

Fallas en los sistemas eléctricos de potencia

Contenido

1. Análisis de falla.
2. Tipos de falla.
3. Corriente de falla.
4. Cálculo de corrientes de cortocircuitos trifásicos.
5. Componentes simétricas.
6. Cálculo de fallas desbalanceadas.

Análisis de fallas

Análisis de fallas (1)

- Es una parte esencial del diseño del sistema de potencia:
 - El cálculo de las corrientes que fluyen en los componentes cuando ocurren varios tipos de fallas.
 - La magnitud de las corrientes de fallas son necesarias para determinar el ajuste de corriente para la protección y la capacidad nominal de los interruptores.

Análisis de fallas (2)

- Se dice que una falla ocurre cuando anormalmente fluye corrientes elevadas debido a fallas parciales o completa del aislamiento en uno o mas puntos.
- La corrientes de falla son una consecuencia de sobretensiones debido a descargas atmosféricas o de maniobra y el resultado de daños causa que fluya un arco que lo atraviesa.

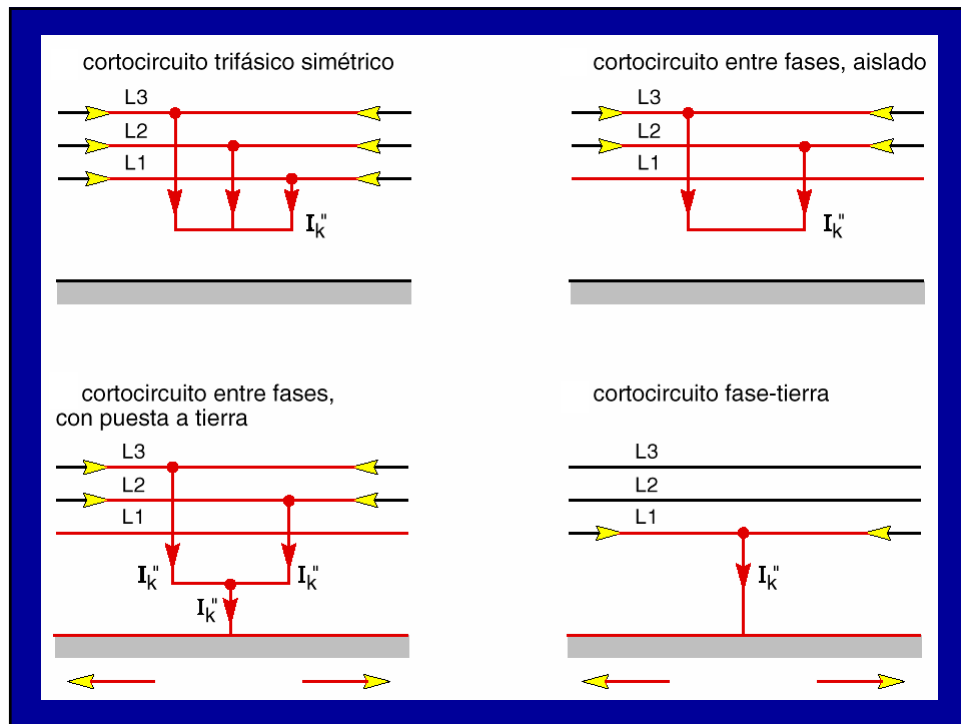
Análisis de fallas (3)

- Un adecuado estudio de falla es esencial en casi todas las aplicaciones del relé.
- Uso adecuado del modelamiento del sistema.
- Fallas trifásicas y de fase a tierra.
- Fallas en barras, líneas y en el extremo final de la línea.
- Efectos de las fallas externas (mutuos).
- Determinar los valores máximos y mínimos de las tensiones y corrientes.

Tipos de fallas

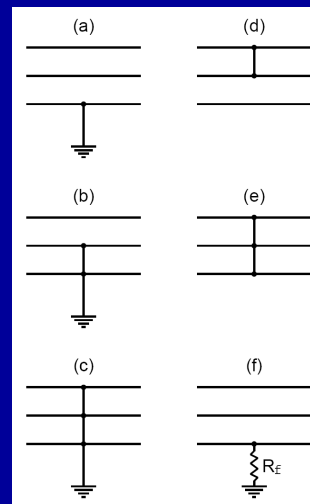
Tipos de fallas

- Por su duración: *autoextinguible, fugaz, permanente.*
- Por su localización: *dentro o fuera de una máquina o un tablero eléctrico.*
- Por su origen: *por factores mecánicos, debido a sobretensiones, por envejecimiento*
- Por el número de fases involucradas: *monofásicos (80%), bifásicos (15%) y trifásicos (5%).*



Tipos de fallas

- Los tipos de fallas que comúnmente ocurren:
 - Fallas pueden ser divididos en dos tipos:
 - Fallas simétricas – (c) y (e).
 - Fallas asimétricas – (a), (b), (d) y (f).
Calculado por el método de las componentes simétricas.
 - El tipo más común: (a)
 - Frecuentemente las fallas a tierra contiene resistencia en forma de arco como (f)



Fallas simétricas

- El más severo tipo: (c) & (e)
 - Falla simétrica trifásica.
 - Los cálculos se realizan con frecuencia.
 - El más fácil de calcular.
- Las fallas simétricas trifásicas serán tratados primero, entonces las averías asimétricas tales como fallas a tierra o las fallas de línea a línea usando el método de las componentes simétricas.

Cálculos

- Hay dos tipos de cálculos de la corriente de falla.
 - Para el cálculo del cortocircuito trifásico, se puede emplear los circuitos equivalentes monofásicos, dado que es normal que las otras dos fases de la red estén eléctricamente balanceados.
 - Para el cálculo de otros tipos de fallas en la red que son desequilibradas eléctricamente - el método de las componentes simétricas es necesario.

Potencia de falla (MVA)

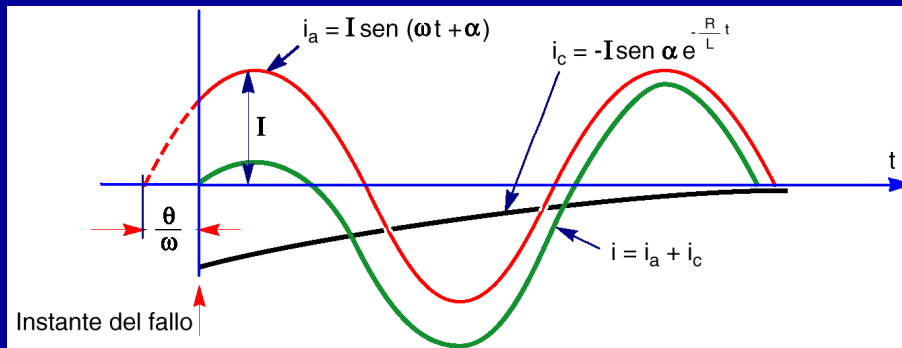
$$\text{Falla MVA} = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_F \times 10^{-6} \text{ (MVA)}$$

- Donde
 - V_L = tensión nominal de línea de la parte fallada.
 - I_F = corriente de falla.
- Puesto que la tensión nominal siempre es conocida, la avería en MVA es una manera indirecta de dar la corriente de falla.
- Sin embargo, cuando la corriente de avería pasa a través de un transformador de dos devanados, la magnitud de la corriente de falla cambia pero no la falla en MVA.

Corriente de falla

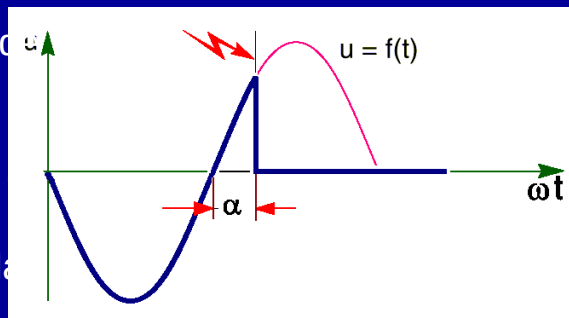
Corriente de falla (1)

- La intensidad del cortocircuito tiene dos componentes una alterna (i_a) y otra continua (i_c).



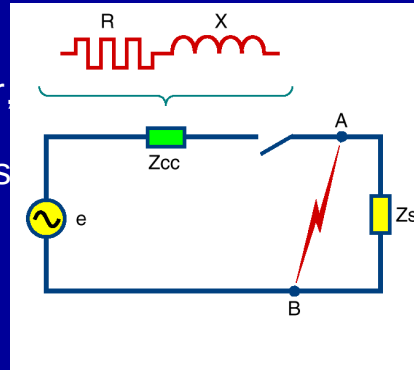
Corriente de falla (2)

- Su valor inicial depende en que parte de la onda de tensión ocurre el cortocircuito y su amortiguamiento tanto más rápido cuanto mayor el la relación R/L .



Circuito equivalente

- Una red simplificada se reduce a una fente de tensión alterna constante, un interruptor, una impedancia Z_{cc} , que representa todas las impedancias situadas aguas arriba del interruptor, y una impedancia Z_s de la carga



Intensidad de cortocircuito

- Cuando se produce un defecto de impedancia despreciable entre los puntos **A** y **B**, aparece una intensidad de cortocircuito, **I_{cc}** , muy elevada, limitada únicamente por la impedancia **Z_{cc}** .
- La intensidad **I_{cc}** se establece siguiendo un régimen transitorio en función de las reactancias **X** y de las resistencias **R** que son las componentes de la impedancia **Z_{cc}** :

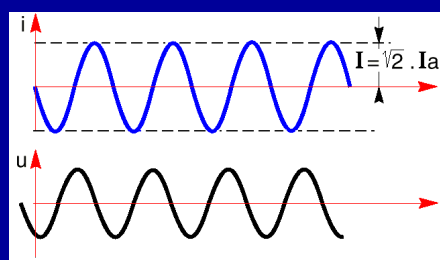
$$Z_{cc} = \sqrt{R^2 + X^2}$$

Ubicación del punto de falla

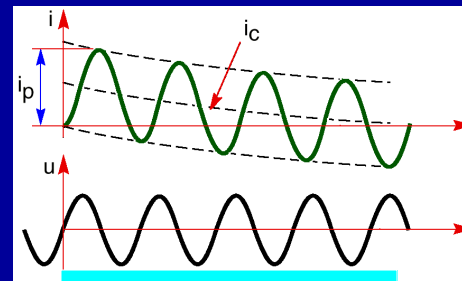
- Se determina si el nodo es cercano o lejano a un generador.
 - Cercano: Cuando la impedancia entre el punto de falla y el generador es menor a 1.5 veces la impedancia del generador.
 - Lejano: lo contrario

Defecto alejado de los alternadores

- Es el caso más frecuente. La componente AC se mantiene y la DC se amortigua.
- Se aprecia los dos casos extremos.



Simétrico



Asimétrico

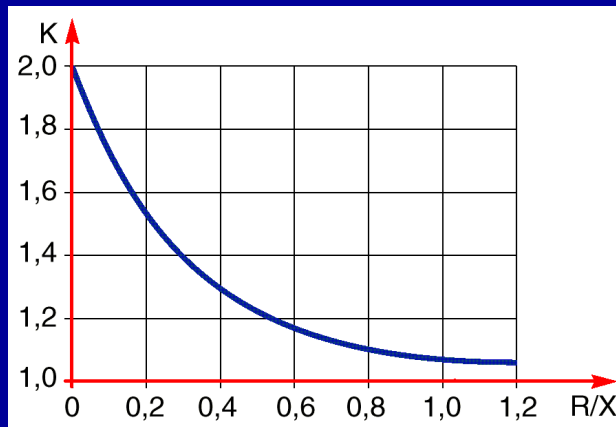
Defecto alejado de los alternadores

- Es pues necesario calcular la corriente de choque **I_p** para determinar el poder de cierre de los interruptores automáticos a instalar y también para definir los esfuerzos electrodinámicos que deberá soportar el conjunto de la instalación.
- Su valor se deduce del valor eficaz de la corriente de cortocircuito simétrica **I_a** mediante la relación:

$$I_p = K \cdot \sqrt{2} \cdot I_a, \text{ (valor pico)}$$

en la que el coeficiente **K** viene dado por la curva de la figura siguiente en función de la razón **R/X** o **R/L** .

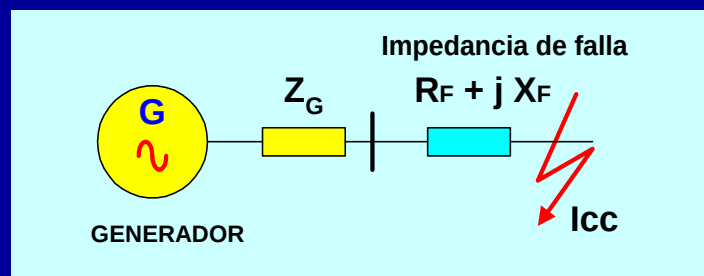
Coeficiente “K”



$$K = 1,022 + 0,96899 \cdot e^{-3,0301 \cdot \left(\frac{R}{X}\right)}$$

Defecto en la proximidad de los alternadores

- Cuando el defecto se produce muy cerca del alternador que alimenta el circuito afectado, la variación de la impedancia del alternador, que ahora pasará a ser preponderante, provoca la amortiguación de la corriente de cortocircuito.



Defecto en la proximidad de los alternadores

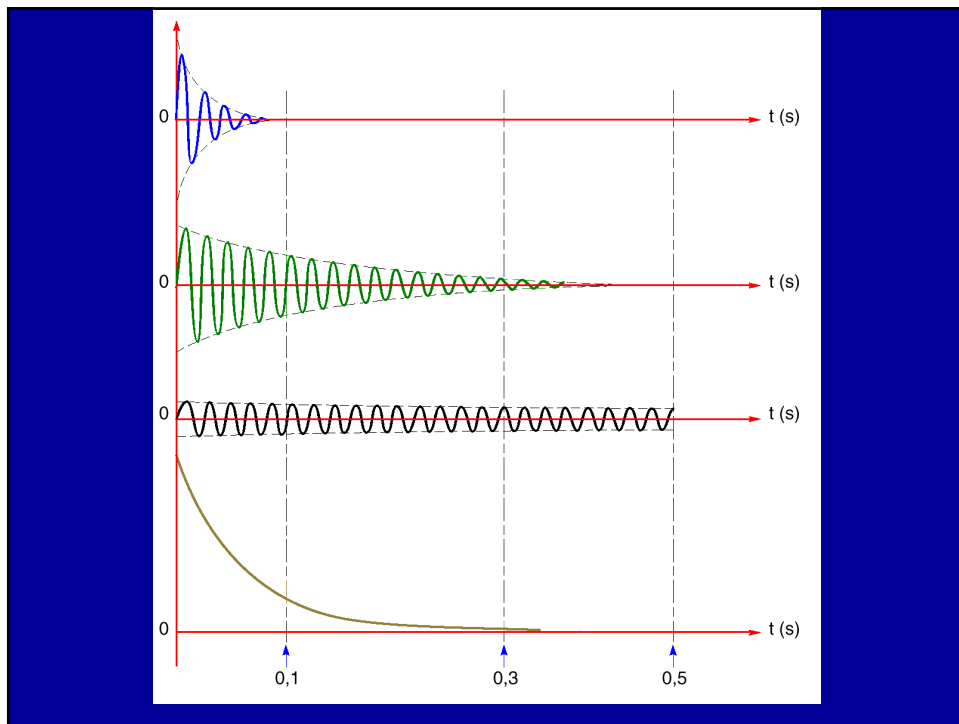
- Producto del cortocircuito es predominantemente inductivo, genera desmagnetización en el generador, haciendo que la tensión se reduzca.
- Como simplificación, consideramos el valor de la f.e.m. constante, pero la reactancia interna de la máquina como variable; esta reactancia evoluciona en tres etapas o estados:
 - *Subtransitorio.*
 - *Transitorio*
 - *Permanente*

Defecto en la proximidad de los alternadores

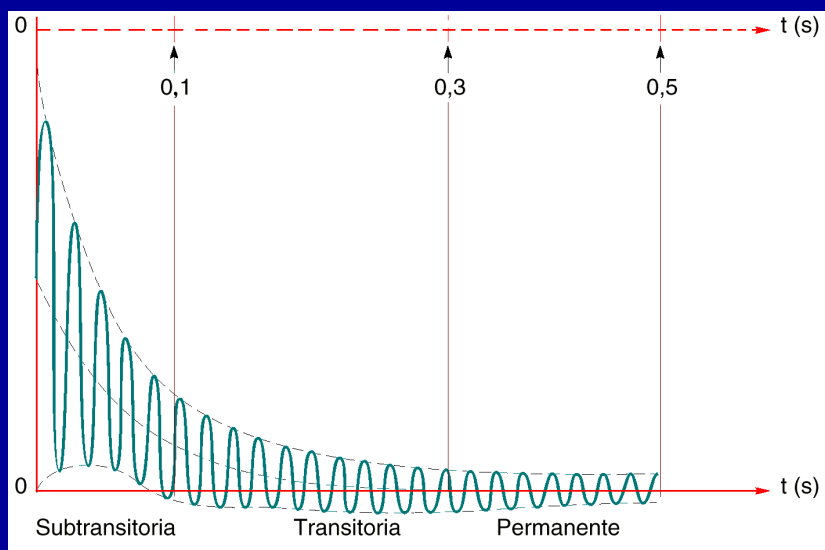
- *Estado subtransitorio*: corresponde a los 10 ó 20 primeros milisegundos del defecto,
- *Estado transitorio*: a continuación del anterior y que se prolonga hasta 500 milisegundos, y
- Después, el estado *permanente* o reactancia síncrona.

Defecto en la proximidad de los alternadores

- Esta intervención sucesiva de las tres reactancias provoca una disminución progresiva de la intensidad de cortocircuito, intensidad que es, por tanto, la suma de cuatro componentes :
 - *las tres componentes alternas y,*
 - *una cuarta, la componente unidireccional que resulta del establecimiento de la corriente en el circuito (inductivo).*



Defecto en la proximidad de los alternadores



Régimen transitorio

- Sin embargo, el régimen transitorio de establecimiento de una corriente de cortocircuito depende normalmente de la distancia del punto de defecto a los alternadores.
- Cabe indicar que las impedancias de los alternadores son inferiores a las de las conexiones entre ellos y el punto de defecto.

Conclusión (1)

- El desarrollo de la corriente de falla en el tiempo $i(t)$ está dividido en tres zonas de tiempo por tres diversas expresiones.
- Primera zona, denota el intervalo subtransitorio y dura hasta 2 ciclos, la corriente es I'' . Está definido la reactancia subtransitoria de eje directo:

$$X_d'' = \frac{E}{I''}$$

Conclusión (2)

- Segunda zona, denota el intervalo transitorio, da lugar:
donde I' es la corriente transitoria y X'_d es la reactancia transitoria de eje directo. El intervalo transitorio dura cerca de 30 ciclos.

$$X'_d = \frac{E}{I'}$$

Conclusión (2)

- La condición de estado estacionario da la reactancia síncrona de eje directo:

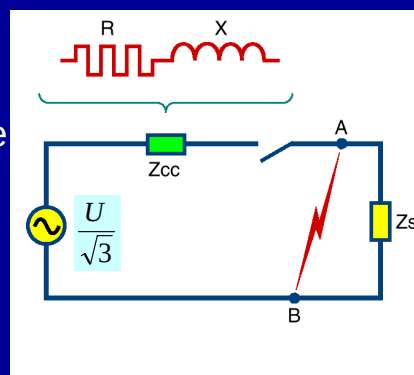
$$X_d = \frac{E}{I}$$

- La reactancia subtransitoria (X''_d) puede ser tan baja como el 7 % de la reactancia síncrona (X_s).

Cálculo de corriente de cortocircuito trifásico

Cortocircuito trifásico simétrico (1)

- Se considera normalmente que el defecto trifásico es el que provoca las corrientes más elevadas.
- El cálculo de I_{CC_3} es pues indispensable para elegir los materiales (intensidades y esfuerzos electrodinámicos máximos a soportar).



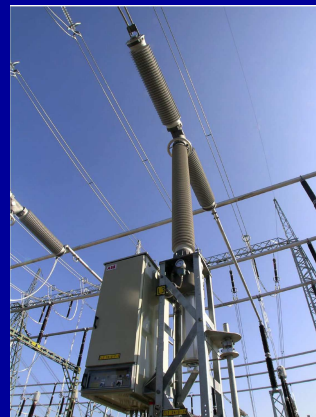
$$I_{CC_3} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z_{CC}}$$

Cortocircuito trifásico simétrico (2)

- Ocurre infrecuentemente.
 - enlace trifásico con conexión a tierra para el mantenimiento pero hecha vivo accidentalmente.
 - una falla a tierra se extiende a través a las otras 2 fases debido a una aclaración de la avería.
- Es un tipo de falla importante.
 - cálculo fácil.
 - dar la respuesta pesimista para el peor caso de aclaramiento lento de la falla.

Cortocircuito trifásico simétrico (3)

- Se asume que si un interruptor puede despejar una avería trifásica, puede despejar cualquier otra avería también. Por lo tanto, es su capacidad nominal en MVA que debe ser por lo menos igual al nivel de falla trifásico en MVA.
- Pues los interruptores se fabrican en tamaño estándar de preferencia, por ejemplo 250, 500, 750 MVA.



Cortocircuito trifásico simétrico (4)

- Un cálculo de alta precisión no es generalmente necesario determinar el nivel de falla trifásico. Las asunciones siguientes se hacen generalmente:
 - Inmediatamente antes de la avería, el sistema está en sin carga y todas las corrientes se desprecian excepto la corriente de avería.

Cortocircuito trifásico simétrico (5)

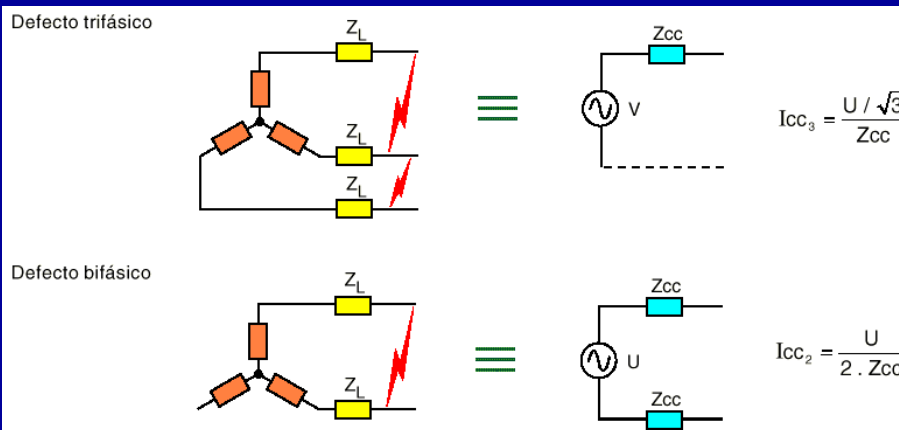
- Todos los generadores están funcionando en su voltaje nominal, inafecto por la avería y se pueden substituir por un solo generador equivalente (es el paralelo de las fuentes).
- Se desprecia las resistencias serie y las admitancias en derivación y cualquier la reactancia inductiva del sistema se tiene en cuenta - ésta da la mínima impedancia del sistema y la máxima corriente de falla; una respuesta pesimista.

Cortocircuito trifásico simétrico (6)

- Dependiente en el tiempo que transcurre de la incidencia de la avería, la reactancia transitoria o subtransitoria debe ser utilizado en la representación del generador.
- El tiempo de la abertura del interruptor está en el rango de 2-8 y como la componente DC es ignorada en el cálculo de la corriente de avería, un factor de multiplicación es necesario tomar en cuenta.

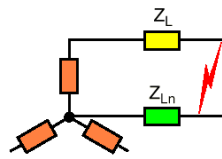
Tiempo de apertura del CB	Factor de multiplicación
8	1
3	1,2
2	1,4

Otros cortocircuitos

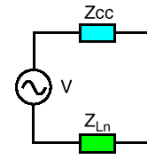


Otros cortocircuitos

Defecto monofásico

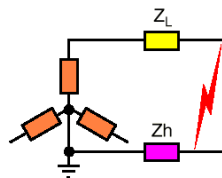


≡

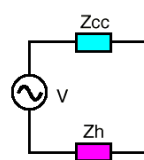


$$I_{cc_1} = \frac{U/\sqrt{3}}{Z_{cc} + Z_{LN}}$$

Defecto a tierra



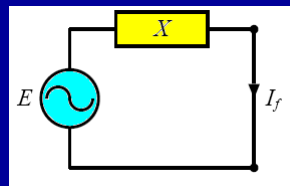
≡



$$I_{cc_n} = \frac{U/\sqrt{3}}{Z_{cc} + Z_h}$$

Corriente de falla y nivel de falla (1)

- Considere el siguiente circuito equivalente de un cortocircuito trifásico simétrico.



- Donde
 - X: reactancia/fase total del sistema.
 - E: f.e.m./fase de las fuentes común a la barra.
 - I_f: corriente de falla.

Corriente de falla y nivel de falla (2)

- La corriente de falla es:

$$I_f = \frac{E}{X}$$

- Y el nivel de falla trifásico total es:

$$VA_f = 3 \cdot E \cdot I_f = 3 \cdot \frac{E^2}{X}$$

$$\text{o } VA_{f \text{ pu}} = \frac{1}{x_{pu}}$$

- Si Z es expresado en p.u.

$$x_{pu} = \frac{I_B \cdot X}{E} \text{ donde } I_B : \text{ corriente base}$$

$$\text{o } X = \frac{E \cdot x_{pu}}{I_B}$$

Corriente de falla y nivel de falla (3)

- Por ejemplo

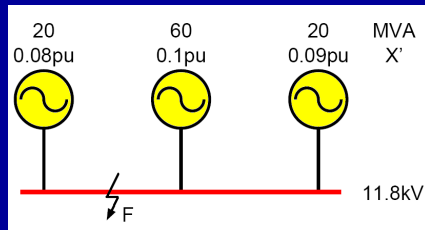
$$I_f = \frac{E}{X} = \frac{E \cdot I_B}{E \cdot x_{pu}} = \frac{I_B}{x_{pu}}$$

$$\text{y } VA_f = 3 \cdot E \cdot \frac{I_B}{x_{pu}} = \frac{3 \cdot E \cdot I_B}{x_{pu}} = \frac{S_B}{x_{pu}} = \frac{VA \text{ base}}{Z \text{ en pu.}}$$

- El nivel de la avería puede ser encontrado si la impedancia total en por unidad de la fuente es conocida. La impedancia total por unidad de la fuente al punto de avería se puede encontrar por análisis del circuito.
- NOTA: por valores en por unidad se deben referir a una S_B elegido como base común.

Ejemplo 1

- Calcular la corriente de falla y el nivel de falla en el punto "F" usando como base común 60 MVA.

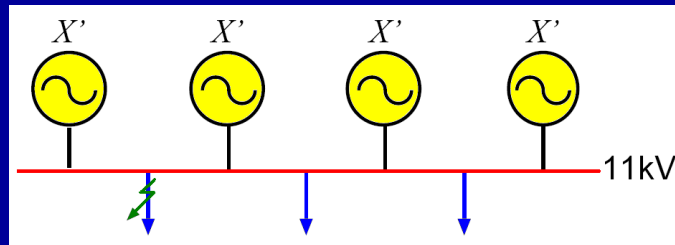


Reactores limitadores de corriente (1)

- Se emplean reactores limitadores de corriente pues las altas corrientes de avería harían daño mecánicamente y térmicamente considerable.
- Las reactancias artificiales algunas veces se insertan para aumentar la reactancia entre la fuente y la avería de forma de mantener la corriente de avería dentro de límites seguros.

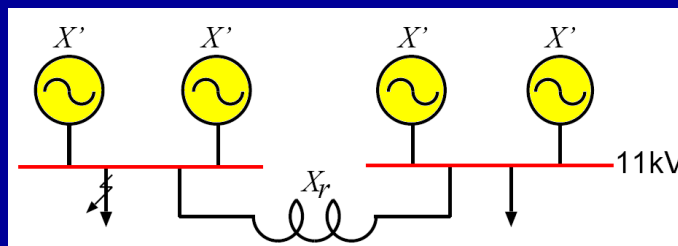
Ejemplo 2

- Considere el sistema mostrado tomando como valores base 11 kV, 25 MVA. Considerar como impedancia de los generadores 16% sobre los valores base indicados.
- Calcular el cortocircuito trifásico en el punto mostrado.



Ejemplo 3

- La capacidad de interrupción del interruptor es de 500 MVA. Una forma para evitar que el interruptor sea sobrecargado es partir la barra de distribución en 2 secciones unidas a través de un reactor. Se pide encontrar la reactancia X_r adentro en (Ω) del reactor limitador.



Ejemplo 4

$S_B = 100 \text{ MVA}$ $V_{B-I} = 60 \text{ KV}$

Impedancia de la fuente :

$$x_s = j \frac{S_B}{S_{CC}} = j \frac{100}{287,67} = j0,347 \text{ p.u.}$$

Impedancia del transformador :

$$x_T = u_{CC} \cdot \left(\frac{S_B}{S_N} \right) = j0,0816 \cdot \left(\frac{100}{14} \right)$$

$$x_T = j0,58286 \text{ p.u.}$$

$$z_{CC} = x_s + x_T = j0,9305$$

$$i_{CC} = \frac{u}{z_{CC}} = \frac{1,0}{0,9305} = 1,0747 \text{ p.u.}$$

$$I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3} \cdot U_{B-II}} = \frac{100 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 10 \text{ KV}} = 5773,5 \text{ A}$$

$$I_{CC} = i_{CC} \cdot I_B = 1,0747 \times 5773,5 \text{ A}$$

$$I_{CC} = 6,2 \text{ kA}$$

Ejemplo 5

método de los MVA

$$\frac{1}{S_{CC-B}} = \frac{1}{S_{CC-A}} + \frac{1}{\frac{S_T}{u_{CC}}}$$

$$\frac{1}{S_{CC-B}} = \frac{1}{287,67} + \frac{1}{\frac{14}{0,0816}}$$

$$\frac{1}{S_{CC-B}} = 3,476 \times 10^{-3} + 5,8286 \times 10^{-3}$$

$$\frac{1}{S_{CC-B}} = 9,3048 \times 10^{-3}$$

$$S_{CC-B} = 107,47 \text{ MVA}$$

$$I_{CC-B} = \frac{107,47 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \times 10 \text{ KV}} = 6,2 \text{ KA}$$

Método de componentes simétricas

Aplicación

- El cálculo con la ayuda de las componentes simétricas resulta particularmente útil para el caso de defectos en redes trifásicas desequilibradas, porque las impedancias clásicas, **R** y **X**, llamadas «cíclicas» no se pueden utilizar debido, por ejemplo, a los fenómenos magnéticos.

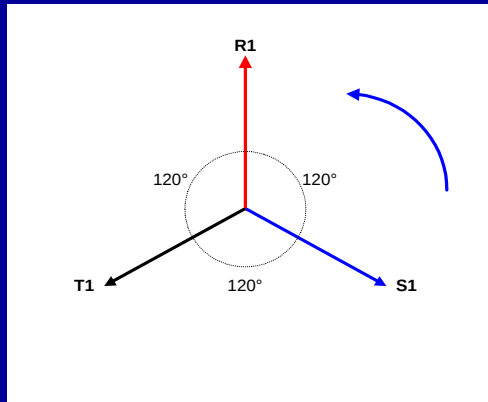
Aplicación

- Por tanto, es necesario este tipo de cálculo:
 1. si se trata de un sistema no simétrico de tensiones y corrientes (vectores de Fresnel con módulos diferentes y con desfases diferentes de 120°); es el caso de un cortocircuito monofásico (fase-tierra), bifásico, o bifásico con tierra.
 2. si la red tiene sobre todo máquinas rotativas y transformadores especiales (conexión estrella-estrella neutro, por ejemplo).
 3. Este método es aplicable a cualquier tipo de red de distribución radial y para cualquier tensión.

Componentes simétricas

- Los métodos de componentes simétricas se basan en el principio de superposición. Así pues, en las redes se suponen características lineales.
- Las tensiones y corrientes (asimétricas) en la fases R, S, T , se obtienen mediante agrupación de las tensiones y corrientes (simétricas) de las componentes. Estas corresponden a los sistemas:
 - Sistema de Secuencia positiva o directo **(1)**
 - Sistema de Secuencia negativa o inverso **(2)**
 - Sistema de Secuencia homopolar o cero **(0)**

Sistema de sistema de secuencia positiva.



El operador a es un vector de magnitud la unidad y argumento 120°

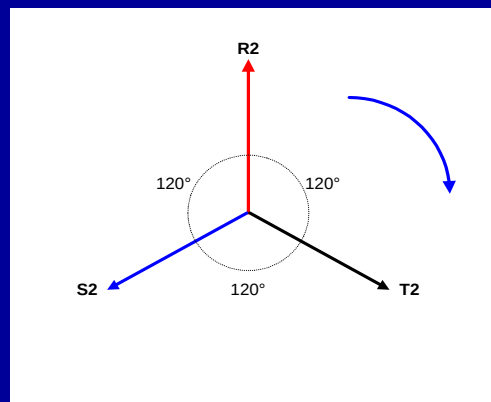
$$a = 1 \angle 120^\circ$$

se cumple lo siguiente:

$$S_1 = a^2 R_1$$

$$T_1 = a R_1$$

Sistema de secuencia negativa.

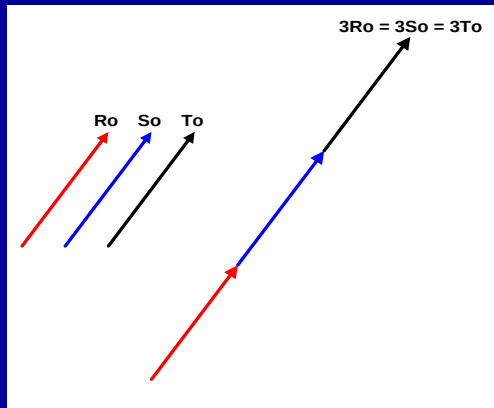


Asimismo se cumple:

$$S_2 = a R_2$$

$$T_2 = a^2 R_2$$

Sistema de secuencia cero.



Los tres vectores homopolares o de secuencia cero, son iguales en magnitud, dirección, y sentido.

Relaciones importantes 1

- Un sistema eléctrico simétrico o asimétrico, puede ser descompuesto en tres sistemas de simétricos diferentes e independientes (positiva, negativa y cero).

$$R = R_1 + R_2 + R_o$$

$$S = S_1 + S_2 + S_o$$

$$T = T_1 + T_2 + T_o$$

Relaciones importantes 2

- Se de muestra que :

$$R_0 = S_0 = T_0 = \frac{R + S + T}{3}$$

$$R_1 = \frac{R + aS + a^2T}{3}$$

$$R_2 = \frac{R + a^2S + aT}{3}$$

Ejemplo 6

- Obtener las componentes simétricas de las corrientes desequilibradas indicadas.

$$I_a = 1.6 \angle 25^\circ$$

$$I_b = 1.0 \angle 180^\circ$$

$$I_c = 0.9 \angle 132^\circ$$

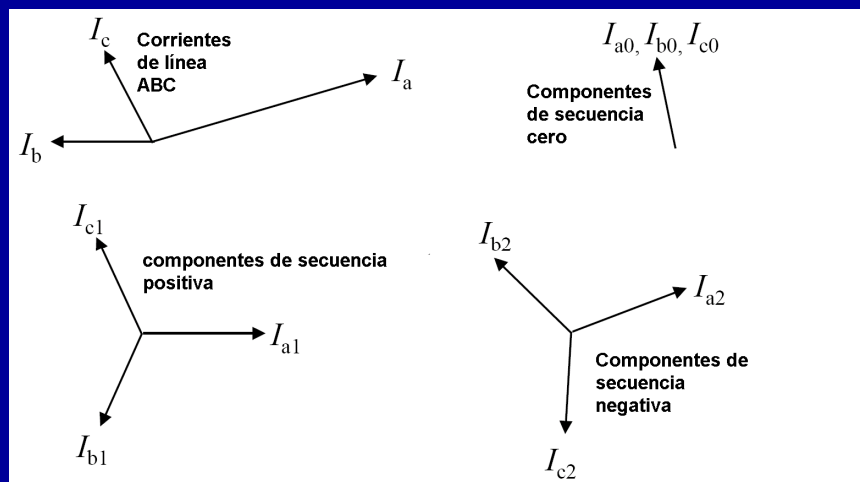
Solución

$$I_{a0} = \frac{(1.6\angle 25^\circ) + (1.0\angle 180^\circ) + (0.9\angle 132^\circ)}{3} = 0.45\angle 96.5^\circ$$

$$I_{a1} = \frac{(1.6\angle 25^\circ) + a(1.0\angle 180^\circ) + a^2(0.9\angle 132^\circ)}{3} = 0.94\angle -0.1^\circ$$

$$I_{a2} = \frac{(1.6\angle 25^\circ) + a^2(1.0\angle 180^\circ) + a(0.9\angle 132^\circ)}{3} = 0.60\angle 22.3^\circ$$

Diagrama fasorial de corrientes



Ejemplo 7

- Determinar las tensiones originales, si se conocen las componentes simétricas de las tensiones

$$V_{a0} = 0.6 \angle 90^\circ$$

$$V_{a1} = 1.0 \angle 30^\circ$$

$$V_{a2} = 0.8 \angle -30^\circ$$

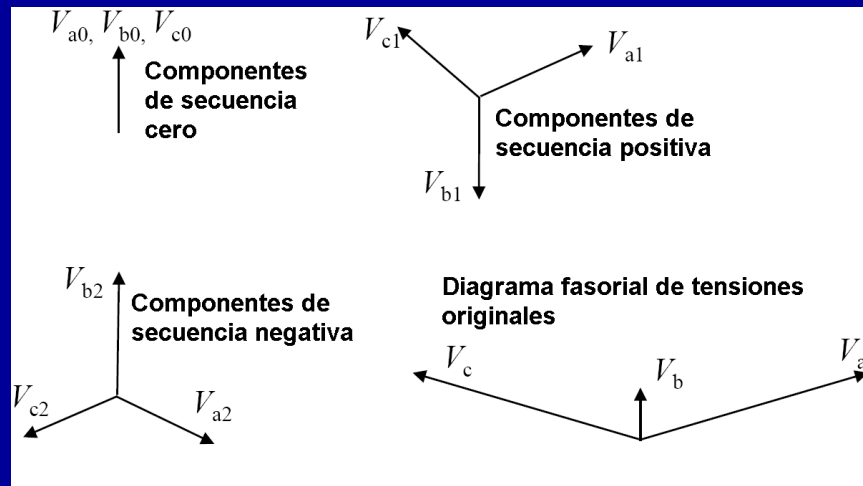
Solución

$$V_a = (0.6 \angle 90^\circ) + (1.0 \angle 30^\circ) + (0.8 \angle -30^\circ) = 1.7088 \angle 24.2^\circ$$

$$V_b = (0.6 \angle 90^\circ) + a^2(1.0 \angle 30^\circ) + a(0.8 \angle -30^\circ) = 0.4 \angle 90^\circ$$

$$V_c = (0.6 \angle 90^\circ) + a(1.0 \angle 30^\circ) + a^2(0.8 \angle -30^\circ) = 1.7088 \angle 155.8^\circ$$

Diagrama fasorial de tensiones



Postulados (1)

- Las componentes de secuencia positiva, están presentes en cualquier condición (balanceada o desbalanceada).
- Las componentes de secuencia negativa, por tener secuencia diferente a las positivas, rompen el equilibrio establecido por el sistema positivo.
- En otras palabras, cualquier desequilibrio introduce componentes de secuencia negativa.

Postulados (2)

- Las componentes homopolares o de secuencia cero, sólo pueden aparecer cuando el sistema trifásico tenga una resultante ($I_R + I_S + I_T > 0$).
Para que un red trifásica tenga resultante es preciso que dicha red tenga, al menos un punto a tierra.

Por ejemplo:

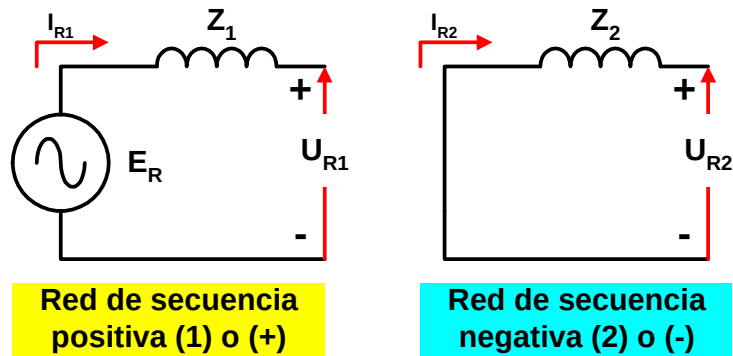
Una falla monofásica a tierra.

Una falla bifásica a tierra.

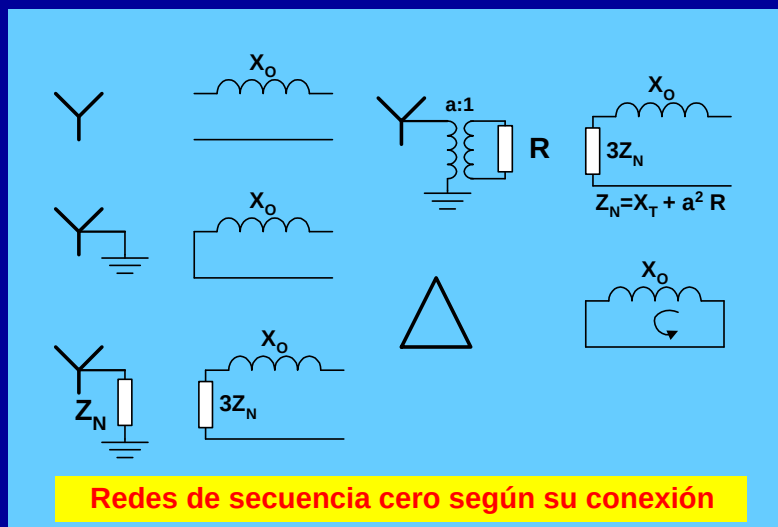
Las aperturas de fase o las cargas desequilibradas solamente producirán componente homopolar cuando exista un segundo punto de contacto a tierra.

Redes de secuencia de los componentes

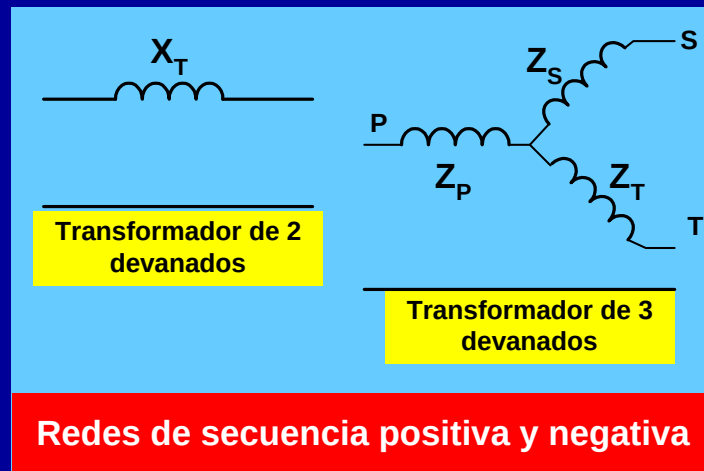
Generadores (1)



Generadores (2)



Transformadores (1)



Transformadores de 3 devanados

$$X_P = \frac{X_{PS} + X_{PT} - X_{ST}}{2}$$

$$X_S = \frac{X_{PS} + X_{ST} - X_{PT}}{2}$$

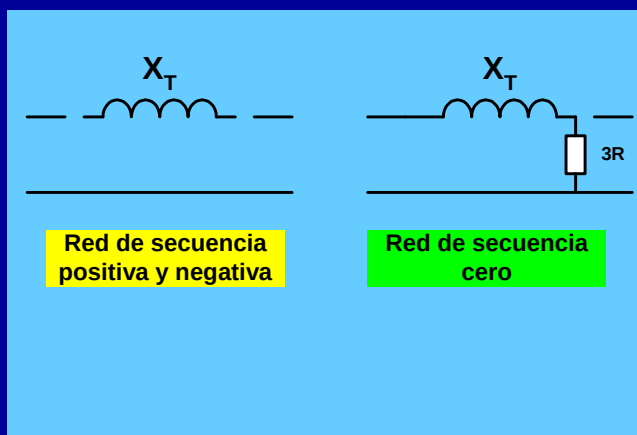
$$X_T = \frac{X_{PT} + X_{ST} - X_{PS}}{2}$$

Red de secuencia
cero para los
transformadores
según su
conexión.

CONNECTION DIAGRAM SOURCE LOAD	ZERO-SEQUENCE EQUIVALENT CIRCUIT
	ZERO-SEQUENCE REFERENCE SOURCE Z_0 LOAD Z_0
	S Z_0 L
	S Z_0 L
	S Z_0 L
	S $3Z_N$ L
	S L
	S L
	S L
	S L

Z_0 = transformer zero-sequence impedance
 Z_1 = transformer positive-sequence impedance
 Z_N = neutral impedance
 Z_{eq} = equivalent zero-sequence impedance of the three-phase transformer connection viewed from the load side

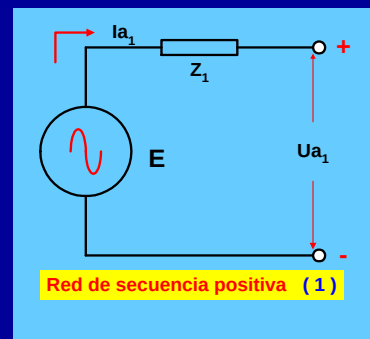
Transformador de puesta a tierra (zig-zag)



Procedimientos de cálculo

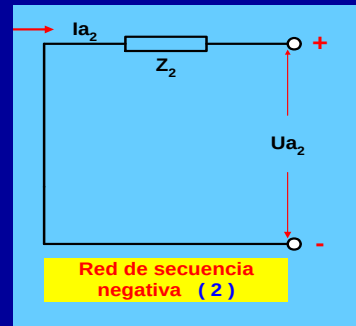
Procedimiento de cálculo (1)

- Reemplazar las impedancias de secuencia positiva en el sistema eléctrico en estudio, luego determinar el circuito Thévenin equivalente (**Red monofásica activa, con impedancias directas**) en el punto de falla.



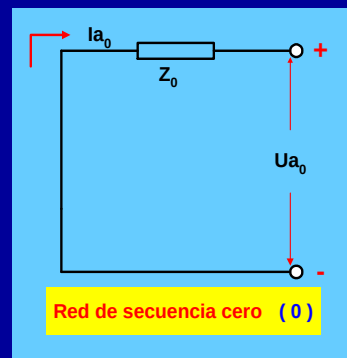
Procedimiento de cálculo (2)

- Reemplazar las impedancias de secuencia negativa y anular las fuentes de tensión existentes. De igual modo se determina la red de secuencia negativa (**Red monofásica pasiva, con impedancias inversas**) en el punto de falla.



Procedimiento de cálculo (3)

- Asimismo se determina la red de secuencia cero (**Red monofásica pasiva, con impedancias homopolares, reemplazando las impedancias de secuencia cero**) en el punto de falla.



Procedimiento de cálculo (4)

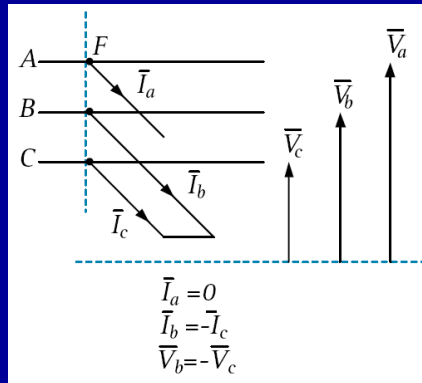
Conexión de la redes de secuencia según la falla

Falla monofásica a tierra

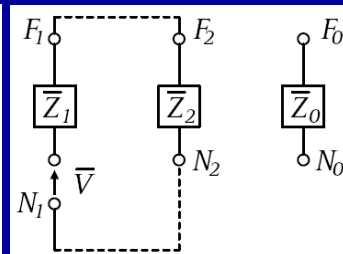
(a) Definition of fault

(b) Equivalent circuit

Falla bifásica

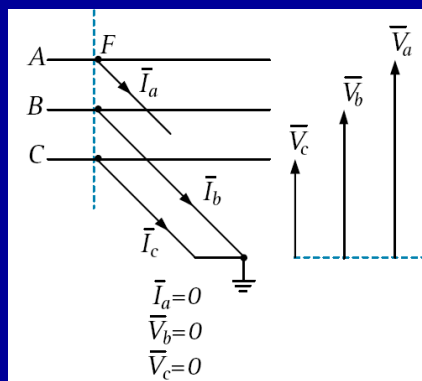


(a) Definition of fault

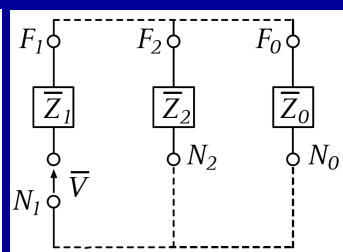


(b) Equivalent circuit

Falla bifásica a tierra

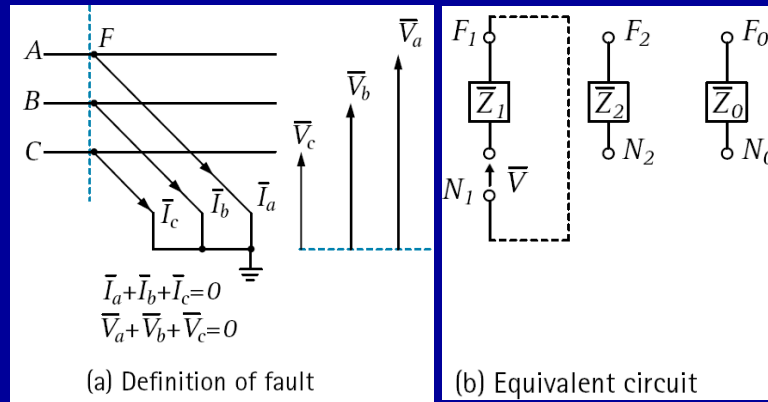


(a) Definition of fault

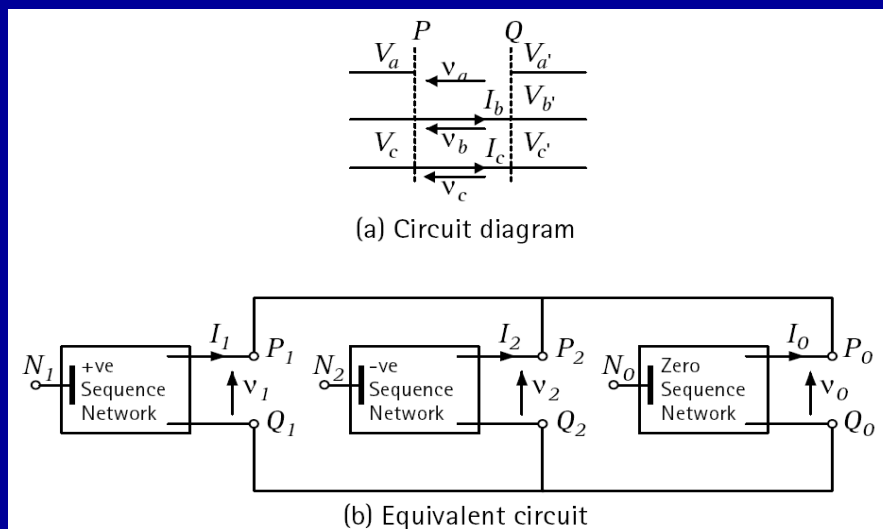


(b) Equivalent circuit

Cortocircuito trifásico

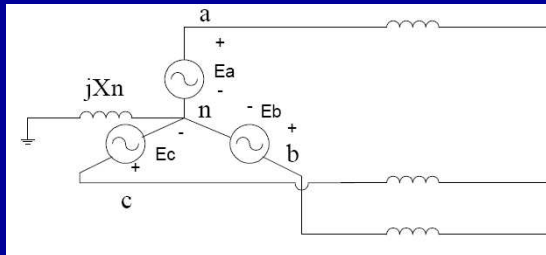


Fase "a" abierta



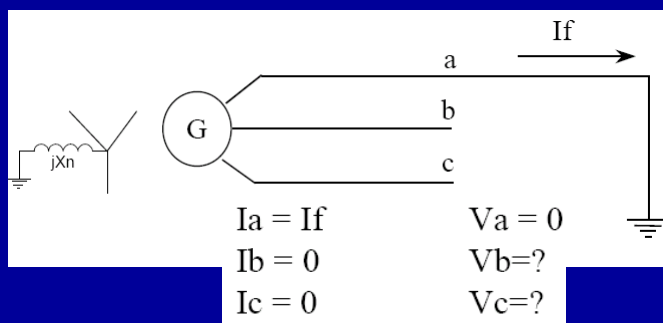
Ejemplo 8

- Se tiene un generador síncrono con los siguientes parámetros:
 - $X_1 = X_2 = 0.12$ p. u.
 - $X_0 = 0.06$ p. u. ,
 - $X_n = 0$
 - $E_{a1} = 1$ p. u.



Ejemplo 8-a

- Calcular la falla monofásica a tierra en la fase "a". Asumir que el generador está operando en vacío.

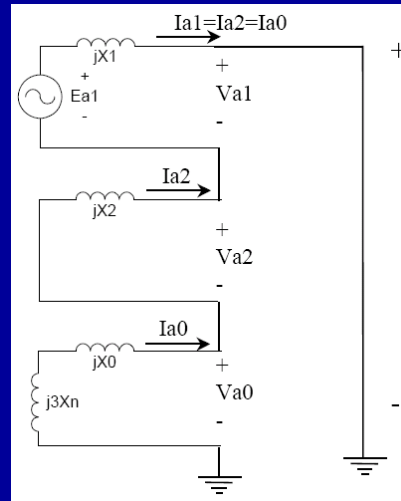


Ejemplo 8-a

- Nosotros tenemos:
 $I_{a1}=I_{a2}=I_{a0}$ y $V_a=0$.

$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = 0$$

- Esta situación se puede representar mediante el siguiente circuito:



Ejemplo 8-a

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = \frac{E_{a1}}{jX1 + jX2 + jX0 + j3Xn}$$

$$V_{a1} = E_{a1} - (jX1)(I_{a1})$$

$$V_{a2} = 0 - (jX2)(I_{a2})$$

$$V_{a0} = 0 - j(X0 + 3Xn)(I_{a0})$$

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = \frac{1 \angle 0^\circ}{j(0.12 + 0.12 + 0.06)} = -j3.33 \text{ p.u.}$$

$$I_a = I_f = 3I_{a1} = -j10 \text{ p.u.}$$

$$I_b = 0$$

$$I_c = 0$$

Ejemplo 8-a

$$V_{a0} = -jX_0(I_{a0}) = -j0.06(-j3.33) = -0.2$$

$$V_{a1} = E_{a1} - jX_1(I_{a1}) = 1 - j0.12(-j3.33) = 1 - j0.4 = 0.6$$

$$V_{a2} = -jX_2(I_{a2}) = -j0.12(-j3.33) = -0.4$$

$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = -0.2 + 0.6 - 0.4 = 0$$

$$V_b = V_{a0} + a^2 V_{a1} + a V_{a2}$$

$$V_b = -0.2 + 0.6a^2 - 0.4a = -0.2 + 0.6\angle -120^\circ - 0.4\angle 120^\circ$$

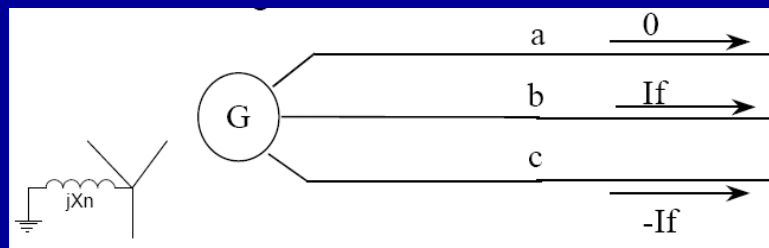
$$V_b = 0.9165\angle -109.1^\circ$$

$$V_c = V_{a0} + a V_{a1} + a^2 V_{a2} = -0.2 + 0.6\angle 120^\circ - 0.4\angle -120^\circ$$

$$V_c = 0.9165\angle +109.1^\circ$$

Ejemplo 8-b

- Calcular la falla bifásica entre las fases "b" y "c". Asumir que el generador está operando en vacío.



$$I_a = 0$$

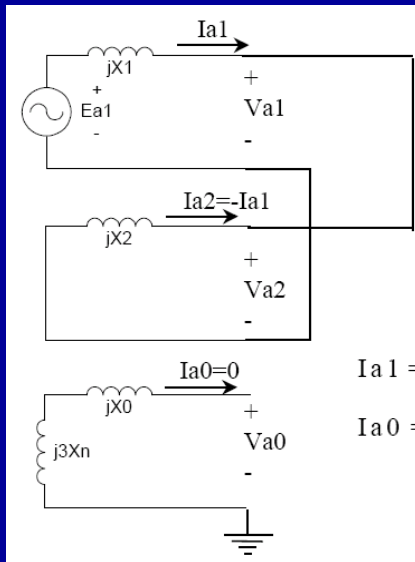
$$V_a = ?$$

$$I_b = I_f$$

$$V_b = V_c$$

$$I_c = -I_f$$

Ejemplo 8-b



$$I_{a1} = -I_{a2} = \frac{E_{a1}}{jX_1 + jX_2}$$

$$V_{a1} = E_{a1} - (jX_1)(I_{a1})$$

$$V_{a2} = V_{a1}$$

$$V_{a0} = 0$$

$$I_{a1} = -I_{a2} = \frac{1 \angle 0^\circ}{j(0.12 + 0.12)} = -j4.17 \text{ p.u.}$$

$$I_{a0} = 0$$

Ejemplo 8-b

$$I_a = 0$$

$$I_b = I_f = -j\sqrt{3} I_{a1} = -7.22 \text{ p.u.}$$

$$I_c = -I_f = 7.22 \text{ p.u.}$$

$$V_{a0} = -jX_0(I_{a0}) = 0$$

$$V_{a1} = E_{a1} - jX_1(I_{a1}) = 1 - j0.12(-j4.17) = 1 - 0.5 = 0.5$$

$$V_{a2} = -jX_2(I_{a2}) = -j0.12(j4.17) = 0.5$$

Ejemplo 8-b

$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2}$$

$$V_a = 0 + 0.5 + 0.5 = 1.0 \text{ p.u.}$$

$$V_b = V_{a0} + a^2 V_{a1} + a V_{a2}$$

$$V_b = 0 + 0.5a^2 + 0.5a = 0.5(a^2 + a) = 0.5(-1)$$

$$V_b = -0.5 \text{ p.u.}$$

$$V_c = V_{a0} + a V_{a1} + a^2 V_{a2}$$

$$V_c = 0.5(a + a^2) = -0.5$$

$$V_c = -0.5 \text{ p.u.}$$

Ejemplo 9

