

**ESCUELA SUPERIOR**  
**POLITECNICA DEL LITORAL**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA**

**"Técnicas de Cambios de Simetria y Análisis de Fallas  
Simultaneas de Doble Contingencia en Sistemas Eléctricos  
de Potencia"**

**TESIS DE GRADO**

**Previa a la obtención del Título de  
INGENIERO EN ELECTRICIDAD**

**Especialización: POTENCIA**

**Presentada Por:**

**RICARDO OTERO ESTRADA**

**Guayaquil-Ecuador  
1986**

## AGRADECIMIENTO

AL ING. JOSE LAYANA CHANCAY,  
DIRECTOR DE TESIS, POR LA  
GENTILEZA QUE TUVO AL COLABO  
RAR, DIRIGIR Y REVISAR EL PRE  
SENTE TRABAJO.

## DEDICATORIA

A MIS PADRES Y HERMANOS FORJADORES  
DE MI FORMACION Y GRACIAS A CUYOS  
SACRIFICIOS Y AMOR ALCANCE MI FOR-  
MACION MORAL E INTELECTUAL.

MIEMBROS DEL TRIBUNAL DE GRADO



ING. GUSTAVO BERMUDEZ F.  
SUB-DECANO DE LA F.I.E.



ING. JOSE LAYANA CH.  
DIRECTOR DE TESIS.



ING. JORGE FLORES M.  
MIEMBRO TRIBUNAL



ING. EDUARDO LEON C.  
MIEMBRO TRIBUNAL

## DECLARACION EXPRESA

"LA RESPONSABILIDAD POR LOS HECHOS, IDEAS Y DOCTRINAS EXPUESTOS EN ESTA TESIS, ME CORRESPONDEN EXCLUSIVAMENTE; Y, EL PATRIMONIO INTELECTUAL DE LA MISMA, A LA ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(REGLAMENTO DE EXÁMENES Y TÍTULOS PROFESIONALES DE LA ESPOL).



RICARDO F. OTERO ESTRADA.

## RESUMEN

Al escribir esta tesis, el autor ha querido presentar los conceptos esenciales de un estudio de cortocircuito más generalizado que los hasta ahora considerados; como elementos necesarios para la comprensión de la operación de los cada vez más grandes sistemas de potencia.

Los cambios de simetría surgen como respuesta al problema de los desajustes establecidos en los cálculos de corrientes y voltaje, frente a contingencias con simetría en términos de una fase que no sea la fase A.

Este hecho reviste especial importancia en el análisis de fallas simétricas en el mismo o diversos puntos de un sistema eléctrico, en los que pueden ocurrir fallas que no necesariamente (y es la mayoría de los casos) son simétricas con respecto a la misma fase.

El capítulo I es una recopilación de conceptos básicos necesarios para la comprensión y desarrollo de los capítulos posteriores, e incluye temas como: Componentes simétricos, impedancias y circuitos de secuencias de los principales componentes de un sistema, además de consideraciones generales de la teoría de redes de dos puertos.

En el siguiente capítulo se realiza un análisis generalizado de las fallas balanceadas, así como las desbalanceadas con simetría en términos de la fase A incluyendo la posible existencia o no de una im-

pedancia de falla por arco.

El capítulo III es una extensión del capítulo II generalizando totalmente las fallas transversales y longitudinales de simple contingencia en base a las técnicas de cambios de simetría según ATABEKOV.

En los dos últimos capítulos se analizan todas las posibles combinaciones de ocurrencia de fallas simultáneas de doble contingencia en el mismo o en diversos puntos y/o fases de un sistema haciendo usos de redes multi-términales, condiciones de frontera para los tipos de falla y técnicas adecuadas de simetría en términos de cualquier fase.

## INDICE GENERAL

	<u>PAG</u>
RESUMEN -----	VI
INDICE GENERAL -----	VIII
INDICE DE TABLAS -----	XI
INTRODUCCION -----	12
CAPITULO I	
CONCEPTOS BASICOS -----	16
1.1. COMPONENTES SIMETRICAS -----	16
1.2. IMPEDANCIAS DE SECUENCIA -----	21
1.3. CIRCUITOS DE SECUENCIA -----	40
1.4. TEORIA DE REDES DE DOS PUERTAS -----	46
CAPITULO II	
DIAGRAMA DE FALLA TRIFASICA GENERALIZADO Y FALLAS DE SIMPLE CONTINGENCIA CON SIMETRIA EN TERMINOS DE LA FASE A. -----	66
2.1. DIAGRAMA DE FALLA TRIFASICA GENERALIZADO -----	66
2.2. FALLAS DE SIMPLE CONTINGENCIA CON SIMETRIA EN TERMINOS DE LA FASE A. -----	72



2.3. ALGUNAS CONSIDERACIONES ACERCA DE LOS DIVERSOS TIPOS DE FALLAS -----	80
--	----

## CAPITULO III

TECNICAS DE CAMBIOS DE SIMETRIA -----	82
3.1. METODO DE ATABEKOV -----	82
3.2. DIAGRAMA DE FALLA GENERALIZADO PARA EL DISTURBIO TRIFASICO CON SIMETRIA EN TERMINOS DE CUALQUIER FASE -----	83
3.3. DIAGRAMA DE FALLA GENERALIZADO PARA DISTURBIOS TIPO PARA- LELO -----	89
3.4. DIAGRAMA DE FALLA GENERALIZADO PARA DISTURBIOS TIPO SERIE	93

## CAPITULO IV

FALLAS SIMULTANEAS DE DOBLE CONTINGENCIA EN DISTINTOS PUNTOS DE UN SISTEMA -----	103
4.1. CONEXION DE REDES DE SECUENCIA PARA FALLAS SIMULTANEAS----	103
4.2. DIAGRAMA DE FALLA GENERALIZADO PARA FALLA TRIFASICA DESBALAN CEADA EN A MAS FALLA TRIFASICA DESBALANCEADA EN B-----	126
4.3. DIAGRAMA DE FALLA GENERALIZADO PARA FALLA TRIFASICA DESBALAN CEADA EN A MAS FALLA PARALELO EN B -----	126
4.4. DIAGRAMA DE FALLA GENERALIZADO PARA FALLA TRIFASICA DESBALAN CEADA EN A MAS FALLA SERIE EN B -----	127

	<u>PAG</u>
4.5. DIAGRAMA DE FALLA GENERALIZADO PARA FALLA PARALELO EN A MAS FALLA PARALELO EN B. -----	127
4.6. DIAGRAMA DE FALLA GENERALIZADO PARA FALLA PARALELO EN A MAS FALLA SERIE EN B -----	129
4.7. DIAGRAMA DE FALLA GENERALIZADO PARA FALLA SERIE EN A MAS FALLA SERIE EN B -----	130
 <b>CAPITULO V</b>	
FALLAS SIMULTANEAS DE DOBLE CONTINGENCIA EN UN MISMO PUNTO DE UN SISTEMA CON SIMETRIA EN TERMINOS DE CUALQUIER FASE. EJEMPLOS DE APLICACION A SISTEMAS DE POTENCIA-----	
	133
5.1. DETERMINACION DE LAS CONEXIONES DE REDES DE SECUENCIA PARA FALLAS SIMULTANEAS EN UN MISMO PUNTO DEL SISTEMA -----	133
5.2. TIPOS DE FALLAS SIMULTANEAS EN UN MISMO PUNTO DEL SISTEMA--	134
5.3. EJEMPLOS DE APLICACION A SISTEMAS DE POTENCIA -----	145
 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES -----	 160
 BIBLIOGRAFIA -----	 165

## INTRODUCCION

El estudio de cortocircuitos en un sistema de potencia es importante por la información que se obtiene para aplicarla en la determinación de las capacidades interruptivas de los disyuntores, selección y coordinación de protecciones, cálculo de esfuerzos térmicos y dinámicos en las instalaciones, diseño y planificación de sistemas, análisis de estabilidad e interferencia en sistemas de comunicación, etc.

Las fallas ocurren principalmente como consecuencia del deterioro del aislamiento en el equipo eléctrico, el que a su vez es resultado de factores como: sobrevoltajes, descargas atmosféricas, lanzamiento de conductores sobre las líneas, disminución de la resistencia dieléctrica propia del conductor, daño mecánico, método de aterrizamiento, clase de voltaje, tipo de construcción de la línea, el uso o no de hilos de guardia, condiciones atmosféricas, etc.

Probablemente la cosa más seria que le puede suceder a un sistema de potencia es tener un gran cortocircuito que no pueda despejarse. Si el cortocircuito existe en el equipo, este será destruido violentamente, ya que la gran cantidad de energía que fluye en el poco tiempo causará explosión. Generalmente la falla no será despejada por la destrucción del equipo o la fundición de la línea de transmisión, sino que el arco continuará y se establecerá en el lado de la fuente de los aparatos y continuará destruyendo equipos hasta que finalmente los generadores sean destruidos. Aún si la falla

se despeja, el intenso calor generado podría fundir el hierro y otros metales.

Los cambios de simetría necesarios para el análisis de fallas más complejas pueden realizarse haciendo uso de métodos como el de ATABEKOV, que está orientado hacia la construcción de un diagrama de falla generalizado, el cual constituye uno de los pilares de esta tesis, existiendo además métodos de otros autores de renombre como son G. Oberdorfer, Kron, R. Smith, E. Clarke, etc.

Uno de los problemas más difíciles en la solución de redes falladas es el que involucra dos o más fallas que ocurren simultáneamente en puntos iguales o remotos, como resultado de descargas atmosféricas, accidentes causados por el hombre, catástrofes, etc. Usualmente se consideran solo dos fallas simultáneas, lo cual es una limitación práctica, ya que la probabilidad de ocurrencia de tal contingencia es igual al producto de las probabilidades de ocurrencia de cada uno de los eventos individuales. Tres o más fallas presentan una probabilidad extremadamente baja para ser considerada en el diseño de sistemas, además de que se complican las redes sobre las que se fundamenta el cálculo de parámetros eléctricos.

Las fallas simultáneas de doble contingencia revisten especial importancia en países de climas tropicales en donde la incidencia de descargas atmosféricas es mucho mayor que en zonas templadas, resultando de un mayor número de fallas.

Una aplicación típica podría ser, determinar la correcta operación de un relé cuando una falla inicial de una fase a tierra en una barra de alto voltaje causa daños que producen una falla simultánea de dos fases a tierra en una barra de bajo voltaje situada a desnivel con respecto a la primera.

También existen fallas simultáneas en el mismo punto y fase del sistema. Por ejemplo, si una descarga atmosférica produce la apertura de una fase cerca de una torre de transmisión de alto voltaje, el tramo de conductor más corto del vano queda suspendido de la torre, mientras que el otro tramo se va a tierra, produciéndose una falla simultánea de fase abierta y fase a tierra en la misma fase y punto de falla.

Muchas fallas simultáneas en sistemas no aterrizados, son consecuencia de una falla inicial a tierra en un punto produciendo sobrevoltajes en otros puntos del sistema que ionizan el aire formando arcos o descargas eléctricas entre fases o fase y tierra. En sistemas de alto voltaje, aún cuando las condiciones locales afectan el resultado, como guía general, cada 400V mantendrán un arco de un pie de longitud en el aire, de modo que una moderna línea de transmisión podrá mantener un arco de cientos de pies una vez que este se ha establecido.

Los sistemas aterrizados que llevan montadas líneas de transmisión de doble circuito sobre una misma torre, a menudo sufren fallas simultáneas en ambos circuitos como consecuencia de descargas atmosféricas.

El estudio de fallas simultáneas es también importante porque en no pocos sistemas, las protecciones responden satisfactoriamente para fallas de simple contingencia pero operan inadecuadamente ante fallas simultáneas.

Este trabajo informa al lector acerca de la teoría y sus aplicaciones de las técnicas de ATABEKOV, el tratamiento de fallas de simple o doble contingencia en uno o varios puntos del sistema, sus modelos, consideraciones generales, etc. Léalo con cuidado; le ayudará a comprender el comportamiento de los sistemas de potencia.

## CAPITULO I

### CONCEPTOS BASICOS

#### 1.1. COMPONENTES SIMÉTRICAS

La mayoría de las fallas en sistemas de potencia son de naturaleza asimétrica, las que además de producir un anormal flujo de corrientes, distorsionan los vectores rotativos que representan las corrientes en los sistemas trifásicos.

Como resultado de esto, las corrientes individuales son distintas en magnitud y fase de modo que no es posible hacer uso de las representaciones monofásicas de las redes para analizar condiciones asimétricas.

El empleo de los componentes simétricas permite resolver circuitos polifásicos desbalanceados, en términos de sistemas balanceados. Esto es posible debido a que los  $n$  fasores desbalanceados pueden ser representados por  $(n-1)$  juegos de fasores balanceados de diferentes secuencia de fase, más un juego adicional de secuencia cero en el que todos ellos son idénticos.

Considere el sistema  $n$ -dimensional de fasores definidos por la siguiente ecuación:





es decir:  $\tilde{V} = CV$

donde:

$\tilde{V}$  = Matriz de transformación de fase "a"

$C$  = Matriz operador que determina las componentes simétricas de la fase a.

$V$  = Matriz de fasores desbalanceados originales.

A partir de las componentes simétricas de la fase a, por simetría pueden encontrarse las componentes simétricas de las otras fases. La matriz  $C$  tiene inversa, ya que su determinante es diferente de cero por el teorema de Vandermonde, luego, si en el siguiente sistema:

$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + \dots + V_{a(n-1)}$$

$$V_b = V_{b0} + V_{b1} + \dots + V_{b(n-1)}$$

$$\vdots$$

$$V_n = V_{n0} + V_{n1} + \dots + V_{n(n-1)}$$

reemplazamos  $V_{b1}, V_{c1}, \dots, V_{n1}$  en función de  $V_{a1}; V_{b2}, V_{c2}, \dots, V_{n2}$

en función de  $V_{a2}$ , etc. y reemplazando la relación para el operador "a" de:

$$a^{-k} = a^{in-k}$$

$$i = 1, 2, \dots$$

$$0 < k < n$$

y así:

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ \vdots \\ V_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & a^{n-1} & \dots & a \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & a & \dots & a^{n-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ \vdots \\ V_{a(n-1)} \end{pmatrix}$$

es decir:

$$V = A \tilde{V} \quad \text{donde: } A = C^{-1}$$

### 1.1.1. COMPONENTES SIMÉTRICAS DE UN SISTEMA TRIFÁSICO

La observación de la teoría de las componentes simétricas reconoce que cualquier sistema trifásico desbalanceado puede resolverse en términos de tres sistemas de fasores balanceados:

- a) El sistema de secuencia positiva, que consiste en un juego de componentes trifásicas balanceadas usualmente de la misma secuencia de fase que el juego desbalanceado original. Los fasores de secuencia positiva son iguales en magnitud, pero desfasados  $120^\circ$  entre ellos.
- b) El sistema de secuencia negativa, que consiste de un juego de componentes trifásicas balanceadas de secuencia de fase opuesta al juego de secuencia positiva. Sus fasores son iguales en magnitud, pero desfasados  $120^\circ$ .

c) El sistema de secuencia cero, que consiste de tres componentes monofásicas iguales en magnitud y fase.

De lo anterior se sigue que tanto para corrientes como para voltajes las ecuaciones que relacionan los vectores originales con sus componentes de secuencia son:

$$V_{012} = A^{-1} V_{abc}$$

$$I_{012} = A^{-1} I_{abc} \quad \text{donde:}$$

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

$$A = C^{-1} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{vmatrix}$$

#### 1.1.2. NATURALEZA DE LAS CORRIENTES DE SECUENCIA CERO.

Siempre que se tenga un sistema trifásico de tres hilos sin retorno de neutro la componente de secuencia cero de la corriente de línea es cero.

Por tanto las líneas que salen de una conexión "Y" aislada o delta no portarán corrientes de secuencia cero. Sin embargo, pueden existir corrientes de secuencia cero en un sistema de cuatro hilos y en la delta de un transformador. Esto último es posible debido a que las corrientes de secuencia cero de las fases a, b y c son iguales en magnitud y fase.

Es obvio por tanto, que las corrientes de secuencia cero se vean involucradas en fallas asimétricas a tierra o en el desbalance monofásico de una carga en un sistema trifásico de cuatro hilos.

Cabe anotar que no hay que confundir las corrientes de secuencia cero con las corrientes de excitación de terceras armónicas, ya que si bien es cierto que estas últimas están en fase, su flujo no requiere una condición de balance en los amperios-vuelta de los transformadores.

## 1.2. IMPEDANCIAS DE SECUENCIA

### 1.2.1. COMPONENTES DE SECUENCIA DE IMPEDANCIA DE REDES DESBALANCEADAS.

Considere el sistema mostrado en la figura 1, donde:  $Z_{aa} \neq Z_{bb} \neq Z_{cc}$  y  $Z_{ab} \neq Z_{bc} \neq Z_{ca}$  constituyendo un juego de impedancias complejas desbalanceadas.

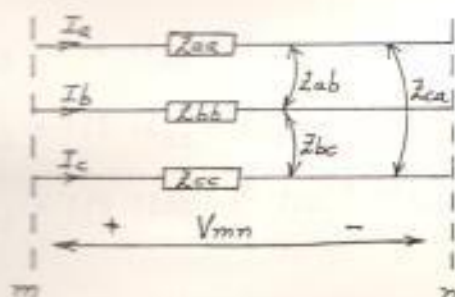


Fig. 1. Sistema trifásico con impedancias serie

Investigaremos la posibilidad de encontrar las componentes simétricas de las impedancias desbalanceadas. En forma matricial:

$$A V_{m-n} 012 = Z A I_{012}, \text{ es decir:}$$

$$Z_{mn} - 012 = A^{-1} Z A$$

donde:

$$Z = \begin{vmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{vmatrix}$$

Realizando las operaciones pertinentes:

$$Z_{mn-012} = \begin{vmatrix} Z_{\Delta 0} + 2Z_{m0} & Z_{\Delta 2} - Z_{m2} & Z_{\Delta 1} - Z_{m1} \\ Z_{\Delta 1} - Z_{m1} & Z_{\Delta 0} - Z_{m0} & Z_{\Delta 2} + 2Z_{m2} \\ Z_{\Delta 2} - Z_{m2} & Z_{\Delta 1} + 2Z_{m1} & Z_{\Delta 0} - Z_{m0} \end{vmatrix}$$

donde:

$$Z_{\Delta 0} = 1/3 (Z_{aa} + Z_{bb} + Z_{cc})$$

$$Z_{\Delta 1} = 1/3 (Z_{aa} + aZ_{bb} + a^2 Z_{cc})$$

$$Z_{\Delta 2} = 1/3 (Z_{aa} + a^2 Z_{bb} + aZ_{cc})$$

además:

$$Z_{m0} = 1/3 (Z_{bc} + Z_{ca} + Z_{ab})$$

$$Z_{m1} = 1/3 (Z_{bc} + aZ_{ca} + a^2 Z_{ab})$$

$$Z_{m2} = 1/3 (Z_{bc} + a^2 Z_{ca} + aZ_{ab})$$

en donde se ha tomado en cuenta que las impedancias mutuas en redes pasivas son recíprocas, es decir,  $Z_{ab} = Z_{ba}$ , etc. Hay básicamente tres casos especiales que simplifican la forma de la matriz  $Z_{mn-012}$  y los cálculos a partir de ella:

- a. En muchos casos las impedancias mutuas son despreciables comparadas con las impedancias propias por lo que se las aproxima a cero. Sin embargo, esta simplificación mantiene a la matriz de componentes simétricas en forma asimétrica, por lo que no es satisfactoria si las impedancias propias son arbitrarias.
- b. Otro tipo de simplificación consiste en hacer iguales los valores de impedancias propias de la red así como los de las impedancias mutuas entre sí, lo que diagonaliza la matriz de componentes simétricas, significando esto no solamente que la matriz es recíproca, sino también asegurando la inexistencia del acoplamiento entre secuencias.

c. Un caso menos restrictivo es aquel en el que las impedancias son simétricas respecto a la fase a, es decir:  $Z_{bb} = Z_{cc}$  y  $Z_{ab} = Z_{ca}$ , convirtiendo a la matriz impedancias de secuencia en simétrica.

El resumen de las condiciones impuestas para simplificar esta matriz y sus resultados, se lo presenta en la tabla I. en donde se destacan cuatro consideraciones:

a. Matriz cero.- Lo que se considera un caso degenerado del sistema, ya que no existen caídas de voltaje.

b. Matriz diagonal.- Significa que no hay acoplamiento entre secuencias, es decir las corrientes de una determinada secuencia producen caídas de voltaje únicamente de esa secuencia en particular.

c. Matriz simétrica.- Significa que existe acoplamiento entre las secuencias, pero éste es recíproco esto es, el acoplamiento desde la secuencia positiva a la negativa, es el mismo que desde la negativa a la positiva. lo último es fácilmente similable con una red pasiva.

- d. *Matriz asimétrica.*- Establece la existencia de un acoplamiento entre secuencias no-recíproco, lo cual es más real, al existir en la práctica sistemas de potencia de redes activas.

IMPEDANCIAS MUTUAS	IMPEDANCIAS PROPIAS			
	C	I	S	A
C	C	D	S	A
I	D	D	S	A
S	S	S	S	A
A	A	A	A	A

Tabla I. Resumen de las condiciones matriciales en base a las impedancias del sistema.

C = cero ; D = diagonal; S = simétrica; A= asimétrica; I = iguales.

#### 1.2.2. IMPEDANCIAS DE SECUENCIA DE MAQUINAS.

##### 1.2.2.1. IMPEDANCIAS DE MAQUINAS SINCRONAS.

Generador.- Es un componente muy complejo como para analizar en detalle, por lo que en muchos estudios se lo representa como una impedancia fija con un voltaje interno fijo. Tal



representación puede ser satisfactoria para algunos estudios pero no necesariamente para todas las condiciones.

Con frecuencia al generador se lo describe con sus impedancias de secuencia cero, positiva y negativa, los mismos que se usan como constantes aún cuando varían bajo ciertas condiciones de operación. A diferencia de los circuitos estáticos, las secuencias positivas y negativas de un generador no son iguales. Algunas veces las impedancias de secuencia positiva y negativa del generador se las considera iguales para simplificar el problema. Esta asunción implica poco error cuando el área del sistema a estudiar está más o menos distante de las plantas generadoras.

Las reactancias de secuencia, designadas como  $X_0$ ,  $X_1$ ,  $X_2$  son valores que representan las reactancias del sistema al flujo de corrientes de secuencia cero positiva y negativa respectivamente.

Una máquina síncrona tiene (como veremos más adelante) valores típicos de reactancia, denominadas síncrona, transiente y subtransiente, todas ellas, de secuencia positiva. La reactancia de secuencia negativa generalmente es igual a la reactancia subtransiente, excepto para generadores hidráulicos sin devanados amortiguadores, mientras que la reactancia de secuencia cero usualmente es menor que cualquiera de las otras tal como lo muestra la tabla II.

Motor.- Su comportamiento es similar al del generador síncrono. Cuando una falla ocurre, la inercia de la carga del motor actúa como primo-motor y como la excitación se mantiene, el motor se comporta como un generador suministrando corriente de cortocircuito durante varios ciclos después del cortocircuito.

Si bien las designaciones usadas para las reactancias de un motor, son las mismas que para las de un generador, sus valores difieren según lo establecido en la tabla II. La magnitud de la corriente de

cortocircuito debida a un motor síncrono depende de los HP, el voltaje, su reactancia y la reactancia del sistema al punto de falla.

Condensador síncrono.- Denominado también capacitor o compensador síncrono, es un motor síncrono que funciona sin carga mecánica con factor de potencia adelantado y se usa para mejorar el factor de potencia y la regulación de tensión de un sistema. Sus reactancias se muestran en la tabla II.

Máquina	Secuencia positiva		Secuencia negativa	Secuencia cero	
	S	T	St		
G 2p	1.7	0.25	0.17	0.17	0.065
G 4p	1.49	0.281	0.19	0.19	0.106
G ps y M de	1.25	0.3	0.2	0.2	0.18
Gps <sub>2</sub>	1.25	0.3	0.3	0.48	0.19
Gs	2.0	0.42	0.3	0.3	0.13

Tabla II. Constantes típicas de máquinas síncronas. Los valores tabulados son valores promedio.

S = síncrona; T = transiente; St = subtransiente; G 2p = generador de dos polos; G4p = generador de cuatro polos;

Gps = generador de pds salientes; Mda = motor con devanado amortiguador; Gps<sub>0</sub> = generador de pds salientes sin devanado amortiguador; Cs = condensador síncrono .

#### 1.2.2.2. IMPEDANCIAS DE MAQUINAS ASINCRONAS

Motor de inducción.- Contribuye a la corriente de cortocircuito debido a la acción generadora producida por la inercia de la carga y el movimiento rotativo del motor una vez que la falla ocurre. Pero hay una gran diferencia entre la contribución a la corriente de cortocircuito del motor de inducción y la del motor síncrono, ya que el flujo de campo del motor de inducción es producido por la inducción desde el estator y no desde un devanado de campo DC. Debido a que este flujo cae rápidamente después de la falla la contribución del motor de inducción desaparece completamente después de uno o dos ciclos por lo que a estas máquinas se les asigna solamente un valor subtransiente de reactancia, cuyo valor es muy cercano a la reactancia de rotor blo-

queado. Al igual que en el motor síncrono su contribución a la falla depende de los HP, el voltaje nominal, la reactancia propia y la reactancia al punto de falla. Los valores típicos de reactancia para un motor de inducción trifásico se muestran en la tabla III.

Generador de inducción. - Debido a su factor de potencia en adelanto, puede usarse únicamente en paralelo con máquinas síncronas que suministren la corriente reactiva en atraso requerida por la carga y además neutralicen la corriente reactiva en adelanto suministrada por el generador de inducción. El voltaje terminal y la frecuencia del generador de inducción son fijados por su alternador en paralelo, mientras que la corriente en adelanto depende de las constantes propias de la máquina y su potencia de salida incrementa con el deslizamiento de la misma.

Nominal HP	Eficiencia plena carga (%)	F.P. a plena carga (%)	Deslizamiento plena carga (%)	Reactancia p.u. ( + )
Hasta 5	75-80	75-85	3.0-5.0	0.10-0.14
5-25	80-88	82-90	2.5-4.0	0.12-0.16
25-200	86-92	84-91	2.0-3.0	0.15-0.17
200-1000	91-93	85-92	1.5-2.5	0.15-0.17
Más 1000	93-94	88-93	~1.0	0.15-0.17

Tabla III. Reactancias de secuencia positiva de estado estable de un motor de inducción trifásico.

1.2.3. ANALISIS DE LAS CORRIENTES DE UN GENERADOR EN ESTADO TRANSIENTE - REACTANCIAS SINCRONA, TRANSIENTE Y SUBTRANSIENTE.

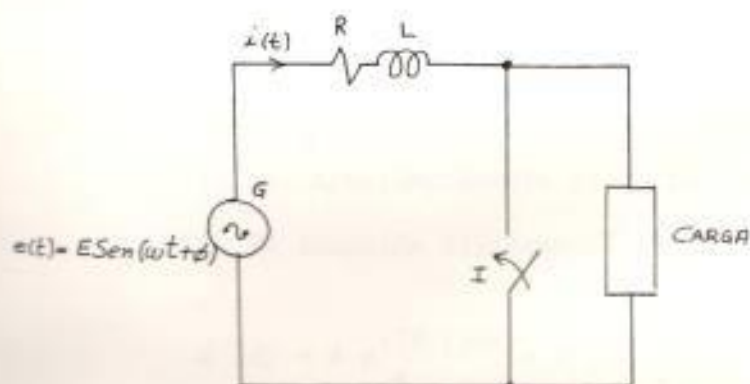


Fig 2. Cortocircuito producido a un sistema alimentado desde un generador.

Considere el circuito de la fig 2. que representa a un generador acoplado a un circuito RL, el mismo que puede ser una línea o el equivalente de un sistema de potencia

Al cerrar el interruptor, circula una corriente que viene determinada por la ecuación diferencial siguiente:

$$Ri + L (di/dt) = E \text{ Sen } (\omega t + \phi)$$

donde:

$E$  = pico de la onda sinusoidal

$\omega$  = frecuencia angular =  $2 \pi f$

$\phi$  = ángulo entre  $V = 0$  y el inicio de la falla.

Asumiendo que la corriente de la carga es igual a la corriente de prefalla y que esta es aproximadamente cero, la solución de la ecuación diferencial viene dada por:

$$i(t) = A e^{-\frac{R}{L}\omega t} + B \text{ Sen } (\omega t + \phi - \theta)$$

↑ Transitorio DC      ↑ Estacionario AC

donde:

$$A = E / (R^2 + X^2)^{1/2} \text{ Sen } (\theta - \phi)$$

$$B = E / (R^2 + X^2)^{1/2}$$

$$\theta = \tan^{-1} (X/R)$$

De aquí que la corriente DC será máxima cuando  $\theta = 0$  y tendrá el valor de la corriente de pico AC para un circuito inductivo puro. Es decir, en el peor de los casos y bajo condiciones ideales, la corriente máxima se tendrá en el primer medio ciclo y valdrá dos veces la corriente de pico con un valor rms total máximo de  $\sqrt{3}$  veces la corriente simétrica rms. (véase la fig 3 ).

En la práctica sin embargo, los generadores tienen una pequeña resistencia que determina que la componente DC se atenúe con el tiempo hasta que finalmente desaparece. Esta constante de amortiguamiento  $R/L$  también depende de la reactancia que presenta la máquina la misma que no es igual durante todo el período transiente, ya que por el teorema de flujo constante la corriente de campo en el inicio del disturbio producirá un mayor flujo de oposición, determinando una mayor reluctancia y por tanto una menor reactancia, que unos ciclos después de ocurrida la perturbación. Este comportamiento de la máquina determina que ella presente tres tipos de reactancia a saber:



- a. La reactancia subtransiente que se presenta en el período que lleva su nombre y determina la corriente inmediatamente después de la falla.
- b. La reactancia transiente que se presenta en el período que lleva su nombre el cual tiene una duración que va desde los 0.1 seg hasta los 2 seg.
- c. La reactancia síncrona o de estado estable, la misma que determina la corriente estacionaria, la cual no empieza a serlo sino varios segundos después de ocurrido el cortocircuito.

Un generador tiene entonces, una reactancia variable que incrementa en magnitud con el tiempo. Consecuentemente la corriente de cortocircuito disminuirá exponencialmente con el tiempo desde un alto valor inicial hasta un nivel de estado estacionario más bajo, tal como lo muestra la figura 4.

En esta figura se pueden distinguir dos tipos de corrientes: la una es la corriente simétrica, llamada así por su simetría res

pecto al eje de las abscisas y será a la que finalmente se llegue una vez transcurridos los periodos transiente y subtransiente; y la otra es la corriente asimétrica que en cada instante viene determinada por la suma de los componentes transiente o DC y estacionaria o AC.

Para establecer el tipo de interruptor requerido en un determinado sistema, debemos conocer tanto la componente simétrica como la DC, para calcular la máxima corriente que dicho interruptor deba soportar. Sin embargo, el cálculo de la componente DC es algo difícil, por lo que se establecen ciertos factores que incluyen el efecto de ella.

Es así como se pueden obtener las denominadas corrientes momentánea total ( $I_{mt}$ ) y corriente de interrupción total ( $I_{it}$ ) definidas como:

$$I_{mt} = M I_{ms}$$

$$I_{it} = K I_{is}$$

donde:

$I_{ms}''$  = Corriente momentánea simétrica determinada en base al sistema en condiciones subtransientes.

$I_{it}'$  = Corriente de interrupción simétrica, determinada en base a condiciones subtransientes para los generadores, transientes para los motores síncronos y despreciando la contribución de los motores de inducción, en el período transiente.

M = Multiplicador que oscila entre 1.5 y 1.6 para medios y altos voltajes; y 1.25 para bajos voltajes. (menores a 600 V): Véase la tabla IV.

K = Factor que depende de los ciclos de interrupción nominales del disyuntor. En la tabla IV se puede apreciar que mientras más rápido es el interruptor mayor es el valor de K, ya que la corriente a interrumpir es mayor.

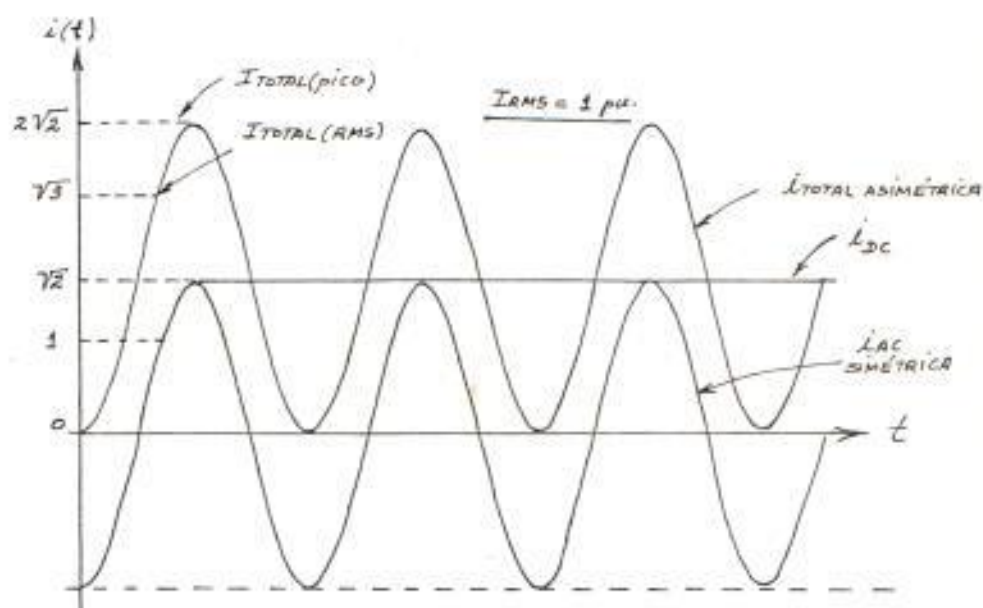


Fig 3. Corriente de cortocircuito para un circuito inductivo puro, con  $\phi = 0$ .

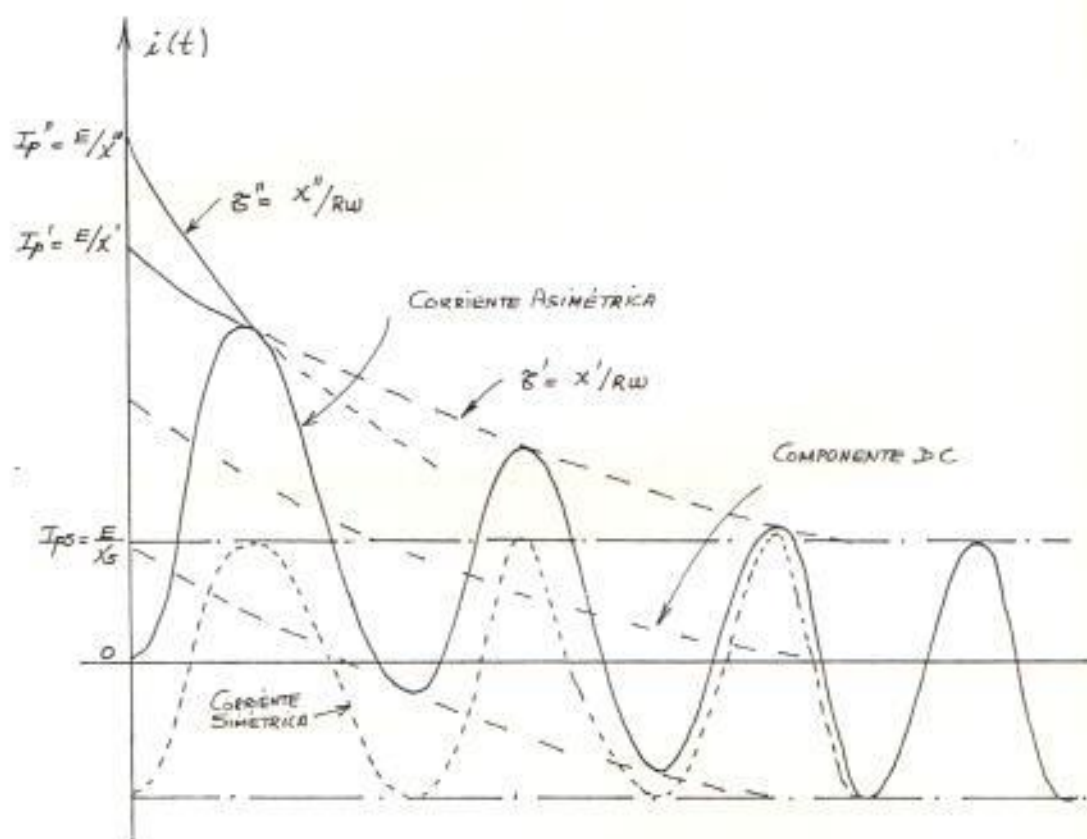


Fig 4. Comportamiento de la corriente de cortocircuito de un generador.

Número de ciclos	K	Voltaje del sistema (KV)	M
8	1.0	hasta 0.6	1.25
5	1.1	0.6-5.0	1.50
3	1.2	más de 5	1.60
2	1.4		

Tabla IV. Valor de las constantes M y K para la determinación de las corrientes momentánea y de interrupción.

#### 1.2.4. IMPEDANCIAS DE SECUENCIA DE TRANSFORMADORES.

Los transformadores tienen reactancias de secuencia positiva y negativa iguales. La reac tancia de secuencia cero tiene también el mis mo valor, excepto para cierto tipo de trans formadores trifásicos. Las corrientes de secuencia cero no podrán fluir cuando el neutro del transformador no esté aterrizado, en cuyo caso la impedancia de secuencia cero se la considera infinita. En la mayoría de los ca sos en donde las corrientes de secuencia ce ro pueden fluir, la reactancia de secuencia cero ( $X_0$ ) tiene el mismo valor que las reac tancias de secuencia positiva y negativa. En los transformadores Y - Delta, las corrien-

tes de secuencia cero fluirán por el neutro de la  $Y$ , si esta está aterrizada pero no habría corrientes de secuencia cero fluyendo del lado de la delta, pudiendo hacerlo eso sí dentro de la misma.

En una conexión  $Y-Y$  de un transformador, fluirán corrientes de secuencia cero siempre que los devanados en  $Y$  estén aterrizados. En cálculos de cortocircuitos, la resistencia de los devanados del transformador, así como la contribución de la corriente de excitación se les considera despreciables. Los circuitos equivalentes de secuencia cero correspondientes a transformadores, autotransformadores, etc. se detallan en la sección 1.3.

#### 1.2.5. IMPEDANCIAS DE SECUENCIA DE LINEAS DE TRANSMISION.

Cuando se trata de líneas de transmisión y cables, las reactancias de secuencia positiva y negativa se las considera iguales, mientras que las reactancias de secuencia cero es diferente ya que depende de la naturaleza de la trayectoria de retorno, la misma

que puede ser a través de la tierra o en base a uno o dos hilos de guardia, instalados en las torres para la protección de la línea contra descargas atmosféricas. La reactancia de secuencia cero es usualmente mayor, y en ausencia de información detallada se pueden usar los siguientes rangos según la tabla V.

Tipo de sistema	Nº de hilos de guardia	Relación $Z_0/Z_1$
Línea trifásica 1 sólo circuito	-	3.5
	1	2.0
Línea trifásica 2 circuitos	-	5.5
	1	5.0
Cables subterráneos	-	1-5

Tabla V. Valores típicos de relación  $Z_0/Z_1$  para líneas y cables.

### 1.3. CIRCUITOS DE SECUENCIA

En un sistema de potencia simétrico balanceado, las corrientes de secuencia positiva producen únicamente caídas de voltaje de secuencia positiva; las corrientes de secuencia negativa, únicamente caídas de voltajes de

secuencia negativa; y las corrientes de secuencia cero, caídas de voltaje de secuencia cero, es decir no existe inter-acción entre las diferentes secuencias de fase.

Los diagramas de secuencias se desarrollan para propósito de cálculo ya que las tres componentes de secuencia son independientes haciéndose necesarios los tres diagramas de red de fase a neutro del sistema de potencia. La red de secuencia positiva muestra al voltaje del generador, su reactancia, las reactancias de transformadores, líneas etc. La red de secuencia negativa es usualmente una réplica de la red de secuencia positiva, excepto que:

- Los voltajes de secuencia negativa de los generadores no existen ya que en la práctica ellos no los generan.
- Las reactancias de secuencia negativa de las máquinas síncronas puede ocasionalmente diferir de la reactancia de secuencia positiva.

La red de secuencia cero es usualmente similar a la red de secuencia negativa, excepto que:



- Hay que realizar consideraciones especiales de la conexión de los transformadores. La conexión Y-Y aterrizada en ambos lados permite la circulación de las corrientes de secuencia cero tanto en el primario como en el secundario del transformador. La conexión Y aterrizada-delta permite circulación de corrientes de secuencia cero en el lado de la Y y en el interior de la delta pero no en el lado externo de ella. Otros tipos de conexiones se muestran en la figura 5.
- Los resistores y reactores conectados en los neutros de los generadores y/O transformadores se simulan como tres veces su valor normal. Cuando una impedancia se conecta en la delta, su impedancia se ve disminuida en tres veces. Consúltese la fig 5.

Es práctica normal que en estudios de cortocircuitos se desprecie la resistencia, lo cual genera resultados suficientemente exactos y conservativos en medios y altos voltajes. Sin embargo, para muchos cálculos en baja tensión, la resistencia no debería ignorarse ya que produciría resultados sobre-conser

vativos. Lo que conduciría a una sobre dimensión de los equipos de protección, con el consecuente e in necesario aumento en el costo de la instalación.

De excepcional importancia en los problemas de corto circuito, son los teoremas de Thevenin y de superpo sición los cuales simplifican las redes complejas en el punto de falla y determinan los parámetros eléctricos en un punto del sistema debidos a una o va-  
rias fuentes respectivamente.

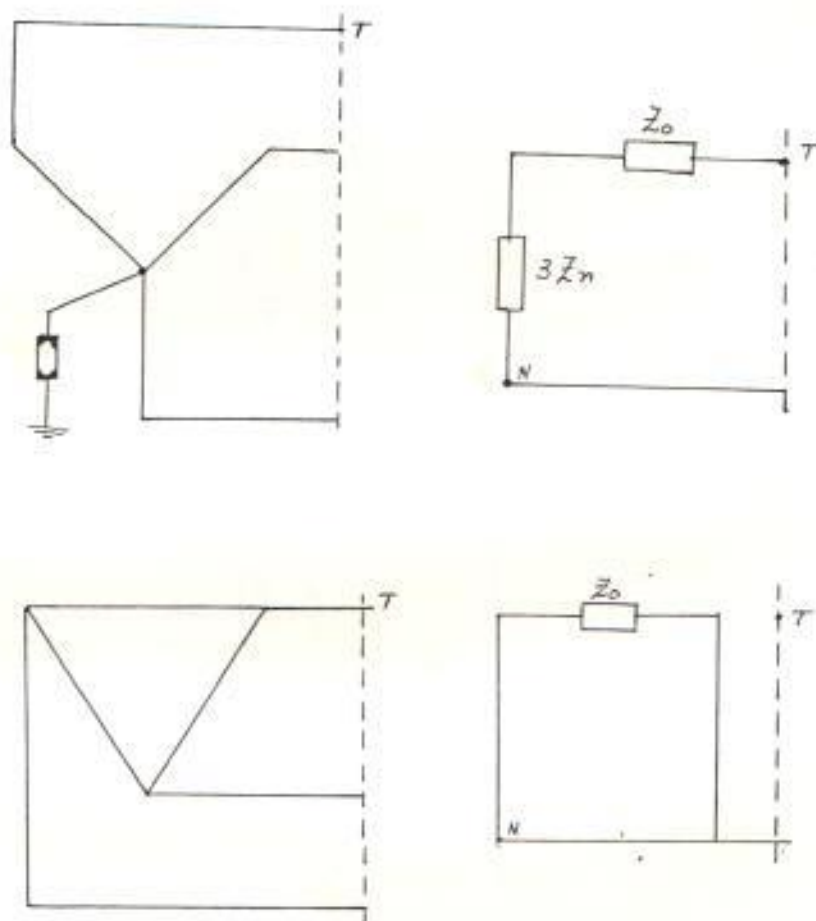


Fig 5a. Circuitos equivalentes de secuencia cero para diversos tipos de conexión de un generador.

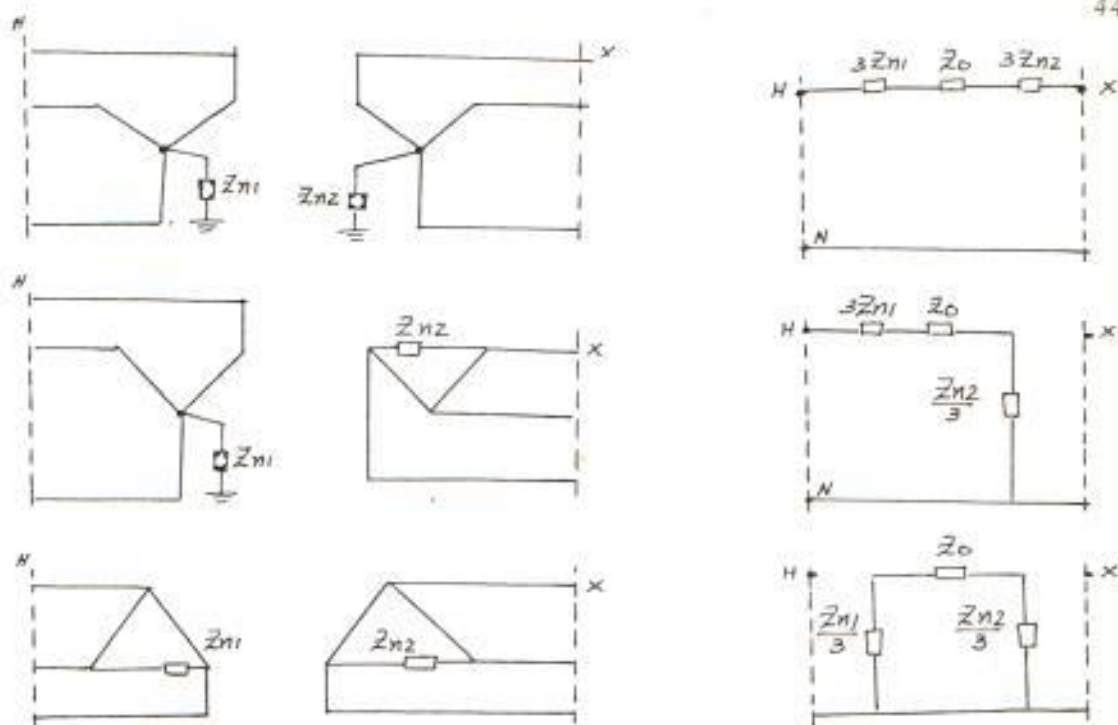


Fig 5b. Circuitos equivalentes de secuencia cero para bancos de transformadores monofásicos de dos devanados.

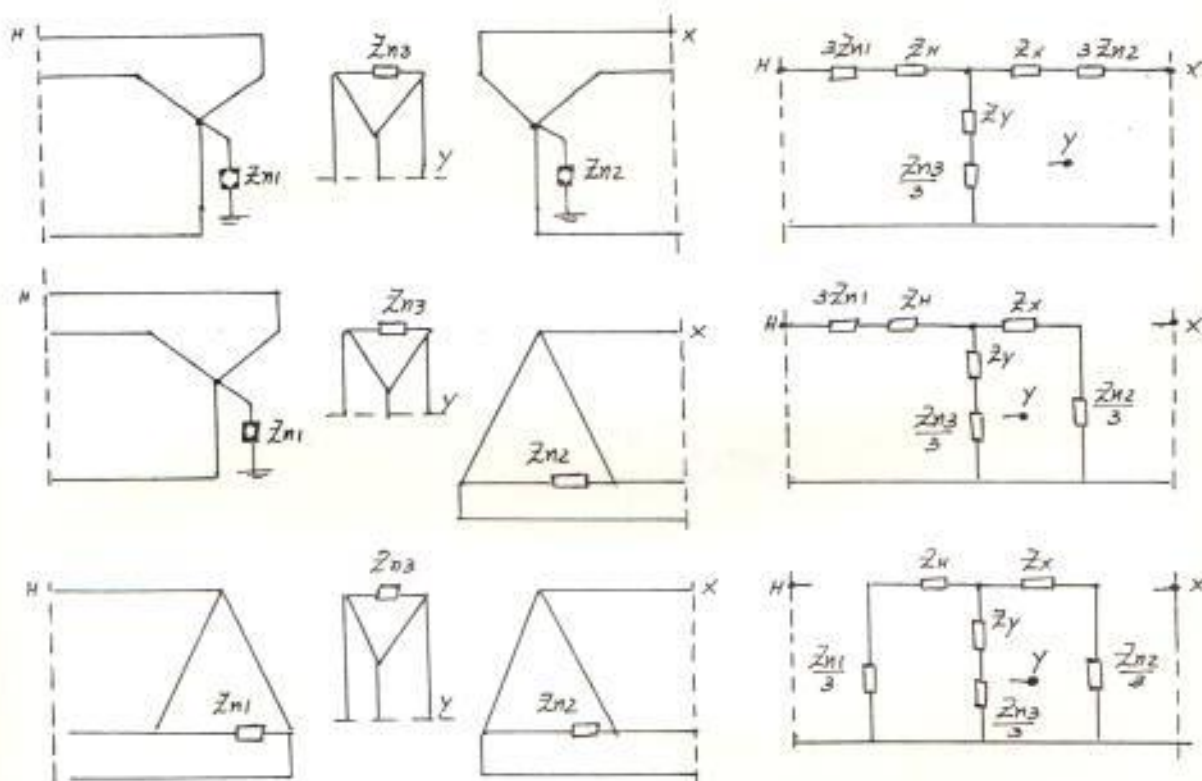
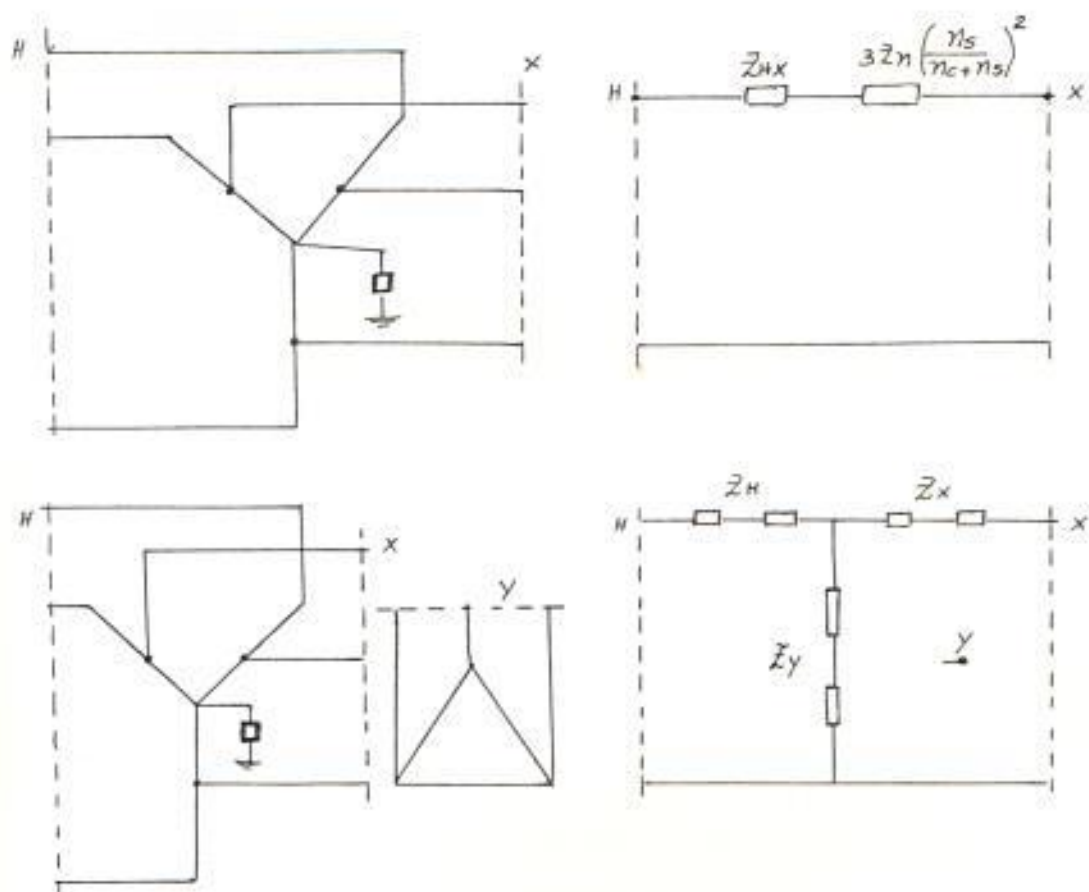


Fig 5c. Circuitos equivalentes de secuencia cero para bancos de transformadores monofásicos de tres devanados.



$$Z_H = 1/2 (Z_{HX} + Z_{HY} - Z_{XY}) + 3 Z_n \frac{n_\delta n_c}{(n_\delta + n_c)^2}$$

$$Z_X = 1/2 (Z_{HX} + Z_{XY} - Z_{HY}) + 3 Z_n \frac{n_\delta}{n_\delta + n_c}$$

$$Z_Y = 1/2 (Z_{HY} + Z_{XY} - Z_{HX}) + 3 Z_n \frac{n_e}{n_\delta + n_c}$$

Fig 5d. Circuitos equivalentes de secuencia cero para bancos de autotransformadores monofásicos de dos y tres devanados.

NOTA: Las impedancias adicionales en el circuito de secuencia cero están definidas en términos de las cantidades base del circuito de bajo voltaje.

## 1.4 TEORÍA DE REDES DE DOS PUERTAS

Una red de dos puertas es la que tiene dos pares de terminales como lo muestra la figura 6.

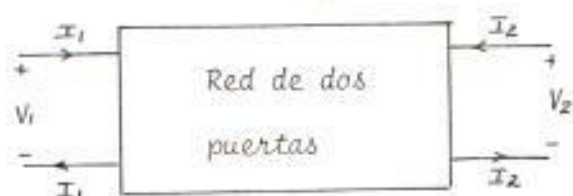


Fig 6. Una red de dos puertas

Las redes pasivas de dos puertas están especificadas en términos de sus parámetros definidos en las tablas VIa y VIb.

Designación	Ecuación
Z (parámetro de impedancia)	$\begin{vmatrix} V_1 \\ V_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_1 \\ I_2 \end{vmatrix}$
Y (parámetro de admitancia)	$\begin{vmatrix} I_1 \\ I_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_1 \\ V_2 \end{vmatrix}$
H (parámetros híbridos)	$\begin{vmatrix} V_1 \\ I_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_1 \\ V_2 \end{vmatrix}$

Tabla VIa. Parámetros de redes de dos puertas.

Designación	Ecuación
G (parámetros híbridos inversos)	$\begin{vmatrix} I_1 \\ V_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_1 \\ I_2 \end{vmatrix}$
A (parámetros de transmisión)	$\begin{vmatrix} V_1 \\ I_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_2 \\ I_2 \end{vmatrix}$
$\alpha$ (parámetros inversos de transmisión)	$\begin{vmatrix} V_2 \\ I_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_1 \\ I_1 \end{vmatrix}$

Tabla VIb. Parámetros de redes de dos puertas.

NOTA: Los parámetros de transmisión usualmente se los llama parámetros ABCD.

#### 1.4.1. PARAMETROS DE REDES DE DOS PUERTAS Y SUS RELACIONES.

Cuando una red es recíproca, lo cual acontece con sistemas de potencia a los que se les realiza estudios de cortocircuito, la matriz de parámetros equivalentes en forma de red de dos puertas es simétrica.

Todas las descripciones de una red de dos puertas dadas en las tablas VIa y VIb. muestran la relación en-

tre pares de variables. Por tanto, las ecuaciones pueden re-arreglarse para determinar relaciones únicas entre los varios juegos de parámetros de puertas. Estas relaciones se dan en la tabla VII en donde se nota que algunos juegos de parámetros pueden no existir para una red dada ya que si por ejemplo  $Z_{22}$  es cero, la matriz  $H$  no existe porque sus elementos son infinitos.

#### 1.4.2. REDES DE DOS PUERTAS CON FUENTES INTERNAS.

Consideraremos ahora, el efecto de las fuentes internas sobre los parámetros de puertas. Las fuentes internas pueden ser de dos tipos, dependientes o independientes. Las primeras desarrollan una corriente o voltaje de salida que depende de algún otro voltaje o corriente de la red. Por ejemplo, el voltaje en eje directo de una máquina síncrona, depende de la corriente del eje en cuadratura.

Las fuentes controladas afectan la descripción oficial de una red de dos puertas alterando uno o más de los elementos. Si inicialmente la matriz es simétrica

Z	Y	H	G	A	Q
	Y22/DY -Y12/DY	DH/H22 H12/H22	1/G11 -G12/G11	A11/A21 -DA/A21	-Q22/Q21 1/Q21
Z	-Y21/DY Y11/DY	-H21/H22 1/H22	G21/G11 DG/G11	1/A21 -A22/A21	-DQ/Q21 011/Q21
	Y11 Y12	1/H11 -H12/H11	DG/G22 G12/G22	A22/A12 -DA/A12	-011/012 1/012
Y	Y21 Y22	H21/H22 DH/H11	-G21/G22 1/G22	1/A12 -A11/A12	-DQ/Q12 022/012
	1/Y11 -Y12/Y11	H11 H12	G22/DG -G12/DG	A12/A22 DA/A22	-012/011 1/011
H	Y21/Y11 DY/Y11	H21 H22	-G21/DG G11/DG	1/A22 -A21/A22	DQ/Q11 021/011
	DY/Y22 Y12/Y22	H22/DH -H12/DH	G11 G12	A21/A11 DA/A11	-Q21/Q22 1/Q22
G	-Y21/Y22 1/Y22	-H21/DH H11/DH	G21 G22	1/A11 -A12/A11	DQ/Q22 012/Q22
	-Y22/Y21 1/Y21	-DH/H21 H11/H21	1/G21 -G22/G21	A11 A12	Q22/DQ -012/DQ
A	DY/Y21 Y11/Y21	H22/H21 1/H21	G11/G21 -DG/G21	A21 A22	-Q21/DQ 011/DQ
	-Y11/Y12 1/Y12	1/H12 -H11/H12	-DG/G12 G22/G12	A22/DQ -A12/DA	011 012
Q	-DY/Y12 Y22/Y12	H22/H12 -DH/H11	-G11/G12 1/G12	-A21/DA A11/DA	021 022



como ocurre con la matriz  $Z$  o  $Y$  de una red pasiva las fuentes controladas causarán que la matriz se convierta en asimétrica.

De otro lado, una fuente independiente dentro de una red mantendrá su salida en un valor específico, independientemente de la conexión externa a la red de dos puertas. En realidad si la red de dos puertas está completamente aislada la fuente independiente interna causará voltajes a circuito abierto o corrientes de cortocircuitos medibles que aparecen en la red de dos puertas. De modo que para el caso de los parámetros  $Z$ :

$$\begin{vmatrix} V_1 \\ V_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_1 \\ I_2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} V_{z1} \\ V_{z2} \end{vmatrix} \quad (1.2)$$

En donde se interpreta la ecuación como sigue:

- a) Todos los voltajes y corrientes de puertas se definen como antes.
- b) Cuando  $I_1$  es igual  $I_2 = 0$ , los voltajes de puert $\tilde{a}$ s son:

$$\begin{vmatrix} V_1 \\ V_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} V_{z1} \\ V_{z2} \end{vmatrix}$$

y estos voltajes a circuito abierto se deben a la (s) fuentes (s) internas.

- c) Determinamos la matriz Z de (1.2) cortocircuitando los voltajes independientes internos y dejando en circuito abierto las fuentes independientes de corrientes, con lo que (1.2) se reduce a:

$$\begin{vmatrix} V_1 \\ V_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_1 \\ I_2 \end{vmatrix}$$

En igual forma podemos establecer sistemas de ecuaciones similares al (1.2) para redes que están descritas por cualquier otro juego de parámetros de dos puertos.

De manera general, debemos adicionar a cada ecuación un término debido a las fuentes, de la misma dimensión de la ecuación. Matemáticamente:

$$U = PW + U_s$$

donde:

$U, W$  son vectores que contienen los vol  
tajes y/o corrientes de puerta.

$P$  es la matriz  $2 \times 2$  de parámetros de  
dos puertas.

$U_s$ , es el término de fuentes independien  
te con la misma dimensión de  $U$ .

De modo que  $U_s$  se encuentra cuando  $W = 0$  y  $P$   
cuando  $U_s$  es cero. De otro lado, notamos que  
es imposible hacer  $W = 0$  para calcular  $U_s$  cu  
ando usamos los parámetros de transmisión ya  
que esto involucra hacer  $I_2$  y  $V_2$  iguales a  
cero simultáneamente. Por tanto, la des -  
cripción de una red de dos puertas incluyen -  
do el efecto de una fuente independiente es -  
tá limitada a los parámetros  $Z, Y, H$  y  $G$ . Es  
to se ilustra en la tabla VIII.

Los parámetros de dos puertas están relacio -  
nados de un modo definido según la tabla VII,  
por tanto no debe sorprendernos que los tér -  
minos de la tabla VIII también estén relacio -  
nados. Si escribimos las ecuaciones de pará

Prueba para obtener el término de la fuente.

Ecuación

Designación





Z	$\begin{vmatrix} V_1 \\ V_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_1 \\ I_2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} V_{21} \\ V_{22} \end{vmatrix}$	
Y	$\begin{vmatrix} I_1 \\ I_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_1 \\ V_2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} I_{g1} \\ I_{g2} \end{vmatrix}$	
H	$\begin{vmatrix} V_1 \\ I_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_1 \\ V_2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} V_{h1} \\ I_{h2} \end{vmatrix}$	
G	$\begin{vmatrix} I_1 \\ V_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_1 \\ I_2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} I_{g1} \\ I_{g2} \end{vmatrix}$	

Tabla VIII. Ecuaciones de redes de dos puertos con fuentes independientes.

metros  $Z$  y  $V$  en forma matricial, tenemos:

$$V = ZI + V_z$$

$$I = YV + I_y$$

Además, si escribimos:

$$M = HN + M_h$$

$$N = GM + N_g$$

con:

$$M = \begin{bmatrix} V_1 \\ I_2 \end{bmatrix}; \quad M_h = \begin{bmatrix} V_{h1} \\ I_{h2} \end{bmatrix}; \quad N = \begin{bmatrix} I_1 \\ V_2 \end{bmatrix}; \quad N_g = \begin{bmatrix} I_{g1} \\ V_{g2} \end{bmatrix}$$

entonces la manipulación algebraica revela las relaciones entre los parámetros de fuente. Por ejemplo, podemos escribir:

$$V_z = U_z = -Y^{-1}I_y = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{h_{12}}{h_{22}} \\ 0 & \frac{1}{h_{22}} \end{bmatrix} M_h = \begin{bmatrix} \frac{-1}{g_{11}} & 0 \\ \frac{-g_{21}}{g_{11}} & 1 \end{bmatrix} N_g$$

donde  $U$  es la matriz unidad. Realizando las posibles combinaciones establecemos las relaciones de la tabla IX.

Tabla IX

Relaciones entre parámetros de fuente.

	Vz	ly	Mh	Ng
Vz1	1 0	-Y22/DY Y12/DY	1 -H12/H11	-1/G11 0
Vz2	0 1	Y21/DY -Y11/DY	0 -1/H22	-G21/G11 1
ly1	-Z22/DZ Z12/DZ	1 0	-1/H11 0	1 -G12/G22
ly2	Z21/DZ -Z11/DZ	0 1	-H21/H11 1	0 -1/G22
Vh1	1 -Z12/Z22	-1/Y11 0	1 0	-G22/DG G12/DG
Vh2	0 -1/Z22	-Y21/Y11 1	0 1	G21/DG -G11/DG
lg1	-1/Z21 0	1 -Y12/Y22	-H22/DH H12/DH	1 0
Vg2	-Z21/Z11 1	0 -1/Y22	H21/DH -H11/DH	0 1

### 1.4.3. INTERCONEXIÓN DE REDES DE DOS PUERTAS

Una de las razones principales de la descripción de redes de dos puertas tan cuidadosamente elaboradas es simplificar el problema de la interconexión de redes de dos puertas para formar sistemas más grandes y complicados. Hay varias formas de interconectar las redes de dos puertas, entre ellas tenemos:

#### Conexión serie

Considere un grupo de  $n$  redes de dos puertas, que se conectan en serie como en la figura 7 en donde definimos:

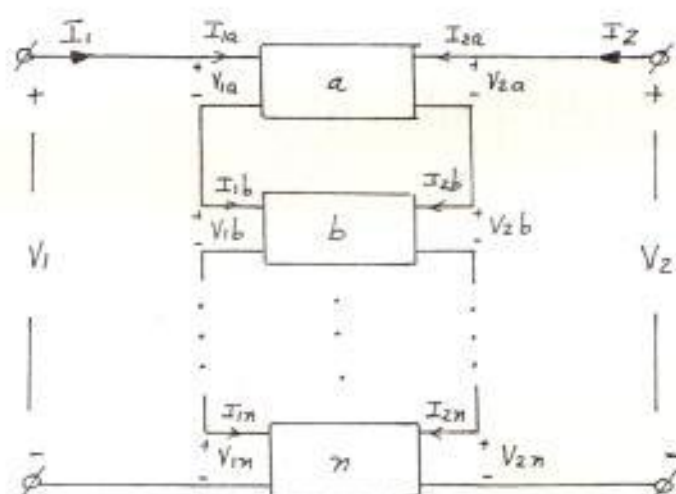


Fig 7. Conexión serie de  $n$  redes de dos puertas

$$V_k = \begin{vmatrix} V_{1k} \\ V_{2k} \end{vmatrix} ; \quad I_k = \begin{vmatrix} I_{1k} \\ I_{2k} \end{vmatrix}$$

$$k = a, b, \dots, n$$

$$Z_k = \begin{vmatrix} z_{11k} & z_{12k} \\ z_{21k} & z_{22k} \end{vmatrix}$$

En donde para cada red de dos puertas tenemos:

$$V_k = Z_k I_k ; \quad k = a, b, \dots, n$$

Buscando una descripción del grupo interconectado, tenemos:

$$\begin{vmatrix} V_1 \\ V_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_1 \\ I_2 \end{vmatrix}$$

Describiendo las relaciones entre estas cantidades y ya que las redes están en serie:

$$V = V_a + V_b + \dots + V_n$$

y como:

$$I = I_a = I_b = \dots = I_n$$



entonces:

$$V = (Z_a + Z_b + \dots + Z_n)I$$

por lo que:

$$Z = Z_a + Z_b + \dots + Z_n$$

Esto significa que podemos fácilmente encontrar la descripción de parámetros  $Z$  de cualquier número de redes de dos puertas conectadas en serie, encontrando primero los parámetros  $Z$  de las redes individuales y adici<sup>o</sup>nandolas posteriormente. Debe entenderse sin embargo, que la descripción de puerta debe preservarse en la interconexión.

#### Conexión paralelo

Considere un grupo de  $n$  redes de dos puertas conectadas en paralelo tal como lo muestra la figura 8.

Definiendo los vectores corriente y voltaje como antes y usando la descripción de parámetros  $Y$ , tenemos:

$$y_k = \begin{vmatrix} y_{11k} & y_{12k} \\ y_{21k} & y_{22k} \end{vmatrix}; k = a, b, \dots, n$$

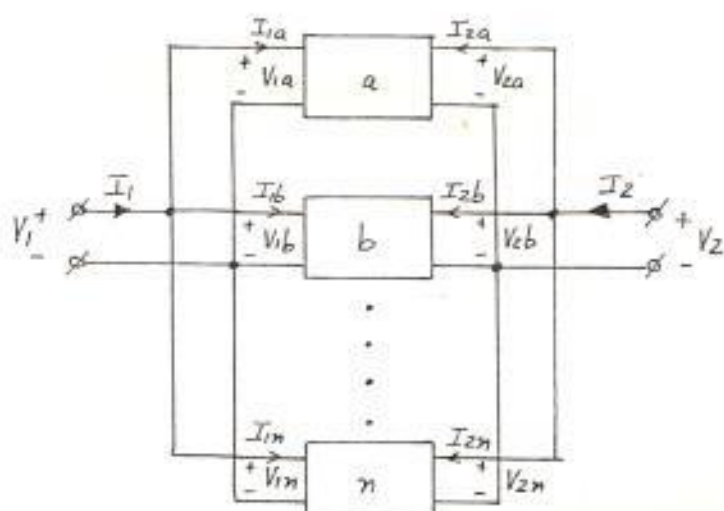


Fig 8. Conexión paralelo de redes de dos puertas

De modo que para cualquier red de dos puertas:  $I_k = Y_k V_k$  ;  $k = a, b, \dots, n$

Con lo que:

$$I = YV$$

Donde:

$$Y = \begin{vmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{vmatrix}$$

Describiendo la relación entre  $V$  e  $I$  para la conexión paralelo, tenemos:

$$I = I_a + I_b + \dots + I_n$$

$$V = V_a = V_b = \dots = V_n$$

Con lo cual  $I = (Y_a + Y_b + \dots + Y_n) V$

Resultando:

$$Y = Y_a + Y_b + \dots + Y_n$$

La descripción de redes de dos puertas para esta conexión puede encontrarse fácilmente adicionando los parámetros  $Y$  de las redes individuales requiriendo que la descripción de dos puertas se conserve en la interconexión.

Note, que no es conveniente encontrar la descripción de parámetros  $Z$  para la conexión paralelo. Es preferible primero convertir los parámetros  $Z$  de las redes de dos puertas individuales a parámetros  $Y$  para posteriormente adicionarlos.

#### Conexión híbrida

Considere un grupo de  $n$  redes de dos puertas conectadas en serie en una puerta y en paralelo en la otra, tal como lo muestra la figura 9.

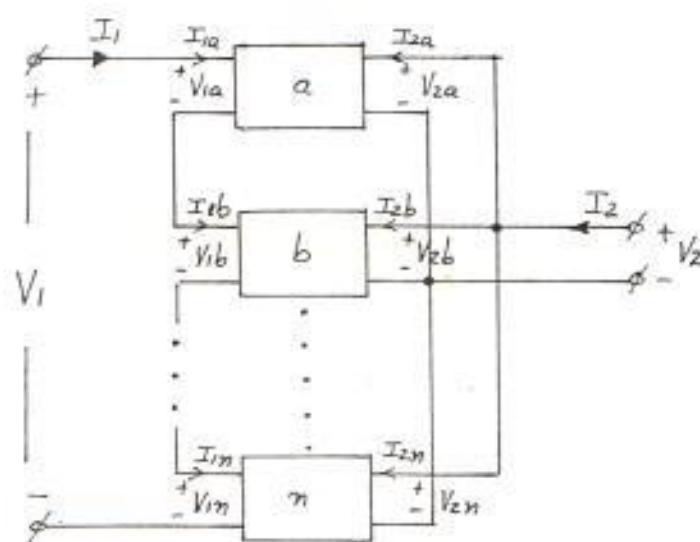


Fig 9. Conexión híbrida (serie-paralelo) para redes de dos puertas.

Definiendo los vectores voltaje-corriente híbridos de puerta como:

$$M_k = \begin{bmatrix} V_{1k} \\ I_{2k} \end{bmatrix}; \quad N_k = \begin{bmatrix} I_{1k} \\ V_{2k} \end{bmatrix}; \quad k=a, b, \dots, n$$

y la matriz híbrida como:

$$H_k = \begin{bmatrix} h_{11k} & h_{12k} \\ h_{21k} & h_{22k} \end{bmatrix}; \quad k = a, b, \dots, n$$

tenemos que de la tabla  $V_{1a}$ :

$$M_k = H_k N_k; \quad k = a, b, \dots, n$$

describiendo al sistema interconectado según:

$$M = HN$$

y con  $M$  y  $N$  definidos de acuerdo a las can-  
tidades externas:

$$M = \begin{bmatrix} V_1 \\ I_2 \end{bmatrix} ; \quad N = \begin{bmatrix} I_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

donde:

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix}$$

es la matriz de parámetros híbridos para la interconexión.

De la figura 9 observamos que:

$$M = M_a + M_b + \dots + M_n$$

$$N = N_a = N_b = \dots = N_n$$

Combinando esto, con los resultados anterio-  
res:

$$M = (H_a + H_b + \dots + H_n) N$$

Con lo cual:  $H = H_a + H_b + \dots + H_n$

requiriendo que la descripción de puerta se preserve.

Nótese que un resultado similar podría obte-  
nerse invirtiendo la conexión serie-parale-  
lo de la figura 9. para formar una conexión

paralelo-serie. En tal caso los parámetros  $G$  serán encontrados y adicionados y una descripción correspondiente a N-GM será encontrada. Esta descripción es redundante ya que nosotros estamos en libertad de numerar las puertas según nuestra conveniencia, de modo que la conexión híbrida de la figura 9 será suficiente para cualquier requerimiento.

#### Conexión en cascada

Finalmente revisemos la conexión en cascada de redes de dos puertas, tal como lo muestra la figura 10.

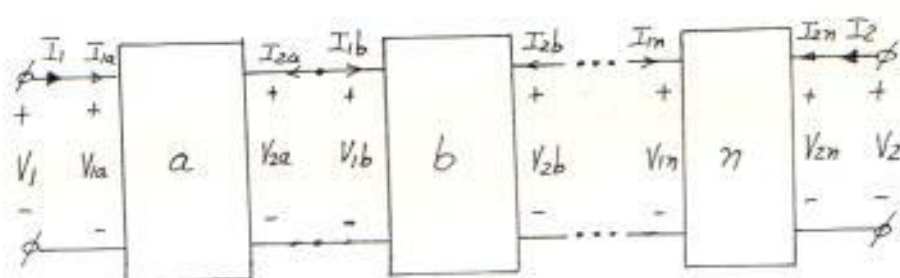


Figura 10. Conexión en cascada de redes de dos puertas

En donde definimos:

$$\begin{vmatrix} V_{1k} \\ I_{1k} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_{11k} & A_{12k} \\ A_{21k} & A_{22k} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_{2k} \\ I_{2k} \end{vmatrix} ;$$

$$k = a, b, \dots, n$$

Buscando una descripción:

$$\begin{vmatrix} V_1 \\ I_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_2 \\ I_2 \end{vmatrix}$$

que establezca la conexión, y si observamos las restricciones de la interconexión, tenemos:

$$\begin{vmatrix} V_1 \\ I_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} V_{1a} \\ I_{1a} \end{vmatrix} ; \begin{vmatrix} V_{2a} \\ -I_{2a} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} V_{1b} \\ I_{1b} \end{vmatrix} ; \dots ; \begin{vmatrix} V_{2n} \\ I_{2n} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} V_2 \\ I_2 \end{vmatrix}$$

Combinando con las relaciones anteriores:

$$\begin{vmatrix} V_1 \\ I_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_{11a} & -A_{12a} \\ A_{21a} & -A_{22a} \end{vmatrix} \dots \begin{vmatrix} A_{11n} & -A_{12n} \\ A_{21n} & -A_{22n} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_2 \\ -I_2 \end{vmatrix}$$

De aquí que la matriz A compuesta, es el producto de las matrices A individuales, con la segunda columna de cada una cambiada de signo. Este signo negativo surge

porque las corrientes entre redes de dos puertas fluyen en direcciones opuestas.

Usando la descripción de parámetros ABCD con  $I_1$  entrando e  $I_2$  saliendo de la red de dos puertas la conexión en cascada es simplemente una matriz producto sin cambios de signo.





## CAPITULO II

### DIAGRAMA DE FALLA TRIFASICA GENERALIZADO Y FALLAS DE SIMPLE CONTINGENCIA CON SIMETRIA EN TERMINOS DE LA FASE A

#### 2.1. DIAGRAMA DE FALLA TRIFASICA GENERALIZADO

Considere el gráfico de la figura 11 en donde se aprecia un desbalance generalizado con simetría en términos de la fase A.

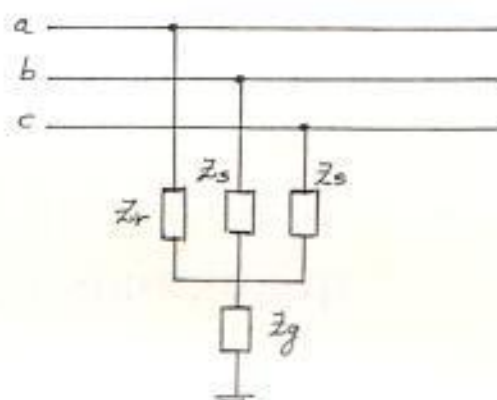


Fig 11. Diagrama para una condición de falla trifásica generalizada.

El sistema queda representado por la ecuación matricial:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (Z_r + Z_g) & Z_g & Z_g \\ Z_g & (Z_s + Z_g) & Z_g \\ Z_g & Z_g & (Z_s + Z_g) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

De aquí que  $Z_{012}$  será:

$$Z_{012} = 1/3 \begin{vmatrix} (Z_n + 2Z_\delta + 9Z_g) & (Z_n - Z_\delta) & (Z_n - Z_\delta) \\ (Z_n - Z_\delta) & (Z_n + 2Z_\delta) & (Z_n - Z_\delta) \\ (Z_n - Z_\delta) & (Z_n - Z_\delta) & (Z_n + 2Z_\delta) \end{vmatrix} \quad (2.1.)$$

con lo que:

$$V_{012} = Z_{012} I_{012}$$

es decir:

$$V_a^0 = 1/3 ((Z_n + 2Z_\delta + 9Z_g) I_0 + (Z_n - Z_\delta) (I_1 + I_2)) \quad (2.2)$$

$$V_a^+ = 1/3 ((Z_n - Z_\delta) (I_0 + I_2) + (Z_n + 2Z_\delta) I_1) \quad (2.3)$$

$$V_a^- = 1/3 ((Z_n - Z_\delta) (I_0 + I_1) + (Z_n + 2Z_\delta) I_2) \quad (2.4)$$

Restando (2.3) de (2.2):

$$V_a^+ - I_1 Z_\delta = V_a^0 - (Z_\delta + 3Z_g) I_0 \quad (2.5)$$

y restando (2.4) de (2.2):

$$V_a^- - I_2 Z_\delta = V_a^0 - (Z_\delta + 3Z_g) I_0 \quad (2.6)$$

Además, de (2.2) tenemos que:

$$V_a^0 = 1/3 ((Z_n - Z_\delta) (I_0 + I_1 + I_2) + (3Z_\delta + 9Z_g) I_0) \quad (2.7)$$

Por lo que de (2.5), (2.6) y (2.7):

$$V_1 - I_1 Z_s = V_2 - I_2 Z_s = V_0 - I_0 (Z_s + 3Z_g) = \frac{1}{3} (Z_r - Z_s) (I_0 + I_1 + I_2) \quad (2.8)$$

La ecuación 2.8 determina el diagrama de falla trifásico generalizada para el cálculo de corriente de cortocircuito, el mismo que se muestra en la figura 12.

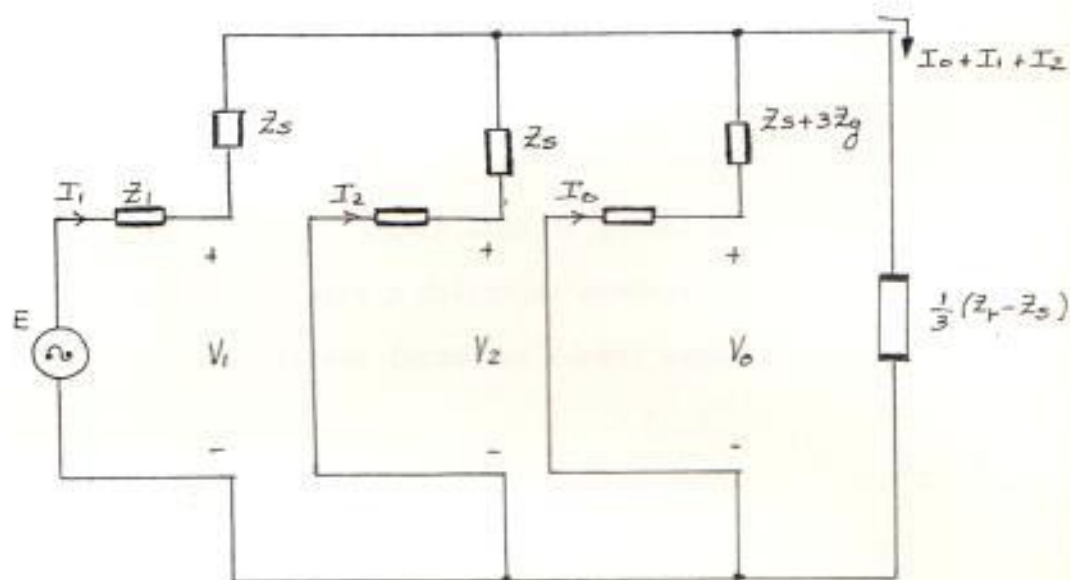


Fig 12. Modelo matemático para el cálculo de corrientes de cortocircuito en condiciones de falla trifásica generalizada.

Este tipo de fallas puede presentar cuatro casos a saber:

### 2.1.1. DIAGRAMA DE FALLA TRIFASICA A TIERRA DESBALANCEADA GENERALIZADA.

Constituye el caso más general, y corresponde a la condición de falla trifásica a través de una resistencia de arco, en un sistema desbalanceado con simetría en términos de la fase A. Véase la figura 12.

Si la impedancia de arco fuera despreciable, simplemente cortocircuitese  $3Z_g$  en el circuito de secuencia cero del modelo representado en la figura 12. Este tipo de fallas entre otras causas se debe a descargas atmosféricas, ramas de árboles que tocan las líneas simultáneamente, etc.

La impedancia de falla puede oscilar entre 5 y 40 ohms dependiendo de factores como la condición ambiental, nivel de voltaje, etc y aproximadamente viene dada por:

$$R = \begin{cases} 44KV/I_f(A) & ; \quad KV < 110 \\ 22 KV/I_f(A) & ; \quad KV > 110 \end{cases}$$

(ohms)

Existen fórmulas como las de C. Warrington que para calcular la resistencia de arco, conside-

ran la longitud del mismo y la velocidad del viento, así como el instante de tiempo en que se calcula, ya que la resistencia de arco varía con el tiempo desde el inicio de la falla. Sin embargo, los valores de resistencia de fallas típicos son: en generadores 0 ohms; sobre línea con hilos de guardia 15 ohms; sobre líneas sin hilo de guardia 50 ohms.

### 2.1.2. DIAGRAMA DE FALLA TRIFÁSICA DESBALANCEADA GENERALIZADA.

Constituye un caso especial del anterior, ya que la impedancia de falla a tierra es infinita. Analizando la figura 12 nos damos cuenta que la corriente de secuencia cero se anula, con lo que el diagrama correspondiente queda como en la figura 13.

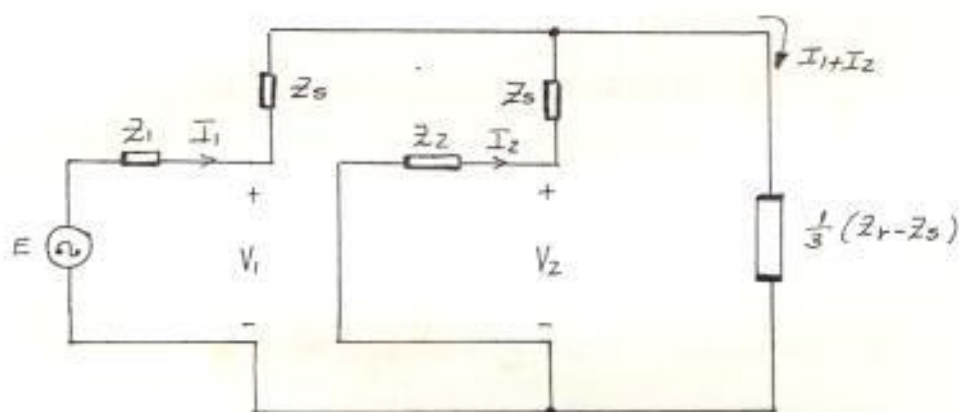


Fig 13. Modelo matemático para el cálculo de corrientes de cortocircuito en condiciones tri-fásicas desbalanceadas con impedancia de falla infinita.

### 2.1.3. DIAGRAMA DE FALLA TRIFASICA A TIERRA BALANCEADA GENERALIZADA.

Este caso corresponde a la condición de falla trifásica a través de una resistencia de arco, en un sistema balanceado. Del análisis de las figuras 11 y 12 deducimos que los circuitos de secuencia cero y negativa quedan cortocircuitados debido a que el término  $(1/3)(Z_r - Z_s)$  se hace cero. El modelo matemático correspondiente se muestra en la figura 14.

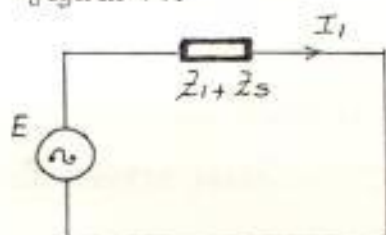


Fig 14. Diagrama para el cálculo de corrientes de cortocircuito en condiciones trifásicas balanceadas.

### 2.1.4. DIAGRAMA DE FALLA TRIFASICA BALANCEADA GENERALIZADO.

Constituye un caso especial del anterior en el que la impedancia a tierra es infinita. La diferencia entre su modelo matemático y el del anterior está en que en este caso el circuito de secuencia cero está abierto, pe-

ro esto no afecta la magnitud o fase de los parámetros eléctricos durante el cálculo ya que el término  $(1/3)(Z_r - Z_s)$  en ambos casos anula los circuitos de secuencia cero y negativa, por lo que el modelo matemático para este caso es el mismo que el de la figura 14.

## 2.2. FALLAS DE SIMPLE CONTINGENCIA CON SIMETRÍA EN TÉRMINOS DE LA FASE A.

Es conveniente distinguir entre desbalances paralelos y desbalances serie. La primera es un desbalance entre fases o entre fase y neutro, mientras que la segunda es un desbalance de las impedancias de la línea y no involucra el neutro, la tierra o cualquier interconexión entre fases.

### 2.2.1. FALLAS TIPO PARALELO

#### Falla de una fase a tierra

Considere el gráfico de la figura 15 en donde:

$$I_a = I_f$$

$$I_b = I_c = 0$$

$$V_a = I_b Z_b = I_a Z_b$$

Con estas condiciones en  $I_{012} = A^{-1} I_{abc}$  :

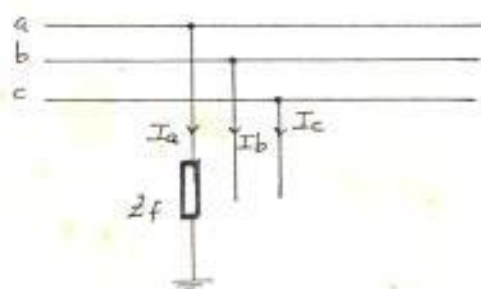


Fig 15. Diagrama para una condición de falla de una fase a tierra.

$$\begin{vmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{vmatrix} = 1/3 \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}$$

$$\text{Con lo cual: } I_0 = I_1 = I_2 = I_f / 3 \quad (2.9)$$

$$V_a = V_0 + V_1 + V_2 = 3I_0 Z_f \quad (2.10)$$

el diagrama que representa matemáticamente a este tipo de falla, es el que cumpliendo las condiciones (2.9) y (2.10) impuestas por la falla, se muestra en la figura 16.

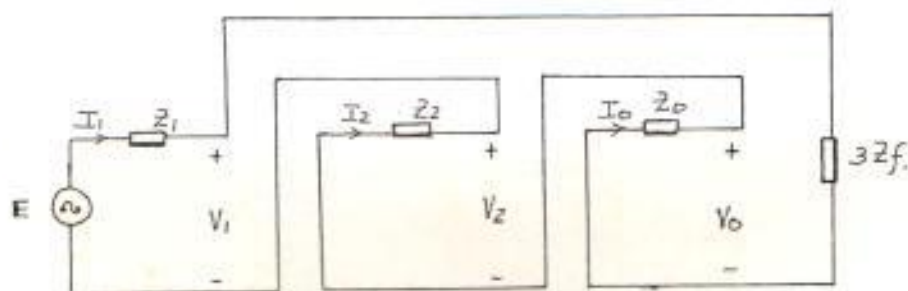


Fig 16. Modelo matemático que representa una falla de una fase a tierra.



Falla de dos fases a tierra

La figura 17 representa este tipo de falla, la cual es un caso especial de la trifásica desbalanceada, haciendo  $Z_n$  infinito.

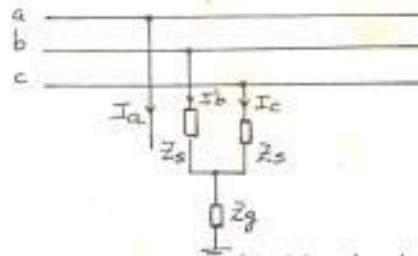


Fig 17. Diagrama para una condición de falla bifásica a tierra.

El análisis de la figura 12 determina que el modelo matemático para este tipo de falla es como el de la figura 18.

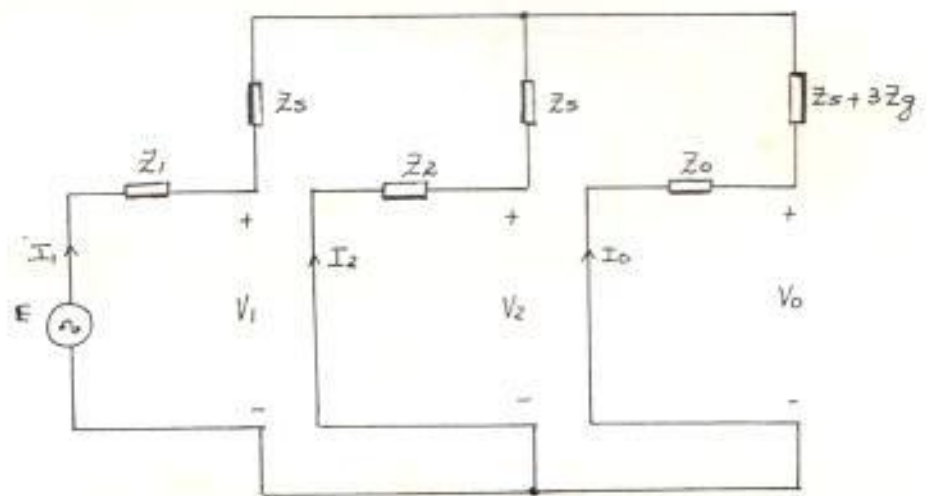


Fig 18. Modelo matemático para representar una falla bifásica a tierra.

### Fallas de fase a fase

Según la figura 19 las condiciones impuestas por esta falla son:

$$I_a = 0$$

$$I_b = -I_c$$

$$I_f = I_b$$

$$V_b = V_c + I_f Z_f$$

así mismo, este es un caso especial de la falla trifásica general desbalanceada haciendo  $Z_h$  infinita,  $Z_g$  infinita y  $2Z_d = Z_f$

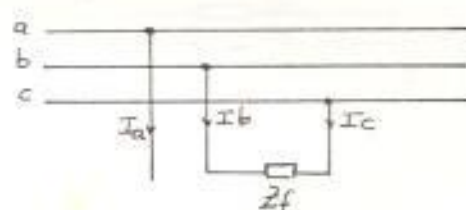


Fig 19. Diagrama para una condición de falla bifásica.

Un análisis de la figura 12 junto a las consideraciones anteriores determina que el modelo matemático para esta falla es como la figura 20.

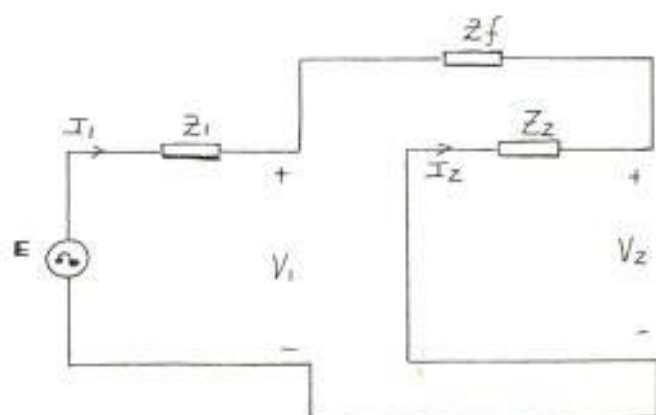


Fig 20. Modelo matemático para representar una falla bifásica.

### 2.2.2. FALLAS TIPO SERIE

#### Falla de una fase abierta

Considere la figura 21 que muestra un sistema desbalanceado con simetría en términos de la fase A.

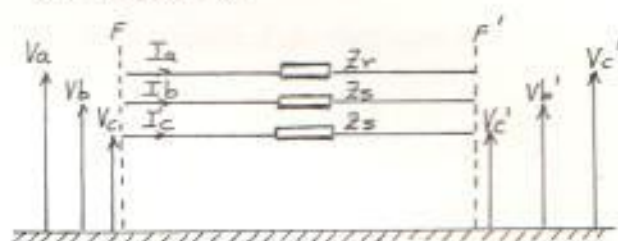


Fig 21. Condición de desbalance longitudinal entre F y F'

La ecuación matricial que representa al sistema es :

$$\begin{bmatrix} V_{aa'} \\ V_{bb'} \\ V_{cc'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_r & 0 & 0 \\ 0 & Z_s & 0 \\ 0 & 0 & Z_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

con lo que  $Z_{012}$  es

$$Z_{012} = 1/3 \begin{vmatrix} (Z_n + 2Z_\delta) & (Z_n - Z_\delta) & (Z_n - Z_\delta) \\ (Z_n - Z_\delta) & (Z_n + 2Z_\delta) & (Z_n - Z_\delta) \\ (Z_n - Z_\delta) & (Z_n - Z_\delta) & (Z_n + 2Z_\delta) \end{vmatrix} \quad (2.11)$$

por tanto la ecuación  $V_{012} = Z_{012} I_{012}$  viene dada por:

$$\begin{vmatrix} 0' \\ V_{aa} \\ V_{aa}^{+'} \\ V_{aa}^{-'} \end{vmatrix} = Z_{012} \begin{vmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{vmatrix}$$

El sistema (2.11) es igual al sistema (2.1) haciendo  $Z_g = 0$ . Por lo que si procedemos como en la sección 2.1 obtenemos:

$$\begin{aligned} V_{aa}^{0'} - Z_\delta I_0 &= V_{aa}^{+'} - Z_\delta I_1 = V_{aa}^{-'} - Z_\delta I_2 = \\ &= 1/3 (Z_n - Z_\delta) (I_0 + I_1 + I_2) \end{aligned} \quad (2.12)$$

La ecuación (2.12) representa esta falla, cuyo modelo se muestra en la figura 22. La falla de una fase abierta se consigue haciendo  $Z_n$  infinita.

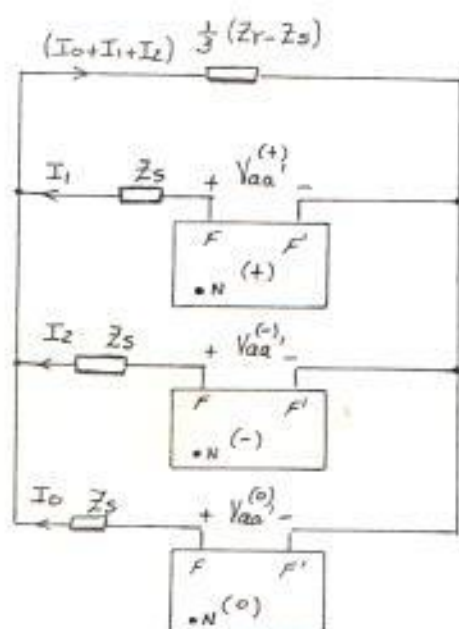


Fig 22. Modelo matemático que representa un desbalance serie en la fase a.

### Falla de dos fases abiertas

Considerando la figura 23 y estableciendo que:

$$I_b = I_c = 0 \quad ; \quad V_{aa} = I_a Z_a$$

tenemos:

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

de donde:

$$I_0 = I_1 = I_2 = (1/3)I_a \quad (2.13)$$

además:

$$V_{aa}' = V_{aa}^{0'} + V_{aa}^{+'} + V_{aa}^{-'} = I_a Z_a'$$

$$= I_{a0} Z_a' + I_{a1} Z_a' + I_{a2} Z_a'$$

es decir:

$$(V_{aa}^{0'} - I_{a0} Z_a') + (V_{aa}^{+'} - I_{a1} Z_a') +$$

$$+ (V_{aa}^{-'} - I_{a2} Z_a') = 0 \quad (2.14)$$

Con [2.13] y [2.14] tenemos que la red que satisface estas condiciones es la mostrada en la figura 24.

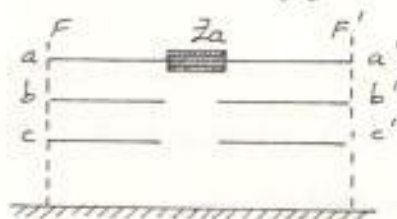


Figura 23. Condición de falla de dos fases abiertas.

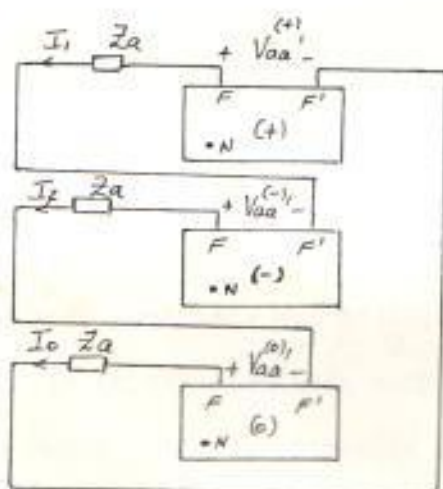


Figura 24. Modelo que representa una falla de dos fases abiertas.

### 2.3. ALGUNAS CONSIDERACIONES ACERCA DE LOS DIVERSOS TIPOS DE FALLAS

Muchas son las causas por las que ocurre una determinada falla: entre ellas podemos citar: Los vientos que ponen en contacto los conductores, roces de las ramas de los árboles con las líneas, nieve o hielo que causa ruptura de los conductores, animales que producen cortocircuito, descargas atmosféricas, movimientos de tierras, cargas no previstas, fallas de diseño o planificación, fallas del sistema, deterioro del aislamiento de los equipos, mala aplicación de ellos, mal diseño, instalación o fabricación de los equipos, etc.

Las descargas atmosféricas constituyen alrededor del 95% de las fallas, siendo permanentes entre el 20 y el 30%; y transitorias entre el 70 y el 80%. Para calcular la máxima corriente de falla se asume que la resistencia de arco es despreciable, lo cual se acostumbra cuando se realizan estudios de cortocircuito en sistemas de alta tensión; sin embargo, en redes de distribución suele considerarse la resistencia de arco, ya que esta disminuye la corriente trifásica.

Esto permite escoger sistemas de protección más baratos y eficientes con el consecuente ahorro económico al adquirir equipos de valores nominales más bajos, Además, para el mismo nivel de voltaje la resistencia de arco que presenta la falla trifásica es mayor de la que presenta la de línea a línea, y esta a su vez mayor que la resistencia de arco que presenta -

### *La falla monofásica.*

En un sistema de potencia es necesario determinar tanto las corrientes mínimas como máximas de falla, ya que la primera establece la sensibilidad de los equipos de protección, mientras que la segunda fija los valores nominales de ellos. Las corrientes de línea a línea durante una falla son aproximadamente el 87% de la corriente de falla trifásica, mientras que la corriente de falla línea a neutro está en un rango - que oscila entre un bajo porcentaje y el 125% de la corriente de falla trifásica.

De otro lado, cuando ocurre una falla monofásica a tierra en un sistema aislado, el voltaje de la fase fallada disminuye, pero el de las fases no falladas aumenta, siendo la corriente de falla alrededor del 80% de la corriente de falla en un sistema no aislado.



## CAPITULO III

### TECNICAS DE CAMBIOS DE SIMETRIAS

#### 3.1. METODO DE ATABEKOV

De los capítulos precedentes notamos que los cálculos de componentes simétricas, de corrientes y voltajes se realizan siempre en términos de la fase A, sin embargo, puede ocurrir por ejemplo una falla monofásica a tierra en la fase B, lo que sugiere que debemos readecuar las letras de cada fase para realizar el cálculo en términos de la fase B, es decir cambiar (a,b,c) por (c,a,b).

En desbalances simples, esta es la mejor y más fácil forma de proceder, sin embargo ante la ocurrencia de una falla simultánea por ejemplo, nos vemos abocados a desarrollar técnicas que hagan posible la resolución del problema, ya que dichas fallas pueden no ser simultáneamente simétricas en términos de una misma fase.

Una de estas técnicas se basa en la descripción y construcción de un diagrama de fallas generalizado, la misma que se debe a Ata bekov, y se constituirá en uno de los pilares básicos para el desarrollo de los próximos capítulos de esta tesis; existiendo sin embargo, otras técnicas como las de Kron, Clarke, Smith,

Oberdorfer, etc.

El método de Atabekov para fallas simultáneas se sustenta en la teoría de redes multipuertas. Las contingencias pueden ser combinaciones de fallas desbalanceadas o no, con ocurrencia en cualquier fase y en cualquier lugar del sistema. Las tres redes de secuencias se manipulan por separado haciendo uso de las matrices puerta-falla para interconectar las redes de secuencia. El tamaño de la matriz puerta-falla depende del número de fallas simultáneas.

En la teoría de redes multipuertas cada punto de falla se define como una puerta en la que la corriente que sale de un terminal es igual a la que entra por el otro. Esta condición se garantiza al conectar un transformador ideal a la puerta antes de hacer cualquier conexión externa.

Después de formar las tres redes de secuencia del sistema de potencia fallado, producimos su interconexión haciendo uso de las condiciones de frontera de la falla en particular.

### 3.2. DIAGRAMA DE FALLA GENERALIZADO PARA EL DISTURBIO TRIFÁSICO CON SIMETRÍA EN TÉRMINOS DE CUALQUIER FASE.

En la sección 2.1 se encontró un modelo matemático para la falla trifásica generalizada con simetría en términos de la fase A y se demostró que la ecuación que describe tal

desbalance es:

$$\begin{aligned}
 V_0 - I_0(Z_s + 3Z_g) &= V_1 - I_1 Z_s = V_2 - I_2 Z_s = \\
 &= 1/3(Z_r - Z_s)(I_0 + I_1 + I_2) \quad (3.1)
 \end{aligned}$$

Realizando el mismo procedimiento de esa sección en base a los diagramas de fallas en términos de las otras dos fases mostrados en la figura 25 a y 25 b tenemos:

- Simetría en términos de la fase B

Según la figura 25a la matriz que describe tal desbalance es:

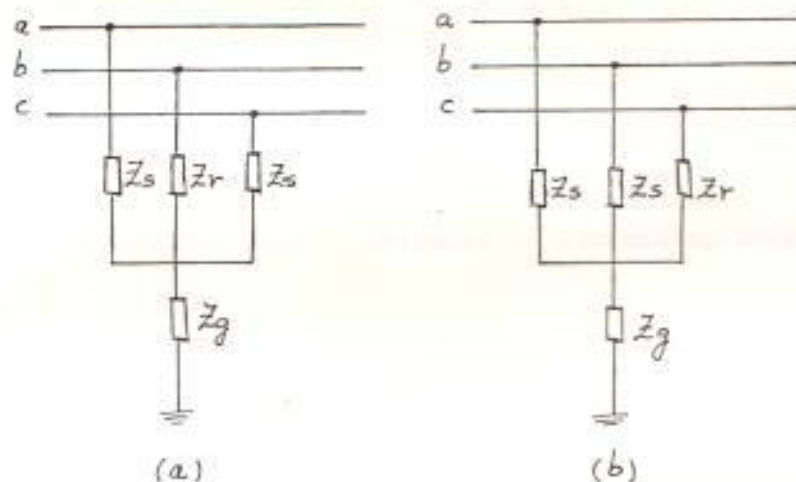


Fig 25. Condición de falla trifásica desbalanceada generalizada.

(a) con simetría en término de la fase B.

(b) con simetría en términos de la fase C.

$$Z_{abc} = \begin{vmatrix} (Z_s + Z_g) Z_g & & Z_g \\ Z_g & (Z_n + Z_g) & \\ Z_g & Z_g & (Z_s + Z_g) \end{vmatrix}$$

de donde:

$$Z_{012} = 1/3 \begin{vmatrix} (Z_n + 2Z_s + 9Z_g) & a^2(Z_n - Z_s) & a(Z_n - Z_s) \\ a(Z_n - Z_s) & (Z_n + 2Z_s) & a^2(Z_n - Z_s) \\ a^2(Z_n - Z_s) & a(Z_n - Z_s) & (Z_n + 2Z_s) \end{vmatrix}$$

y así:

$$V_a^0 = 1/3 [(Z_n + 2Z_s + 9Z_g) I_0 + a^2(Z_n - Z_s) I_1 + a(Z_n - Z_s) I_2]$$

$$V_a^+ = 1/3 [a(Z_n - Z_s) I_0 + (Z_n + 2Z_s) I_1 + a^2(Z_n - Z_s) I_2]$$

$$V_a^- = 1/3 [a^2(Z_n - Z_s) I_0 + a(Z_n - Z_s) I_1 + (Z_n + 2Z_s) I_2]$$

Restando  $a^2$  veces la segunda ecuación de la primera; restando  $a$  veces la tercera ecuación de la primera; y, manipulando la primera ecuación entonces el desbalance trifásico viene descrito por:

$$V_a^0 - (3Z_g + Z_s) I_0 = a^2 (V_a^+ - I_1 Z_s) = a (V_a^- - I_2 Z_s) =$$

$$= 1/3 (Z_n - Z_s) (I_0 + a^2 I_1 + a I_2)$$

(3.2)

- Simetría en términos de la fase C

Según la figura 25b la matriz que describe tal desbalance es:

$$Z_{abc} = \begin{vmatrix} (Z_s + Z_g) & Z_g & Z_g \\ Z_g & (Z_s + Z_g) & Z_g \\ Z_g & Z_g & (Z_r + Z_g) \end{vmatrix}$$

de donde:

$$Z_{012} = 1/3 \begin{vmatrix} (Z_r + 2Z_s + 9Z_g) & a(Z_r - Z_s) & a^2(Z_r - Z_s) \\ a^2(Z_r - Z_s) & (Z_r + 2Z_s) & a(Z_r - Z_s) \\ a(Z_r - Z_s) & a^2(Z_r - Z_s) & (Z_r + 2Z_s) \end{vmatrix}$$

y así:

$$V_a^0 = 1/3 \{ (Z_r + 2Z_s + 9Z_g) I_0 + a(Z_r - Z_s) I_1 + a^2(Z_r - Z_s) I_2 \}$$

$$V_a^+ = 1/3 \{ a^2(Z_r - Z_s) I_0 + (Z_r + 2Z_s) I_1 + a(Z_r - Z_s) I_2 \}$$

$$V_a^- = 1/3 \{ a(Z_r - Z_s) I_0 + a^2(Z_r - Z_s) I_1 + (Z_r + 2Z_s) I_2 \}$$

Restando a veces la segunda ecuación de la primera; restando  $a^2$  veces la tercera ecuación de la primera; y, según la primera ecuación el desbalance queda descrito por:

$$\begin{aligned}
 V_a^0 - (Z_s + 3Z_g)I_0 &= a(V_a^+ - I_1 Z_s) = a^2(V_a^- - I_2 Z_s) = \\
 &= 1/3(Z_k - Z_s)(I_0 + aI_1 + a^2I_2)
 \end{aligned}
 \tag{3.3}$$

Las ecuaciones (3.1), (3.2) y (3.3) determinan un diagrama de fallas trifásicas generalizado desbalanceado con simetría en términos de cualquier fase. Para ello debemos hacer uso de desfases, los cuales rotan los valores de voltaje y corriente un ángulo de 0, 120 o 240°, sin alterar su magnitud, y se caracterizan por:

$$V_2 = nV_1$$

$$I_2 = nI_1$$

donde:

$$n = e^{j\theta}$$

El modelo matemático se muestra en la figura 26.

Por tanto, los cuatro casos especiales considerados en el capítulo anterior para una falla trifásica, pero ahora con simetría en término de cualquier fase son:

- Falla trifásica a tierra desbalanceada generalizada

Las ecuaciones que describen este disturbio son la (3.1), (3.2) y (3.3) con su diagrama correspondien-

te en la figura 26.

- Falla trifásica desbalanceada generalizada

Constituye un caso especial del anterior en el que el valor de la impedancia  $Z_g$  es infinito, por tanto el circuito de secuencia cero permanece abierto en la figura 26.

- Falla trifásica a tierra balanceada generalizada

Las condiciones son:  $Z_a = Z_b = Z_c = Z_g$ , quedando corto-circuitados todos los circuitos de secuencia y por ser el de secuencia positiva el único que tiene fuentes de voltaje este se convertirá en el diagrama representativo.

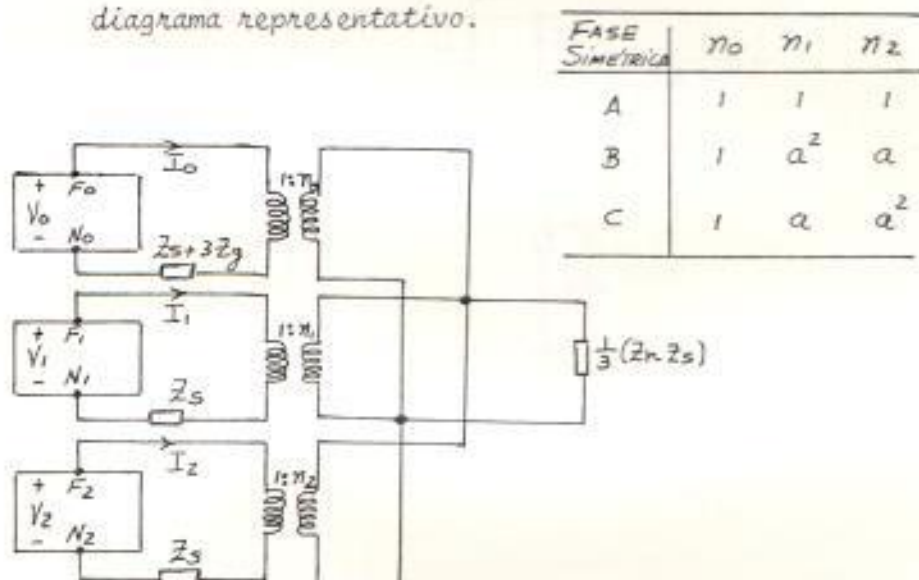


Fig 26. Modelo matemático para una falla trifásica desbalanceada generalizada con simetría en términos de cualquier fase.

- Falla trifásica balanceada generalizada

Las condiciones son las mismas que en el caso anterior con  $Z_g$  infinita. El modelo matemático es el mismo que antes por las razones expuestas en la sección 2.1.4

3.3. DIAGRAMA DE FALLAS GENERALIZADO PARA DISTURBIOS TIPO PARALELO

La condición de una falla transversal general en un punto de un sistema se muestra en la figura 27, donde dependiendo de los valores de las impedancias  $Z_a$ ,  $Z_b$ ,  $Z_c$  y  $Z_g$  (incluyendo cero e infinito) se establecerá el tipo de falla requerido con la simetría deseada en términos de cualquier fase.

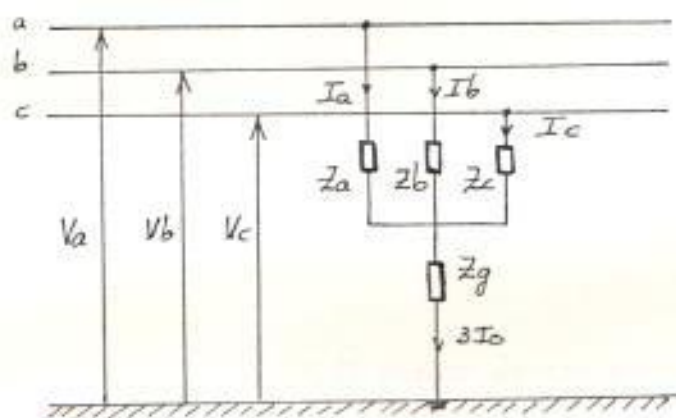


Fig 27. Condición de falla transversal en F.

Según la figura 27:



$$\begin{vmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} (Z_a + Z_g) & Z_g & Z_g \\ Z_g & (Z_b + Z_g) & Z_g \\ Z_g & Z_g & (Z_c + Z_g) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{vmatrix} \quad (3.4)$$

Sumando las filas de (3.4):

$$V_0 - 3I_0 Z_g = 1/3(Z_a I_a) + 1/3(Z_b I_b) + 1/3(Z_c I_c) \quad (3.5)$$

Sumando la fila uno más  $a$  veces la fila más  $a^2$  veces la fila tres en (3.4):

$$V_1 = 1/3(Z_a I_a) + a/3(Z_b I_b) + a^2/3(Z_c I_c) \quad (3.6)$$

Sumando la fila uno más  $a^2$  veces la dos más  $a$  veces la tres en (3.4):

$$V_2 = 1/3(Z_a I_a) + a^2/3(Z_b I_b) + a/3(Z_c I_c) \quad (3.7)$$

Las ecuaciones (3.5) al (3.7) pueden usarse para construir un diagrama que define completamente la condición de la figura 27 tal como lo muestra la figura 28., el cual es el diagrama de fallas generalizado para fallas tipo paralelo; donde los puntos  $Q$ ,  $Q_0$ ,  $Q_1$  y  $Q_2$  están al mismo potencial debiendo estar conectados entre sí.

En base al diagrama de la figura 28 podemos determinar los modelos matemáticos correspondientes a las fallas monofásicas y de dos fases a tierra (la falla línea a línea es un caso especial de esta última) en forma general y con simetría en términos de cualquier fase.

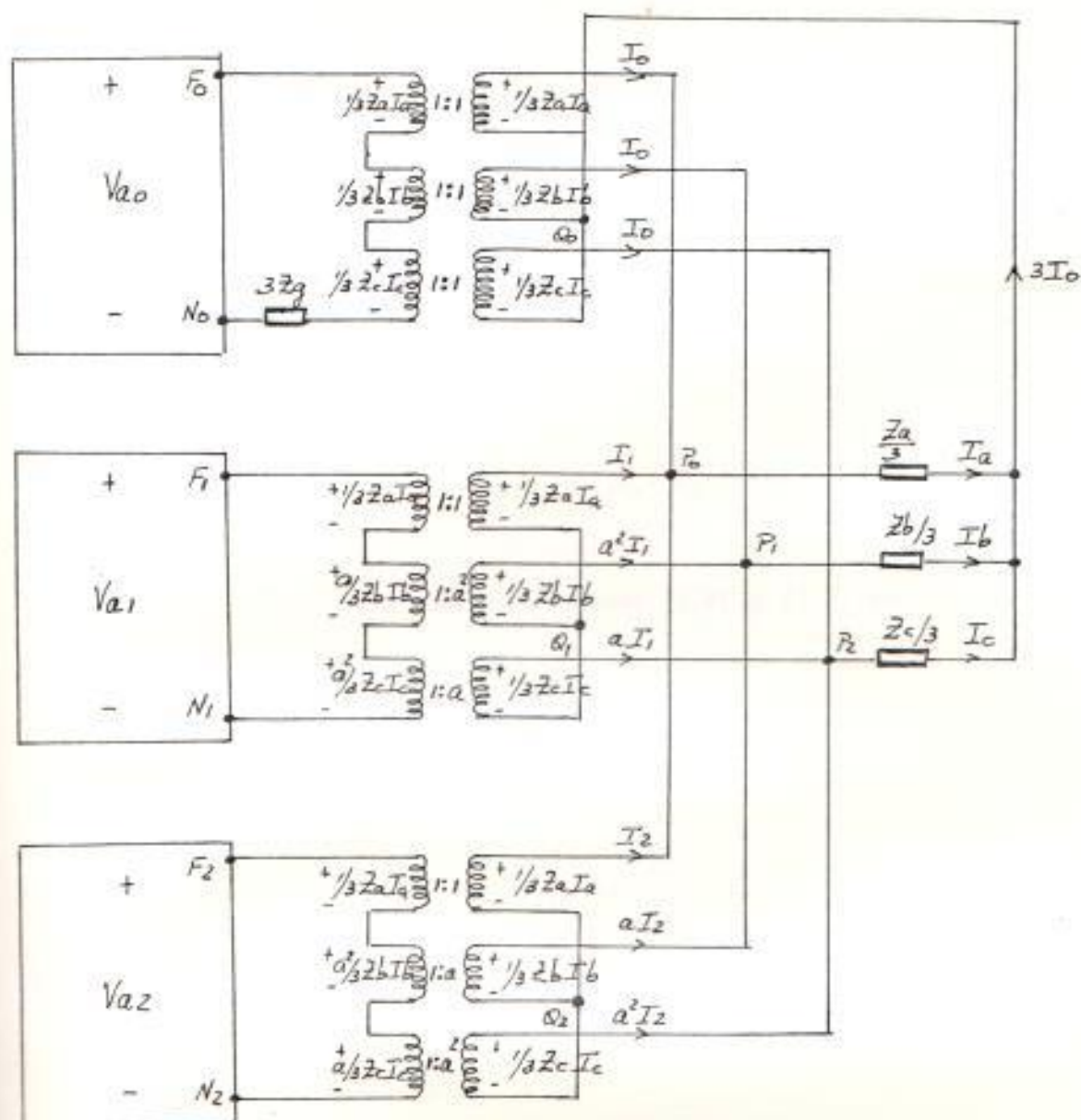


Fig 28. Diagrama de falla generalizado para fallas tipo paralelo.

## 3.3.1. FALLA MONOFÁSICA A TIERRA GENERALIZADA

- Simetría en términos de la fase A

En este caso:  $Z_a=0$ ;  $Z_b=Z_c=\text{infinito}$ ;

$I_b=I_c=0$ , es decir:

$$I_0+a^2I_1+aI_2=I_0+aI_1+a^2I_2=0$$

de donde:

$$I_0=I_1=I_2 \quad (3.8)$$

Además:

$$V_a=3I_0Z_g=V_0+V_1+V_2 \quad (3.9)$$

Las condiciones (3.8) y (3.9) determinan que los desfases a usar son:

$$n_0=n_1=n_2=1$$

- Simetría en términos de la fase B

Las condiciones son:  $Z_a=Z_c=\text{infinito}$ ,

$Z_b=0$ ,  $I_a=I_c=0$ , por tanto:

$$I_0+aI_1+a^2I_2=I_0+I_1+I_2=0$$

de donde:

$$I_0 = a^2 I_1 = a I_2 \quad (3.10)$$

Además:

$$V_b = 3I_0 Z_g = V_0 + a^2 V_1 + a V_2 \quad (3.11)$$

Las condiciones (3.10) y (3.11) determinan que los desfases usados sean:

$$n_0 = 1 ; n_1 = a^2 ; n_2 = a$$

- Simetría en términos de la fase C

Las condiciones para este caso son:

$$Z_a = Z_b = \text{infinito}, Z_c = 0, I_a = I_b = 0, \text{ es decir:}$$

$$I_0 + I_1 + I_2 = I_0 + a^2 I_1 + a I_2 = 0$$

de donde:

$$I_0 = a I_1 = a^2 I_2 \quad (3.2)$$

Además:

$$V_c = 3I_0 Z_g = V_0 + a V_1 + a^2 V_2 \quad (3.13)$$

Las condiciones (3.12) y (3.13) determinan que los desfases a usar en este caso sean:  $n_0 = 1 ; n_1 = a ; n_2 = a^2$

Por lo que cumpliendo con las condiciones respectivas en cada caso, el modelo matemático general para una falla monofásica a tierra con simetría en términos de cualquier fase es el que se muestra en la figura 29.

FASE FALLADA	$n_0$	$n_1$	$n_2$
A	1	1	1
B	1	$a^2$	$a$
C	1	$a$	$a^2$

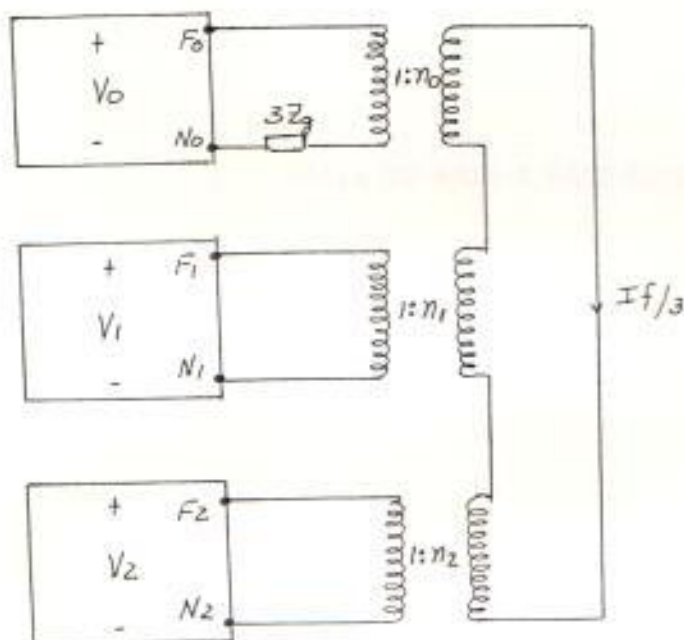


Fig 29. Diagrama de fallas generalizado para una falla monofásica a tierra.

### 3.3.2. FALLA DE DOS FASES A TIERRA GENERALIZADA.

Este disturbio puede considerarse como un caso especial de las fallas trifásica a tierra desbalanceada estudiada en la sección 3.2 haciendo que la impedancia de la fase simétrica ( $Z_n$ ) sea infinita. Por tanto el modelo matemático y las ecuaciones correspondientes según sea el caso simétrico pueden obtenerse en base a la figura 26 y las ecuaciones (3.1), (3.2) y (3.3) con la supresión del último término de la derecha de cada igualdad.

### 3.3.3. FALLA DE FASE A FASE GENERALIZADA.

Este tipo de falla se constituye en un caso especial de la falla bifásica a tierra generalizada, considerando que  $Z_g$  es infinita, por lo que el circuito equivalente de secuencia cero queda abierto. Nótese sin embargo que la impedancia de falla se convierte en  $2Z_g$  y el modelo matemático generalizado puede por tanto obtenerse en base a la figura 26 y las ecuaciones (3.1), (3.2) y (3.3)

## 3.4. DIAGRAMA DE FALLA GENERALIZADO PARA DISTURBIOS TIPO SERIE

La condición de una falla longitudinal general se muestra en la figura 30. donde dependiendo de los valores de las impedancias en cada fase establece el tipo de desbalance en estudio con la simetría en términos de la fase requerida.

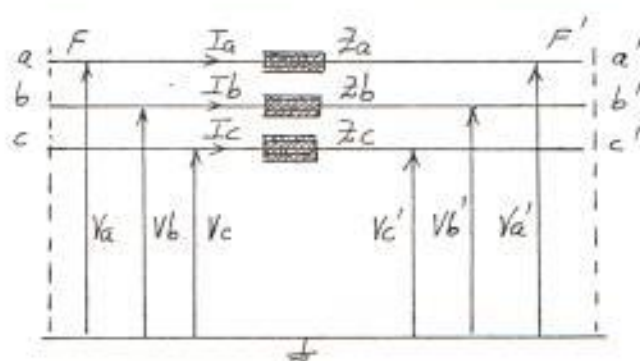


Fig 30. Condición de falla longitudinal entre los puntos F y F'.

Según la figura 30:

$$\begin{vmatrix} V_{aa}' \\ V_{bb}' \\ V_{cc}' \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Z_a & 0 & 0 \\ 0 & Z_b & 0 \\ 0 & 0 & Z_c \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{vmatrix} \quad (3.14)$$

por tanto:

$$Z_{012} = \begin{vmatrix} Z_{00} & Z_{01} & Z_{02} \\ Z_{10} & Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{20} & Z_{21} & Z_{22} \end{vmatrix}$$

donde:

$$Z_{00} = Z_{11} = Z_{22} = 1/3(Z_a + Z_b + Z_c)$$

$$Z_{10} = Z_{21} = Z_{02} = 1/3(Z_a + aZ_b + a^2Z_c)$$

$$Z_{01} = Z_{12} = Z_{20} = 1/3(Z_a + a^2Z_b + aZ_c)$$

Sumando las filas de (3.14):

$$V_0 = 1/3(Z_a I_a) + 1/3(Z_b I_b) + 1/3(Z_c I_c) \quad (3.15)$$

Sumando la fila uno, más  $a$  veces la fila dos, más  $a^2$  veces la fila tres; de (3.14) tenemos:

$$V_1 = 1/3(Z_a I_a) + a/3(Z_b I_b) + a^2/3(Z_c I_c) \quad (3.16)$$

Sumando la fila uno, más  $a^2$  veces la fila dos, más  $a$  veces la fila tres de (3.14):

$$V_2 = 1/3(Z_a I_a) + a^2/3(Z_b I_b) + a/3(Z_c I_c) \quad (3.17)$$

Las ecuaciones (3.15), (3.16) y (3.17) las usaremos para construir un diagrama que define completamente la condición de desbalance de la figura 30. Al igual que para una falla transversal, usaremos los desfases apropiados para incluir los cambios producidos en el modelo matemático por la simetría de la falla, con respecto a una u otra fase.



El modelo matemático general para un desbalance serie se lo muestra en la figura 31, en donde se nota claramente que los puntos  $Q_0$ ,  $Q_1$  y  $Q_2$  están al mismo potencial debiendo estar conectados entre sí.

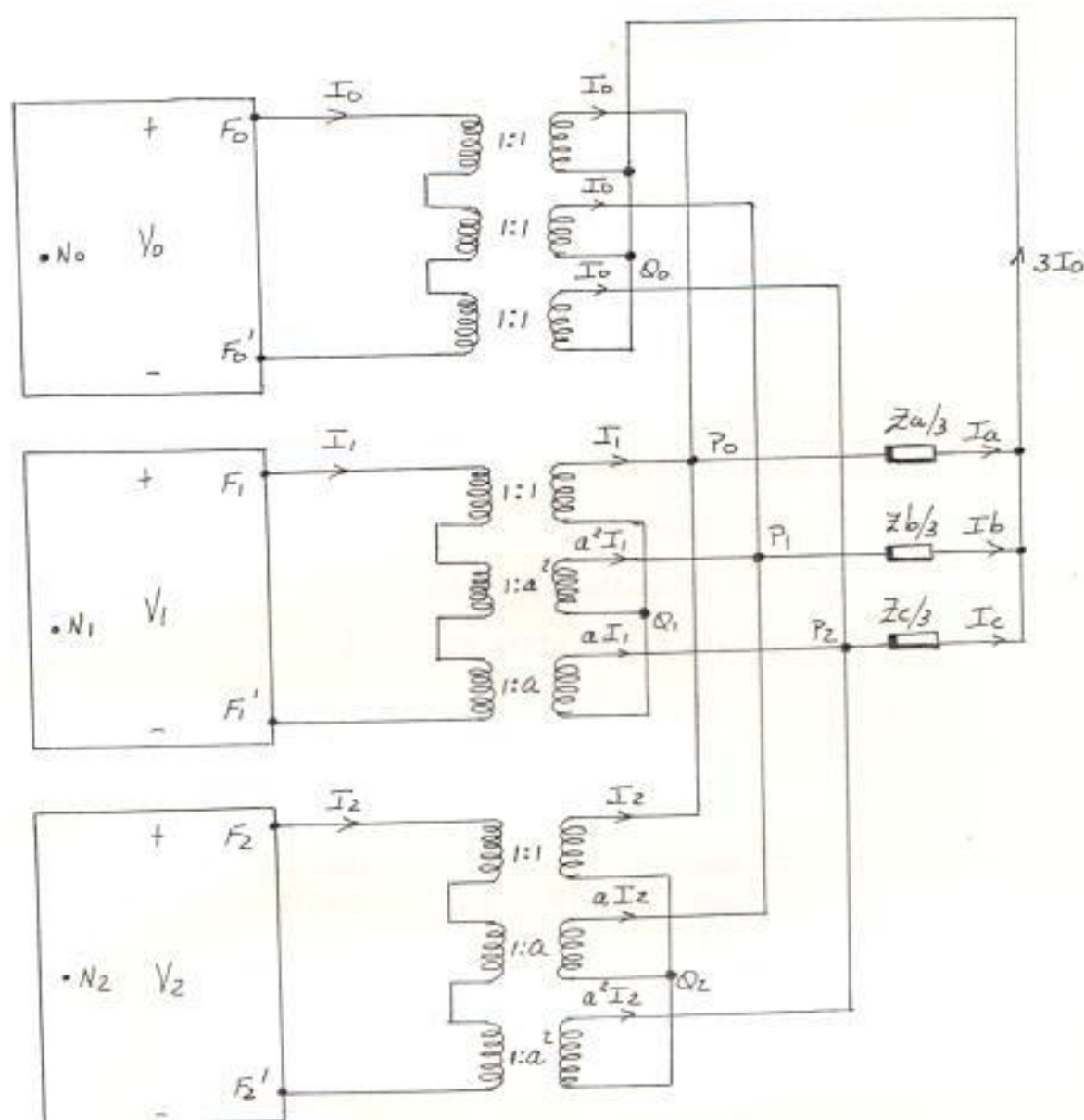


Fig 31. Diagrama de falla generalizado para fallas tipo serie.

## 3.4.1. FALLA DE UNA FASE ABIERTA GENERALIZADA

Las figuras 21 y 22 y la ecuación (2.12) describen totalmente el desbalance serie con simetría en términos de la fase A, mientras que, las figuras 32a y 32b representan los desbalances serie con simetría en términos de las fases B y C, cuyas ecuaciones matriciales respectivas son las mismas que las obtenidas en la sección 3.2 pero con  $Z_g = 0$ .

Por tanto, este disturbio queda representado por las ecuaciones (3.1), (3.2) y (3.3) y el modelo matemático de la figura 26 con  $Z_g = 0$ . La falla de una fase abierta se obtiene cuando  $Z_n = \text{infinito}$ .

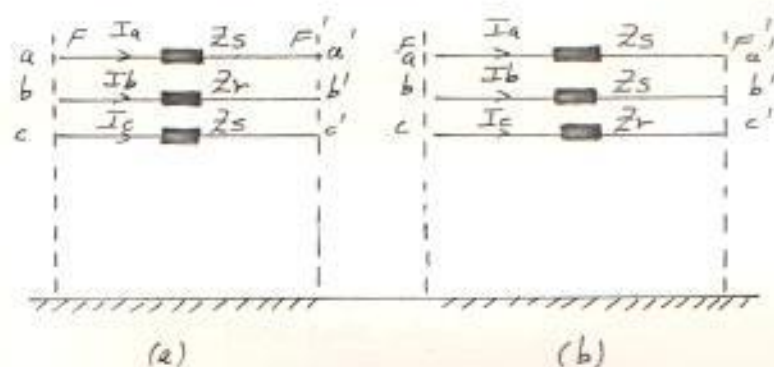


Fig 32. Condición de desbalance longitudinal entre F y F' (a) con simetría en término de la fase b. (b) con simetría en término de la fase c.

## 3.4.2. FALLAS DE DOS FASES ABIERTAS GENERALIZADA

- Simetría en términos de la fase A

Las condiciones son:

$$I_b = I_c = 0 ; V'_{aa} = I_a Z$$

De las primeras condiciones de corriente tenemos que:

$$I_0 + a^2 I_1 + I_2 = I_0 + a I_1 + a^2 I_2 = 0$$

de lo que:

$$I_0 = I_1 = I_2 \quad (3.18)$$

De la restricción de voltaje:

$$V'_{aa} = V_0 + V_1 + V_2 = 3I_0 Z \quad (3.19)$$

De (3.18) y (3.19) establecemos que:

$$n_0 = n_1 = n_2 = 1$$

- Simetría en términos de la fase B

Para este caso:

$$I_a = I_c = 0 ; V'_{bb} = I_b Z$$

De aquí que:

$$I_0 + I_1 + I_2 = I_0 + aI_1 + a^2I_2 = 0$$

De donde:

$$I_0 = a^2I_1 = aI_2 \quad (3.20)$$

Además:

$$V'_{bb} = 3I_0Z = V_0 + a^2V_1 + aV_2 \quad (3.21)$$

De (3.20) y (3.21) establecemos que:

$$n_0 = 1; \quad n_1 = a^2; \quad n_2 = a$$

- Simetría en términos de la fase C

Las nuevas condiciones son:

$$I_a = I_b = 0; \quad V'_{cc} = I_c Z$$

de donde:

$$I_0 + I_1 + I_2 = I_0 + a^2I_1 + aI_2 = 0$$

con lo que:

$$I_0 = aI_1 = a^2I_2 \quad (3.22)$$

además:

$$V'_{cc} = V_0 + aV_1 + a^2V_2 = 3I_0Z \quad (3.23)$$

Con (3.22) y (3.23) establecemos que:

$$n_0 = 1; \quad n_1 = a; \quad n_2 = a^2$$

El modelo matemático general para una falla de dos fases abiertas que cumpla con todos los requisitos impuestos por cada una de las fases asignadas como simétricas, se lo muestra en la figura 33.

FASE SIMÉTRICA	$n_0$	$n_1$	$n_2$
A	1	1	1
B	1	$a^2$	$a$
C	1	$a$	$a^2$

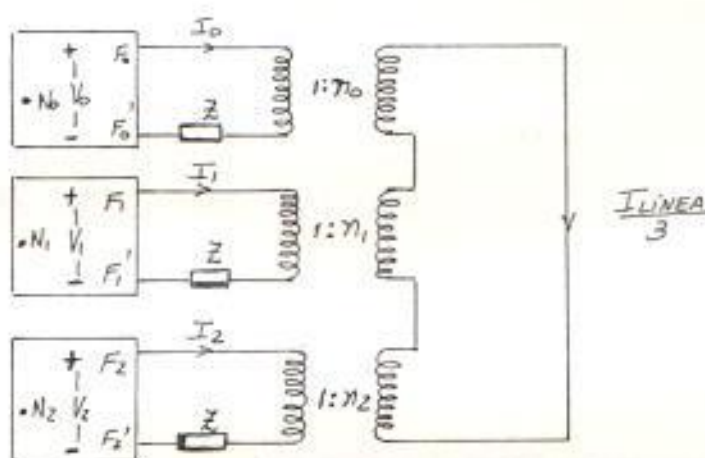


Fig 33. Diagrama de falla generalizada para una falla de dos fases abiertas.

## CAPITULO IV

### FALLAS SIMULTANEAS DE DOBLE CONTINGENCIA EN DISTINTOS PUNTOS DE UN SISTEMA.

#### 4.1. CONEXION DE REDES DE SECUENCIA PARA FALLAS SIMULTANEAS.

Cuando una falla ocurre en un sistema, el punto F se define como el punto de falla, siendo la red de secuencia positiva, activa, por poseer fuentes independientes mientras que las redes de secuencia negativa y cero son pasivas.

Si una falla simultánea de doble contingencia ocurre en un sistema se puede hacer uso de la teoría de redes de dos puertas para representar las fallas encontrando los parámetros de puerta de las redes de secuencia positiva negativa y cero; y combinándolas de manera apropiada según los tipos de falla.

Considerando los cuatro tipos de fallas comunes que pueden ocurrir en diferentes puntos de un sistema existen un total de diez y seis problemas posibles a resolver. Ellos se resumen en la tabla X. Debido a que uno puede hacer cualquier puerta como la izquierda o la derecha, la matriz G puede eliminarse considerándose únicamente la matriz H durante una conexión híbrida.

		Puerta derecha				
Tipo de falla	Tipo	Falla paralelo K = N		Falla serie K = M		
		1 $\phi$ -T (s)	2 $\phi$ -T (p)	1 $\phi$ -abier. (p)	2 $\phi$ -abier. (s)	
Puerta izquierda	Falla paralelo	1 $\phi$ -T (s)	Znn	Hnn	Hnm	Znm
		2 $\phi$ -T (p)	Gnn	Ynn	Ynm	Gnm
	Falla serie	1 $\phi$ -abier (p)	Gmn	Ymn	Ymm	Gmm
		2 $\phi$ -abier (s)	Zmn	Hmn	Hmm	Zmm

(s) = serie ; (p) = paralelo

Tabla X . Combinaciones de fallas de dos puertas

En la tabla X , N representa la barra de referencia del sistema compuesto por las redes de secuencia y M representa un punto de falla diferente a F.

Es de anotar que las fallas de línea a línea es un caso especial de las fallas de dos líneas a tierra, por lo que en la tabla anterior implícitamente está incluida. Así mismo, la falla trifásica desbalanceada general, también está implícita en la tabla X . ya que es una conexión paralelo modificada según se lo verá en lo que sigue de este capítulo.

Cuando ocurre una falla simultánea, las redes de secuencia ten-

drán dos puntos de fallas y serán redes de dos puertas con puntos F y K. en cada puerta según el tipo de falla.

Los problemas de fallas simultáneas se resolverán mediante la generalización de los tres tipos de falla posibles: 1) Falla serie-serie, 2) falla paralelo-paralelo y 3) falla serie-paralelo, donde los términos serie y paralelo se refieren al tipo de conexión en el modelo matemático y no al tipo de falla.

La red de secuencia interconectada vista desde la conexión externa se muestra en la figura 34, donde se definen los voltajes y corrientes de red para fallas simultáneas en F y F'. Así mismo se definen las direcciones de corrientes y polaridades de voltaje a considerar en los desarrollos posteriores. Los desfases ideales, tienen una relación de transformación de:

$$n_{ki} = \frac{V_{1i}}{V_{ki}} = \frac{I_{1i}}{I_{ki}} ; n_{ki}' = \frac{V_{2i}}{V_{ki}'} = \frac{I_{2i}}{I_{ki}'}$$



Fig 34. Representación de una red de dos puertas para fallas simultáneas en F y F'.

Donde  $i$  puede ser 0, 1, 2 de acuerdo a las diferentes secuencias. Los valores de las relaciones de transformación estarán dados



por el tipo de falla considerado y la simetría correspondiente.

#### 4.1.1. CONEXIÓN SERIE-SERIE (FALLA TIPO Z)

Una conexión serie de redes de secuencia de dos puertos se utiliza cuando ocurren fallas como:

- Fallas simultáneas de una fase a tierra en F y F', usándose  $Z_{nn}$ .
- Una falla monofásica a tierra en F y de dos líneas abiertas en F' ( $Z_{nm}$ ).
- Dos líneas abiertas en F y una fase a tierra en F' ( $Z_{mn}$ ).
- Dos líneas abiertas en F y F' ( $Z_{mm}$ ).

La conexión de redes de secuencia se muestra en la figura 35. Para la red de secuencia positiva tenemos:

$$\begin{bmatrix} V_{k1} \\ V_{k1}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11}(1) & Z_{12}(1) \\ Z_{21}(1) & Z_{22}(1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{k1} \\ I_{k1}' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{z1} \\ V_{z2} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

donde:

$$\begin{bmatrix} V_{z1} \\ V_{z2} \end{bmatrix}$$

es el término de fuente independiente visto desde los terminales  $K_1-K_2$  (dentro de los transformadores). Además con  $i=1$ :

$$n_{k1} = \frac{V_{11}}{V_{k1}} = \frac{I_{11}}{I_{k1}}; \quad n'_{k1} = \frac{V_{21}}{V_{k1}} = \frac{I_{21}}{I_{k1}} \quad (4.2)$$

premultiplicando (4.1) por:

$$\begin{vmatrix} n_{k1} & 0 \\ 0 & n'_{k1} \end{vmatrix}$$

tenemos:

$$\begin{vmatrix} V_{11} \\ V_{21} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} z_{11}(1) & (n_{k1}/n'_{k1})z_{12}(1) \\ (n'_{k1}/n_{k1})z_{21}(1) & z_{22}(1) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_{11} \\ I_{21} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} n_{k1}V_{z1} \\ n'_{k1}V_{z2} \end{vmatrix} \quad (4.3)$$

Para la red de secuencia negativa:

$$\begin{vmatrix} V_{k2} \\ V'_{k2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} z_{11}(2) & z_{12}(2) \\ z_{21}(2) & z_{22}(2) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_{k2} \\ I'_{k2} \end{vmatrix} \quad (4.4)$$

premultiplicando (4.4) por:

$$\begin{vmatrix} n_{k2} & 0 \\ 0 & n'_{k2} \end{vmatrix}$$

obtenemos:

$$\begin{vmatrix} V_{12} \\ V_{22} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} z_{11}(2) & (n_{k2}/n'_{k2})z_{12}(2) \\ (n'_{k2}/n_{k2})z_{21}(2) & z_{22}(2) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_{12} \\ I_{22} \end{vmatrix} \quad (4.5)$$

Para la red de secuencia cero:

$$\begin{vmatrix} V_{k0} \\ V'_{k0} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} z_{11}(0) & z_{12}(0) \\ z_{21}(0) & z_{22}(0) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_{k0} \\ I'_{k0} \end{vmatrix} \quad (4.6)$$

y ya que  $n_{k0} = n'_{k0} = 1$ :

$$\begin{vmatrix} V_{10} \\ V_{20} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} z_{11}(0) & z_{12}(0) \\ z_{21}(0) & z_{22}(0) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_{10} \\ I_{20} \end{vmatrix} \quad (4.7)$$

De la figura 35 para la conexión serie-serie

$$\begin{vmatrix} V_1 \\ V_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} V_{11} \\ V_{21} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} V_{12} \\ V_{22} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} V_{10} \\ V_{20} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \end{vmatrix} \quad (4.8)$$

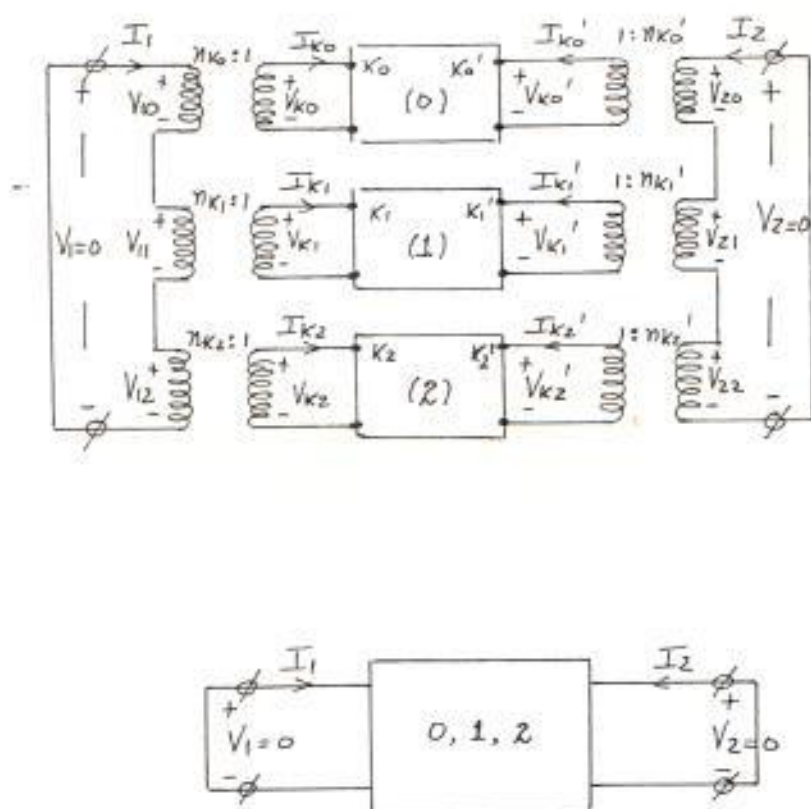


Fig 35. Conexión de redes de secuencia para fallas simultáneas de doble contingencia de tipo 2.

y:

$$\begin{vmatrix} I_1 \\ I_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} I_{10} \\ I_{20} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} I_{11} \\ I_{21} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} I_{12} \\ I_{22} \end{vmatrix} \quad (4.9)$$

Realizando la operación de (4.8) y sustituyendo (4.9):

$$\begin{vmatrix} V_1 \\ V_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_1 \\ I_2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} n_{k1} V_{z1} \\ n_{k1}' V_{z2} \end{vmatrix} \quad (4.10)$$

donde:

$$z_{11} = z_{11}(0) + z_{11}(1) + z_{11}(2)$$

$$z_{12} = z_{12}(0) + (n_{k1}/n_{k1}') z_{12}(1) + (n_{k2}/n_{k2}') z_{12}(2)$$

$$z_{21} = z_{21}(0) + (n_{k1}'/n_{k1}) z_{21}(1) + (n_{k2}'/n_{k2}) z_{21}(2)$$

$$z_{22} = z_{22}(0) + z_{22}(1) + z_{22}(2)$$

La ecuación (4.10) puede escribirse como:

$$C = 0 = ZI + V_z$$

Entonces:

$$I = -Z^{-1}V_z$$

es la solución de la conexión serie-serie. Conociendo estas corrientes determinamos las corrientes en los devanados externos del transformador y calculamos los voltajes según las ecuaciones (4.3), (4.5) y (4.7). Las corrientes de red de secuencia individuales se pueden obtener mediante la aplicación de las leyes de Kirchhoff. La solución entonces, puede escribirse:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{-1}{\det. Z} \begin{bmatrix} z_{22} & -z_{12} \\ -z_{21} & z_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_{k1} V_{z1} \\ n_{k1}' V_{z2} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

donde se nota que cada corriente de falla depende de las fuentes de voltaje independientes.

## 4.1.2. CONEXION PARALELO-PARALELO (FALLA TIPO Y)

Se utiliza para representar las siguientes condiciones de fallas simultáneas:

- Falla de dos líneas a tierra en F y F' (Ynn).
- Falla de dos líneas a tierra en F y de una línea abierta en F' (Ynm).
- Falla de una línea abierta en F y de dos líneas a tierra en F' (Ymn).
- Falla de una línea abierta en F y F' (Ymm).

La conexión de redes de secuencia para este caso se muestra en la figura 36.

Escribiendo las ecuaciones de dos puertos para las tres redes de secuencias:

$$\begin{bmatrix} I_{k1} \\ I_{k1}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11}(1) & Y_{12}(1) \\ Y_{21}(1) & Y_{22}(1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{k1} \\ V_{k1}' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{y1} \\ I_{y2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} I_{k2} \\ I_{k2}' \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} y_{11}(2) & y_{12}(2) \\ y_{21}(2) & y_{22}(2) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} v_{k2} \\ v_{k2}' \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} I_{k0} \\ I_{k0}' \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} y_{11}(0) & y_{12}(0) \\ y_{21}(0) & -y_{22}(0) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} v_{k0} \\ v_{k0}' \end{vmatrix}$$

Donde  $I_y$  es la fuente independiente vista desde las puertas  $k_1$  y  $k_1'$ . Premultiplicando las ecuaciones anteriores por:

$$\begin{vmatrix} n_{ki} & 0 \\ 0 & n_{ki}' \end{vmatrix}$$

para  $i=1,2,0$  tenemos:

$$\begin{vmatrix} I_{11} \\ I_{21} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} y_{11}(1) & (n_{k1}/n_{k1}')y_{12}(1) \\ (n_{k1}'/n_{k1})y_{21}(1) & y_{22}(1) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} v_{11} \\ v_{21} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} n_{k1}I_{1y} \\ n_{k1}'I_{2y} \end{vmatrix} \quad (4.12)$$

$$\begin{vmatrix} I_{12} \\ I_{22} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} y_{11}(2) & (n_{k2}/n_{k2}')y_{12}(2) \\ (n_{k2}'/n_{k2})y_{21}(2) & y_{22}(2) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} v_{12} \\ v_{22} \end{vmatrix} \quad (4.13)$$

$$\begin{bmatrix} I_{10} \\ I_{20} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11}(0) & y_{12}(0) \\ y_{21}(0) & y_{22}(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{10} \\ V_{20} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Además, de la figura 36:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{10} \\ I_{20} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{11} \\ I_{21} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{12} \\ I_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

y:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{10} \\ V_{20} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{11} \\ V_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{12} \\ V_{22} \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Sustituyendo (4.16) en (4.12), (4.13) y (4.14) y con esto en (4.15) tenemos:

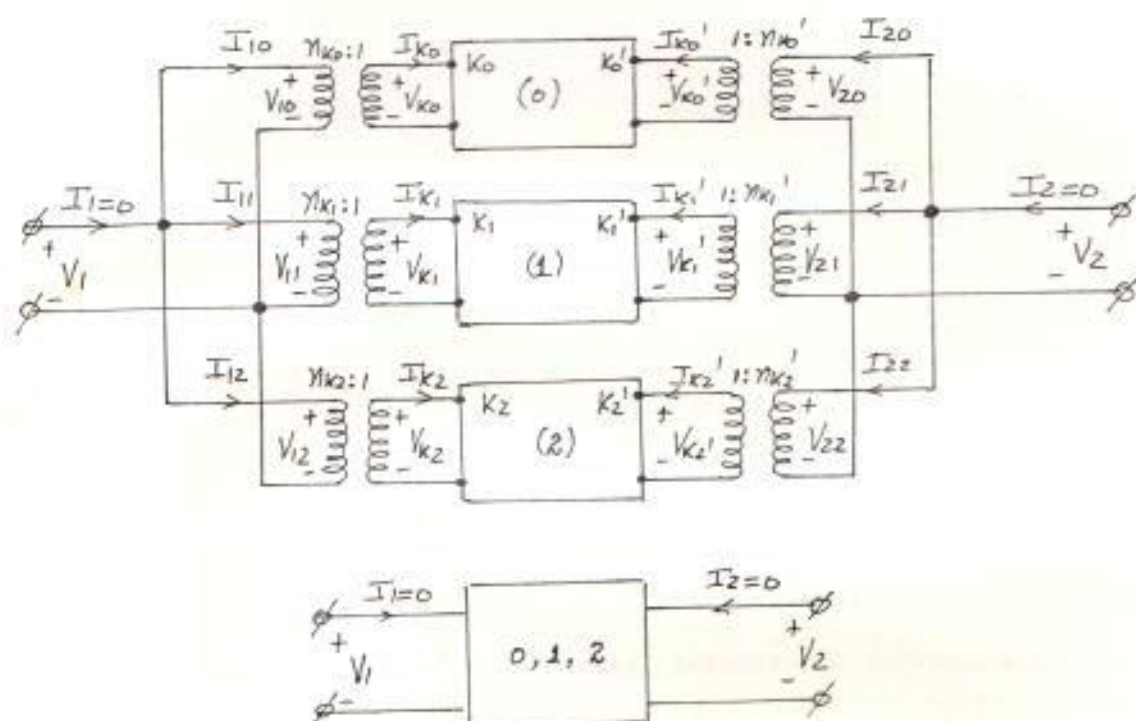


Fig 36. Conexión de redes de secuencia para fallas simultáneas tipo V.



$$\begin{vmatrix} I_1 \\ I_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_1 \\ V_2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} n_{k1} I_{y1} \\ n_{k1}' I_{y2} \end{vmatrix}$$

donde:

$$y_{11} = y_{11}(0) + y_{11}(1) + y_{11}(2)$$

$$y_{12} = y_{12}(0) + (n_{k1}/n_{k1}') y_{12}(1) + (n_{k2}/n_{k2}') y_{12}(2)$$

$$y_{21} = y_{21}(0) + (n_{k1}'/n_{k1}) y_{21}(1) + (n_{k2}'/n_{k2}) y_{21}(2)$$

$$y_{22} = y_{22}(0) + y_{22}(1) + y_{22}(2)$$

en forma matricial:

$$0 = Y V + I_s ; \quad V = -Y^{-1} I_s$$

es decir:

$$\begin{vmatrix} V_1 \\ V_2 \end{vmatrix} = \frac{-1}{\det Y} \begin{vmatrix} y_{22} & -y_{12} \\ -y_{21} & y_{11} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} n_{k1} I_{y1} \\ n_{k1}' I_{y2} \end{vmatrix} \quad (4.17)$$

que se constituye en la solución para este caso. Los voltajes encontrados son fácilmente convertidos a voltajes dentro de los transformadores y si los voltajes de redes de secuencia se conocen, entonces la red puede resolverse completamente.

#### 4.1.3. CONEXION SERIE-PARALELO (FALLA TIPO H)

Este tipo de conexión se utiliza cuando se tienen fallas simultáneas como:

- Falla monofásica a tierra en F y de dos fases a tierra en F' (Hnn).
- Monofásica a tierra en F y de una línea abierta en F' (Hnm).
- Falla de dos líneas abiertas en F y de dos líneas a tierra en F' (Hmn).
- Dos líneas abiertas en F y una línea abierta en F' (Hmm).

Esta conexión se muestra en la figura 37 y puede usarse para todas las fallas serie-paralelo, como para las fallas paralelo-serie, únicamente definiendo la puerta izquierda como la derecha y viceversa. Por tanto la utilización de la matriz G para las conexiones paralelo-serie no será necesaria si se desea.

Escribiendo las ecuaciones híbridas de dos

puertas para cada red de secuencia:

$$\begin{bmatrix} V_{k1} \\ I_{k1}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11}(1) & h_{12}(1) \\ h_{21}(1) & h_{22}(1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{k1} \\ V_{k1}' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{h1} \\ I_{h2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_{k0} \\ I_{k0}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11}(0) & h_{12}(0) \\ h_{21}(0) & h_{22}(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{k0} \\ V_{k0}' \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_{k2} \\ I_{k2}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11}(2) & h_{12}(2) \\ h_{21}(2) & h_{22}(2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{k2} \\ V_{k2}' \end{bmatrix}$$

y pre-multiplicandolas por:

$$\begin{bmatrix} n_{ki} & 0 \\ 0 & n_{ki}' \end{bmatrix}; \quad i = 1, 2, 0$$

obtenemos:

$$\begin{bmatrix} V_{11} \\ I_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11}(1) & (n_{k1}/n_{k1}')h_{12}(1) \\ (n_{k1}'/n_{k1})h_{21}(1) & h_{22}(1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{11} \\ V_{21} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{k1}V_{h1} \\ n_{k1}'I_{h2} \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

$$\begin{bmatrix} V_{12} \\ I_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11}(2) & (n_{k2}/n_{k2}')h_{12}(2) \\ (n_{k2}'/n_{k2})h_{21}(2) & h_{22}(2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{12} \\ V_{22} \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

$$\begin{vmatrix} V_{10} \\ I_{20} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} h_{11}(0) & h_{12}(0) \\ h_{21}(0) & h_{22}(0) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_{10} \\ V_{20} \end{vmatrix} \quad (4.20)$$

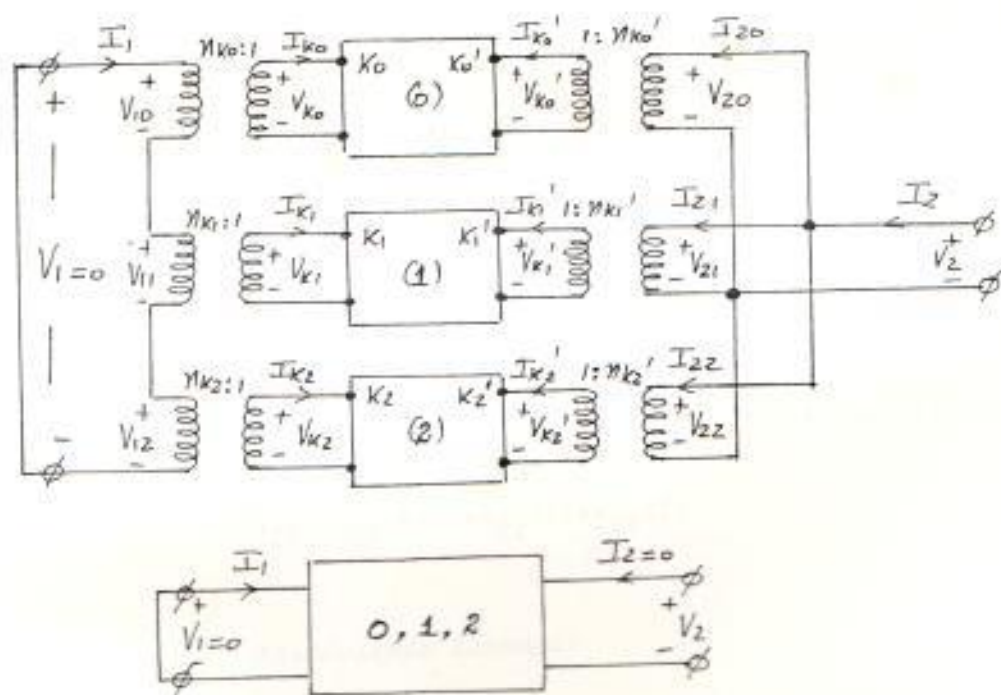


Fig 37. Conexión de redes de secuencia para fallas simultáneas tipo H.

Además de la figura 37:

$$\begin{vmatrix} V_1 \\ I_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} V_{10} \\ I_{20} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} V_{11} \\ I_{21} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} V_{12} \\ I_{22} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \end{vmatrix} \quad (4.21)$$

y:

$$\begin{vmatrix} I_1 \\ V_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} I_{10} \\ V_{20} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} I_{11} \\ V_{21} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} I_{12} \\ V_{22} \end{vmatrix} \quad (4.22)$$

Sustituyendo (4.18) hasta (4.20) en (4.21) y con esto en (4.22):

$$\begin{vmatrix} V_1 \\ I_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_1 \\ V_2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} n_{k1} V_{k1} \\ n_{k1} I_{k2} \end{vmatrix}$$

donde:

$$h_{11} = h_{11}(0) + h_{11}(1) + h_{11}(2)$$

$$h_{12} = h_{12}(0) + (n_{k1}/n_{k1}') h_{12}(1) + (n_{k2}/n_{k2}') h_{12}(2)$$

$$h_{21} = h_{21}(0) + (n_{k1}'/n_{k1}) h_{21}(1) + (n_{k2}'/n_{k2}) h_{21}(2)$$

$$h_{22} = h_{22}(0) + h_{22}(1) + h_{22}(2)$$

resolviendo tenemos:

$$N = -H^{-1}M_{\Delta}$$

$$\begin{vmatrix} I_1 \\ V_2 \end{vmatrix} = \frac{-1}{\det H} \begin{vmatrix} h_{22} & -h_{12} \\ -h_{21} & h_{11} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} n_{k1} V_{k1} \\ n_{k1} I_{k2} \end{vmatrix}$$

por lo que conociendo  $I_1$  y  $V_2$  podemos resolver completamente para todas las cantidades de puertos y entonces para las cantidades de la red interna.

#### 4.1.4. CONEXION PARALELO-SERIE (FALLA TIPO G)

La conexión de redes de secuencia que represen

ta este tipo de falla se lo muestra en la figura 38. Nótese que la conexión es contra-ria a la establecida para las fallas tipo H. La única diferencia está en el nombre que se le da a cada puerta, por tanto este tipo de falla puede resolverse con el modelo matemático serie-paralelo, intercambiando el nombre a las puertas, es decir, a la puerta uno la llamamos dos y viceversa.

Sin embargo, a modo de referencia, si se realizan las operaciones matemáticas como antes, la ecuación que describe este tipo de falla en términos de la matriz G es:

$$\begin{vmatrix} V_1 \\ I_2 \end{vmatrix} = \frac{-1}{\det G} \begin{vmatrix} g_{22} & -g_{12} \\ -g_{21} & g_{11} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} n_{k1} I_{g1} \\ n_{k1} V_{g2} \end{vmatrix}$$

y puede resolver fallas como:

- Dos líneas a tierra en F y una línea a tierra en F' (Gnn).
- Una línea abierta en F y una fase a tierra en F' (Gmn)
- Dos líneas a tierra en F y dos líneas a -  
biertas en F' (Gnm).

- Una línea abierta en F y dos líneas abiertas en F' (Gmm).

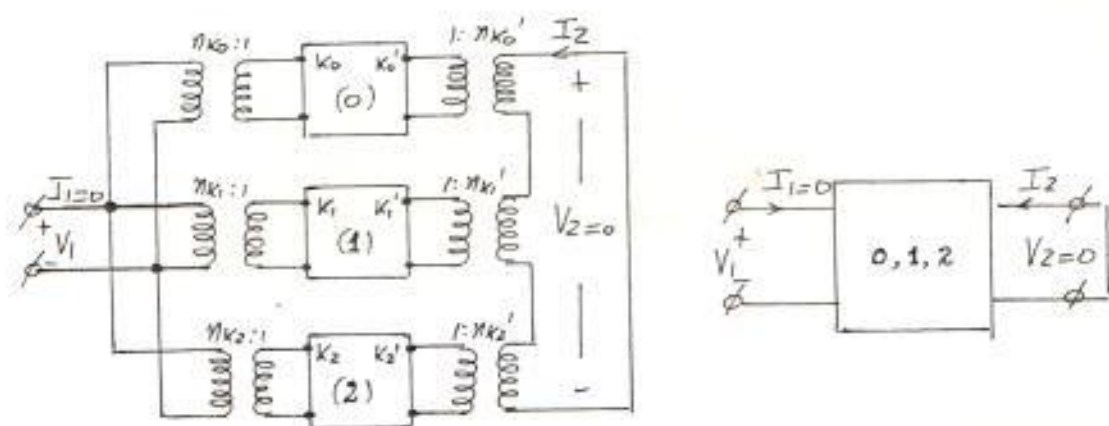


Fig 38. Conexión de redes de secuencia para una falla simultánea tipo G.

#### 4.1.5. CONEXION TRIFASICA-PARALELO.

Esta es una conexión modificada de la paralelo-paralelo, tal como se observa en la figura 39 de donde:

$$\begin{vmatrix} I_1 \\ I_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_1 \\ V_2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} n_{k1} I_{y1} \\ n_{k1}' I_{y2} \end{vmatrix}$$

pero:

$$\begin{vmatrix} I_1 \\ I_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{-3}{Z_k - Z_s} & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_1 \\ 0 \end{vmatrix}$$

Reemplazando y manipulando la expresión matricial:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{-1}{\det Y} \begin{bmatrix} y_{22} & -y_{12} \\ -y_{21} & (y_{11} \frac{3}{n} - z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_{k1}' I_{y1}' \\ n_{k1}' I_{y1}' \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

Nótese, que la ecuación matricial (4.23) es una modificación de la (4.17) al incluirse el término  $3/(Z_n - Z_\Delta)$ .

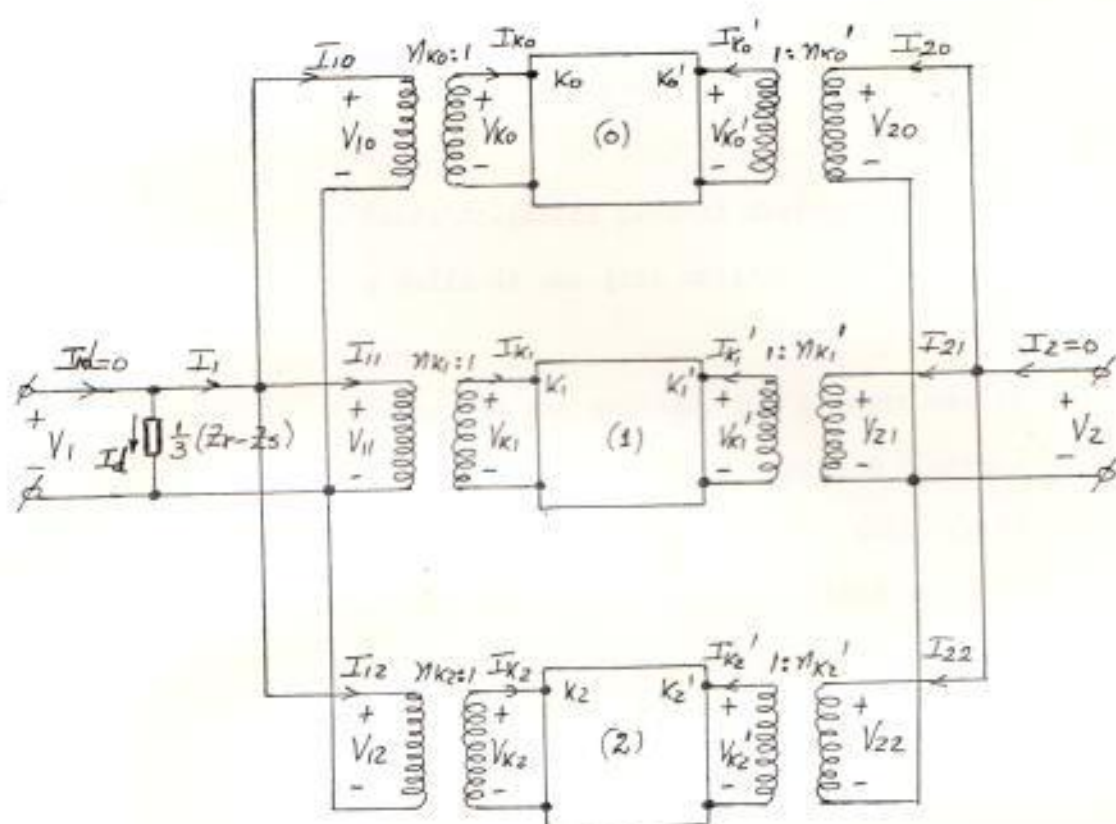


Figura 39. Conexión de redes de secuencia para una falla simultánea tipo trifásica-paralelo.



Es importante además, hacer presente que es esta conexión y su respectivo modelo pueden usarse para analizar fallas simultáneas tipo paralelo trifásica, con solo intercambiar el nombre a cada una de las puertas de secuencia.

Los tipos de fallas que tienen solución con la conexión trifásica-paralelo son:

- Falla trifásica general desbalanceada en F y falla de dos fases a tierra en F'.
- Falla trifásica general desbalanceada en F y falla de una fase abierta en F'.

Cabe anotar sin embargo, que siempre que se hable de una falla de dos líneas a tierra, implícitamente está incluida la falla de línea a línea, ya que como se recordará de los desarrollos anteriores, esta última es un caso especial de la primera con  $Z_g$  infinita.

#### 4.1.6. CONEXION SERIE-TRIFASICA.

Esta, también es una conexión modificada de otra anteriormente desarrollada: la conexión

serie-paralelo, tal como se observa en la figura 40 en donde:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ V_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{k1} V_{h1} \\ n_{k1}' I_{h2} \end{bmatrix}$$

pero:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{-3}{Z_n - Z_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

Reemplazando y manipulando la expresión:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{-1}{\det H} \begin{bmatrix} h_{22} + \frac{3}{Z_n - Z_s} & -h_{12} \\ -h_{21} & h_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_{k1} V_{h1} \\ n_{k1}' I_{h2} \end{bmatrix}$$

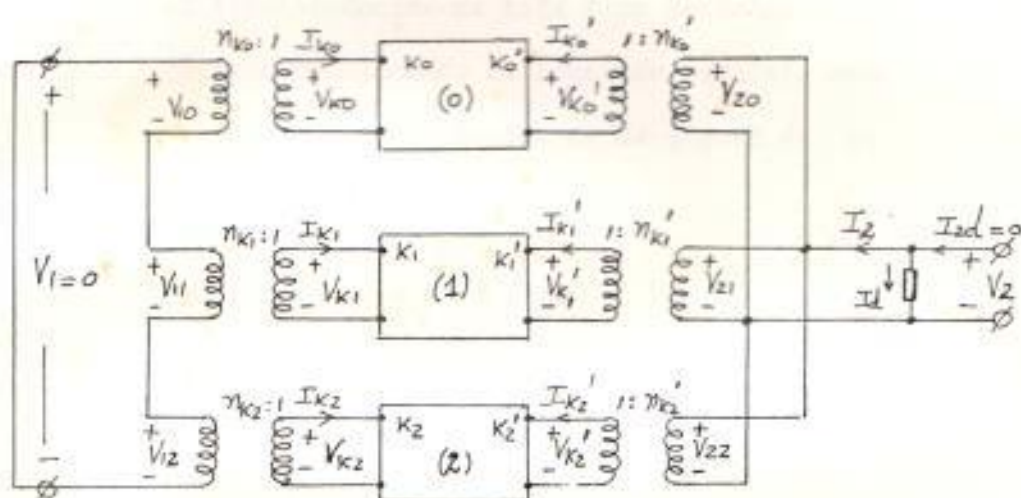


Fig. 40 Conexión de redes de secuencia para una falla simultánea tipo serie-trifásica.

Cabe añadir que este modelo puede perfectamente usarse para fallas tipo trifásica-serie cambiando el nombre a las puertas al igual que en la falla tipo paralelo-trifásica. Los tipos de fallas que se pueden resolver con la conexión serie-trifásica son:

- Falla monofásica a tierra en F y falla trifásica general desbalanceada en F'.
- Falla de dos fases abiertas en F y falla trifásica general desbalanceada en F'.

#### 4.1.7. CONEXION TRIFASICA-TRIFASICA

La representación de este tipo de falla se la obtiene modificando la conexión paralelo-paralelo tal como se observa en la figura 41 en donde:

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n_{k1} I_{y1} \\ n_{k1} I_{y2} \end{pmatrix}$$

pero:

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{-3V_1}{Z_{r1} - Z_{s1}} \\ \frac{-3V_2}{Z_{r2} - Z_{s2}} \end{pmatrix}$$

Introduciendo esto en la expresión anterior  
y manipulando la ecuación matricial:

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} = \frac{-1}{\det Y} \begin{pmatrix} (y_{22} + \frac{3}{Z_{n2} - Z_{s2}}) & -y_{12} \\ -y_{21} & (y_{11} + \frac{3}{Z_{n1} - Z_{s1}}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_{k1}' I_{y1} \\ n_{k1}' I_{y2} \end{pmatrix}$$

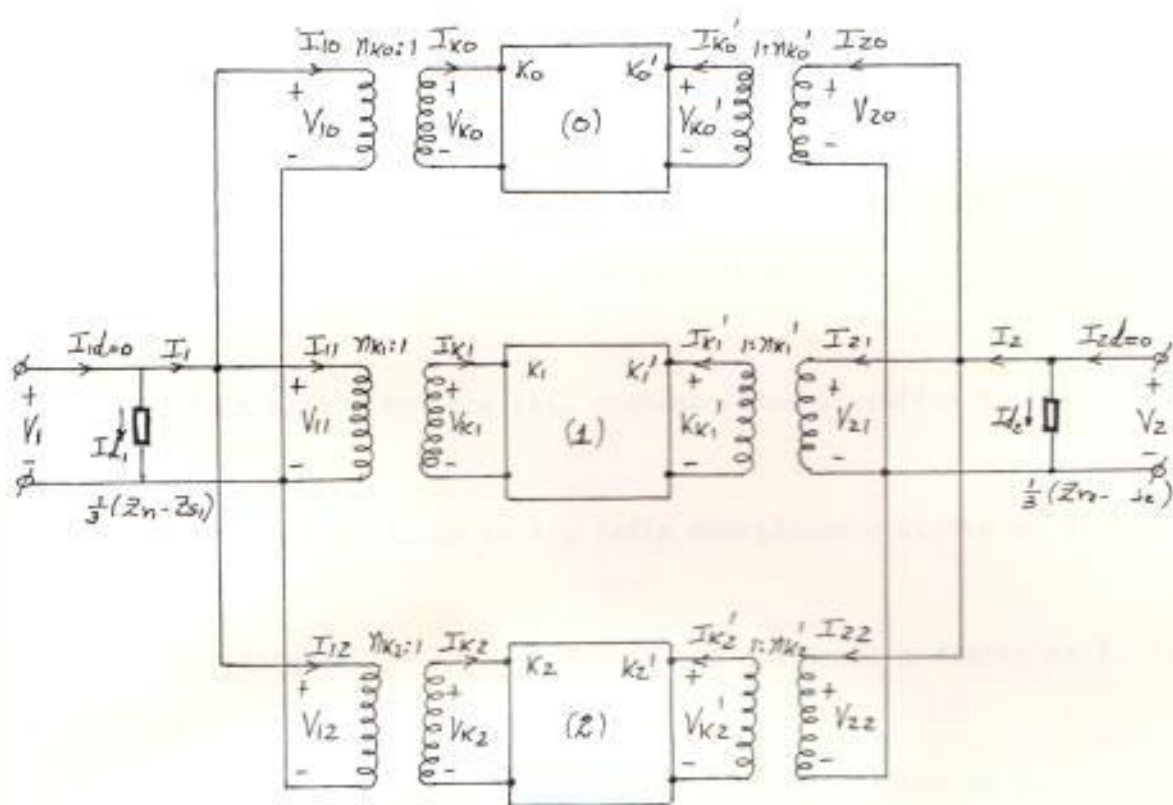


Fig 41. Conexión de redes de secuencia para una falla simultánea trifásica-trifásica.

4.2. DIAGRAMA DE FALLA GENERALIZADO PARA FALLA TRIFÁSICA DESBALANCEADA EN A MAS FALLA TRIFÁSICA DESBALANCEADA EN B.

La representación matemática de este tipo de falla se la obtuvo en la sección 4.1.7, así como las ecuaciones que describen tal disturbio. Los ejemplos que clarifican la utilización de esta y otros tipos de contingencias simultáneas se pueden revisar en el último capítulo de este trabajo.

4.3. DIAGRAMA DE FALLA GENERALIZADA PARA FALLA TRIFÁSICA DESBALANCEADA EN A MAS FALLA PARALELO EN B.

Este caso establece seis combinaciones de fallas a saber:

- Falla trifásica en A y falla monofásica a tierra en B.
- Falla trifásica en A y falla de dos fases a tierra en B.
- Falla trifásica en A y falla de línea a línea en B.
- Tres combinaciones más, como resultado de la alteración en la localización de la falla.

El primer tipo de falla, se analiza con una conexión trifásica-serie, mientras que, las dos fallas siguientes se las puede resolver con una conexión trifásica-paralelo.

Las tres combinaciones restantes se las puede analizar, cambiando el nombre a cada una de las puertas, ya que ahora cada una de las fallas ocurre en la puerta contraria.

#### 4.4. DIAGRAMA DE FALLAS GENERALIZADO PARA FALLA TRIFASICA DESBALANCEADA EN A MAS FALLA SERIE EN B.

Aquí, los casos a estudiar son:

- Falla trifásica en A más falla de una fase abierta en B.
- Falla trifásica en A más falla de dos fases abiertas en B.
- Otras dos combinaciones generadas por el intercambio en la ubicación de las fallas.

El primer caso se soluciona con la conexión trifásica-paralelo, y el segundo, con la conexión trifásica-serie, pudiendo resolverse las últimas dos combinaciones con el mismo procedimiento y conexiones que para las fallas anteriores, excepto que la puerta uno es la dos y viceversa.

#### 4.5. DIAGRAMA DE FALLA GENERALIZADO PARA FALLA PARALELO EN A MAS FALLA PARALELO EN B.

Este caso, presenta las siguientes alternativas:

- Falla monofásica a tierra en A más falla monofásica a tierra en B.
- Falla monofásica a tierra en A más falla de dos líneas en tierra en B.
- Falla monofásica a tierra en A más falla de línea a línea en B.
- Falla de dos fases a tierra en A más falla de línea a línea en B.
- Falla de dos fases a tierra en A más falla de dos fases a tierra en B.
- Falla de fase a fase en A más falla de fase a fase en B.
- Otras seis fallas debidas a la posibilidad de que las fallas que ocurren en A sucedan en B y viceversa.

La primera de las posibilidades, puede resolverse con la conexión serie-serie; las dos siguientes son una serie-paralelo; las otras tres con la conexión paralelo-paralelo; y las últimas seis con un intercambio en el nombre de las puertas siguiendo el mismo procedimiento de solución establecido en secciones anteriores de este capítulo.

4.6. DIAGRAMA DE FALLAS GENERALIZADA PARA FALLA PARALELO EN A MAS FALLA SERIE EN B.

Los posibles disturbios para este caso son:

- Falla monofásica en A más falla de una fase abierta en b.
- Falla de una fase a tierra en A. más falla de dos fases abiertas en B.
- Falla de dos fases a tierra en A más falla de una fase abierta en B.
- Falla de dos fases a tierra en A más falla de dos fases abiertas en B.
- Falla de fase a fase en A más falla de una línea abierta en B.
- Falla de fase a fase en A más falla de dos líneas a abiertas en B.
- Seis combinaciones adicionales surgidas al invertir la posición de las contingencias .



El primer disturbio se soluciona con la conexión serie-paralelo; el siguiente con una conexión serie-serie; el tercero y quinto con una paralelo-paralelo, mientras que el cuarto y sexto con la paralelo-serie; dejando las seis últimas para ser analizadas en las mismas conexiones mencionadas, excepto que cada puerta cambia de nombre con su opuesta.

#### 4.7. DIAGRAMAS DE FALLA GENERALIZADO PARA FALLA SERIE EN A MAS FALLA SERIE EN B.

Esta sección hace referencia a las siguientes posibilidades:

- Falla de una fase abierta en A más falla de una fase abierta en B.
- Falla de una fase abierta en A más falla de dos fases abiertas en B.
- Falla de dos fases abiertas en A más falla de dos fases abiertas en B.
- Tres combinaciones más previenen la posibilidad de que las fallas que antes ocurrían en A, ocurran en B, y viceversa.

La primera de estas posibilidades puede resolverse con una conexión paralelo-paralelo; la siguiente, con una conexión paralelo-serie; la tercera con una serie-serie y las restantes ,

con las mismas condiciones arriba anotadas, cambiando la nomenclatura de cada puerta con su contraria.

La tabla XI muestra un resumen de las posibles ocurrencias de fallas simultáneas de doble contingencia en distintos puntos de un sistema de potencia.

En ella se observan tan solo una parte de la gran cantidad de disturbios que pueden solucionarse por este método si tomamos en consideración que cada falla puede ocurrir en cualquier fase con cualquier simetría y en cualquier puerta, A, B o ambas.

B		30-T	30	30-T	30	10-T	20-T	0-0	10-A	20-A
A		Desbal.	Desbal.	Desbal.	Balanc.	Balanc.				
30-T										
Desbal.	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
30										
Desbal.		X	X	X	X	X	X	X	X	X
30-T										
Balanc.			X	X	X	X	X	X	X	X
30										
Balanc.				X	X	X	X	X	X	X
10-T						X	X	X	X	X
20-T							X	X	X	X
0-0								X	X	X
10-A									X	X
20-A										X

S I M E T R I C A

## CAPITULO V

FALLAS SIMULTANEAS DE DOBLE CONTINGENCIA EN UN MISMO PUNTO DEL SISTEMA CON SIMETRIA EN TERMINOS DE CUALQUIER FASE.  
EJEMPLOS DE APLICACION A SISTEMAS DE POTENCIA.

### 5.1. DETERMINACION DE LAS CONEXIONES DE REDES DE SECUENCIA PARA FALLAS SIMULTANEAS EN UN MISMO PUNTO DEL SISTEMA.

Cuando una falla simultánea de doble contingencia ocurre en un mismo punto del sistema, puede analizársela como una falla en dos puntos de ese sistema cuando uno de ellos tiende al otro.

Por tanto, la teoría desarrollada en el capítulo anterior nos sirve para implementar los modelos para estos tipos de falla, realizando en ellos las consideraciones pertinentes a cada disturbio. Así por ejemplo, si ocurre una falla de línea a tierra en la fase A, en el lado izquierdo del punto F; y esa misma fase se abre en el lado derecho de aquél, podemos hacer uso de una conexión serie-paralelo desarrollada en el capítulo anterior haciendo tender el punto de falla B hacia el punto de falla A (figura 42), teniendo en cuenta que la simetría de ambas contingencias está en términos de la fase A.

En otras palabras, tenemos que cortocircuitar los puntos  $F_1$  y

$F_2$  en las redes de secuencia de dos puertas para la conexión serie-paralelo.

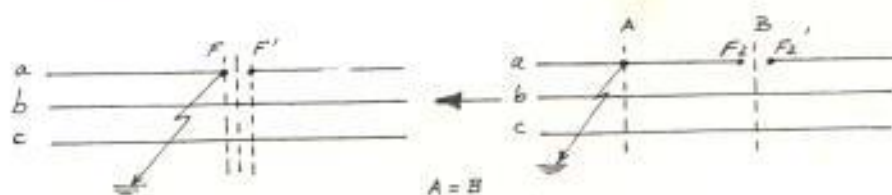


Fig 42. Diagrama usado para ejemplificar la forma de determinar la conexión de redes de secuencia.

## 5.2. TIPOS DE FALLAS SIMULTANEAS EN UN MISMO PUNTO DEL SISTEMA

Las posibles fallas que puedan ocurrir simultáneamente en el mismo punto de un sistema de potencia se detallan a continuación; y los tipos de conexiones requeridas para modelar la falla se analizarán en cada caso:

### 5.2.1. FALLA TRIFASICA DESBALANCEADA GENERALIZADA MAS FALLA DE UNA FASE ABIERTA.

Este disturbio se soluciona con la conexión trifásica-paralelo, considerando la respectiva simetría de cada falla a cada lado de las puertas de las redes de secuencia y cortocircuitando los puntos  $F_1$  y  $F_2$  según la figura 43.

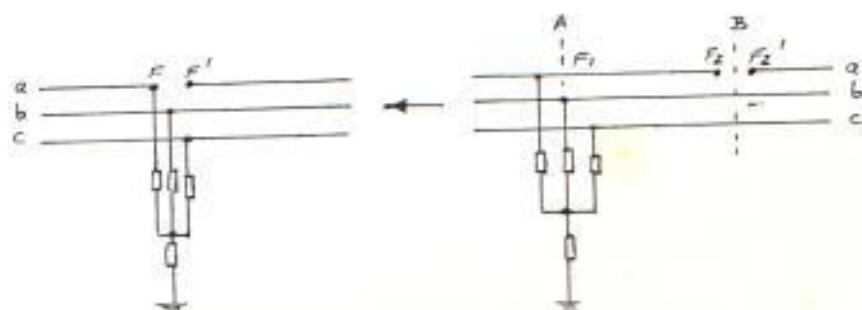


Fig 43. Determinación del modelo para una falla trifásica más una línea abierta.

### 5.2.2. FALLA TRIFÁSICA DESBALANCEADA GENERALIZADA MAS FALLA DE DOS FASES ABIERTAS.

En este caso, usaremos la conexión trifásica-serie, incorporando la restricción de simetría de cada falla en los transformadores desfasadores y superponiendo  $F_1$  con  $F_2$  (fig 44).

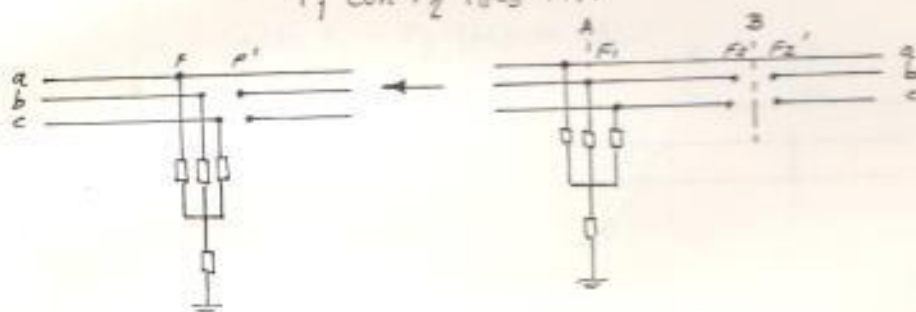


Fig 44. Determinación del modelo matemático para una falla trifásica más dos líneas abiertas.

### 5.2.3. FALLA GENERALIZADA DE UNA FASE A TIERRA MAS FALLA DE UNA FASE ABIERTA.

Esta alternativa adquiere una conexión serie-paralelo, con las consideraciones de simetría de cada disturbio y mediante la unión de los puntos  $F_1$  y  $F_2$  (figura 45).



Fig 45. Determinación del modelo matemático para una falla monofásica a tierra más una fase abierta.

#### 5.2.4. FALLA GENERALIZADA DE UNA FASE A TIERRA MAS FALLA DE FASE A FASE.

Esta posibilidad sugiere el uso de la conexión serie paralelo, con las consideraciones de simetría de cada contingencia y la unión  $F_1 - F_2$  (figura 46).

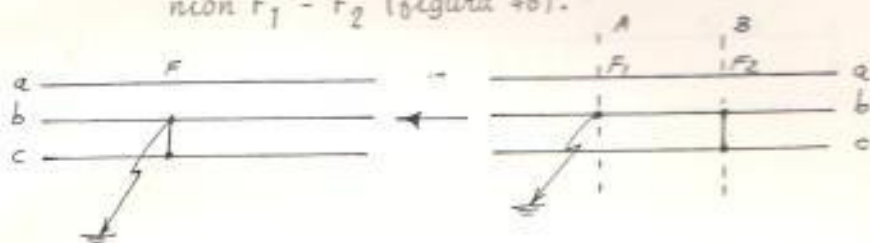


Fig 46. Determinación del modelo matemático para una falla monofásica a tierra más una falla de línea a línea.

#### 5.2.5. FALLA GENERALIZADA DE UNA FASE A TIERRA MAS FALLA DE DOS FASES ABIERTAS.

En este caso utilizaremos la conexión serie-serie, considerando la simetría y unión  $F_1$  y  $F_2$  según la figura 47.



Fig 47. Determinación del modelo matemático para una falla de una línea a tierra y dos fases abiertas.

#### 5.2.6. FALLA GENERALIZADA DE DOS FASES A TIERRA MAS FALLA DE UNA FASE ABIERTA.

Esta alternativa involucra una conexión paralelo-paralelo analizando la simetría de cada disturbio, uniendo los puntos  $F_1$  y  $F_2$  en las redes de secuencia de puercas (figura 48).

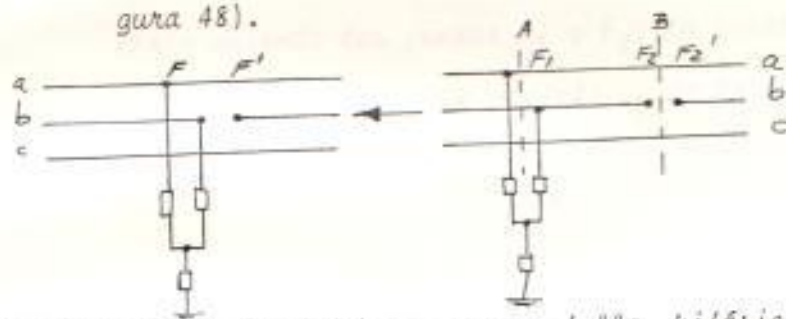


Fig 48. Determinación del modelo matemático para una falla bifásica a tierra y una fase abierta.

#### 5.2.7. FALLA GENERALIZADA DE DOS FASES A TIERRA MAS FALLA DE DOS FASES ABIERTAS.



Esta posibilidad viene acompañada de la conexión paralelo-serie, con la simetría correspondiente y la conexión  $F_1 - F_2$  en las redes de secuencia del sistema tal como se muestra en la figura 49.

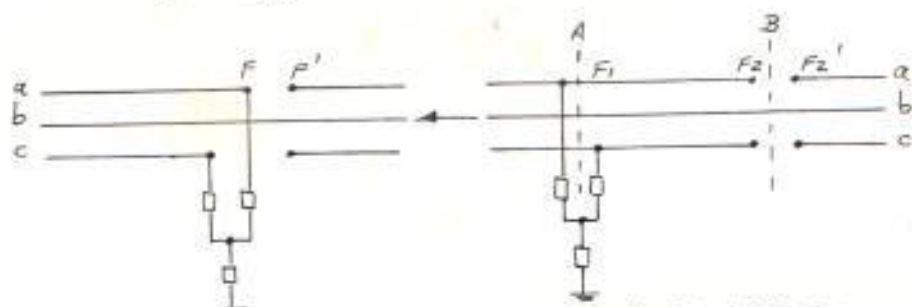


Fig 49. Determinación del modelo matemático para una falla bifásica a tierra y dos fases abiertas.

#### 5.2.8. FALLA GENERALIZADA DE FASE A FASE MAS FALLA DE UNA FASE ABIERTA.

Observando la simetría relacionada con la falla y uniendo los puntos  $F_1$  y  $F_2$ , la conexión deseada es la paralelo-paralelo según la figura 50.

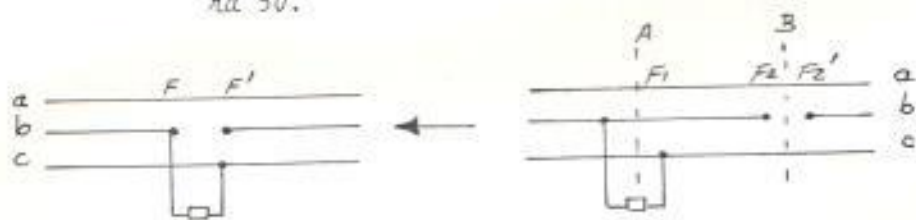


Fig 50. Determinación del modelo matemático para una falla de fase a fase y una fase abierta.

### 5.2.9. FALLA GENERALIZADA DE FASE A FASE MAS FALLA DE DOS FASES ABIERTAS.

Este tipo de falla puede solucionarse mediante la conexión paralelo-serie con las consideraciones de simetría de cada contingencia y la unión  $F_1-F_2$  en las redes de secuencia de acuerdo a la figura 51.

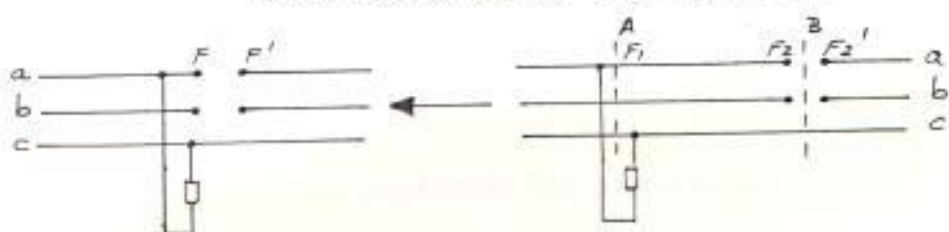


Fig 51. Determinación del modelo matemático para una falla de fase a fase y dos fases abiertas.

### 5.2.10. FALLA GENERALIZADA DE TRES FASES ABIERTAS

Una manera de analizar esta falla es considerarla como un disturbio simultáneo de una fase abierta y dos fases abiertas en el mismo punto, para lo cual necesitamos la conexión paralelo-serie con las respectivas simetrías para cada falla y la unión de  $F_1$  con  $F_2$  y  $F_1'$  con  $F_2'$  (figura 52).

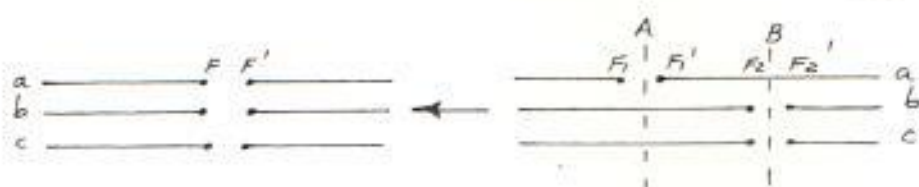


Fig 52. Determinación del modelo matemático para una falla de tres fases abiertas.

#### 5.2.11. DIEZ FALLAS ADICIONALES DEBIDAS A CAMBIOS EN LA UBICACION DE LOS DISTURBIOS.

En las secciones 5.2.1. hasta 5.2.10 se han analizado los posibles disturbios, los mismos que en su mayoría tienen en la puerta izquierda una falla tipo para lelo; y en la puerta derecha, una falla serie, con el punto de la puerta derecha tendiendo al punto de la puerta izquierda.

Sin embargo, puede ocurrir que la falla de la puerta izquierda sea serie y no para lelo lo que convertirá a la conexión paralelo-serie en una serie-paralelo, estableciéndose diez posibilidades adicionales de fallas simultáneas, las que podrán resolverse con las mismas conexiones estipuladas en las secciones 5.2.1.

5.2.10. , pero intercambiando el nombre de cada puerta y cortocircuitando los puntos de falla adecuados.

Estos no necesariamente son iguales a los cortocircuitados en los casos uno al diez de esas secciones. Esto se ilustra en el siguiente ejemplo: supongamos que ocurre una falla simultánea de una fase a tierra y de una fase abierta con la misma simetría para las contingencias, lo cual se representa en la figura 53 (a) en donde se deben conectar los puntos  $F_1$  y  $F_2$  en las redes de secuencia con parámetros de dos puertas .

Si ahora ocurre una falla de una fase abierta y una fase a tierra, la conexión en vez de ser serie-paralelo como antes, se rá paralelo-serie y los puntos a cortocuitar ahora son  $F_1'$  y  $F_2$  según la figura 53 (d).

Cabe anotar además, que si la conexión se rie-paralelo quiere usarse para solucionar ambos tipos de fallas, mediante el intercambio de los nombres a las puertas de

secuencia, los puntos a conectar serán  $F_2'$  y  $F_1$ , como en el esquema de la figura 53(e).

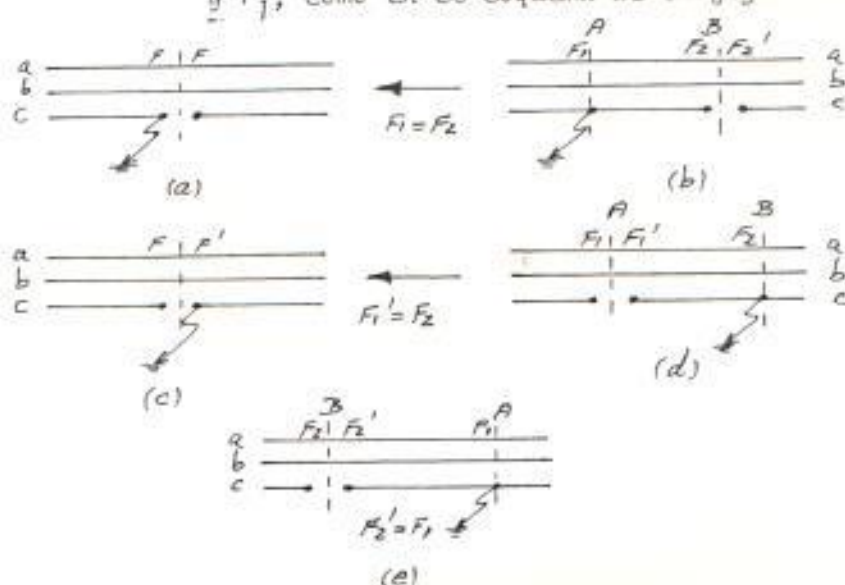


Fig 53. Diagramas usados para explicar cuales son los puntos de unión durante una falla simultánea.

En la tabla XII . se muestra un resumen de las posibles combinaciones de fallas simultáneas de doble contingencia con simetría en términos de la fase A.

En ella se nota que ciertas combinaciones dan como resultados disturbios ya estudiados en capítulos anteriores (por ejemplo , la combinación de una falla monofásica a tierra más una de dos fases a tierra con simetría en términos de la fase A, conforman una falla trifásica a tierra).

Según la tabla XII . existen diez y seis posibles nuevos tipos de contingencias - simultáneas, pero como cada una puede ocurrir tanto en el punto A, como en el B, con simetría en términos de cualquier fase, observamos que el número total de posibles combinaciones es considerable. Todas estas alternativas pueden resolverse mediante las técnicas expuestas en este y otros capítulos de esta obra.



## 5.3. EJEMPLOS DE APLICACION A SISTEMAS DE POTENCIA

## PROBLEMA #1.

Aplicación a una falla trifásica a tierra desbalanceada

En la figura 54, todos los datos de reactancia están en una base de 100 MVA, referidos a sus voltajes nominales. Desprecie las corrientes de pre-falla y encuentre la corriente de falla para un disturbio trifásico a tierra desbalanceado en el punto F.

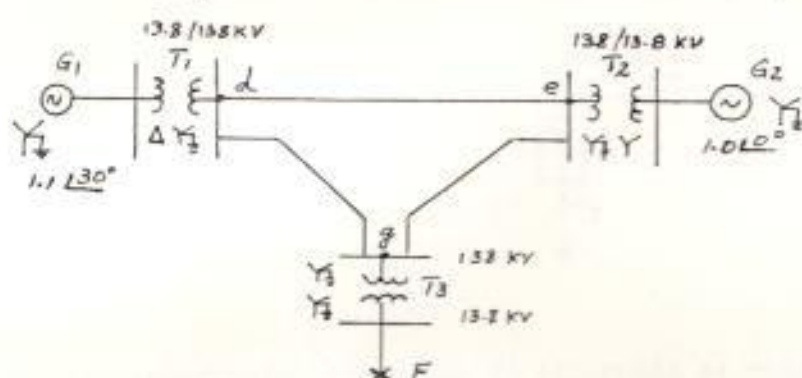


Fig 54. Diagrama del sistema de potencia usado para el problema 1.

donde:

	$X^+$ [%]	$X^-$ [%]	$X^0$ [%]
$G_1$	40	40	10
$G_2$	40	40	10
L/T de	50	50	200

y además...



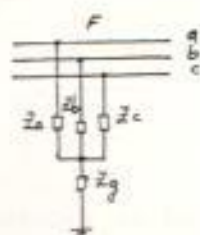
	$X^+$	$X^-$	$X^0$
L/T dg	30	30	100
L/T eg	30	30	100
$T_1$	20	20	20
$T_2$	20	20	20
$T_3$	15	15	15

Con:

$$Z_a = Z_c = j5 \text{ ohms}$$

$$Z_b = j10 \text{ ohms}$$

$$Z_g = j4 \text{ ohms}$$



Solución:

Los correspondientes circuitos de secuencia se muestran en la figura 55, los que una vez manipulados matemáticamente se convierten en los de la figura 56, para en última instancia obtener el esquema de puerta de la figura 57, en donde:

$$Z_0 = 0.4 + 0.7 = 1.1 \text{ p.u.}$$

$$Z_1 = Z_2 = (0.736 \parallel 0.736) + 0.232 = 0.60 \text{ pu}$$

$$E = 1.1 \angle 30^\circ - \left( \frac{1.1 \angle 30^\circ - 1}{2j(0.736)} \right) (j0.736) = 1.014 \angle 15.73^\circ \text{ pu}$$

De acuerdo al problema la simetría de la falla está en términos de la fase B, por tanto  $n_0 = 1$ ;  $n_1 = a^2$ ;  $n_2 = a$ .

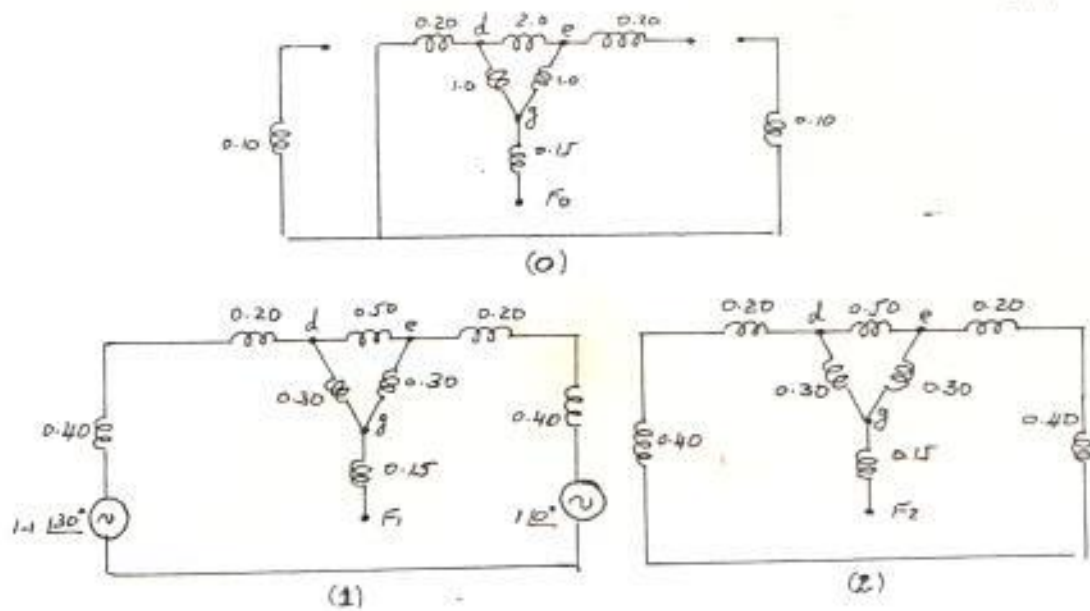


Fig 55. Circuitos de secuencia para el problema uno.

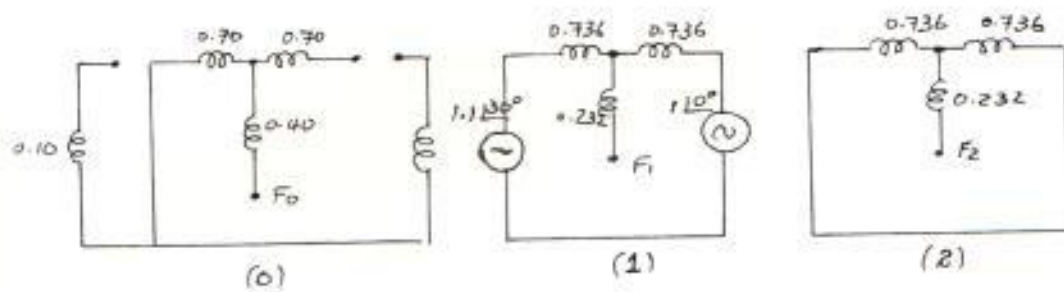


Fig 56. Reducción de los circuitos de secuencia de la figura 55.

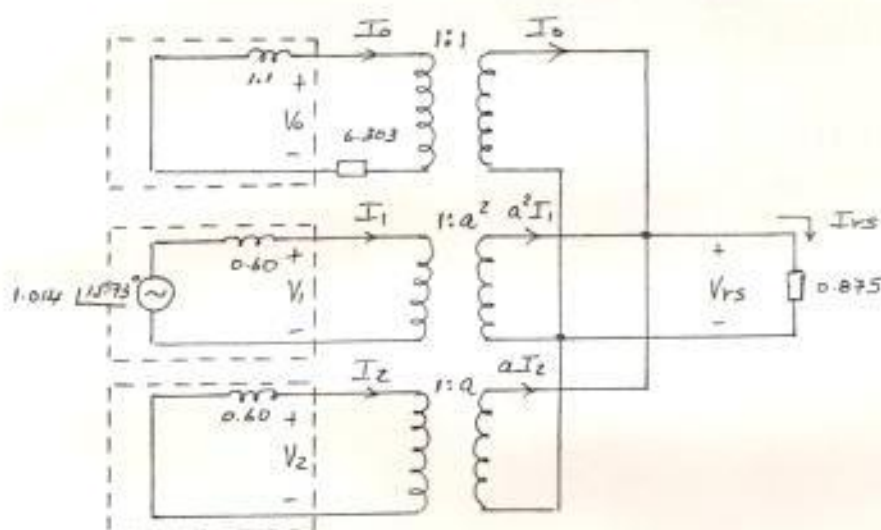


Fig 57. Diagrama de puerta para la falla del problema uno.

Ademas:  $Z_B = (13.8)^2 / 100 = 1.904$  ohms

$$\frac{1/3 (Z_n - Z_\Delta)}{Z_B} = \frac{1/3(5)}{1.904} = 0.875 \text{ pu}$$

$$3Z_g / Z_B = \frac{12}{1.904} = 6.303 \text{ pu}$$

De aquí que:

$$y_{0g} = 1(1.1 + 6.303) = 0.135 \text{ pu}$$

$$y_1 = y_2 = 1/0.6 = 1.667 \text{ pu}$$

$$y_{rs} = 1/0.875 = 1.143 \text{ pu}$$

y como:

$$V_{0g} = n_1 V_1 = n_2 V_2 = V_{rs} = \frac{n_1 E y_1}{y_{0g} + y_1 + y_2 + y_{rs}}$$

Reemplazando obtenemos:

$$V_{rs} = 0.367 \angle 255.73^\circ \text{ pu}$$

y ya que:

$$I_6 = -3V_{0g} y_{0g} = 0.149 \angle -14.27^\circ \text{ pu}$$

y como:

$$I_B = \frac{\text{MVA}}{\sqrt{3} \text{ KV}} = 4.184 \text{ KA}; \text{ tenemos: } I_6 = 623.37 \text{ A}$$

## Problema N° 2.

Aplicación de los cambios de simetría

En el sistema de la figura 58., ocurre un cortocircuito de una fase a tierra en la fase C. de la barra E. Encuentre: a) La corriente de falla; y b) la corriente de la línea de transmisión cuatro, si los voltajes internos de los generadores A y B son  $1.05 \angle 30^\circ$  y  $1.05$  pu respectivamente. Asuma despreciables las resistencias, y trabaje con las reactancias según la tabla a continuación:

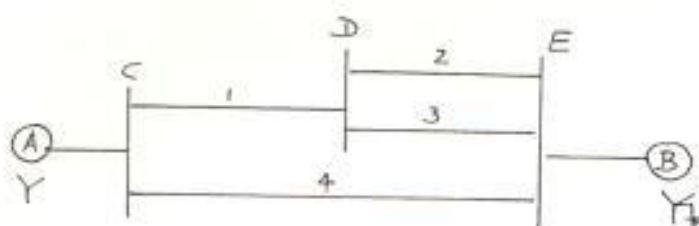


Fig #58. Sistema de potencia del problema dos.

	$X(+)$ (%)	$X(-)$ (%)	$X(0)$ (%)
A	25	15	3
B	20	12	2
1	8	8	14
2	6	6	10
3	6	6	12
4	13	13	17

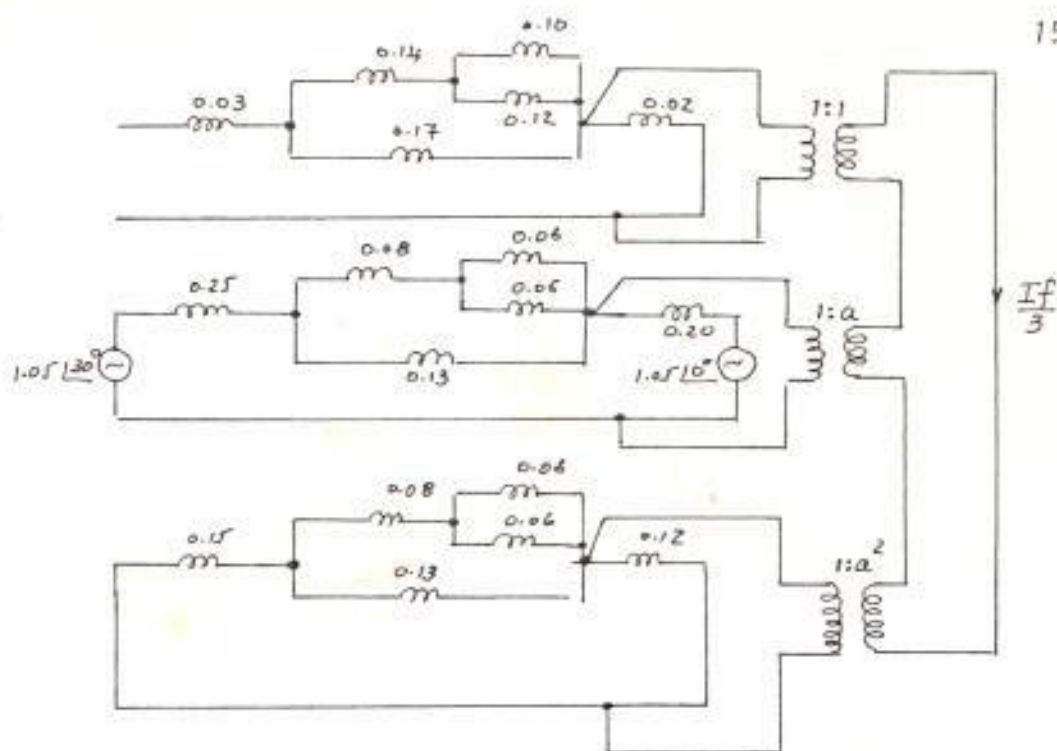


Fig 59. Circuitos de secuencia interconectados para el problema dos.

Solución:

Debido a que la falla es simétrica con respecto a la fase C, los desfases usados son los que junto a las reactancias del sistema y el circuito equivalente, se muestran en la figura 59. Hallando los circuitos equivalentes de Thevenin, para cada red de secuencia, se obtiene la figura 60, de donde:

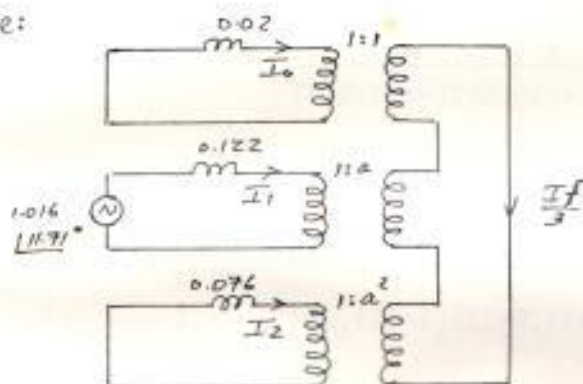


Fig 60. Reducción de los circuitos de secuencia de la figura 59.

$$a) I_6 = \frac{3 aE}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + \cancel{3I_6}}$$

con lo que reemplazando:

$$I_6 = 14.58 / \underline{41.71^\circ} \text{ pu.}$$

b) De la figura 60 tenemos:

$$I_0 = \frac{I_6}{3} = 4.86 / \underline{41.71^\circ} \text{ pu.}$$

$$I_1 = I_0/a = 4.86 / \underline{-78.29^\circ} \text{ pu.}$$

$$I_2 = I_0/a^2 = 4.86 / \underline{-198.29^\circ} \text{ pu}$$

De la figura 59 para la línea de transmisión cuatro tenemos:

$$I_4(0) = 0$$

$$I_4(1) = \frac{(1/0.13) I_1}{(1/0.13) + (2/0.06) + (1/0.20)} = 0.812 / \underline{-78.29^\circ} \text{ pu}$$

$$I_4(2) = \frac{(1/0.13) I_2}{(1/0.13) + (2/0.06) + (1/0.12)} = 0.757 / \underline{-198.29^\circ} \text{ pu}$$

luego, la corriente en la línea de transmisión cuatro es:

$$I_4 = I_4(0) + I_4(1) + I_4(2) = 0.786 / \underline{-134.81^\circ} \text{ pu.}$$

## Problema N° 3.

Aplicación a una falla simultánea en diferentes puntos de un sistema.

En el sistema de la figura 61 ocurre una falla simultánea en F (líneas a y b abiertas y F' (fase b a tierra). Asumiendo que los voltajes internos de los generadores L y R son  $1.1/\underline{30^\circ}$  y  $1.0$  pu respectivamente y tomando los valores de la tabla que a continuación se muestra, encuentre las corrientes y voltajes en el disyuntor B.

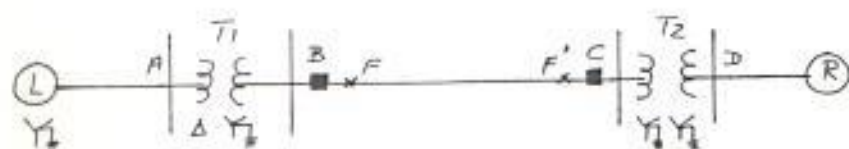


Fig. 61 Sistema de potencia del problema tres.

	$X(+)$ (%)	$X(-)$ (%)	$X(0)$ (%)
L	12	12	10
R	15	15	13
$T_1$	10	10	10
$T_2$	12	12	12
L/T	50	50	100

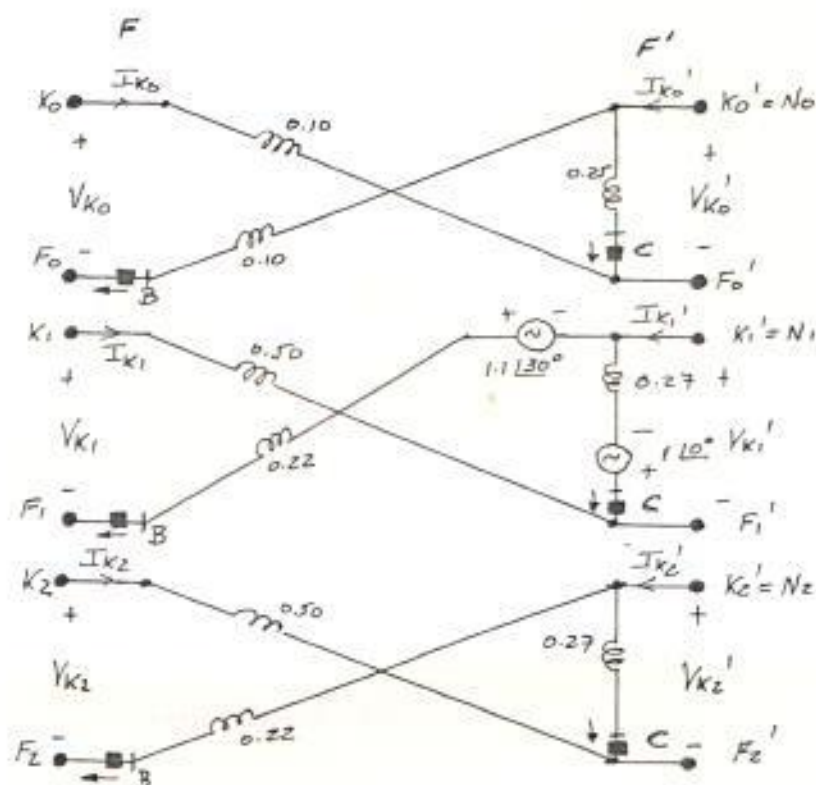


Fig 62. Circuitos de secuencias para el problema tres.

Solución:

Esta falla requiere de una conexión serie, con el circuito equivalente de redes de secuencia de la figura 62, de la cual obtenemos los parámetros de secuencia de dos puertas:

$$\begin{vmatrix} V_{k0} \\ V_{k0'} \end{vmatrix} = j \begin{vmatrix} 1.35 & -0.25 \\ -0.25 & 0.25 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_{k0} \\ I_{k0'} \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} V_{k1} \\ V_{k1'} \end{vmatrix} = j \begin{vmatrix} 0.99 & -0.27 \\ -0.27 & 0.27 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_{k1} \\ I_{k1'} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0.047 - j0.55 \\ -1 \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} V_{k2} \\ V_{k2'} \end{vmatrix} = j \begin{vmatrix} 0.99 & -0.27 \\ -0.27 & 0.27 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_{k2} \\ I_{k2'} \end{vmatrix}$$



Además:

Para falla en F:  $n_0 = 1$ ;  $n_1 = a$ ;  $n_2 = a^2$

Para falla en F':  $n_0 = 1$ ;  $n_1 = a^2$ ;  $n_2 = a$

De aquí que:

$$Z = j \begin{vmatrix} 3.33 & 0.02 \\ 0.02 & 0.79 \end{vmatrix}$$

Con lo que según la ecuación (4.11):

$$\begin{vmatrix} I_1 \\ I_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.1589 / \underline{123.76^\circ} \\ 1.2622 / \underline{150.08^\circ} \end{vmatrix}$$

Además:

$$\begin{vmatrix} I_1 \\ I_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} I_{10} \\ I_{20} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} I_{11} \\ I_{21} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} I_{12} \\ I_{22} \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} I_{k0} \\ I_{k0}' \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} I_1 \\ I_2 \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} I_{k1} \\ I_{k1}' \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a^2 I_1 \\ a I_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.1589 / \underline{3.76^\circ} \\ 1.262 / \underline{270.08^\circ} \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} I_{k2} \\ I_{k2'} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} aI_1 \\ a^2I_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.1589 / 243.76^\circ \\ 1.262 / 30.08^\circ \end{vmatrix}$$

Por lo tanto, las corrientes en el disyuntor B serán:

$$I_{a0} = I_{k0} = 0.1615 / \underline{123.75^\circ}$$

$$I_{a1} = I_{k1} = a^2 I_{a0}$$

$$I_{a2} = I_{k2} = a I_{a0}$$

y así:

$$I_a = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = 0$$

$$I_b = I_{a0} + a^2 I_{a1} + a I_{a2} = 0$$

$$I_c = 3I_{a0} = 0.477 / \underline{123.76^\circ} \text{ pu.}$$

y sus voltajes:

$$V_{a0} = -j0.10(I_{k0}) = 0.0134 + j0.00897$$

$$V_{a1} = 1.1 / \underline{30^\circ} - j0.22(I_{k1}) = 0.954 + j0.514$$

$$V_{a2} = -j0.22(I_{k2}) = -0.0381 + j0.0157 \quad ; \quad \text{con lo que:}$$

$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = \underline{1.08 / 29.9^\circ} \quad \text{pu}$$

$$V_b = V_{a0} + a^2 V_{a1} + a V_{a2} = \underline{1.11 / 269.1^\circ} \quad \text{pu}$$

$$V_c = V_{a0} + a V_{a1} + a^2 V_{a2} = \underline{1.06 / 145.8^\circ} \quad \text{pu}$$

## Problema # 4.

Aplicación a una falla simultánea en el mismo punto de un sistema.

En la figura 63. los valores de reactancia están dados por unidad. El sistema presenta una falla simultánea de una fase a tierra y de una fase abierta en la fase A de la barra S. Asumiendo despreciables las corrientes de pre-falla encuentre la distribución de las corrientes de post-falla.

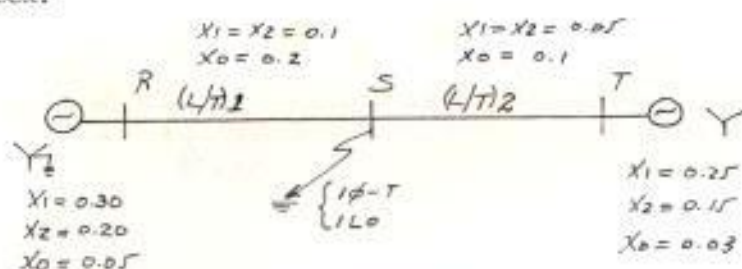


Fig.63. Sistema de potencia del problema cuatro.

## Solución:

Las figuras 64. y 65. muestran los circuitos de secuencia y los circuitos de puerta respectivamente utilizados para resolver este problema. De dichas figuras y mediante una manipulación matemática obtenemos la matrices H de parámetros de puerta:

$$H^+ = \begin{vmatrix} 0,1714 & 0,5714 \\ -0,5714 & 1,4285 \end{vmatrix}; \quad H^- = \begin{vmatrix} 0,12 & 0,6 \\ -0,6 & 2 \end{vmatrix}$$

$$H^0 = \begin{vmatrix} 0,25 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}; \quad M_h = \begin{vmatrix} V_{h1} \\ I_{h2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -1,4 \\ 0 \end{vmatrix}$$

y con:  $n_{1k} = n_{1k}' = 1$ , tenemos:

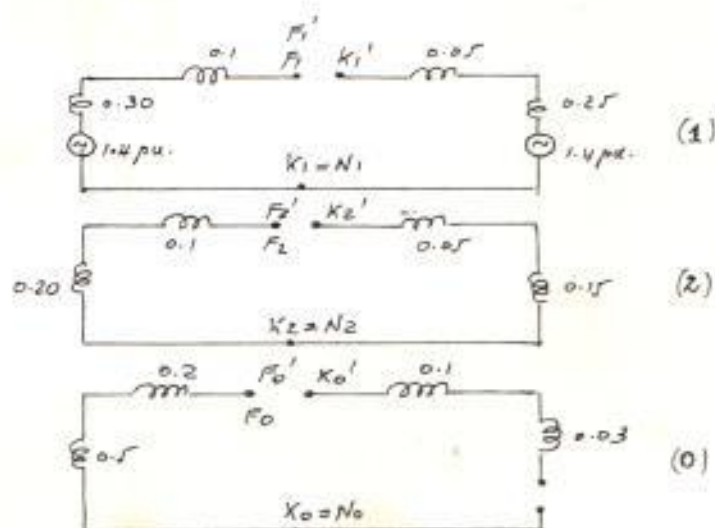


Fig. 64. Circuitos de secuencia para el problema cuatro.

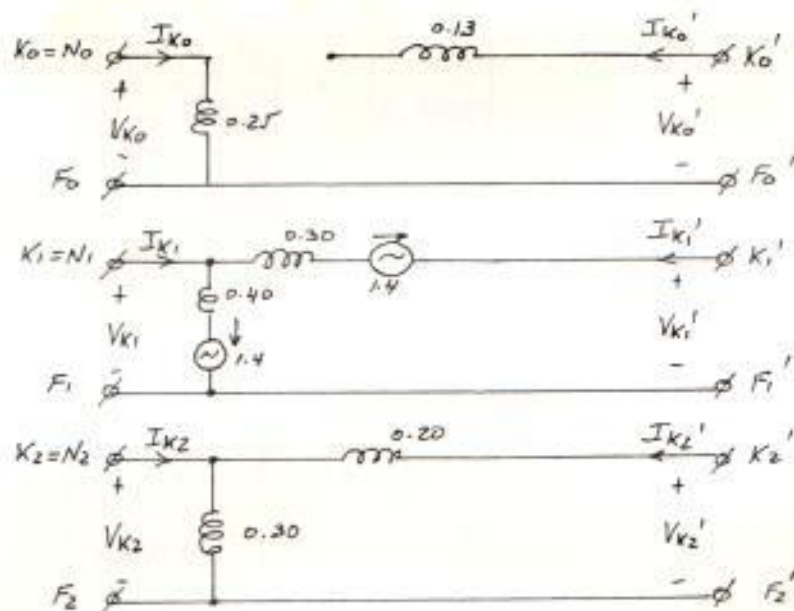


Fig. 65. Circuitos de secuencia de puercas para el problema cuatro.

$$H = \begin{vmatrix} 0.5414 & 1.1714 \\ -1.1714 & 3.4285 \end{vmatrix}$$

Aplicando la ecuación matricial  $N = -H^{-1}M_H$  de la sección 4.1.3.

y con la condición [4.22] de esa sección tenemos:

$$I_1 = 1.4868$$

$$V_2 = 0.5080$$

y como:

$$\begin{bmatrix} I_{k0} \\ V_{k0}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{10} \\ V_{20} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.4868 \\ 0.5080 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_{k1} \\ V_{k1}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{11} \\ V_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.4868 \\ 0.5080 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_{k2} \\ V_{k2}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{12} \\ V_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.4868 \\ 0.5080 \end{bmatrix}$$

tenemos:

$$\begin{bmatrix} V_{k0} \\ I_{k0}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.25 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{k0} \\ V_{k0}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.3717 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_{k1} \\ I_{k1}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1714 & 0.5714 \\ -0.5714 & 1.4285 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{k1} \\ V_{k1}' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1.4 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.8549 \\ -0.1239 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_{k2} \\ I_{k2}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.12 & 0.6 \\ -0.6 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{k2} \\ V_{k2}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4832 \\ 0.1239 \end{bmatrix}$$

De aquí que la corriente de falla en la línea de transmisión uno es:

$$I_{f1} = (I_{k0} + I_{k0}') + (I_{k1} + I_{k1}') + (I_{k2} + I_{k2}') = 4.46 \text{ pu}$$

La corriente en la línea de transmisión dos será:

$$I_{L/t2} = I_{k0}' + I_{k1}' + I_{k2}' = 0$$

En las figuras 66. y 67. se esquematizan las corrientes de secuencia en el sistema y las corrientes reales del mismo respectivamente.

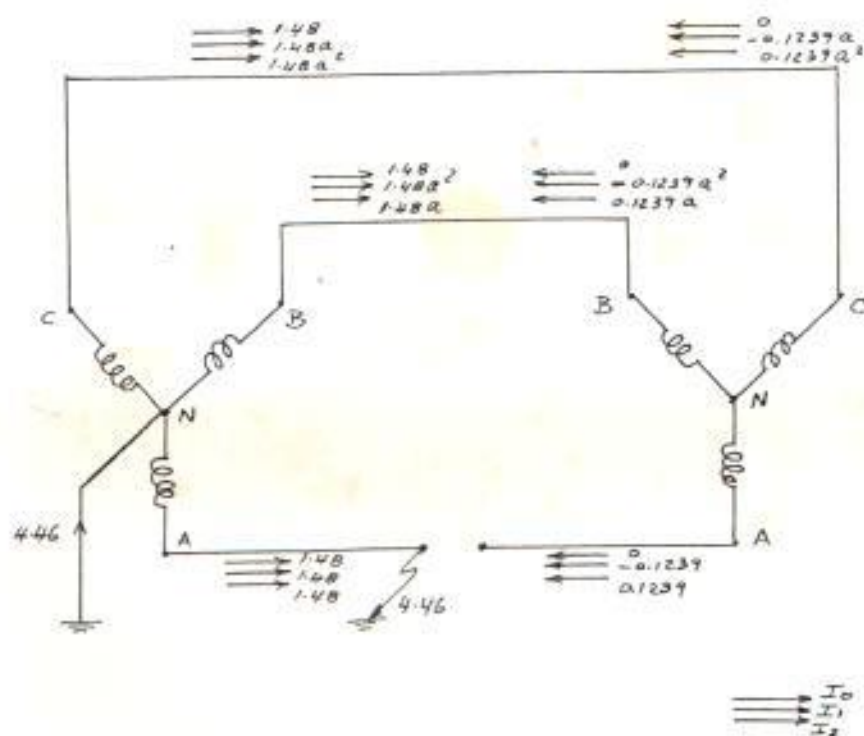


Fig 66. Diagrama esquemático de las corrientes de secuencia del sistema.

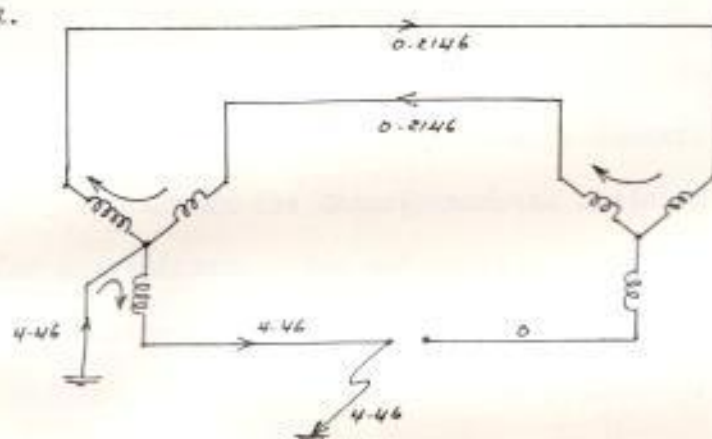


Fig 67. Diagrama esquemático de la distribución de corrientes reales del sistema del problema cuatro.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La presente tesis ha tenido por objetivo presentar un método de análisis de falla general basado en el desarrollo de modelos matemáticos equivalentes, de fallas eléctricas de simple o doble contingencia en el mismo o en distintos puntos de un sistema de potencia, complementando y eliminando las dificultades y limitaciones de las técnicas clásicas.

En opinión del autor, la mayor contribución del trabajo, estriba en la simplicidad, generalidad y aplicabilidad de los modelos matemáticos establecidos. Son simples, por la facilidad con que el lector se familiariza con ellos, para analizarlos, aplicarlos y de desearlos memorizarlos con mayor rapidéz. Generales, porque cualquiera de ellos puede solucionar no solo fallas eléctricas comúnmente conocidas sino también otras poco usuales, únicamente manipulando los valores de las impedancias y seleccionando adecuadamente las relaciones de transformación de los transformadores desfasadores del modelo matemático generalizado. Son aplicables, por su funcionalidad ante diversas condiciones impuestas por el sistema, pudiendo analizarse muchas situaciones con solo cambiar los parámetros del modelo.

La elaboración de modelos que representan los tipos de fallas aquí estudiados tiene su justificación, porque son una poderosa herramienta de análisis del comportamiento de los cada vez más complicados sistemas de potencia y su mayor tendencia a la operabilidad en condiciones desbalanceada como resultado del aumento en el número de dispositivos monofásicos y de reconexión automática instalados. - como un medio para mejorar la estabilidad del sistema.

Además, tiene una justificación técnica porque no son pocos los sistemas de protección que responden satisfactoriamente para simples contingencias, pero operan inadecuadamente frente a fallas poco usuales, complejas o simultáneas.

El análisis de sistemas, basado en los modelos aquí desarrollados, permiten conocer con mayor exactitud los parámetros eléctricos ante los cuales los disyuntores deben reaccionar para mejorar la coordinación y operabilidad del sistema.

Posee una justificación económica y de confiabilidad, porque el mal funcionamiento del sistema de protección, resultado de un estudio poco objetivo, práctico y exacto, puede producir aumento en las pérdidas de potencia, al tener que transmitir la energía por otras líneas de transmisión por ejemplo, disminución del ingreso económico de la Empresa como consecuencia de la inminente -



caída en las ventas de energía, sino se tiene como llegar con la energía a los centros de consumo por otros canales, y un mal servicio al consumidor, traducido como disturbios en el voltaje, frecuencia o ambos.

El estudio de fallas simultáneas es una herramienta muy deseable que debería ser aprovechada particularmente para mejorar el análisis de los circuitos de distribución y para muchas situaciones tales como las que requieran adecuada exactitud. Esto incluye el tratamiento de la resistencia, ya que en tales circuitos, esta puede ser del orden de la reactancia. Es un método efectivo para usarlo en los campos de diseño de sistemas, diseño de dispositivos de protección y análisis de estabilidad.

Por último, cabe hacer algunas recomendaciones en lo concerniente al trabajo realizado. El desarrollo de esta tesis implica un sentido práctico, al considerar el estudio de sólo dos fallas que puedan ocurrir simultáneamente en puntos remotos del sistema. Esta es una limitación práctica porque la probabilidad conjunta de tal disturbio es extremadamente pequeña, si consideramos que se calcula como el producto de las probabilidades de cada uno de los eventos en particular. Sin embargo, si por algún motivo, deban realizarse estudios sobre el comportamiento del sistema cuando está sometido a más de dos disturbios simultáneos puede recurrirse al desarrollo de modelos matemáticos generalizados basados en la teoría de redes multipuertas. Las fallas pueden ser cualquier combinación de disturbios balanceados y

desbalanceados pudiendo ocurrir en cualquier fase un lugar de la red. Las tres redes de secuencia son manipuladas por separado para luego producir su interconexión mediante el uso de la matriz puerta-falla. El tamaño de ésta depende del número de fallas simultáneas, lo que hace eficiente su manipulación si consideramos que generalmente no es una matriz de orden alto.

Es práctica normal que en estudios de cortocircuito se desprece la resistencia, lo cual genera resultados suficientemente exactos y conservativos en medios y altos voltajes. Sin embargo, para muchos cálculos en baja tensión, la resistencia no debería ignorarse ya que produciría resultados muy conservadores, lo que conduciría a una sobredimensión de los equipos de protección, con el consecuente e innecesario aumento en el costo de la instalación.

Un tópico que merece ser tomado en consideración, es la existencia de otros métodos de análisis de fallas que como todo, tienen sus ventajas y desventajas. Por ejemplo, el uso de componentes RST implica una resolución más fácil para ciertos disturbios en detrimento de otros, incluyendo en los modelos equivalentes, transformadores con relación de transformación numéricamente exacta. En los actuales momentos existen otros tantos métodos como los que usan las componentes de Clarke, Concordia, Kimbark, etc, cada uno de los cuales tiene sus ventajas y desventajas con respecto a los otros. Sin embargo, en opinión del autor, las componentes simétricas poseen la gran ventaja de que manipuladas adecuada y conjuntamente con la teoría de puertas múltiples hacen extensibles los mismos conceptos a la solución de proble-

mas más complejos .

El criterio para evaluar la eficiencia de un método de análisis de falla puede ser diferente para diferentes aplicaciones . Por ejemplo , un método muy eficiente para un análisis exhaustivo puede no ser el mejor para un análisis superficial. Algunos métodos son eficientes para fallas comúnmente estudiadas, pero no pueden resolver fallas inusuales o simultáneas. Un método ideal no debería tener tales restricciones.

## BIBLIOGRAFIA

1. PAUL ANDERSON. ANALYSIS OF FAULTED POWER SYSTEMS. THE IOWA STATE UNIVERSITY PRESS. 1973.
2. G.I. ATABEKOV. THE RELAY PROTECTION OF HIGH VOLTAGE NETWORK. PER GAMON PRESS. LONDON. 1960.
3. N. BALABANIAN AND T.A. BICKART. ELECTRIC NETWORK THEORY. JOHN WILEY & SONS. NEW YORK, 1969.
4. H.E. BROWN. SOLUTION OF LARGE NETWORKS BY MATRIX METHODS. JOHN WILEY & SONS., INC., 1975.
5. OLLE ELGERD. ELECTRIC ENERGY SYSTEMS THEORY. MC. GRAW HILL, 1970.
6. ENRIQUEZ HARPER. ANALISIS MODERNO DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA. EDITORIAL LIMUSA. MEXICO. 1977.
7. A.E. GUILLE AND. W. PATERSON. ELECTRICAL POWER SYSTEMS. VOL I. 2ND. EDITION, 1977.
8. IEEE. VOL PASS. 89 N° 6 1970. SHORT CIRCUIT CALCULATION FOR MULTILINE SWITCHING AND END FAULT. pp. 1226-1237.

9. IEEE. TRANSACTIONS ON POWER APPARATUS AND SYSTEMS. JAN/FEB. 1971  
ANALYSIS OF SIMULTANEOUS FAULTS BY TWO-PORT NETWORK THEORY.  
p.p. 2199-2205.
10. IEEE. TRANSACTIONS ON POWER APPARATUS AND SYSTEMS. MAR/ABR.1972  
ANALYSIS OF POWER SYSTEMS FAULT BY PHASE IMPEDANCE MATRIZ METHOD:  
ANALYSIS OF GENERAL FAULTS, PART I AND II. p.p. 592-610.
11. IEEE. TRANSACTIONS ON POWER APPARATUS AND SYSTEMS. VOL PASS-94  
Nº 6. NOV/DIC. 1975. ADVANCED POWER SYSTEMS FAULT ANALYSIS ME-  
THOD. p.p. 2141-2150.
12. IEEE. TRANSACTIONS ON POWER APPARATUS AND SYSTEMS. VOL PASS-101  
Nº 10, OCT 1982. GENERALIZED METHOD OF ANALYSIS OF SIMULTANEOUS  
FAULTS IN ELECTRIC POWER SYSTEMS. p.p. 3933-3942.
13. IEEE. TRANSACTIONS ON POWER APPARATUS AND SYSTEMS. VOL PASS-104  
Nº 6, JUN 1985. GENERALIZED METHOD OF FAULT ANALYSIS. pp. 1301-  
1306.
14. H. RISSIK. THE CALCULATION OF UNSYMETRICAL SHORT CIRCUITS. SECOND  
EDITION. LONDON, 1952.
15. STAGG-ELABIAD. COMPUTER METHODS IN POWER SYSTEMS ANALYSIS. MC.  
GRAW HILL, 1968.

16. W.D. STEVENSON. ANALISIS DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA. EDITORIAL MC. GRAW HILL LATINOAMERICA S.A. BOGOTA. 1979.
17. WAGNER C.F. AND EVANS R.D. SYMETRICAL COMPONENTS, MC. GRAW HILL. NEW YORK, 1961.
18. B.W. WEEDY. ELECTRIC POWER SYSTEMS, JOHN WILY&SONS LTD. NEW YORK. 1979.