla 3.1.

3.2.3 Transformador Ye - Hexágono.

El esquema para este transformador se muestra en la figura 3.10.

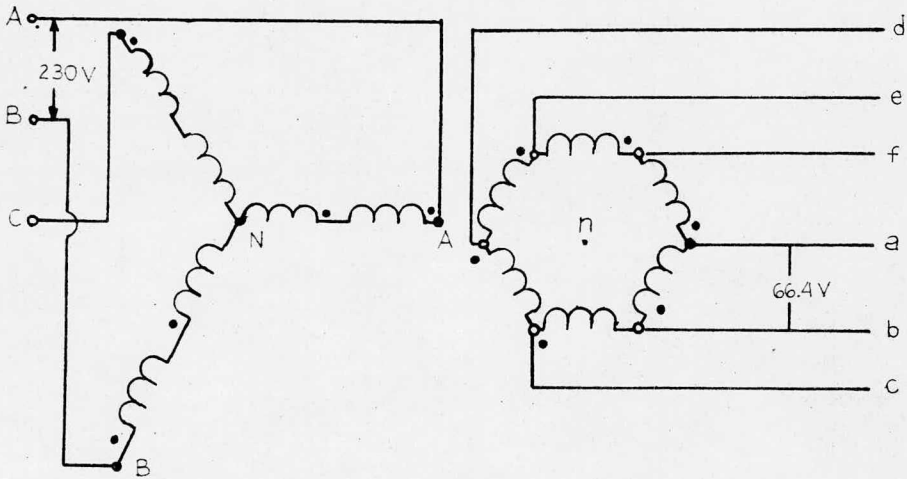


Figura 3.10 Esquema de una conexión de un transformador Ye - Hexágono.

Los valores para este transformador con 230 Volts - - aplicados entre línea y línea del lado trifásico y hexafásico

Trifásico

$$\text{Pot. en KVA} = 3 \times 1.5 = 4.5$$

Tensión de línea a línea

$$V_{AB} = 230 \text{ V}$$

Tensión de embobinado

$$V_{AN} = \frac{230}{\sqrt{3}} = 132.79 \text{ V}$$

$$\text{Pot. en KVA} = 6 \times 0.75 = 4.5$$

Tensión de embobinado

$$V_{ab} = \frac{115}{\sqrt{3}} = 66.4 \text{ V}$$

Corriente de embobinado

$$I_{ab} = \frac{750}{66.4} = 11.29 \text{ A}$$

Corriente de embobinado

I_{ab} = Corriente de línea

$$I_A = \frac{1.5 \times 10^3}{132.78} = 11.29 \text{ A}$$

= Corriente de línea

La relación de vueltas entre un embobinado trifásico y un embobinado hexafásico es:

$$r = \frac{132.79}{66.4} = 2 \quad \text{Por tanto la relación es de: } 2 : 1$$

$$\text{La razón de tensión de línea a línea} = \frac{230}{66.4} = 3.464$$

Por tanto la razón es de: 3.464 : 1

$$\text{La razón de corriente de línea} = \frac{11.29}{11.29} = 1$$

Por tanto la razón es de: 1 : 1

El diagrama fasorial de tensión para esta conexión es el representado en la figura 3.11.

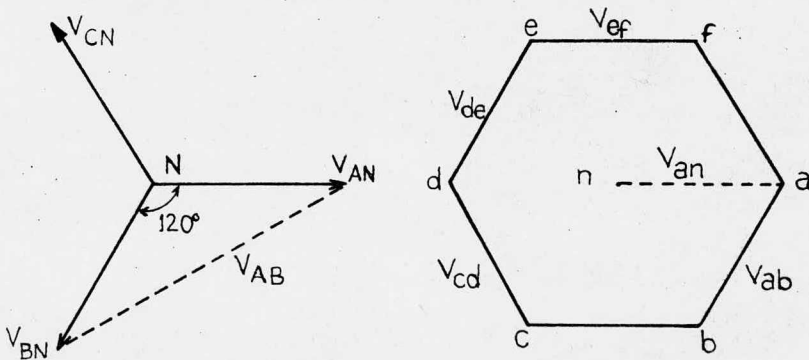


Figura 3.11 Diagrama fasorial de tensión para un transformador Ye - Hexágono.

Del diagrama se puede observar facilmente:

$$\boxed{V_{AN}, V_{an} = 0^\circ} \quad \text{y} \quad \boxed{V_{AB}, V_{ab} = -30^\circ}$$

Igualmente, el diagrama fasorial de corriente para el lado hexafásico es:

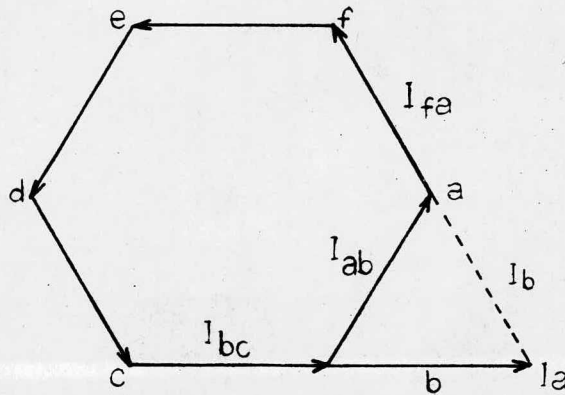


Figura 3.12 Diagrama fasorial de corriente para el lado hexagonal del transformador Ye -- Hexágono.

Del diagrama se muestra que:

$$\boxed{I_A, I_a = 0} \quad \text{y} \quad \boxed{I_{AB}, I_{ab} = 60^\circ}$$

Ya que las tensiones de línea a línea en ambos lados, son los mismos para los transformadores Ye - Estrella y Ye -- Hexágono. Los parámetros medidos en este caso son casi iguales a los obtenidos en la anterior conexión.

También los datos de corto circuito y circuito abierto se encuentran en la tabla 3.1.

3.2.4 Autotransformador Conectado en Estrella.

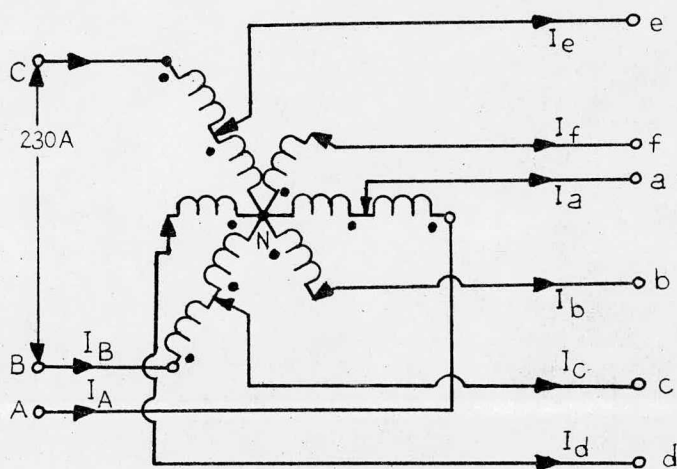


Figura 3.13 Diagrama esquemático de un autotransformador trifásico - hexafásico conectado en estrella.

En el esquema anterior, si todas las seis terminales de entrada son alimentadas, entonces este transformador forma un autotransformador Hexafásico/Hexafásico. Ya que las diferentes terminales no eran aprovechables en los transformadores trifásicos sencillos usados para simular la conexión ante

rior, se conectaron de tal forma que las salidas se unieron - como se muestra arriba.

Los valores para esta conexión con 230 Volts., aplica dos entre línea a línea en el lado trifásico como el hexafási co son:

Trifásico

$$\text{Pot. en KVA} = 3 \times 1.5 = 4.5$$

Tensión de línea a línea

$$V_{AB} = 230 \text{ V}$$

Tensión de embobinado

$$V_{AN} = 132.79 \text{ V}$$

Corriente de embobinado

$$I_A = 11.29 \text{ A}$$

Impedancia base

$$Z_{\text{base}} = \frac{230/\sqrt{3}}{11.29} = 11.75 \text{ ohm}$$

$$\text{Admitancia base} = \frac{1}{11.75} = 0.08515 \text{ } \checkmark$$

por fase

$$\text{Pot. en KVA} = 6 \times 0.75 = 4.5$$

Tensión de embobinado

$$V_{an} = \frac{115}{\sqrt{3}} = 66.4 \text{ V}$$

Corriente de embobinado

$$I_a = \frac{750}{66.4} = 11.29 \text{ A}$$

Corriente de línea = 11.29 A

Impedancia base

$$Z_{\text{base}} = \frac{66.4}{11.29} = 5.88 \text{ ohm}$$

La relación de vueltas entre el embobinado trifásico- y el embobinado hexafásico para este caso particular es:

$$r = 2 \quad \text{Por tanto la relación es de: } 2 : 1$$

La razón de tensión de línea a línea es:

$$3.464 : 1$$

La razón de corriente de línea es:

$$1 : 1$$

Para determinar el modelo del autotransformador, se aplicó primero la prueba de corto circuito con medidores mantenidos en el lado trifásico y el lado hexafásico en corto.

Basados en los datos obtenidos los parámetros son:

$$Z_{CC} = 0.38 \quad \text{ohms} = \frac{0.38}{11.75} = 0.0323 \quad \text{p.u.}$$

$$R_{CC} = 0.09 \quad \text{ohms} = \frac{0.09}{11.75} = 0.0077 \quad \text{p.u.}$$

$$X_{CC} = 0.369 \quad \text{ohms} = \frac{0.369}{11.75} = 0.0310 \quad \text{p.u.}$$

La prueba de circuito abierto, se realizó alimentando el lado trifásico, con el lado hexafásico en circuito abierto, los parámetros en el núcleo obtenidos son:

$$Y_{ca} = 0.00135 = \frac{0.00135}{0.08515} = 0.0159 \quad \text{p.u.}$$

$$G_{ca} = 0.000567 = \frac{0.000567}{0.08515} = 0.00666 \quad \text{p.u.}$$

$$b_{ca} = 0.001225 = \frac{0.001225}{0.08515} = 0.0144 \quad \text{p.u.}$$

TABLA 3.1 CAPACIDADES Y RESULTADOS DE PRUEBA EN CUATRO TIPOS DE CONECCIONES DE TRANSFORMADORES BAJO ESTUDIO.

TIPO DE CONECCION VARIABLE	DELTA/ESTRELLA		YE/ESTRELLA		YE/HEXAGONO		AUTOTRANSFORMADOR CONECTADO EN ESTRELLA.	
	LADO - TRIFASICO	LADO - HEXAFASICO	LADO - TRIFASICO	LADO - HEXAFASICO	LADO - TRIFASICO	LADO - HEXAFASICO	LADO - TRIFASICO	LADO - HEXAFASICO
CAPACIDADES TOTALES KVA (TRES O SEIS FASES)	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
V_{L-L} (FASES ADYACENTES), V	230	115	230	66.4	230	66.4	230	66.4
V_{L-n} , V	132.8	115	132.8	66.4	132.8	66.4	132.8	66.4
I_{linea} , A	11.29	6.52	11.29	11.29	11.29	11.29	11.29	11.29
$I_{devanado}$, A	6.52	6.52	11.29	11.29	11.29	11.29	11.29	11.29

a).- CAPACIDADES.

CAPACIDADES Y RESULTADOS DE PRUEBA EN CUATRO TIPOS DE CONECCIONES DE TRANSFORMADORES BAJO ESTUDIO.

CON PRUEBAS CONDUCIDAS EN	LADO - TRIPASICO	LADO - HEXAPASICO	LADO - TRIPASICO	LADO - HEXAPASICO	LADO TRIPASICO	LADO TRIPASICO
PARAMETROS						
Z_{SC} , ohms	0.8200	0.4750	0.842	0.372	0.788	0.88
R_{SC} , ohms	0.2770	0.1480	0.1622	0.0811	0.111	0.09
X_{SC} , ohms	0.7740	0.4510	0.8262	0.3631	0.780	0.369
Z_{base} , ohms	35.27	17.63	11.75	5.87	11.75	11.75
$Z_{SC,P.U.}$	0.0233	0.0270	0.0717	0.0634	0.0670	0.0323
$R_{SC,P.U.}$	0.0079	0.0084	0.0138	0.0138	0.0094	0.0077
$X_{SC,P.U.}$	0.0219	0.0256	0.0703	0.0619	0.0663	0.0310

b).-PARAMETROS DE PRUEBAS DE CIRCUITO CORTO.

CAPACIDADES Y RESULTADOS DE PRUEBA EN CUATRO TIPOS DE CONECCIONES DE TRANSFORMADORES BAJO ESTUDIO.

CON PRUEBAS CONDUCIDAS EN PARAMETROS	LADO TRIFASICO	LADO TRIFASICO	LADO TRIFASICO	LADO TRIFASICO
Y_{OC} , Siemens	0.00045	0.00136	0.00147	0.00135
g_c , Siemens	0.000189	0.00055	0.00060	0.00057
b_m , Siemens	0.00041	0.00124	0.00134	0.00123
Y_{base} , Siemens	0.02830	0.08510	0.08510	0.08610
Y_{oc} , p.u.	0.01590	0.01600	0.01730	0.01590
g_c , p.u.	0.00668	0.00650	0.00710	0.00668
b_m , p.u.	0.01440	0.01460	0.01570	0.01440

c).- PARAMETROS DE PRUEBAS DE CIRCUITO ABIERTO.

C A P I T U L O I V

ANALISIS DE CORTO CIRCUITO EN SISTEMAS HEXAFASICOS

4.1 Introducción.

El complejo análisis de fallas en sistemas hexafásicos es mucho más grande que los sistemas trifásicos. Por esta razón el objetivo de este capítulo esta enfocado a analizar los tipos de falla más probables.

La diferencia entre los tipos de falla en un sistema trifásico y hexafásico y las combinaciones que existen se ilustran en la tabla 4.1, 4.2. Como se observa en las tablas el número de fallas significativas es solo 4 para el sistema trifásico, mientras es 22 para el sistema hexafásico.

El número significativo de fallas se obtiene eliminando las combinaciones que producen el mismo valor de corriente de falla. Por ejemplo en un sistema trifásico balanceado, cualquier falla de línea a línea produce el mismo valor de corriente de falla. Esto significa que hay 5.5 veces distintos valores de corriente de falla para sistemas hexafásicos que las que existen para sistemas trifásicos.

Los tipos de fallas que se analizan en este trabajo son:

- a) Falla de línea a tierra.
- b) Falla trifásica a tierra.
- c) Falla pentafásica a tierra.
- d) Falla pentafásica.
- e) Falla hexafásica a tierra
- f) Falla hexafásica.
- g) Falla bifásica.

Tipo de falla	# total de combi naciones.	# significativo de combinaciones.
Trifásica	1	1
Trifásica a tierra	1	-
Bifásica	3	1
Bifásica a tierra	3	1
Fase a tierra	<u>3</u>	<u>1</u>
Total	11	4

Tabla 4.1 Tipos de fallas para un sistema trifásico

Tipo de falla	# total de combi naciones.	# significativo de combinaciones.
Hexafásica	1	1
Hexafásica a tierra	1	-
Pentafásica	6	1
Pentafásica a tierra	6	1
Cuatro fases	15	3
Cuatro fases a tierra	15	3
Trifásica	20	3
Trifásica a tierra	20	3
Bifásica	15	3
Bifásica a tierra	15	3
Fase a tierra	<u>6</u>	<u>1</u>
Total	120	22

Tabla 4.2 Tipos de fallas para un sistema hexafási
co.

Para simplificar el análisis se considera en la falla una configuración simétrica con respecto a la fase "a".

4.2 Falla de Línea a Tierra.

La falla que se representa en la figura 4.1, es el -- más probable tipo de falla a ocurrir en un sistema de poten--
cia.

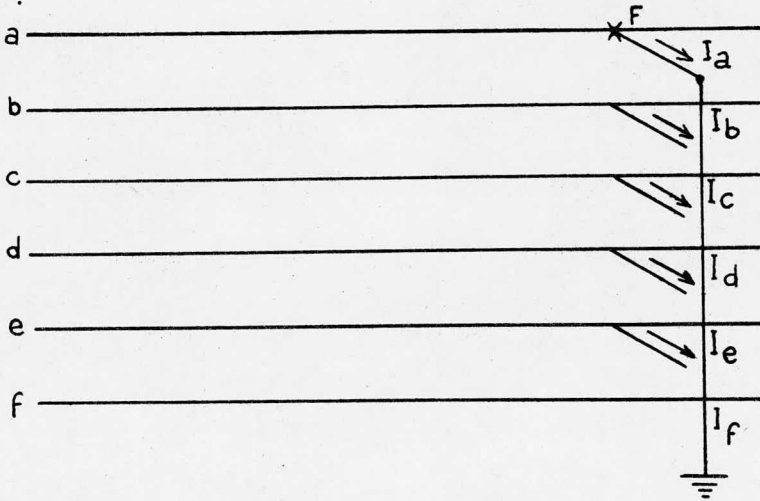


Figura 4.1 Falla de una fase a tierra.

Condiciones de la falla.

$$V_a = 0$$

$$I_b = I_c = I_d = I_e = I_f = 0$$

Las componentes simétricas de la corriente son:

$$I_{a0} = 1/6(I_a + I_b + I_c + I_d + I_e + I_f) = 1/6 I_a$$

$$I_{a1} = 1/6(I_a + bI_b + b^2I_c + b^3I_d + b^4I_e + b^5I_f) = 1/6 I_a$$

$$I_{a2} = 1/6(I_a + b^2I_b + b^4I_c + I_d + b^2I_e + b^4I_f) = 1/6 I_a$$

$$I_{a3} = 1/6(I_a + b^3I_b + I_c + b^3I_d + I_e + b^3I_f) = 1/6 I_a$$

$$I_{a4} = 1/6(I_a + b^4 I_b + b^2 I_c + I_d + b^4 I_e + b^2 I_f) = 1/6 I_a$$

$$I_{a5} = 1/6(I_a + b^5 I_b + b^4 I_c + b^3 I_d + b^2 I_e + b I_f) = 1/6 I_a$$

Por lo tanto:

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = I_{a3} = I_{a4} = I_{a5} \quad (4.1)$$

Las componentes simétricas de voltaje son:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \\ V_{a3} \\ V_{a4} \\ V_{a5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_{a1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \\ I_{a3} \\ I_{a4} \\ I_{a5} \end{bmatrix}$$

ó bien

$$V_{a0} = -I_{a0} Z_0$$

$$V_{a1} = E_{a1} - I_{a1} Z_1$$

$$V_{a2} = -I_{a2} Z_2$$

$$V_{a3} = -I_{a3} Z_3$$

$$V_{a4} = -I_{a4} Z_4$$

$$V_{a5} = -I_{a5} Z_5$$

(4.2)

Como $I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = I_{a3} = I_{a4} = I_{a5}$

$$V_{a0} = -I_{a1}Z_0$$

$$V_{a1} = E_{a1} - I_{a1}Z_1$$

$$V_{a2} = -I_{a1}Z_2$$

$$V_{a3} = -I_{a1}Z_3$$

$$V_{a4} = -I_{a1}Z_4$$

$$V_{a5} = -I_{a1}Z_5$$

$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} + V_{a3} + V_{a4} + V_{a5}$$

$$V_a = -I_{a1}Z_0 + E_{a1} - I_{a1}Z_1 - I_{a1}Z_2 - I_{a1}Z_3 - I_{a1}Z_4 - I_{a1}Z_5$$

De las condiciones $V_a = 0$

$$-I_{a1}Z_0 + E_{a1} - I_{a1}Z_1 - I_{a1}Z_2 - I_{a1}Z_3 - I_{a1}Z_4 - I_{a1}Z_5 = 0$$

$$-I_{a1}(Z_0 + Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5) = -E_{a1}$$

$$I_{a1} = \frac{E_{a1}}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5} \quad (4.3)$$

Como $I_{a1} = I_{a2} = I_{a3} = I_{a4} = I_{a5}$ quiere decir que las seis redes de secuencia deben conectarse en serie, y se representa en la figura 4.2.

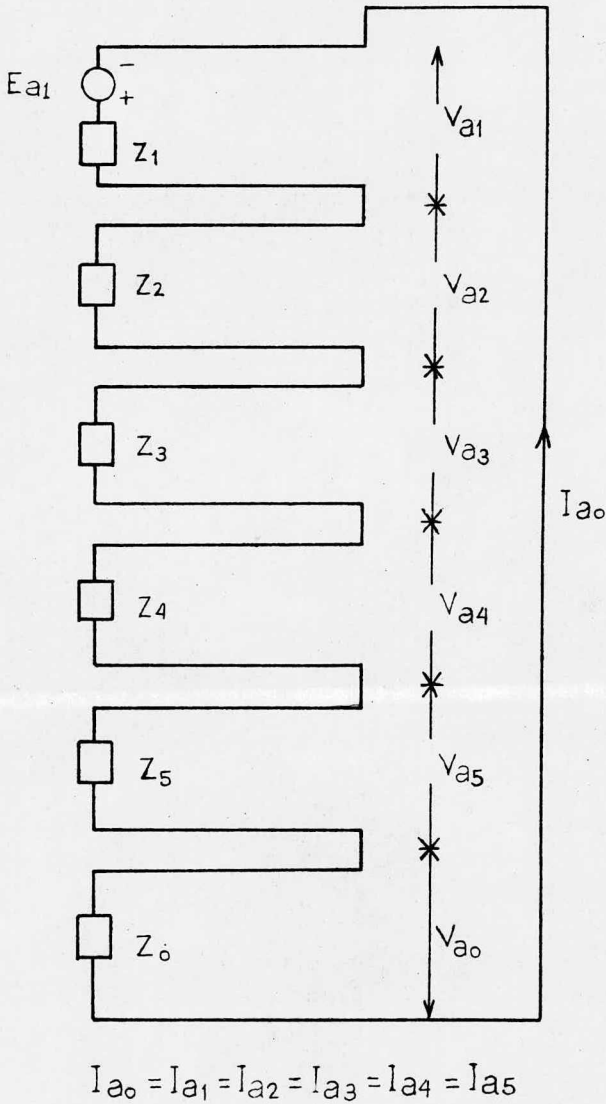


Figura 4.2 Conexión de las redes de secuencia para una falla de línea a tierra.

4.3 Falla Trifásica a Tierra.

En la figura 4.3 se ilustra el diagrama representativo de una falla trifásica a tierra ocurrida en las fases b, d y f.

Condiciones de la falla:

$$I_a = I_c = I_e = 0$$

$$I_b + I_d + I_f = I_n$$

$$V_b = V_d = V_f = 0$$

Si eliminamos las condiciones del fallo, las componentes simétricas de la corriente son:

$$I_{a0} = 1/6(I_b + I_d + I_f)$$

$$I_{a1} = 1/6(bI_b + b^3I_d + b^5I_f)$$

$$I_{a2} = 1/6(b^2I_b + I_d + b^4I_f)$$

$$I_{a3} = 1/6(b^3I_b + b^3I_d + b^3I_f)$$

$$I_{a4} = 1/6(b^4I_b + I_d + b^2I_f)$$

$$I_{a5} = 1/6(b^5I_b + b^3I_d + bI_f)$$

Al multiplicar, I_{a1} por b^3 :

$$b^3I_{a1} = 1/6(b^4I_b + b^6I_d + b^8I_f)$$

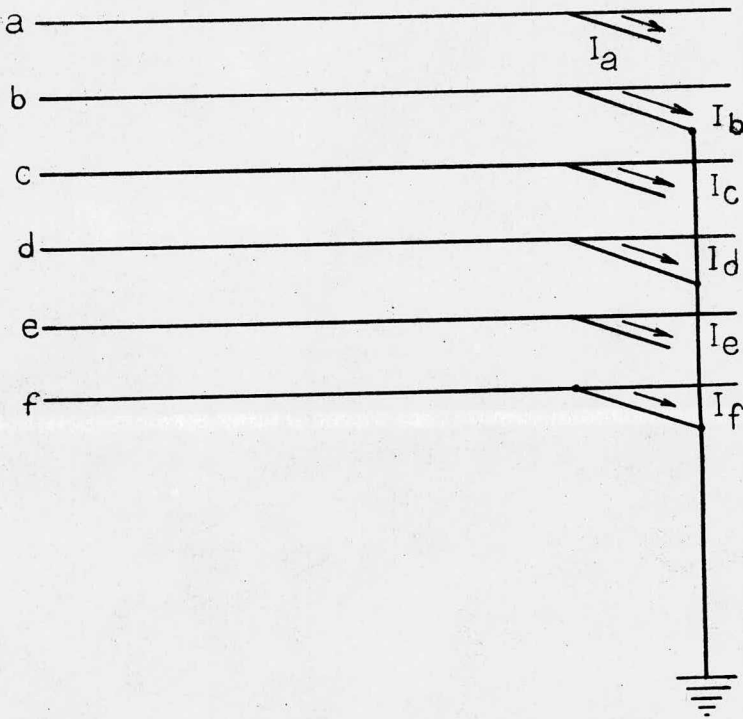


Figura 4.3 Falla trifásica a tierra.

$$-I_{a1} = 1/6(b^4 I_b + I_d + b^2 I_f)$$

Al multiplicar, I_{a2} por b^3 :

$$b^3 I_{a2} = 1/6(b^5 I_b + b^3 I_d + b^7 I_f)$$

$$-I_{a2} = 1/6(b^5 I_b + b^3 I_d + b I_f)$$

Por lo tanto:

$$I_{a0} = -I_{a3}$$

$$I_{a1} = -I_{a4}$$

$$I_{a2} = -I_{a5}$$

(4.4)

Las componentes simétricas de voltaje son:

$$V_{a0} = 1/6(V_a + V_c + V_e)$$

$$V_{a1} = 1/6(V_a + b^2 V_c + b^4 V_e)$$

$$V_{a2} = 1/6(V_a + b^4 V_c + b^2 V_e)$$

$$V_{a3} = 1/6(V_a + V_c + V_e)$$

$$V_{a4} = 1/6(V_a + b^2 V_c + b^4 V_e)$$

$$V_{a5} = 1/6(V_a + b^4 V_c + b^2 V_e)$$

Así que:

$$\begin{aligned}
 V_{a0} &= V_{a3} \\
 V_{a1} &= V_{a4} \\
 V_{a2} &= V_{a5}
 \end{aligned}
 \tag{4.5}$$

Al sustituir la ecuación (4.4) en (4.2):

$$\begin{aligned}
 V_{a0} &= -I_{a0}Z_0 \\
 V_{a1} &= E_{a1} - I_{a1}Z_1 \\
 V_{a2} &= -I_{a2}Z_2 \\
 V_{a3} &= I_{a0}Z_3 \\
 V_{a4} &= I_{a1}Z_4 \\
 V_{a5} &= I_{a2}Z_5
 \end{aligned}$$

De la ecuación anterior se observa que:

$$I_{a0} = I_{a3} = I_{a2} = I_{a5} = 0 \tag{4.6}$$

Si

$$\begin{aligned}
 V_{a1} &= V_{a4} \\
 E_{a1} - I_{a1}Z_1 &= I_{a1}Z_4 \\
 I_{a1}(Z_1 + Z_4) &= E_{a1}
 \end{aligned}$$

$$I_{a1} = -I_{a4} = \frac{E_{a1}}{Z_1 + Z_4} \quad (4.7)$$

La ecuación (4.5) se cumple conectando la primera y la cuarta, segunda y quinta, tercera y cero, redes de secuencia en paralelo figura (4.4).

4.4 Falla Pentafásica a Tierra.

En la figura 4.5 se ilustra el diagrama de una falla-pentafásica a tierra ocurrida en las fases b,c,d,e y f.

Condiciones de la falla:

$$I_a = 0$$

$$V_b = V_c = V_d = V_e = V_f = 0$$

La ecuación anterior implica:

$$V_{a0} = V_{a1} = V_{a2} = V_{a3} = V_{a4} = V_{a5} \quad (4.8)$$

La corriente I_a en términos de sus componentes simétricas es:

$$I_a = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} + I_{a3} + I_{a4} + I_{a5} = 0$$

$$I_{a1} = -(I_{a0} + I_{a2} + I_{a3} + I_{a4} + I_{a5})$$

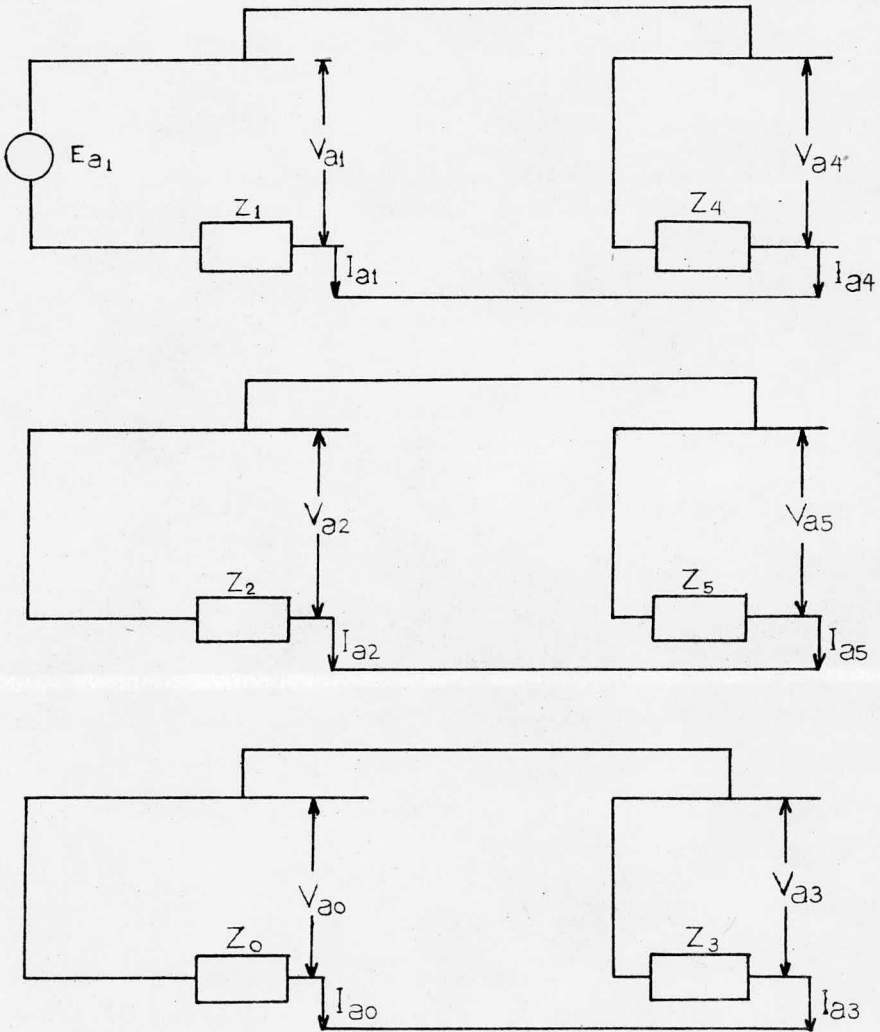


Figura 4.4 Conexión de las redes de secuencia para una falla trifásica a tierra.

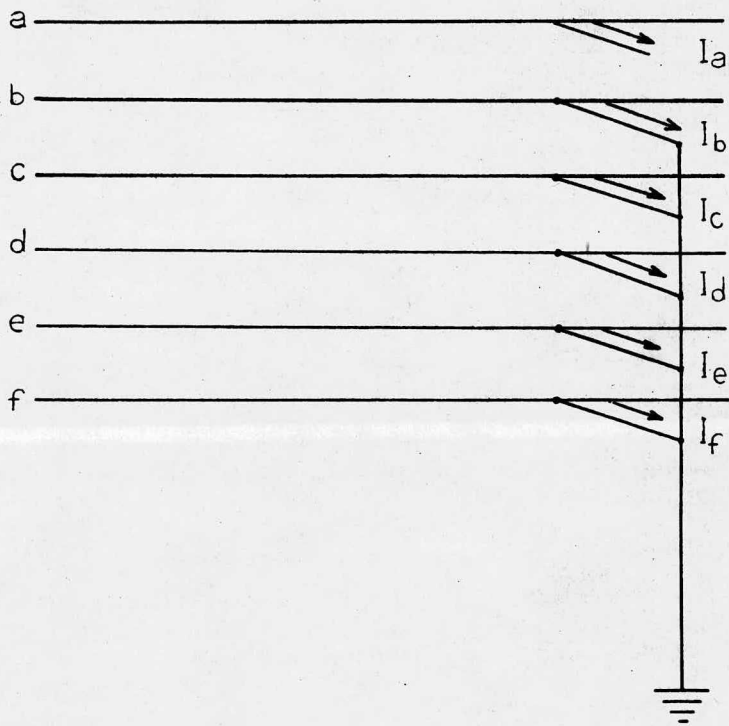


Figura 4.5 Falla pentafásica a tierra.

Al sustituir la ecuación (4.8) en (4.2):

$$V_{a1} = -Z_0 I_{a0}$$

$$V_{a1} = E_a - Z_1 I_{a1}$$

$$V_{a1} = -Z_2 I_{a2}$$

$$V_{a1} = -Z_3 I_{a3}$$

$$V_{a1} = -Z_4 I_{a4}$$

$$V_{a1} = -Z_5 I_{a5}$$

Por lo tanto:

$$I_{a0} = -\frac{V_{a1}}{Z_0}$$

$$I_{a2} = -\frac{V_{a1}}{Z_2}$$

$$I_{a3} = -\frac{V_{a1}}{Z_3}$$

(4.9)

$$I_{a4} = -\frac{V_{a1}}{Z_4}$$

$$I_{a5} = -\frac{V_{a1}}{Z_5}$$

Si:

$$I_{a1} = -(I_{a0} + I_{a2} + I_{a3} + I_{a4} + I_{a5})$$

$$I_{a1} = \frac{V_{a1}}{Z_0} + \frac{V_{a1}}{Z_2} + \frac{V_{a1}}{Z_3} + \frac{V_{a1}}{Z_4} + \frac{V_{a1}}{Z_5}$$

$$I_{a1} = V_{a1} \left(\frac{1}{Z_0} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} + \frac{1}{Z_4} + \frac{1}{Z_5} \right)$$

$$V_{a1} = \frac{I_{a1}}{\frac{1}{Z_0} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} + \frac{1}{Z_4} + \frac{1}{Z_5}} \quad (4.10)$$

Finalmente:

$$V_{a1} = E_a - Z_1 I_{a1}$$

$$\frac{I_{a1}}{\frac{1}{Z_0} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} + \frac{1}{Z_4} + \frac{1}{Z_5}} = E_a - Z_1 I_{a1}$$

$$I_{a1} \left(Z_1 + \frac{1}{\frac{1}{Z_0} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} + \frac{1}{Z_4} + \frac{1}{Z_5}} \right) = E_{a1}$$

$$I_{a1} = \frac{E_{a1}}{Z_1 + \frac{1}{\frac{1}{Z_0} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} + \frac{1}{Z_4} + \frac{1}{Z_5}}} \quad (4.11)$$

La ecuación (4.8) indica que todas las redes de se- -
cuencia están conectadas en paralelo, figura 4.6.

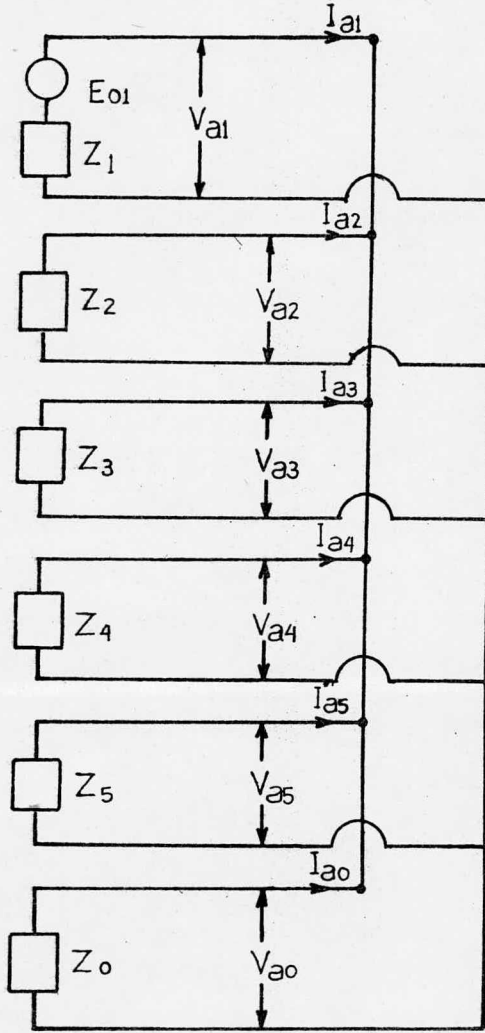


Figura 4.6 Conexión de las redes de secuencia para una falla pentafásica a tierra.

4.5 Falla Pentafásica.

La falla pentafásica es similar al caso de una falla-pentafásica a tierra. Al suponer que la fase "a" es la fase-sin falla, el diagrama para esta condición se muestra en la - figura 4.7.

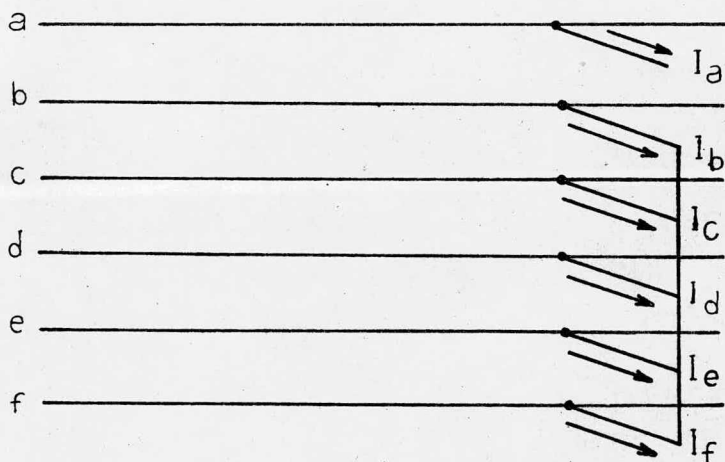


Figura 4.7 Falla Pentafásica.

Condiciones de la falla:

$$I_a = 0$$

$$V_b = V_c = V_d = V_e = V_f$$

$$I_b + I_c + I_d + I_e + I_f = 0$$

$$I_b = - (I_c + I_d + I_e + I_f)$$

Con estas condiciones las componentes simétricas son:

$$I_{a0} = 1/6(I_a + I_b + I_c + I_d + I_e + I_f) = 1/6(0 + I_b - I_b) = 0$$

$$V_{a1} = V_{a2} = V_{a3} = V_{a4} = V_{a5} \quad (4.12)$$

La corriente I_a en términos de sus componentes simétricas es:

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a3} + I_{a4} + I_{a5} = 0$$

$$I_{a1} = -(I_{a2} + I_{a3} + I_{a4} + I_{a5})$$

Al seguir el mismo desarrollo que en el caso anterior, tenemos:

$$I_{a1} = \frac{E_{a1}}{Z_1 + \frac{1}{\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} + \frac{1}{Z_4} + \frac{1}{Z_5}}} \quad (4.13)$$

La ecuación (4.12) se cumple conectando las redes de secuencia primera hasta la quinta en paralelo, con la red de secuencia cero en circuito abierto, figura 4.8.

4.6 Falla Hexafásica a Tierra.

En la figura 4.9 se representa el diagrama de una falla hexafásica a tierra.

Condiciones de la falla:

$$V_a = V_b = V_c = V_d = V_e = V_f = 0$$

$$I_a + I_b + I_c + I_d + I_e + I_f = I_n$$

De acuerdo a las condiciones anteriores las componentes simétricas de la tensión son iguales a cero.

$$V_{a0} = V_{a1} = V_{a3} = V_{a4} = V_{a5} = 0 \quad (4.14)$$

Si sustituimos la ecuación (4.14) en (4.2) se observa que para este tipo de fallas sólo circulan corrientes de secuencia positiva.

$$V_{a1} = E_{a1} - I_{a1}Z_1$$

$$I_{a1} = \frac{E_{a1}}{Z_1} \quad (4.15)$$

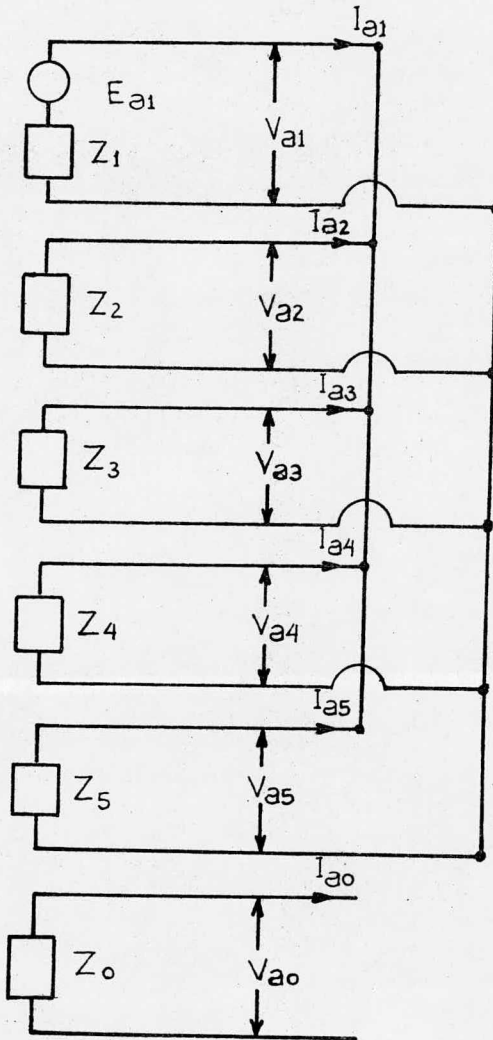


Figura 4.8 Conexión de las redes de secuencia para una falla pentafásica.

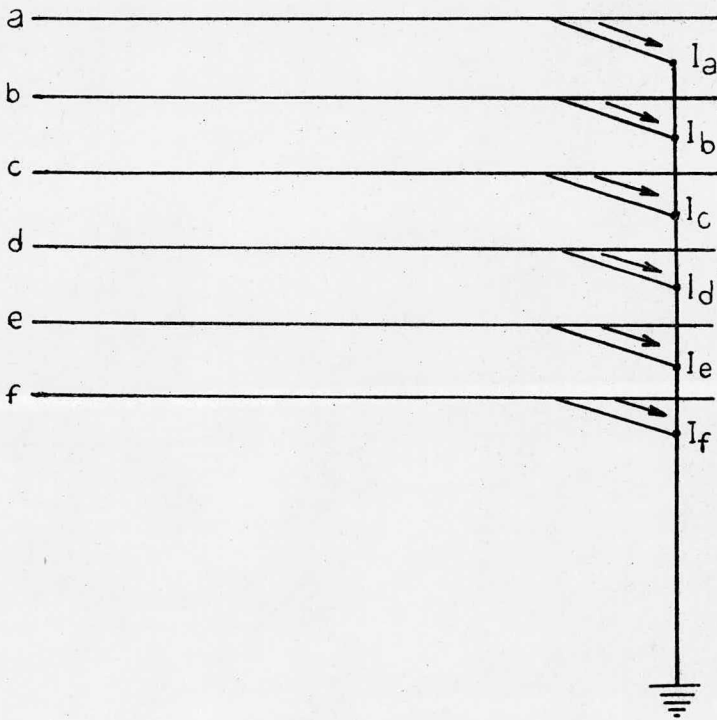


Figura 4.9 Falla hexafásica a tierra.

4.7 Falla Hexafásica.

En la figura 4.10 se representa el diagrama de una falla hexafásica.

La falla hexafásica es una extensión del caso hexafásico a tierra, la única diferencia es que la red de secuencia cero se conecta en circuito abierto. Esto no cambia ninguno de los valores de las corrientes de falla, por tanto:

$$I_{a1} = \frac{E_{a1}}{Z_1}$$

Mientras las otras corrientes de secuencia son cero.

4.8 Falla Bifásica.

Otro tipo de falla que se puede analizar completamente en un sistema hexafásico es la falla de línea a línea. Básicamente hay tres valores distintos de corrientes de falla, depende del ángulo que se forma entre las fases de falla, que pueden ser 60°, 120° y 180°.

4.8.1 Falla Bifásica a 120°.

Con un ángulo de fase de 120° entre las fases de falla la corriente de falla es esencialmente la misma que en el caso de una falla de línea a línea de un sistema trifásico. -

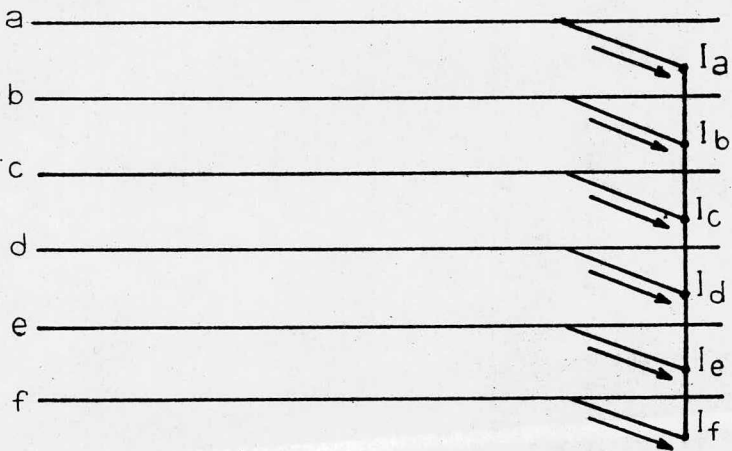


Figura 4.10 Falla Hexafásica.

Para mantener la configuración simétrica con respecto a la fa se de falla, ocurre en la fase b y f.

Condiciones de la falla:

$$I_a = I_c = I_d = I_e = 0$$

$$I_b + I_f = 0 \quad I_b = -I_f \quad V_b = V_f$$

Las componentes simétricas de la corriente son:

$$I_{a0} = 1/6(I_b + I_f) = 1/6(I_b - I_b) = 0$$

$$I_{a1} = 1/6(bI_b + b^5I_f) = 1/6(bI_b - b^5I_b) = 1/6(b - b^5)I_b$$

$$I_{a2} = 1/6(b^2I_b + b^4I_f) = 1/6(b^2 - b^4)I_b$$

$$I_{a3} = 1/6(b^3I_b + b^3I_f) = 1/6(-I_b - I_b) = (-I_b + I_b) = 0$$

$$I_{a4} = 1/6(b^4I_b + b^2I_f) = 1/6(b^4 - b^2)I_b$$

$$I_{a5} = 1/6(b^5I_b + bI_f) = 1/6(b^5 - b)I_b$$

Al multiplicar I_{a2} y I_{a4} por b^3 :

$$-I_{a2} = 1/6(b^5 - b^7)I_b = 1/6(b^5 - b)I_b$$

$$-I_{a4} = 1/6(b^7 - b^5)I_b = 1/6(b - b^5)I_b$$

Por tanto:

$$I_{a0} = I_{a3} = 0 \quad (4.16)$$

$$I_{a1} = I_{a2} = -I_{a5} = -I_{a4}$$

Las componentes simétricas de voltaje son:

$$V_{a0} = 0$$

$$V_{a1} = 1/6(V_a + b^2V_c + b^3V_d + b^4V_e + (b^5 + b)V_f)$$

$$V_{a2} = 1/6(V_a + b^4V_c + V_d + b^2V_e + (b^4 + b^2)V_f)$$

$$V_{a3} = 0$$

$$V_{a4} = 1/6(V_a + b^2V_c + V_d + b^4V_e + (b^2 + b^4)V_f)$$

$$V_{a5} = 1/6(V_a + b^4V_c + b^3V_d + b^2V_e + (b + b^5)V_f)$$

Si se observa la ecuación anterior se llega al siguiente resultado:

$$V_{a1} + V_{a2} = V_{a4} + V_{a5} \quad (4.17)$$

Al sustituir la ecuación (4.16) en (4.2):

$$V_{a1} = E_{a1} - I_{a1}Z_1$$

$$V_{a2} = -I_{a1}Z_2$$

$$V_{a4} = I_{a1} Z_4$$

$$V_{a5} = I_{a1} Z_5$$

$$\text{Si } V_{a1} + V_{a2} = V_{a4} + V_{a5}$$

$$E_{a1} - I_{a1} Z_1 - I_{a1} Z_2 = I_{a1} Z_4 + I_{a1} Z_5$$

$$I_{a1} (Z_1 + Z_2 + Z_4 + Z_5) = E_{a1}$$

$$I_{a1} = \frac{E_{a1}}{Z_1 + Z_2 + Z_4 + Z_5} \quad (4.18)$$

La ecuación (4.17) se cumple al conectar la primera y segunda red de secuencia en serie, la cuarta y la quinta red de secuencia en serie y la combinación de las dos series en paralelo, figura 4.11.

4.8.2 Falla Bifásica a 180°

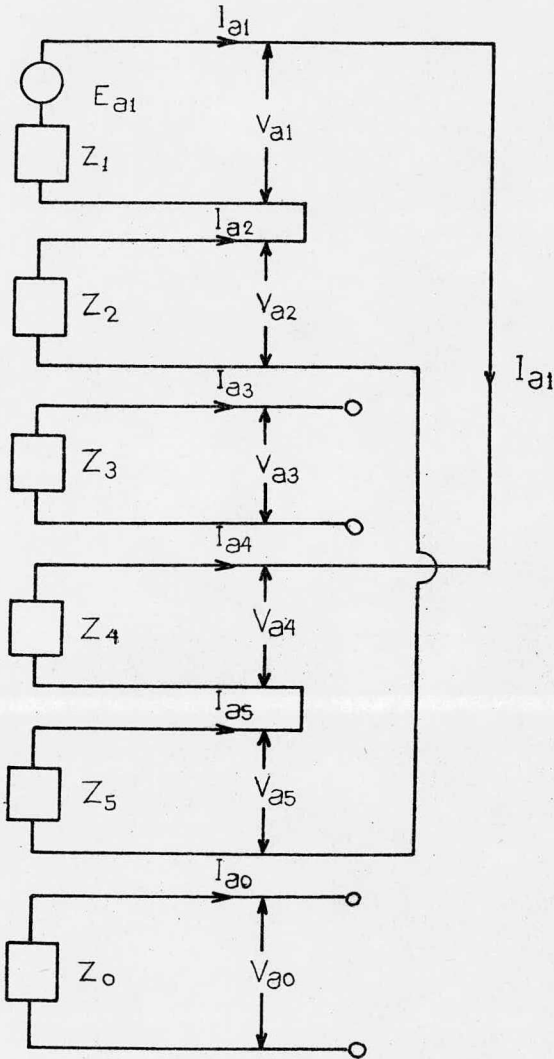
En el caso donde el ángulo de fase es de 180° ocurren en las fases a y d.

Condiciones de la falla.

$$I_b = I_c = I_e = I_f = 0$$

$$I_a = -I_d$$

$$V_a = V_d$$



$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a4} = -I_{a5}$$

Figura 4.11 Conexión de las redes de secuencia para una falla Bifásica a 120° .

Las componentes simétricas de la corriente son:

$$I_{a0} = 1/6(I_a + I_d) = 1/6(I_a - I_a) = 0$$

$$I_{a1} = 1/6(I_a + b^3 I_d)$$

$$I_{a2} = 1/6(I_a + I_d) = 0$$

$$I_{a3} = 1/6(I_a + b^3 I_d)$$

$$I_{a4} = 1/6(I_a + I_d) = 0$$

$$I_{a5} = 1/6(I_a + b^3 I_d)$$

Por lo que:

$$I_{a0} = I_{a2} = I_{a4} = 0 \quad (4.19)$$

$$I_{a1} = I_{a3} = I_{a5}$$

Las componentes simétricas de tensión son:

$$V_{a0} = 0$$

$$V_{a1} = 1/6((1 + b^3)V_a + bV_b + b^2V_c + b^4V_e + b^5V_f)$$

$$V_{a2} = 0$$

$$V_{a3} = 1/6((1 + b^3)V_a + b^3V_d + V_c + V_e + b^3V_f)$$

$$V_{a4} = 0$$

$$V_{a5} = 1/6((1 + b^3)V_a + b^5V_b + b^4V_c + b^2V_e + bV_f)$$

Al sumar V_{a1} , V_{a3} y V_{a5} :

$$\begin{aligned}
 V_{a1} + V_{a3} + V_{a5} = & \frac{3}{6} (\cancel{3(1 + b^3)} V_a + (b + \cancel{b^3} + \cancel{b^5}) V_b \\
 & + (1 + \cancel{b^2} + \cancel{b^4}) V_c + (1 + \cancel{b^2} + \cancel{b^4}) V_e \\
 & + (b + \cancel{b^3} + \cancel{b^5}) V_f)
 \end{aligned}$$

$$V_{a1} + V_{a3} + V_{a5} = 0 \quad (4.20)$$

Al sustituir la ecuación (4.19) en (4.2):

$$V_{a1} = E_{a1} - Z_1 I_{a1}$$

$$V_{a3} = -Z_3 I_{a1}$$

$$V_{a5} = -Z_5 I_{a1}$$

$$\text{Si } V_{a1} + V_{a2} + V_{a3} = 0$$

$$E_{a1} - Z_1 I_{a1} - Z_3 I_{a1} - Z_5 I_{a1} = 0$$

$$I_{a1} (Z_1 + Z_3 + Z_5) = E_{a1}$$

$$I_{a1} = \frac{E_{a1}}{Z_1 + Z_3 + Z_5} \quad (4.21)$$

La ecuación (4.20) implica que las redes de secuencia primera, tercera y quinta se conectan en serie, figura 4.12.

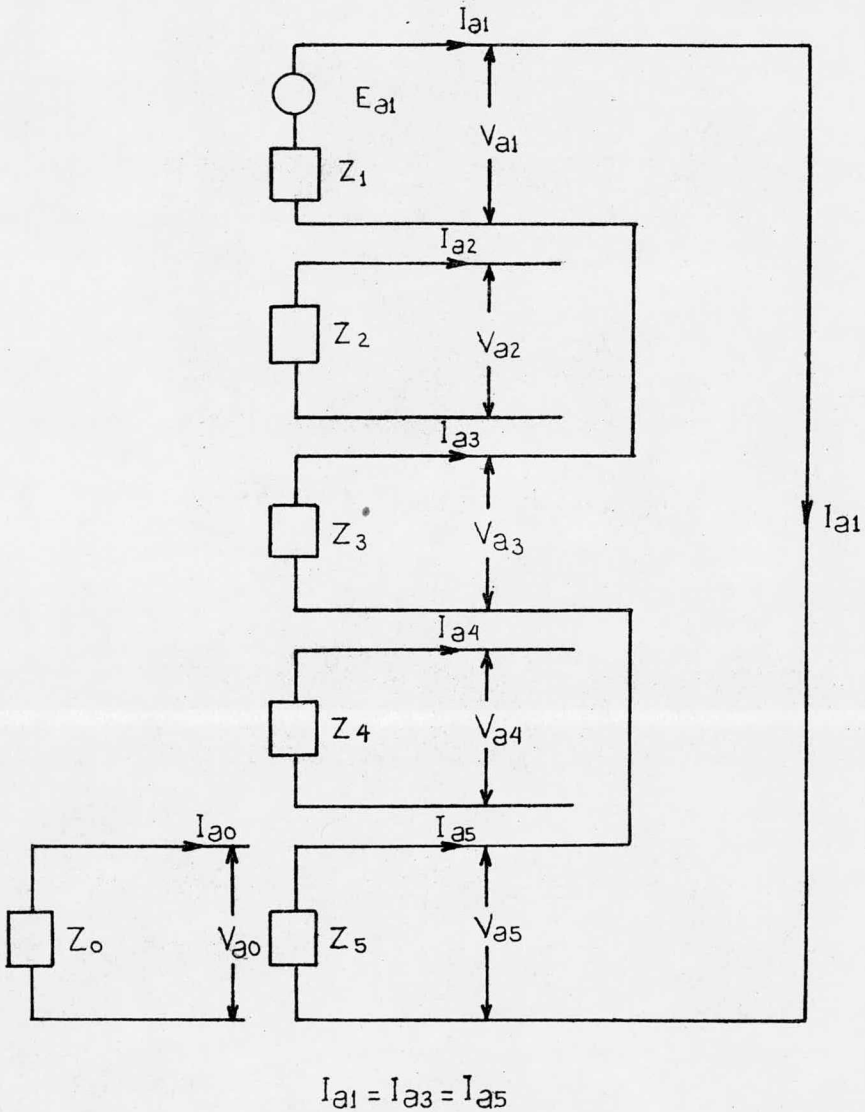


Figura 4.12 Conexión de las redes de secuencia para una falla bifásica a 180°.

4.8.3 Falla Bifásica a 60°.

La última falla de fase a fase a considerarse es en que las fases de falla están a 60° y ocurre en las fases b y c.

Condiciones de la falla:

$$I_a = I_d = I_e = I_f = 0$$

$$I_b = -I_c$$

$$V_b = V_c$$

Las componentes simétricas de la corriente son:

$$I_{a0} = 1/6(I_b + I_c) = 0$$

$$\begin{aligned} I_{a1} &= 1/6(bI_b + b^2I_c) = 1/6(b - b^2)I_b = 1/6(0.5 + j0.866 \\ &\quad + 0.5 - j0.866)I_b \\ &= 1/6(I_b) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{a2} &= 1/6(b^2I_b + b^4I_c) = 1/6(b^2 - b^4)I_b = 1/6(-0.5 + j0.866 \\ &\quad + 0.5 + j0.866)I_b \\ &= 1/6(j\sqrt{3})I_b \end{aligned}$$

$$I_{a3} = 1/6(b^3I_b + I_c) = 1/6(b^3 - 1)I_b = -2I_b$$

$$I_{a4} = 1/6(b^4I_b + b^2I_c) = 1/6(b^4 - b^2)I_b = -1/6(j\sqrt{3})I_b$$

$$I_{a5} = 1/6(b^5 I_b + b^4 I_c) = 1/6(b^5 - b^4) I_b$$

Al multiplicar I_{a5} por b^3 :

$$-I_{a5} = 1/6(b^8 I_b + b^7 I_c) = 1/6(b^2 I_b + b I_c)$$

$$I_{a5} = 1/6(b - b^2) I_b$$

Por tanto:

$$I_{a0} = 0$$

$$I_{a1} = I_{a5} = \frac{1}{j\sqrt{3}} I_{a2} = -\frac{1}{j\sqrt{3}} I_{a4} = -\frac{1}{2} I_{a3} \quad (4.22)$$

Si aplicamos las condiciones de la falla a las componentes simétricas de tensión se llega al siguiente resultado:

$$V_{a1} - j\sqrt{3}V_{a2} - 2V_{a3} + j\sqrt{3}V_{a4} + V_{a5} = 0$$

Al sustituir la ecuación (4.22) en (4.2):

$$V_{a1} = E_{a1} - Z_1 I_{a1}$$

$$V_{a2} = -Z_2 (j\sqrt{3} I_{a1})$$

$$V_{a3} = Z_3 (2I_{a1})$$

$$V_{a4} = Z_4 (j\sqrt{3} I_{a1})$$

$$V_{a5} = -Z_5 I_{a1}$$

$$\text{Si } V_{a1} - j\sqrt{3}V_{a2} - 2V_{a3} + j\sqrt{3}V_{a4} + V_{a5} = 0$$

$$E_{a1} - Z_1 I_{a1} + Z_2 (j\sqrt{3} I_{a1})(j\sqrt{3}) - 2Z_3 (2I_{a1}) + Z_4 (j\sqrt{3})(j\sqrt{3} I_{a1}) - Z_5 I_{a1} = 0$$

$$E_{a1} - Z_1 I_{a1} - 3Z_2 I_{a1} - 4Z_3 I_{a1} - 3Z_4 I_{a1} - Z_5 I_{a1} = 0$$

$$I_{a1} = \frac{E_{a1}}{(Z_1 + 3Z_2 + 4Z_3 + 3Z_4 + Z_5)} \quad (4.24)$$

Las redes de secuencia para las restricciones de la ecuación (4.23) se interconectan por medio de un transformador ideal, figura 4.13.

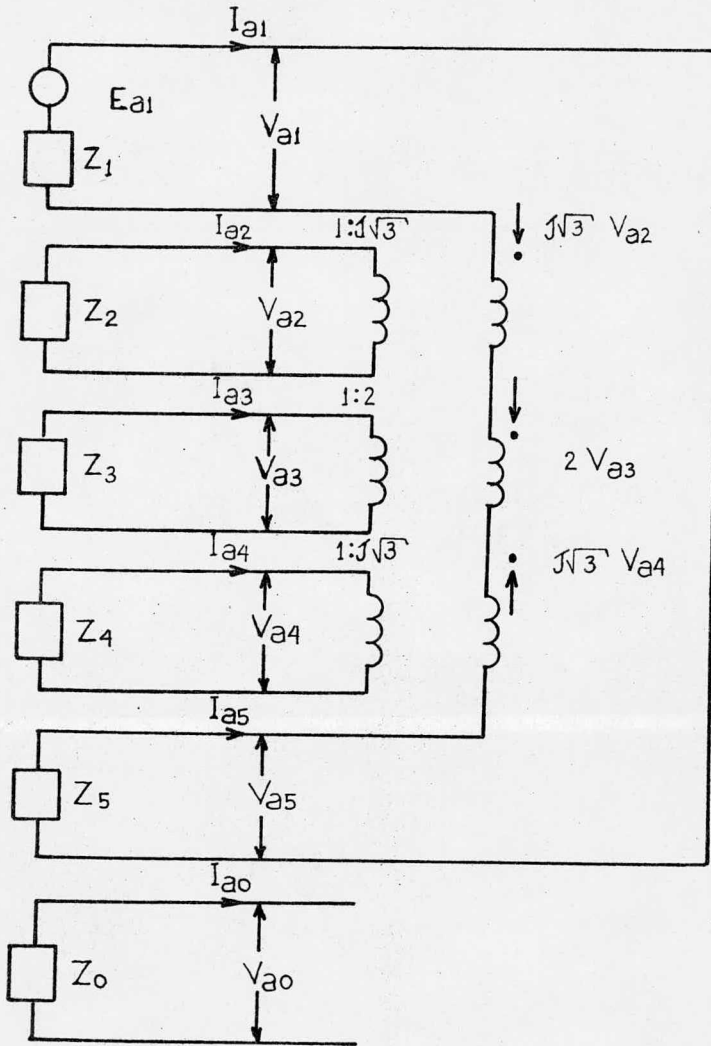


Figura 4.13 Conexión de las redes de secuencia para una falla Bifásica a 60° .

CONCLUSIONES

Las presentes conclusiones se derivan de los resultados obtenidos en los capítulos anteriores, así como las bases para estudios posteriores y con ello, hacer el sistema hexafásico cada vez más un hecho real.

I.- Para incrementar la capacidad de transmisión es posible utilizar dos alternativas:

a) Convertir las líneas de doble circuito trifásico de 230 KV en líneas hexafásicas a 230 KV. Con el mismo derecho de vía y sin cambios en la estructura de la torre, así como también en los conductores y en números de aisladores.

b) La capacidad de transmisión de la línea de doble circuito a 230 KV también se puede incrementar convirtiéndola a una línea de doble circuito a 400 KV. Tal conversión requerirá derecho de vía adicional.

II.- Para transmitir la misma potencia, una línea hexafásica se puede operar con un ángulo potencial más pequeño (δ) que su equivalente trifásico. Esto significa que la línea hexafásica ofrece mayor margen de estabilidad que la línea trifásica.

III.- Existen otras ventajas que las líneas hexafásicas pueden ofrecer:

Bajo requerimiento de aislación para tensión constante de línea a neutro.

Disminución en las pérdidas por efecto corona.

La regulación de tensión de una línea hexafásica es menor que su equivalente trifásico.

La línea hexafásica ofrece mejor eficiencia de transmisión que una línea trifásica.

IV.- La utilización y generación de la energía eléctrica continuará siendo trifásica aún si el concepto hexafásico se adopta para los propósitos de transmisión. Por tanto, las tensiones trifásicas generadas son transformadas a tensiones de transmisión hexafásicas y nuevamente a tensiones de distribución trifásica, juegan un papel importante en el proceso de conversión. Esto plantea la necesidad de un análisis cuidadoso para esta transformación.

Las conexiones ideales de transformadores trifásicos-hexafásicos que se encontraron para el proceso de conversión son los siguientes: Delta/Estrella, Ye/Estrella, Delta/hexágono y autotransformador conectado en estrella.

Con los datos obtenidos de las pruebas de corto circuito y circuito abierto que se realizaron a cada una de las conexiones en el laboratorio eléctrico de potencia de la WUV, se calcularon sus circuitos equivalentes y sus características fueron evaluadas. Estos resultados se resumieron en la tabla 3.1 y se concluyó lo siguiente:

a) El modelo de cualquier transformador trifásico-

hexafásico, los parámetros de corto circuito y circuito abierto por unidad son los mismos en el lado primario y en el lado secundario.

b) El autotransformador conectado en estrella es el óptimo para interconectar en una red un sistema trifásico con un sistema hexafásico debido a su baja impedancia equivalente.

V.- En el caso de las líneas hexafásicas el número de fallas importantes a analizar es 22, y casi todas ellas se -- pueden analizar usando la teoría del componente simétrico -- hexafásico. Las fallas de línea a línea no sujetas a este -- análisis se pueden analizar por transformaciones reales.

Finalmente podemos concluir que la solución al problema de la demanda de energía eléctrica es convertir las líneas de doble circuito trifásico existentes en líneas hexafásicas, lo cual sería el sistema más ideal. Aunque éste se encuentra aún en etapa de investigación y por ello, presentará problemas que se podrán resolver al profundizar en este sistema.

A P E N D I C E A
COMPONENTES SIMETRICAS

A raíz de la creación de los grandes sistemas de energía eléctrica interconectadas, surgió el problema de estabilidad y de la coordinación y la protección de éstos. Como en la actualidad ya no se justifican instalaciones aisladas de energía eléctrica, se comprende que el análisis de sistemas se empieza a complicar a tal grado que los métodos convencionales de análisis referentes a corrientes de corto circuito y tiempos de operación de relevadores ya no son adecuados, por el enorme trabajo que hay que realizar. En vista de ello, -- apareció un nuevo método llamado componentes simétricas, en el cual se hacen estos análisis de circuitos en forma sencilla, en comparación con los anteriores y los resultados son aceptables.

Este método se basa en el operador "a" el cual, es un número complejo que gira cualquier vector 120° sin alterar su magnitud. En la figura A.1 se representa un sistema de fasores utilizando el operador "a".

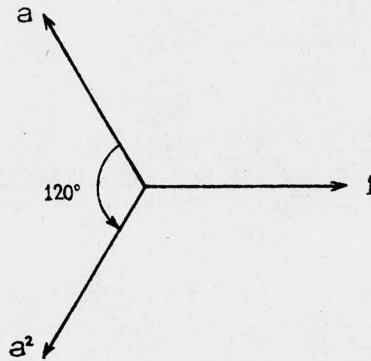


Figura A.1

De la figura observamos:

$$a = 1 \angle 120^\circ = -0.5 + j0.866$$

$$a^2 = 1 \angle 120^\circ \times 1 \angle 120^\circ = 1 \angle 240^\circ = -0.5 - j0.866$$

$$a^3 = a \times a^2 = 1 \angle 120^\circ \times 1 \angle 240^\circ = 1 \angle 360^\circ = 1$$

$$a^4 = a^2 \times a^2 = 1 \angle 240^\circ \times 1 \angle 240^\circ = 1 \angle 480^\circ = 1 \angle 120^\circ = a$$

El método de las componentes simétricas sirve para -- simplificar el análisis de sistemas eléctricos desequilibrados.

Este método consiste en dividir un sistema desequilibrado en tres subsistemas equilibrados, llamados de secuencia positiva, identificado con un subíndice (1), de secuencia negativa con un subíndice (2) y de secuencia cero, con un subíndice (0).

El subsistema de secuencia positiva consiste de tres-fasores de igual magnitud, defasados 120° y con secuencia de-rotación, a,b,c.

En la figura A.2 se representa un sistema de fasores- de secuencia positiva.

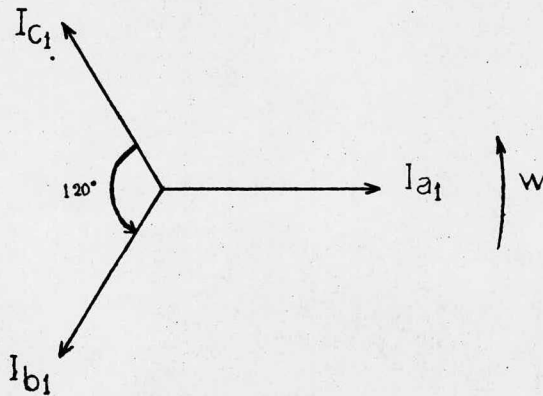


Figura A.2 Secuencia Positiva

Al utilizar el operador "a" tenemos:

$$I_{a1} = I_{a1}$$

$$I_{b1} = a^2 I_{a1}$$

$$I_{c1} = a I_{a1}$$

El subsistema de secuencia negativa consiste de tres-fasores de igual magnitud defasados 120° y con sentido de rotación contraria a la secuencia positiva, es decir a,c,b.

En la figura A.3 se representa un sistema de fasores de secuencia negativa.

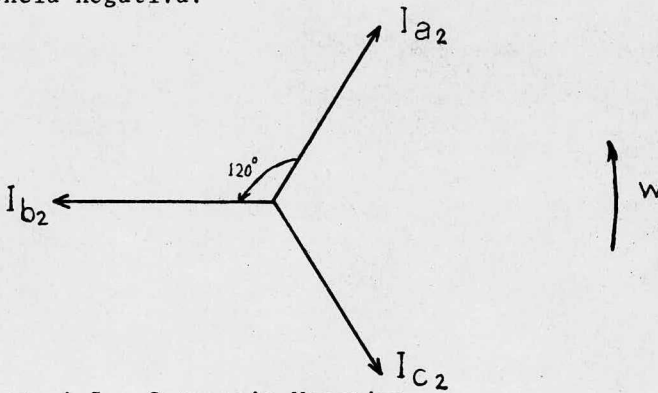


Figura A.3 Secuencia Negativa.

Al utilizar el operador "a" tenemos:

$$I_{a2} = I_{a2}$$

$$I_{b2} = aI_{a2}$$

$$I_{c2} = a^2I_{a2}$$

El subsistema de secuencia cero consiste de tres fasores de igual magnitud y en fase.

En la figura A.4 se representa un sistema de fasores de secuencia cero.

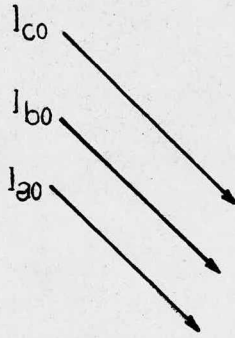


Figura A.4 Secuencia Cero.

De la figura se observa que:

$$I_{a0} = I_{b0} = I_{c0}$$

Un sistema de tres fasores desequilibrados sera igual a la suma de sus componentes; uno de secuencia positiva, uno de secuencia negativa y uno de secuencia cero.

$$I_a = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}$$

$$I_b = I_{b0} + I_{b1} + I_{b2} \tag{A.1}$$

$$I_c = I_{c0} + I_{c1} + I_{c2}$$

Si utilizamos el operador "a" en la ecuación (A.1) se tiene:

$$I_a = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}$$

$$I_b = I_{b0} + a^2 I_{a1} + a I_{a2} \quad (\text{A.2})$$

$$I_c = I_{c0} + a I_{a1} + a^2 I_{a2}$$

La ecuación (A.2) en forma matricial:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (\text{A.3})$$

ó bien en forma simplificada:

$$\begin{bmatrix} I_{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{012} \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

Donde:

$$\begin{bmatrix} I_{abc} \end{bmatrix} = \text{Matriz de corrientes de fase}$$

$$\begin{bmatrix} A \end{bmatrix} = \text{Matriz de transformación}$$

$$\begin{bmatrix} I_{012} \end{bmatrix} = \text{Matriz de corrientes de secuencia}$$

Las componentes de secuencia se obtienen de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} I_{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{012} \end{bmatrix}$$

$$A^{-1} \begin{bmatrix} I_{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I_{012} \end{bmatrix} \quad (\text{A.5})$$

$$\begin{bmatrix} I_{012} \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} I_{abc} \end{bmatrix}$$

Para obtener A^{-1} haremos el siguiente desarrollo:

$$A^{-1} = \frac{\begin{bmatrix} A \end{bmatrix}_C^T}{A}$$

Donde:

A^{-1} = Matriz inversa de A

$\begin{bmatrix} A \end{bmatrix}_C^T$ = Matriz de cofactores de A T

$\begin{bmatrix} A \end{bmatrix}_T$ = Matriz Transpuesta de A .

$$\begin{bmatrix} A \end{bmatrix}_T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} A \end{bmatrix}_C^T = \begin{bmatrix} \begin{vmatrix} a^2 & a \\ a & a^2 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 1 & a \\ 1 & a^2 \end{vmatrix} & \begin{vmatrix} 1 & a^2 \\ 1 & a \end{vmatrix} & \begin{vmatrix} 1 & a \\ 1 & a^2 \end{vmatrix} \\ \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ a & a^2 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & a^2 \end{vmatrix} & \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & a \end{vmatrix} & \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & a \end{vmatrix} \\ \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ a^2 & a \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & a \end{vmatrix} & \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & a^2 \end{vmatrix} & \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & a^2 \end{vmatrix} \end{bmatrix}$$

$$[A]_C^T = \begin{bmatrix} (a - a^2) & (a - a^2) & (a - a^2) \\ (a - a^2) & (a^2 - 1) & (-a + 1) \\ (a - a^2) & (-a + 1) & (a^2 - 1) \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} |A| &= (a^4 - a^2) - (a^2 - a) + (a - a^2) = a - a^2 - a^2 + a + a \\ &\quad - a^2 \\ &= 3a - 3a^2 \\ &= 3(a - a^2) \end{aligned}$$

$$[A]^{-1} = 1/3 \begin{bmatrix} \frac{a - a^2}{a - a^2} & \frac{a - a^2}{a - a^2} & \frac{a - a^2}{a - a^2} \\ \frac{a - a^2}{a - a^2} & \frac{a^2 - 1}{a - a^2} & \frac{-a + 1}{a - a^2} \\ \frac{a - a^2}{a - a^2} & \frac{-a + 1}{a - a^2} & \frac{a^2 - 1}{a - a^2} \end{bmatrix}$$

$$[A]^{-1} = 1/3 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

Por tanto:

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (\text{A.6})$$

Por tanto:

$$\begin{aligned} I_{a0} &= \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \\ I_{a1} &= \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2I_c) \\ I_{a2} &= \frac{1}{3}(I_a + a^2I_b + aI_c) \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

Si se toman fasores de voltaje, haciendo un desarrollo análogo al anterior se tiene:

$$\begin{bmatrix} V_{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{012} \end{bmatrix} \quad (\text{A.8})$$

$$\begin{bmatrix} V_{012} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{abc} \end{bmatrix} \quad (\text{A.9})$$

ó bien:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (\text{A.10})$$

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{A.11})$$

Ejemplo:

$$I_a = j10 = 10 \angle 90^\circ, \quad I_b = 5, \quad I_c = 15 + j10 = 18.02 \angle 33.6^\circ$$

Encuentre las corrientes de secuencia:

Solución:

Secuencia Cero

$$\begin{aligned} I_{a0} &= \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) = \frac{1}{3}(j10 + 5 + 15 + j10) = \\ &= \frac{1}{3}(20 + j20) = 9.42 \angle 45^\circ \text{ Amp} \end{aligned}$$

$$I_{a0} = I_{b0} = I_{c0}$$

Secuencia Positiva

$$\begin{aligned} I_{a1} &= \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2I_c) = \frac{1}{3}(10 \angle 90^\circ + (1 \angle 120^\circ \times 5) \\ &\quad + (1 \angle 240^\circ \times 18.02 \angle 33.69^\circ)) \\ &= \frac{1}{3}(10 \angle 90^\circ + 5 \angle 120^\circ + 18.02 \angle 33.69^\circ + 240^\circ) \\ &= \frac{1}{3}(j10 - 2.5 + j4.33 + 1.13 - j17.98) \\ &= \frac{1}{3}(-1.37 - j3.65) = 1.29 \angle 249.4^\circ \text{ Amp.} \end{aligned}$$

$$I_{b1} = a^2 I_1 = 1 \angle 240^\circ \times 1.29 \angle 249.9^\circ = 1.29 \angle 129.9^\circ \quad \text{Amp.}$$

$$I_{c1} = a I_1 = 1 \angle 120^\circ \times 1.29 \angle 249.9^\circ = 1.29 \angle 9.9^\circ \quad \text{Amp.}$$

Secuencia Negativa

$$I_{a2} = 1/3(I_a + a^2 I_b + a I_c)$$

$$\begin{aligned} I_{a2} &= 1/3(j10 + (1 \angle 240^\circ \times 5) + (1 \angle 120^\circ \times 18.02 \angle 33.69^\circ)) \\ &= 1/3(j10 + 5 \angle 240^\circ + 18.02 \angle 33.69^\circ + 120^\circ) \\ &= 1/3(j10 - 2.5 - j4.33 - 16.15 + j7.98) \\ &= 1/3(-18.65 + j13.66) = 7.7 \angle 143.7^\circ \quad \text{Amp.} \end{aligned}$$

$$I_{b2} = a I_2 = 1 \angle 120^\circ \times 7.7 \angle 143.77^\circ = 7.7 \angle 263.77^\circ \quad \text{Amp.}$$

$$I_{c2} = a^2 I_2 = 1 \angle 240^\circ \times 7.7 \angle 143.77^\circ = 7.7 \angle 23.77^\circ \quad \text{Amp.}$$

A partir de las corrientes de secuencia se obtienen las corrientes de fase.

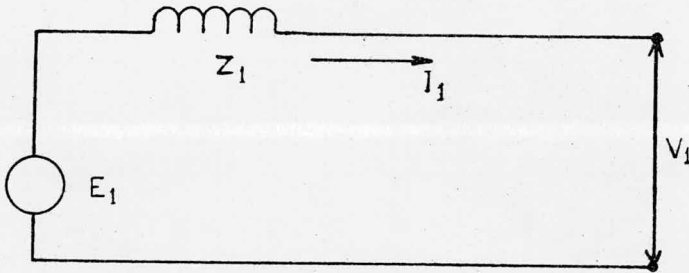
$$\begin{aligned} I_a &= I_{a0} + I_1 + I_2 = 9.42 \angle 45^\circ + 1.29 \angle 249.4^\circ + 7.7 \angle 143.77^\circ \\ &= 6.66 + j6.66 - 0.45 - j1.2 - 6.2 + j4.55 \\ &= 0.01 + j10 \quad \text{Amp.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_b &= I_{b0} + I_{b1} + I_{b2} = 9.42 \angle 45^\circ + 1.29 \angle 9.9^\circ + 7.7 \angle 23.77^\circ \\ &= 6.66 + j6.66 - 0.82 + j0.98 - 0.83 - 7.65 \\ &= 5 - j0.01 \quad \text{Amp.} \end{aligned}$$

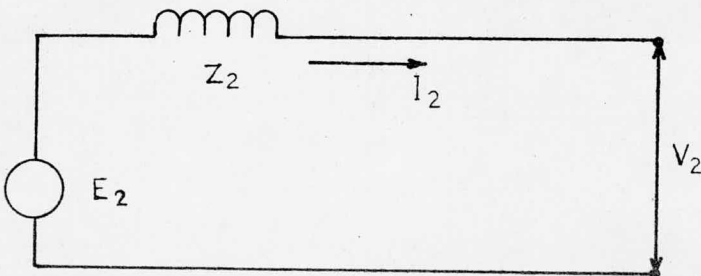
$$\begin{aligned}
 I_c &= I_{c0} + I_{c1} + I_{c2} = 9.42 \angle 45^\circ + 1.29 \angle 9.9^\circ + 7.7 \angle 23.77^\circ \\
 &= 6.66 + j6.66 + 1.27 + j0.221 + 7.04 + j3.1 \\
 &= 14.97 + j9.98 \text{ Amp.}
 \end{aligned}$$

Como observamos en el ejemplo anterior el método de las componentes simétricas nos divide a un sistema trifásico-desequilibrado en tres sistemas trifásicos equilibrados independientes, cada uno de los cuales se pueden representar mediante un circuito equivalente monofásico.

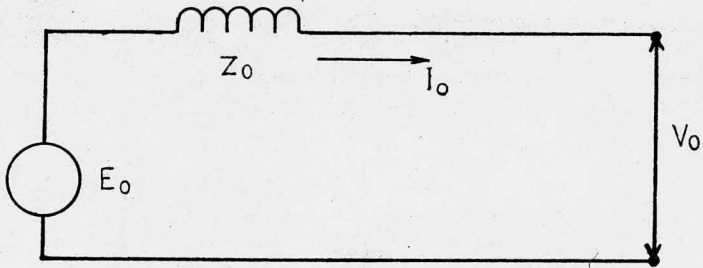
Secuencia (+)



Secuencia (-)



Secuencia (0)

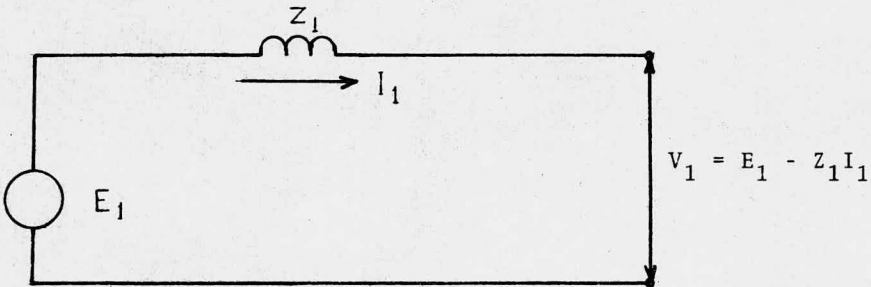


Si las fuerzas eléctricas aplicadas constituyen un sistema trifásico equilibrado esto se reduce al sistema de secuencia positiva:

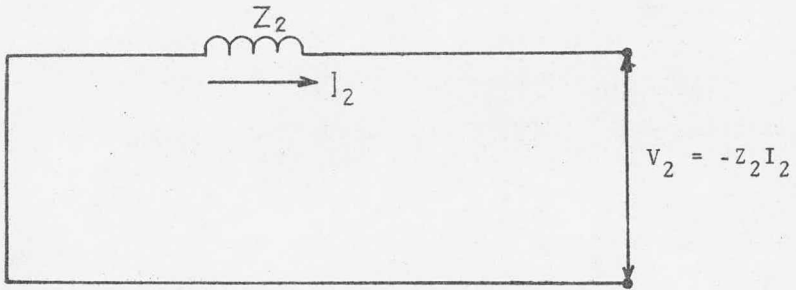
Por tanto:

$$E_2 = 0 \quad E_0 = 0$$

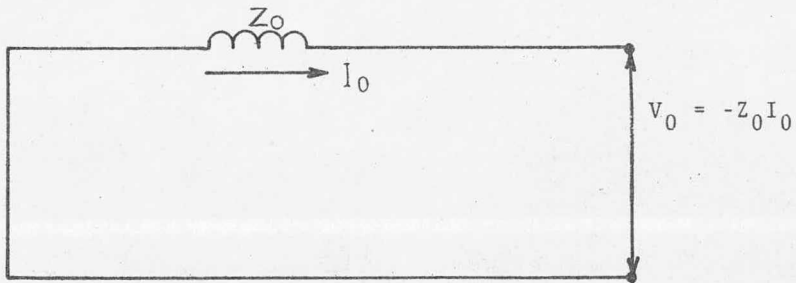
Secuencia (+)



Secuencia (-)



Secuencia (0)



A P E N D I C E B

IMPEDANCIAS EN LINEAS DE TRANSMISION TRIFASICA

B.1 Línea de Carson.

Carson substituyó el circuito real a través de tierra, por otro ideal, partiendo de la suposición de que la tierra - tiene resistencia uniforme y es de extensión infinita, constituida por un conductor ficticio "g" de una unidad de longitud, colocada bajo tierra y en forma paralela a esta. El conductor conduce una corriente con retorno por tierra.

La figura B.1 representa una línea de Carson.

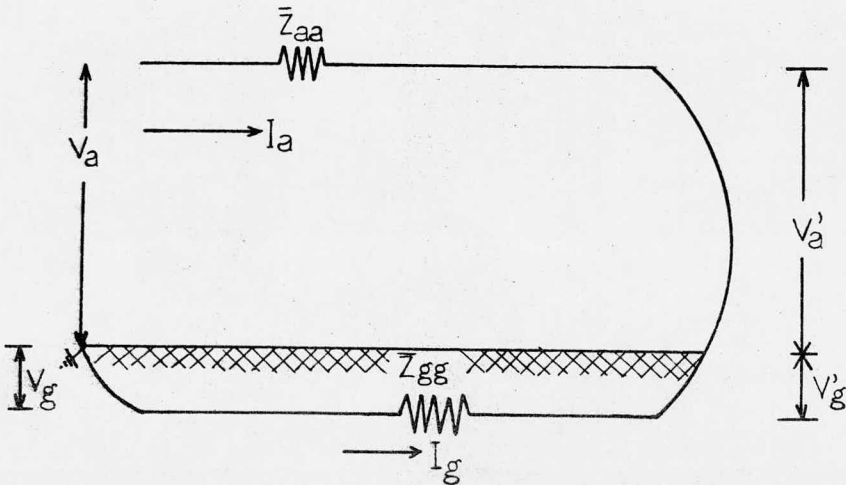


Figura B.1 Línea de Carson.

Si analizamos el circuito anterior tenemos:

$$V_a - V'_a = \bar{z}_{aa} I_a + \bar{z}_{ag} I_g \quad (\text{B.1})$$

$$V_g - V'_g = \bar{z}_{ga} I_a + \bar{z}_{gg} I_g \quad (\text{B.2})$$

$$\text{Si } V'_g - V'_a = 0 \quad V_g = 0 \quad I_g = -I_a$$

Al sustituir el valor de I_g en la ecuación (B.1) y -- (B.2) se deriva lo siguiente:

$$V_a - V'_a = \bar{z}_{aa} I_a - \bar{z}_{ag} I_a \quad (\text{B.3})$$

$$V_g - V'_g = \bar{z}_{ga} I_a - \bar{z}_{gg} I_a \quad (\text{B.4})$$

Al efectuar la diferencia de (B.3) a (B.4)

$$(V_a - V'_a) - (V_g - V'_g) = \bar{z}_{aa} I_a - \bar{z}_{ag} I_a - (\bar{z}_{ga} I_a - \bar{z}_{gg} I_a)$$

$$V_a - V'_a - V_g + V'_g = (\bar{z}_{aa} - 2\bar{z}_{ag} + 2\bar{z}_{gg}) I_a$$

$$V_a + \cancel{V'_g}^0 - \cancel{V'_a}^0 - \cancel{V_g}^0 = (\bar{z}_{aa} - 2\bar{z}_{ag} + \bar{z}_{gg}) I_a$$

$$V_a = Z_{aa} I_a$$

$$Z_{aa} = r_a + r_d + j\omega k \quad \text{Log} \quad \frac{D_e}{D_{sa}} \quad \text{ohms/unidades de long.}$$

Donde:

r_a = Resistencia del conductor ohms/unidades de long.

r_d = Resistencia de la tierra

$$r_d = \begin{cases} 1.588 \times 10^{-3} f & \text{ohms/milla} \\ 9.869 \times 10^{-4} f & \text{ohms/Km} \end{cases}$$

$$D_e = 2160 \sqrt{\frac{\rho}{f}}$$

ρ = Resistividad de la tierra

f = Frecuencia

D_{sa} = Radio medio geométrico

WK = Constante

B.2 Impedancias de Fase en Líneas de Transmisión.

Para obtener las impedancias de los conductores de fase de una línea de transmisión trifásica se realiza semejante al de una fase.

La figura B.2 representa un sistema de tres fases un-circuito.

Condición de la Tierra	Resistividad r-m	De (ft)	
		60 HZ	50 HZ
Agua de mar	0.01 - 1.0	27.9 - 279	30.5 - 305
Tierra promedio	1.0 - 100	279 - 2790	305 - 3055
Tierra Seca	1000	8820	9660
Roca	10^7	882000	966000

Tabla B.1 Resistividad de diferentes tipos de materiales.

Cte	Unidad de longitud	Logaritmo Natural		Log. base 10
K	Km	0.2	$\times 10^{-3}$	0.4605×10^{-3}
	mi	0.3219	$\times 10^{-3}$	0.7411×10^{-3}
2 Π k	km	1.257	$\times 10^{-3}$	2.893×10^{-3}
	mi	2.022	$\times 10^{-3}$	4.656×10^{-6}
wk (50 Hz)	km	0.86283		0.1446
	mi	0.10111		0.2328
(60 Hz)	km	0.07539		0.1736
	mi	0.12134		0.2794

Tabla B.2 Constantes para el calculo de reactancias en líneas de transmisión.

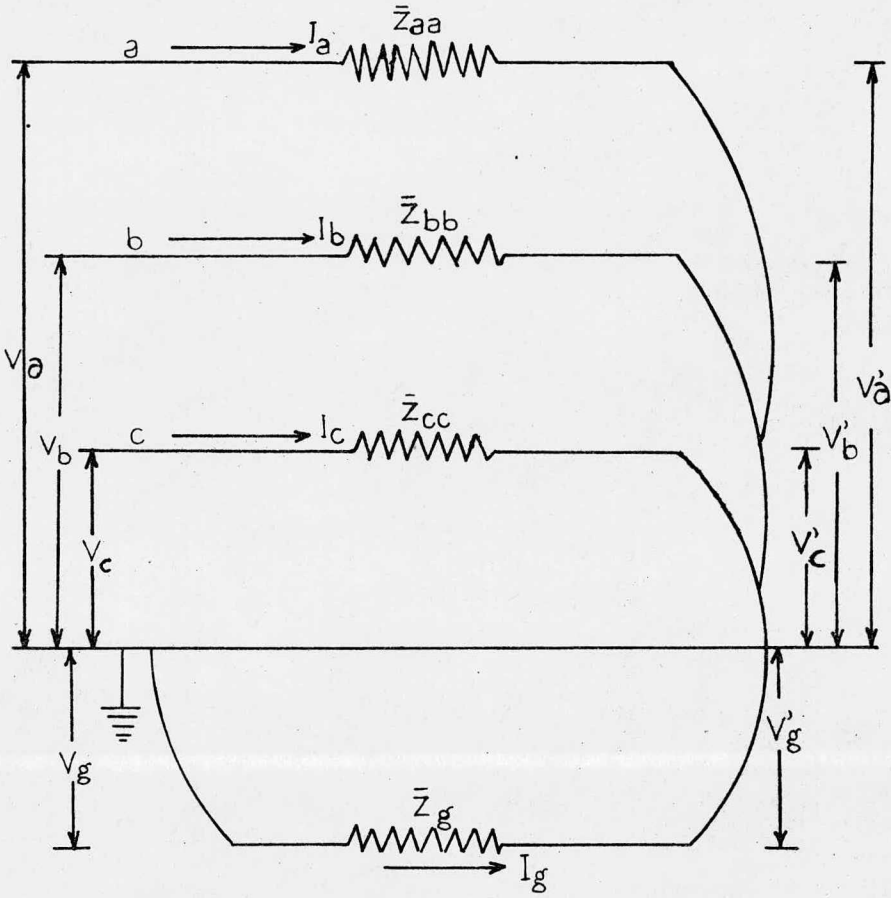


Figura B.2 Sistema Trifásico

Al analizar el circuito tenemos:

$$V_a - V'_a = \bar{z}_{aa}I_a + \bar{z}_{ab}I_b + \bar{z}_{ac}I_c + \bar{z}_{ag}I_g \quad (\text{B.5})$$

$$V_b - V'_b = \bar{z}_{ba}I_a + \bar{z}_{bb}I_b + \bar{z}_{bc}I_c + \bar{z}_{bg}I_g \quad (\text{B.6})$$

$$V_c - V'_c = \bar{z}_{ca}I_a + \bar{z}_{cb}I_b + \bar{z}_{cc}I_c + \bar{z}_{cg}I_g \quad (\text{B.7})$$

$$V_g - V'_g = \bar{z}_{ga}I_a + \bar{z}_{gb}I_b + \bar{z}_{gc}I_c + \bar{z}_{gg}I_g \quad (\text{B.8})$$

$$\text{Si } I_g = -(I_a + I_b + I_c) \quad V_g = 0$$

$$V'_g - V'_a = 0 \quad V'_g - V'_b = 0 \quad V'_g - V'_c = 0$$

Si sustituimos el valor de I_g en la ecuación (B.5) y (B.8).

$$V_a - V'_a = \bar{z}_{aa}I_a + \bar{z}_{ab}I_b + \bar{z}_{ac}I_c - \bar{z}_{ag}(I_a + I_b + I_c) \quad (\text{B.9})$$


$$V_g - V'_g = \bar{z}_{ga}I_a + \bar{z}_{gb}I_b + \bar{z}_{gc}I_c - \bar{z}_{gg}(I_a + I_b + I_c) \quad (\text{B.10})$$

Al efectuar la diferencia de (B.9) a (B.10) tenemos:

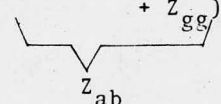
$$V_a - V'_a - (V_g - V'_g) = \bar{z}_{aa}I_a + \bar{z}_{ab}I_b + \bar{z}_{ac}I_c + \bar{z}_{ag}I_g - (\bar{z}_{ga}I_a + \bar{z}_{gb}I_b + \bar{z}_{gc}I_c + \bar{z}_{gg}I_g)$$

Si agrupamos terminos tenemos:

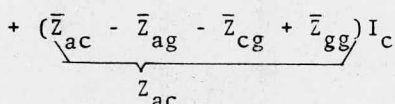
$$V_a + \cancel{V'_g} - \cancel{V'_a} - \cancel{V_g} = (\bar{z}_{aa} - 2\bar{z}_{ga} + \bar{z}_{gg})I_a + (\bar{z}_{ab} - \bar{z}_{ag} - \bar{z}_{bg} + \bar{z}_{gg})I_b + (\bar{z}_{ac} - \bar{z}_{ag} - \bar{z}_{cg} + \bar{z}_{gg})I_c$$



Z_{aa}



Z_{ab}



Z_{ac}

$$V_a = Z_{aa} I_a + Z_{ab} I_b + Z_{ac} I_c \quad (\text{B.11})$$

Donde:

$$Z_{aa} = r_a + r_d + j\omega k \text{ Log } \frac{D_e}{D_{sa}} \quad \text{ohms/unidades de long.}$$

$$Z_{ab} = r_d + j\omega k \text{ Log } \frac{D_e}{D_{ab}} \quad \text{ohms/unidades de long.}$$

$$Z_{ac} = r_d + j\omega k \text{ Log } \frac{D_e}{D_{ac}} \quad \text{ohms/unidades de long.}$$

Al aplicar el mismo procedimiento a la ecuación (B.6) y (B.9) se obtiene:

$$V_b = Z_{ba} I_a + Z_{bb} I_b + Z_{bc} I_c \quad (\text{B.12})$$

$$V_c = Z_{ca} I_a + Z_{cb} I_b + Z_{cc} I_c \quad (\text{B.13})$$

Donde:

$$Z_{bb} = (\bar{Z}_{bb} - 2\bar{Z}_{bg} + \bar{Z}_{gg})$$

$$Z_{cc} = (\bar{Z}_{cc} - 2\bar{Z}_{cg} + \bar{Z}_{gg})$$

$$Z_{cb} = (\bar{Z}_{cb} - \bar{Z}_{cg} - \bar{Z}_{bg} + \bar{Z}_{gg})$$

$$Z_{aa} = Z_{bb} = Z_{cc} = r_a + r_d + j\omega k \text{ Log } \frac{D_e}{D_{sa}} \quad \text{ohms/unidades de long.}$$

$$Z_{cb} = r_d + jwk \operatorname{Log} \frac{D_e}{D_{cb}} \quad \text{ohms/unidades de long.}$$

Las expresiones (B.11), (B.12) y (B.13) en forma matricial:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{bc} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

ó en forma abreviada:

$$\begin{bmatrix} V_{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{abc} \end{bmatrix} \quad (\text{B.14})$$

Donde:

$$\begin{bmatrix} Z_{abc} \end{bmatrix} = \text{Matriz de impedancias de fase.}$$

B I B L I O G R A F I A

- Francis W. Sear. "Fundamentos de Fisica II, Electricidad y Maguetismo". Sexta Edición. Quinta Reimpresión 1978. España: Editorial Aguilar.
- Enríquez Harper Gilberto. "Introducción al Análisis de los Sistemas Eléctricos de Potencia". Primera Edición; - México: Editorial Limusa, S.A. 1972.
- William D. Stevenson, JR. "Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia". Segunda Edición; México: Editorial Li bros Mc Graw-Hill de México, S.A. de C.V. 1979.
- Viqueira Landa Jacinto. "Redes Eléctricos en Regimen Perma nente Desequilibrado y en Regimen Transitorio". Se-- gunda Edición; México: Editorial Representación y -- Servicios de Ingenieria, S.A. 1973.
- Enriquez Harper Gilberto. Curso de Transformadores y Moto-- res Trifásicos de Inducción". Segunda Edición; México: Editorial Limusa, S.A. 1976.
- Perez Amador Barrón Victor. "Pruebas de Equipo Eléctrico. - Transformadores de Distribución y Potencia". Primera- Edición; México: Editorial Limusa, S.A. 1981.
- P. Anderson. "Analysis of Faulted Power System". The Iowa- State University Press Arnes. Iowa, 1973.

- L.O. Barthold and. H.C. Barnes. "High Phase Orden Power --
Transmission" (IGRE Study Committee No. 31 Report,
1972 and ELECTRA, No. 24.

- S.S. Venkata. "Feasibility Studies of High-Orden Phase - -
Electrical Transmission"; Allegheny Power Service Cor
porati6n Proyect Proposal (phase I), April. 1976 - -
May 1977.

- West Virginia University. College of Engineering Morgan - -
town West Virginia, "Final Report Feasibility. Stu--
dies of Nigher Order Phase Electrical.

- Enrriquez Harper Gilberto. "Fundamentos de Instalaciones --
El6ctricas de Mediana y Alta Tensi6n". Primera Edi--
ci6n; M6xico: Editorial Limusa S.A. 1976. e