

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

Jorge Guillermo Calderón Guizar

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

➤ Contenido

- Objetivo.
- Introducción.
- Revisión de Conceptos Básicos de Circuitos de C.A. (estado estable).
 - Concepto de Fasor.
 - Representación del Fasor.
 - Diagramas Fasoriales de cantidades sinusoidales.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

➤ Contenido (cont.).

- Operaciones con Fasores.
- Circuitos monofásicos de C.A., (potencia activa, reactiva y compleja).
- Flujo de Potencia (convenciones)
- Circuitos trifásicos.
 - ✓ Secuencia de fases.
- Voltajes y Corrientes en Circuitos Trifásicos Balanceados.
 - ✓ Conexiones en estrella y en delta.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

➤ Contenido (cont.).

- Transformaciones $Y-\Delta$ y $\Delta-Y$
- Potencias Instantánea y Compleja en Circuitos Trifásicos Balanceados.
- Ejemplos
- El Sistema Por Unidad (p.u.).
 - Definición.
 - Ventajas del sistema p.u.
 - Cantidades base

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

➤ Contenido (cont.).

- Relaciones generales (voltaje, corriente y potencia) en circuitos trifásicos.
- Relaciones en p.u.
- Impedancias de transformadores en p.u.
- Impedancias de generadores en p.u.
- Impedancias de líneas de transmisión en p.u.
- Cambio de base de cantidades en p.u.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

➤ Contenido (cont.).

- Transformadores (conexiones y desfasamientos)
 - Marcas de polaridad
 - Polaridad aditiva y substractiva
 - Desfasamientos en transformadores trifásicos conectados en $Y-\Delta$ y en $\Delta-Y$
- Componentes Simétricas.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

➤ Contenido (cont.).

- Método de las componentes simétricas, en sistemas trifásicos.
- Potencia en el Dominio de las Componentes Simétricas.
- Redes de secuencia
- Modelado del SEP para estudios de Fallas.
 - Líneas de Transmisión
 - Cargas (configuraciones estrella y delta)

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

➤ Contenido (cont.).

- Transformadores de Potencia.
- Generadores.
- Motores Síncronos.
- Motores de inducción.
- Análisis de Fallas.
 - Impedancia de Falla.
 - Fallas en derivación.
 - ✓ Falla Trifásica.
 - ✓ Falla Línea a Tierra.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

➤ Contenido (cont.).

- ✓ Falla Doble Línea a Tierra.
- ✓ Falla entre Líneas.
- Fallas Serie.
 - ✓ Fase abierta.
 - ✓ Dos Fases abiertas.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

➤ Objetivo.

El presente curso tiene como propósito el presentar y revisar los conceptos fundamentales requeridos para el análisis de fallas en sistemas eléctricos de potencia.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

➤ Introducción.

- El análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) generalmente involucra la determinación de voltajes y corrientes para ciertas condiciones de operación. Usualmente los cálculos requeridos se organizan de tal forma que es posible inferir el comportamiento de ciertas variables para propósitos determinados.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- El análisis de fallas (*corto circuito*) en SEP's se realiza para la determinación de los flujos de corrientes bajo condiciones de falla.
- La información obtenida del análisis de fallas se utiliza para determinar:
 - La capacidad y características del equipo de protección (interruptores y fusibles).

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- La coordinación de las protecciones del SEP.
- La evolución (crecimiento) de un SEP, usualmente ocasiona un incremento en la magnitud de las corrientes de falla, por lo que se debe verificar que las capacidades de interrupción momentánea y nominal, de los equipos nuevos y existentes son adecuadas para la nueva realidad del SEP.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- Revisión de Conceptos Básicos de Circuitos de C.A. (estado estable).
 - El Concepto de Fasor.
 - Es un número complejo que representa la amplitud y fase de una función sinusoidal [1]. Utilizado para representar cantidades eléctricas, que inicialmente se denominaron vectores. Posteriormente cambiaron su nombre para evitar confusión con el concepto de vectores en el espacio.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- Un fasor gira conforme pasa el tiempo y representa a una cantidad senoidal. Mientras que un vector permanece estacionario en el espacio.
- En un fasor, el valor absoluto (modulo) del número complejo representa la amplitud máxima (valor pico) o el valor medio cuadrático (rms) de la cantidad. Mientras que su fase (argumento) representa el ángulo de fase en el tiempo $t=0$.

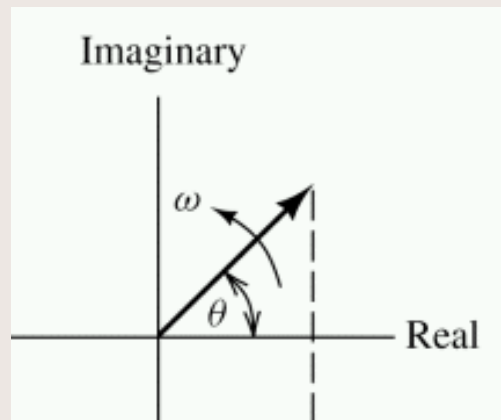
Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- Representación Analítica del Fasor.
 - La representación analítica fasorial de una cantidad eléctrica (F) usualmente adopta cualquiera de las formas siguientes:
 - ✓ Forma rectangular $F = R + jI$
 - ✓ Forma polar $F = |F| \angle +\phi$
 - ✓ Forma exponencial $F = |F| e^{j\phi}$
 - ✓ En el dominio del tiempo $F(t) = |F| \cos (wt + \phi)$

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

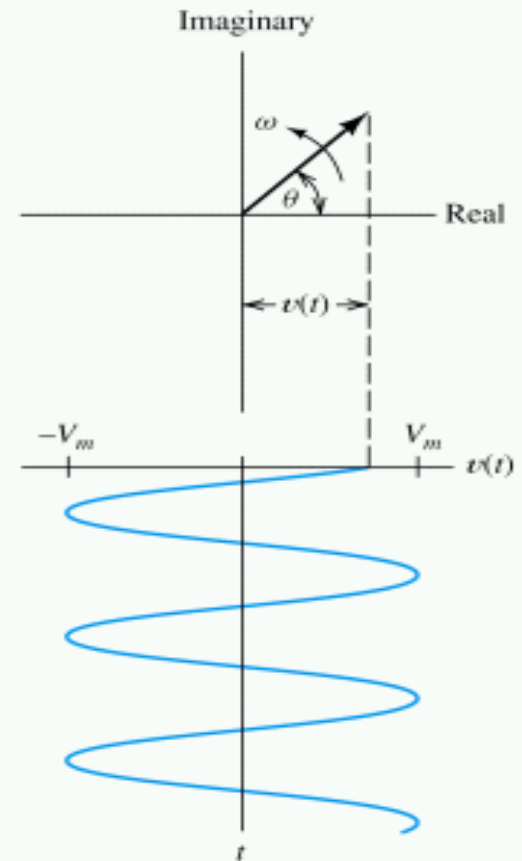
- Representación Gráfica del Fasor.

- La representación gráfica del fasor de una cantidad eléctrica (F) es similar a la de un vector rotatorio como se muestra en la figura siguiente:



Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- Una corriente o tensión sinusoidal con una frecuencia dada esta caracterizada por dos parámetros una "amplitud" y un "ángulo de fase".
- Una cantidad sinusoidal se puede representar como un vector rotatorio en sentido contrario a las manecillas del reloj en el plano complejo.



Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

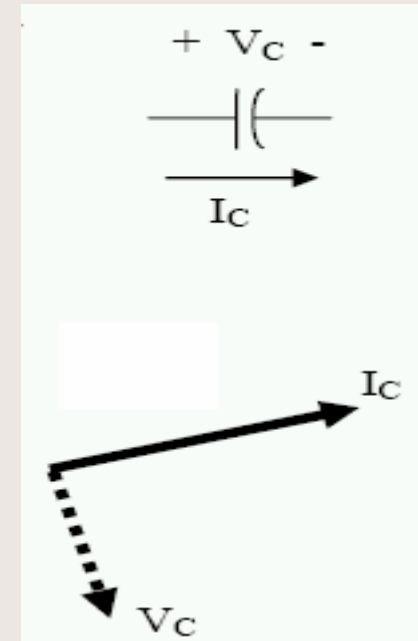
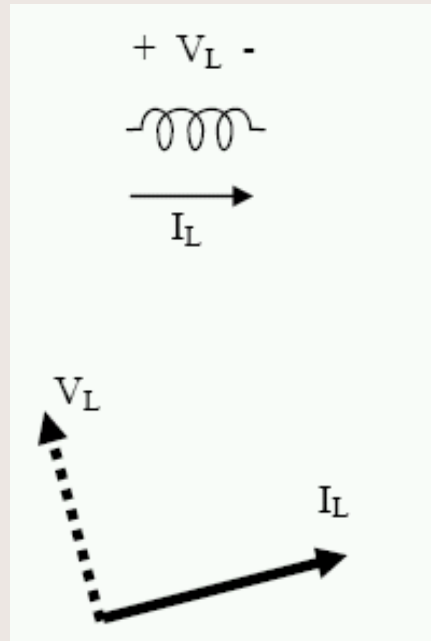
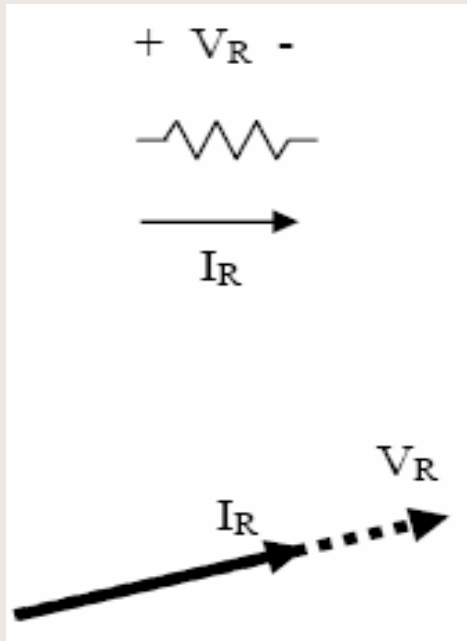
- Diagramas Fasoriales de cantidades sinusoidales.
 - A pesar de que un fasor es una cantidad rotatoria, por conveniencia, en un diagrama fasorial estos siempre se muestran como vectores "fijos" para una condición de operación determinada.
 - En la práctica, la magnitud del fasor usualmente representa el máximo valor "rms" del medio ciclo positivo de la senoide en cuestión.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

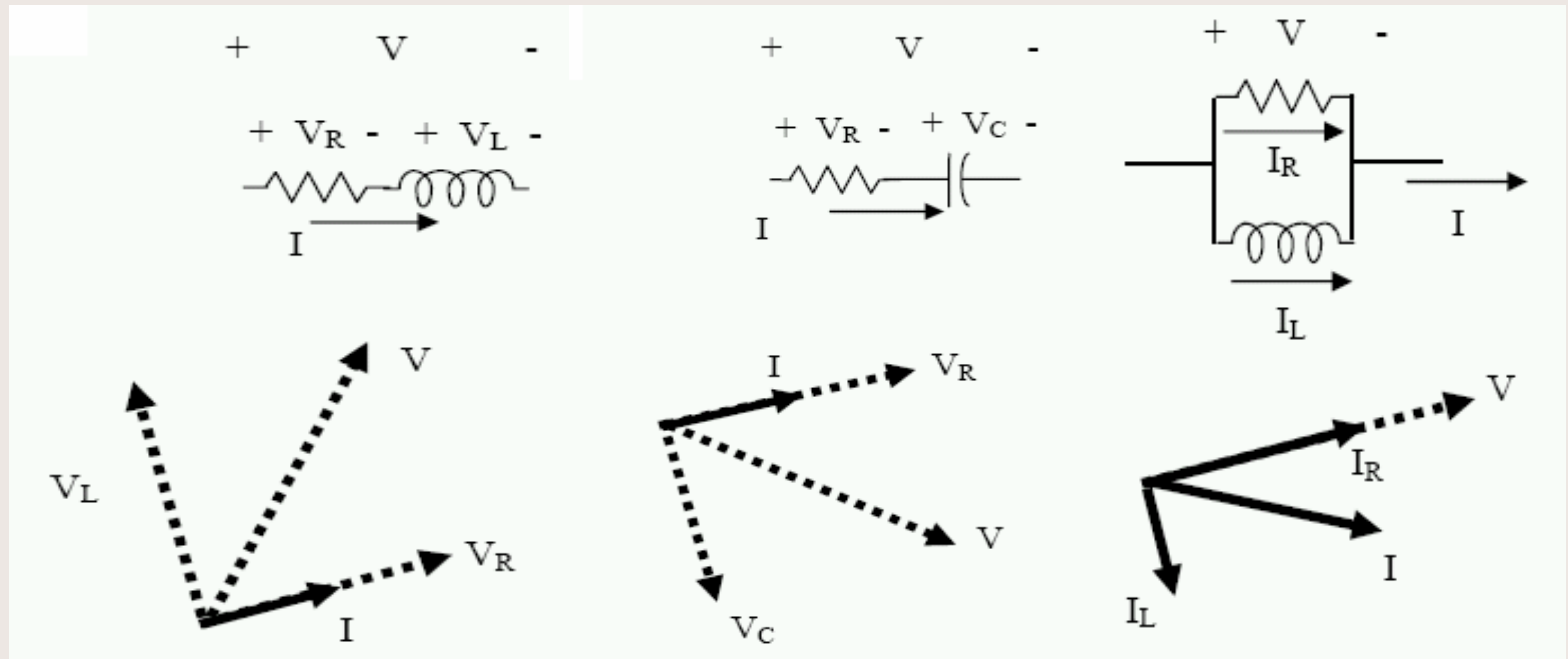
- Un diagrama fasorial muestra los voltajes, corrientes, etc., presentes en un circuito eléctrico.
- Muestra únicamente la magnitud y la fase relativa de las cantidades representadas.
- Requiere de una escala o "nota detallada" sobre las magnitudes físicas de las magnitudes de las cantidades mostradas.
- Los ángulos mostrados, son diferencias de fase entre las cantidades involucradas, por lo que el ángulo de referencia puede seleccionarse a conveniencia.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

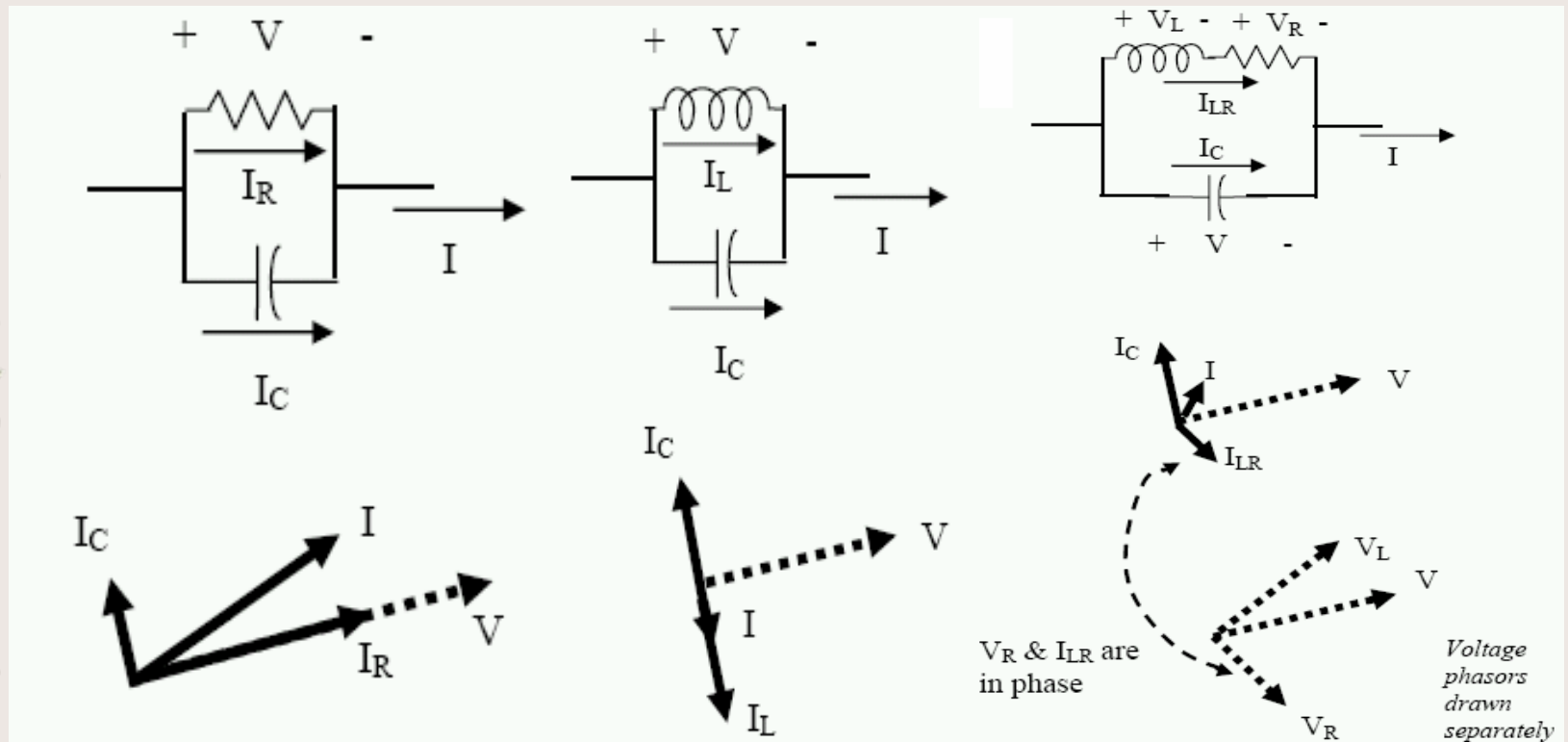
➤ Diagramas fasoriales simples



Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia



Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia



Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

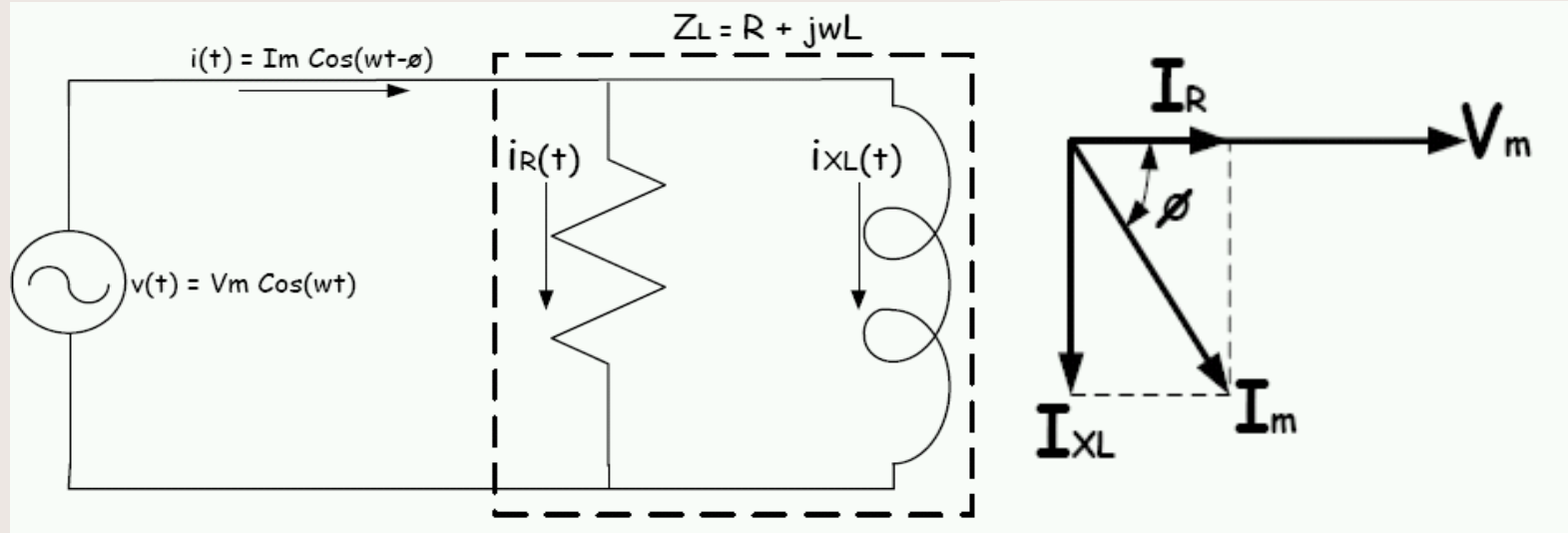
➤ Operaciones entre Fasores

- Las operaciones entre fasores siguen las mismas leyes que las operaciones entre números complejos.
 - Sean $V = p + jq = |V| \angle \alpha$; $I = r + js = |I| \angle \beta$
 - Suma (Resta)
 - ✓ $V \pm I = (p \pm r) + j(q \pm s)$
 - Multiplicación
 - ✓ $VI = |V| |I| \angle (\alpha + \beta)$
 - División
 - ✓ $(V/I) = (|V| / |I|) \angle (\alpha - \beta)$

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- Potencia en circuitos monofásicos de C.A.
 - La potencia "instantánea" en watts que absorbe una carga esta definida por el producto de la caída de tensión a través de la carga en volts y la corriente en amperes que fluye hacia la carga en un instante determinado [2].
 - Con el propósito de ilustrar este concepto se considerará el circuito RL que se muestra a continuación.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia



Donde;

$I_m = V_m / |Z_L|$ y ϕ el ángulo de factor de potencia.

Aplicando la definición de potencia instantánea se tiene que;

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

$$p(t) = v(t)i(t) = V_m I_m [\cos(\omega t) \cos(\omega t - \phi)]$$

o bien

$$p(t) = \frac{V_m I_m}{2} [\cos\phi (1 + \cos 2\omega t) + \sin\phi \sin 2\omega t]$$

- Otra forma de expresar la potencia instantánea es considerar en forma separada las componentes de corriente en fase con el voltaje de fuente (i_R) y la desfasada 90° (i_{XL}). A partir de el diagrama fasorial se deduce que:

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

$$I_R = I_m \cos\phi \quad e \quad I_{XL} = I_m \sin\phi$$

Luego entonces,

$$i_R(t) = I_R \cos\omega t \quad e \quad i_{XL}(t) = I_{XL} \sin\omega t$$

por lo tanto,

$$v(t)i_R(t) = V_m I_m \cos\phi \cos^2\omega t$$

$$P_R(t) = \frac{V_m I_m}{2} \cos\phi (1 + \cos 2\omega t)$$

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

Mientras que,

$$v(t)i_{XL}(t) = V_m I_m \sin\phi \sin\omega t \cos\omega t$$

$$P_{XL}(t) = \frac{V_m I_m}{2} \sin\phi \sin 2\omega t$$

- Las expresiones para $P_R(t)$ y $P_{XL}(t)$ representan las potencias instantáneas correspondientes a la resistencia e inductancia. El comportamiento de éstas en el dominio del tiempo se muestra en las figuras siguientes.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

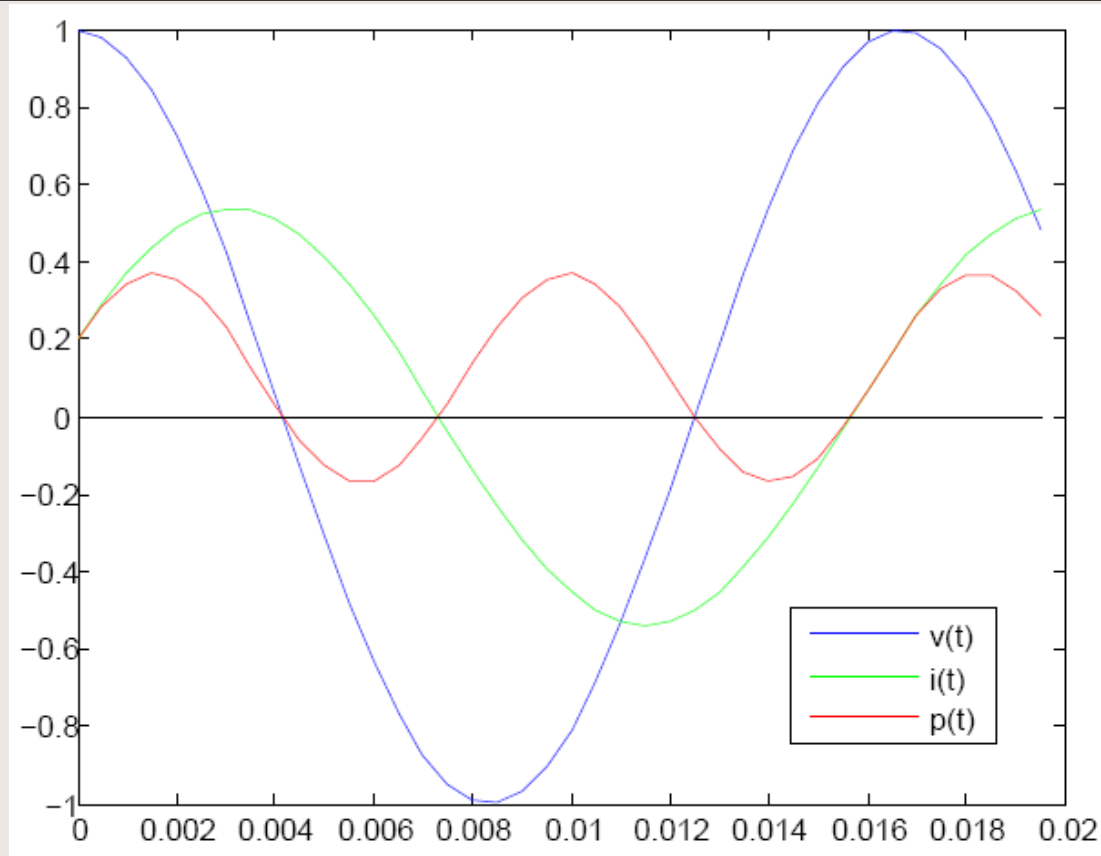


Figura 1. Potencia instantánea consumida por la carga.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

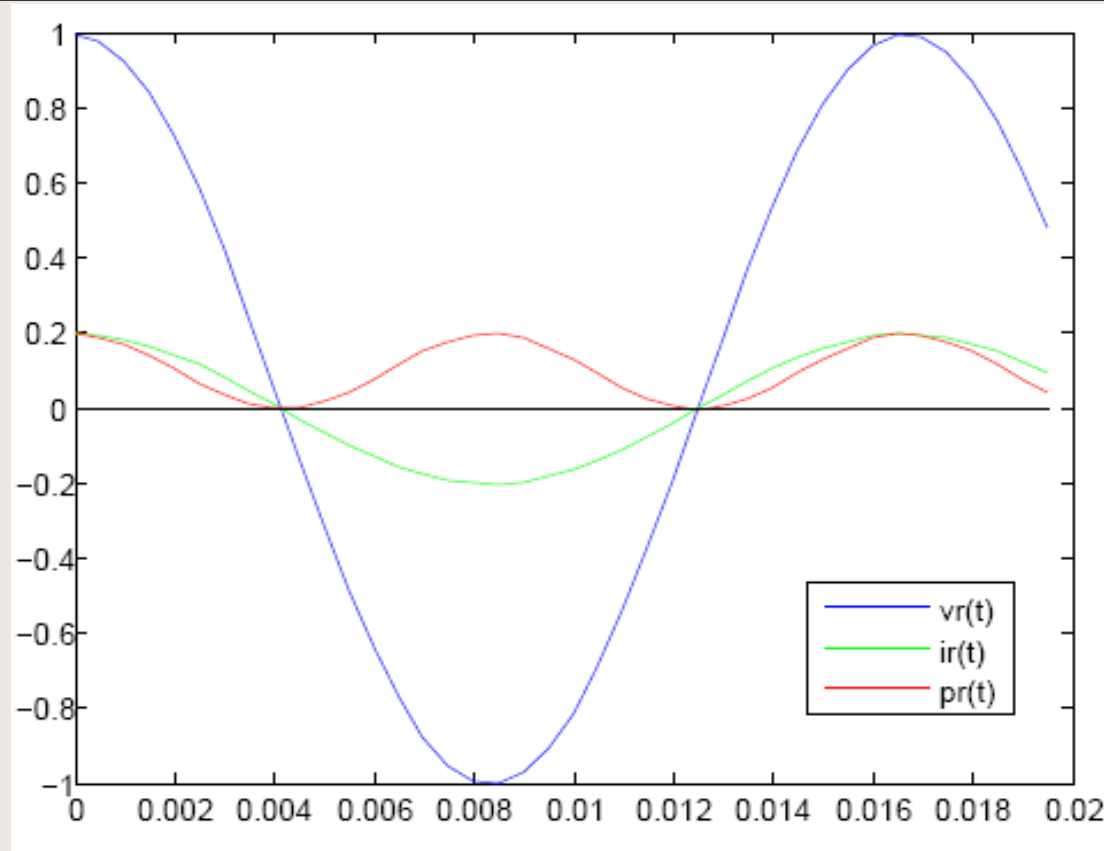


Figura 2. Potencia instantánea en la Resistencia

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

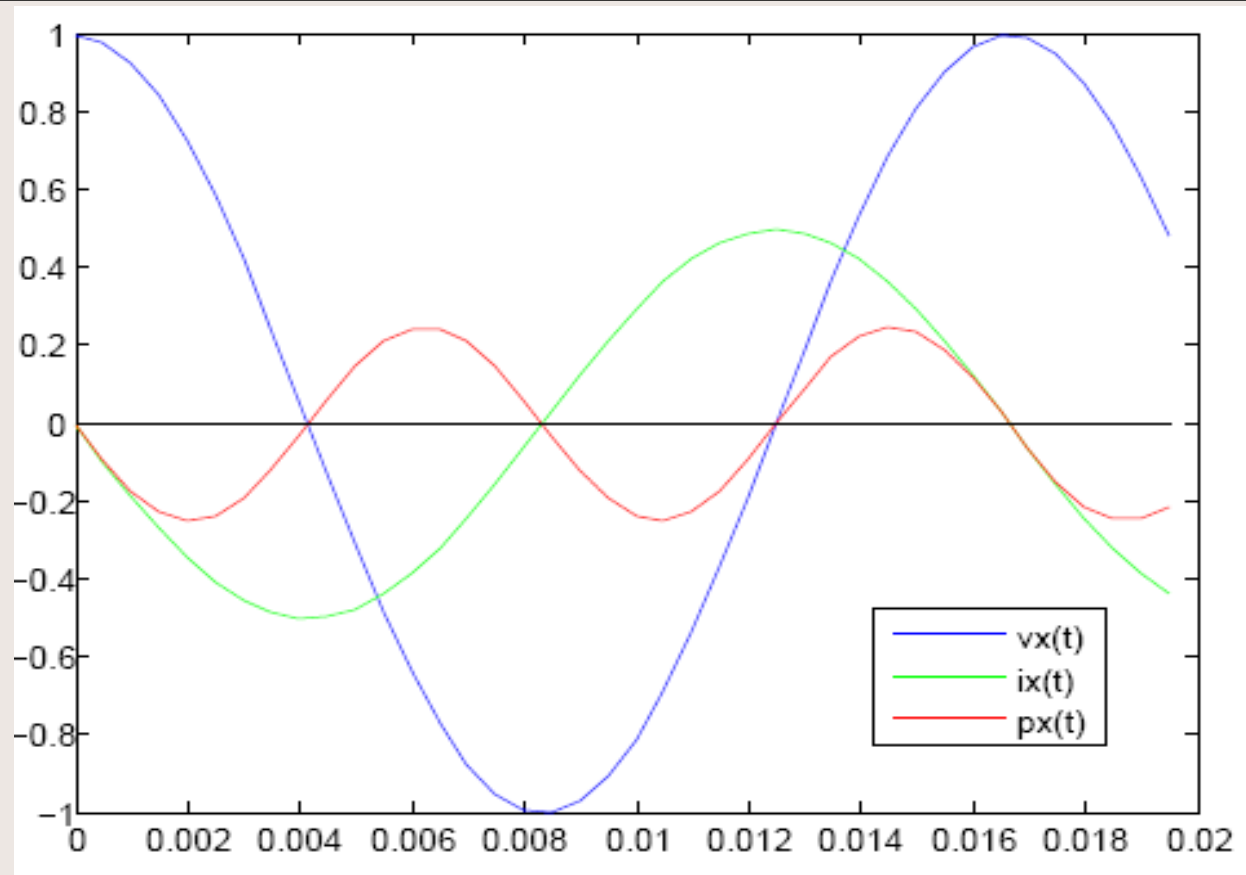


Figura 3. Potencia instantánea en la Inductancia

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- El valor promedio de $\cos 2\omega t$ y $\sin 2\omega t$, es cero. Por lo tanto, estos términos no contribuyen al valor promedio de la potencia que absorbe la carga Z_L .
- Esto es, la potencia promedio consumida por la carga Z_L , cuando es alimentada por voltaje y corriente sinusoidales, es el producto de los valores eficaces (rms) del voltaje y la corriente por el factor de potencia de la carga ($\cos \phi$).

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- Luego entonces, el valor promedio de la potencia que absorbe la inductancia de la carga es cero, ver figura 3.
- Por lo tanto, la potencia promedio que absorbe la carga puede ser expresada como:

$$P_{av} = \frac{V_m I_m}{2} \cos \phi \quad , \text{ o bien } P_{av} = V_{rms} I_{rms} \cos \phi$$

$$\text{donde; } V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad ; \quad I_{rms} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- La parte de la potencia "instantánea" $p(t)$ debida a la componente inductiva de la carga, se denomina "potencia reactiva instantánea" y expresa el flujo de energía que almacena y entrega de manera alterna esta componente de la carga.
- Al valor máximo de esta potencia "pulsante" se le denomina **potencia reactiva (Q)** o voltampere reactivos de la carga.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- A la potencia promedio P_{av} que absorbe la carga se le denomina **potencia activa (P)**, o "real".
- Las potencias activa (P) y reactiva (Q) quedan definidas por las siguientes expresiones:

$$P = V_{rms} I_{rms} \cos \phi$$

$$Q = V_{rms} I_{rms} \sin \phi$$

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- La **potencia compleja o aparente (S)** es un concepto útil para determinar fácilmente tanto la potencia activa (P) como la reactiva (Q), cuando los fasores de voltaje y corriente asociados con alguna carga o parte de un circuito son conocidos.
- La **potencia compleja (S)** se define como el producto del fasor de voltaje por el conjugado del fasor corriente, como se muestra a continuación:

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- Sean V e I los fasores de voltaje y corriente, definidos como:

$$V = V_m \angle \alpha \quad , \quad I = I_m \angle \beta \quad e$$

$I^* = I_m \angle -\beta$ conjugado del fasor corriente.

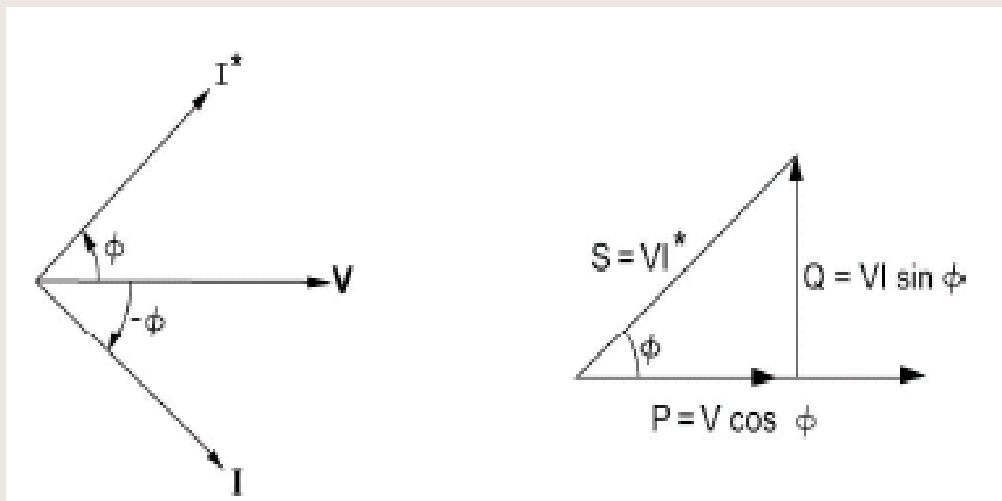
$$S = P + jQ = V I^* = V_m I_m \angle (\alpha - \beta) \quad (1)$$

$$S = V_m I_m [\cos(\alpha - \beta) + j \operatorname{sen}(\alpha - \beta)]$$

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

➤ El Triangulo de Potencias.

- A la representación gráfica de la expresión de la potencia compleja (1) se denomina triangulo de potencia.



Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

➤ Flujo de Potencia (convenciones)

- Para definir la dirección de la potencia que fluye a través de cualquier elemento de un circuito de C.A., se utilizan las convenciones siguientes:
 - Convención de la carga. La corriente entra por la terminal positiva del elemento de circuito. Si P (Q) es positiva, se absorbe potencia real (reactiva). Si P (Q) es negativa, se entrega potencia real (reactiva), figura 4(a).

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- Convención del generador. La corriente sale de la terminal positiva del elemento de circuito. Si P (Q) es positiva, se entrega potencia real (reactiva). Si P (Q) es negativa, se absorbe potencia real (reactiva), figura 4 (b).

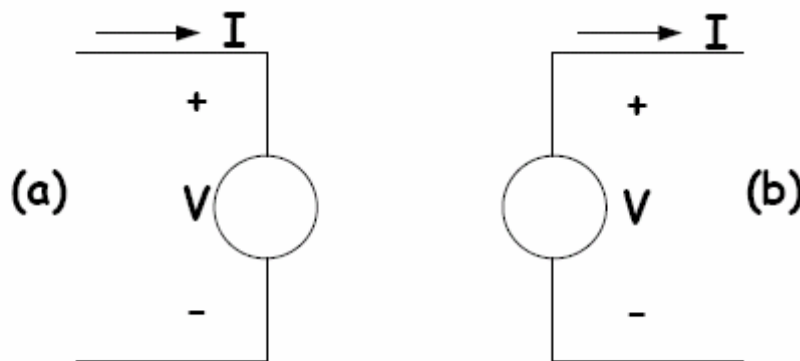


Figura 4. Convenciones de la carga (a) y del generador (b)

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

➤ Circuitos Trifásicos.

- Los SEP's existentes en la actualidad están compuestos por circuitos balanceados trifásicos (generación, transmisión y distribución).
- La potencia instantánea entregada por un generador trifásico bajo condiciones balanceadas y en estado estable no es función del tiempo, es constante a diferencia del caso monofásico.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- Una sistema de voltaje trifásico balanceado consiste tres fuentes monofásicas de igual magnitud y frecuencia, pero desfasadas 120° entre si.
- Secuencia de fases.
 - Se refiere al orden en que los fasores al girar en sentido contrario al de las manecillas del reloj pasan por una referencia determinada. La figura 5 indica una secuencia a,b,c.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

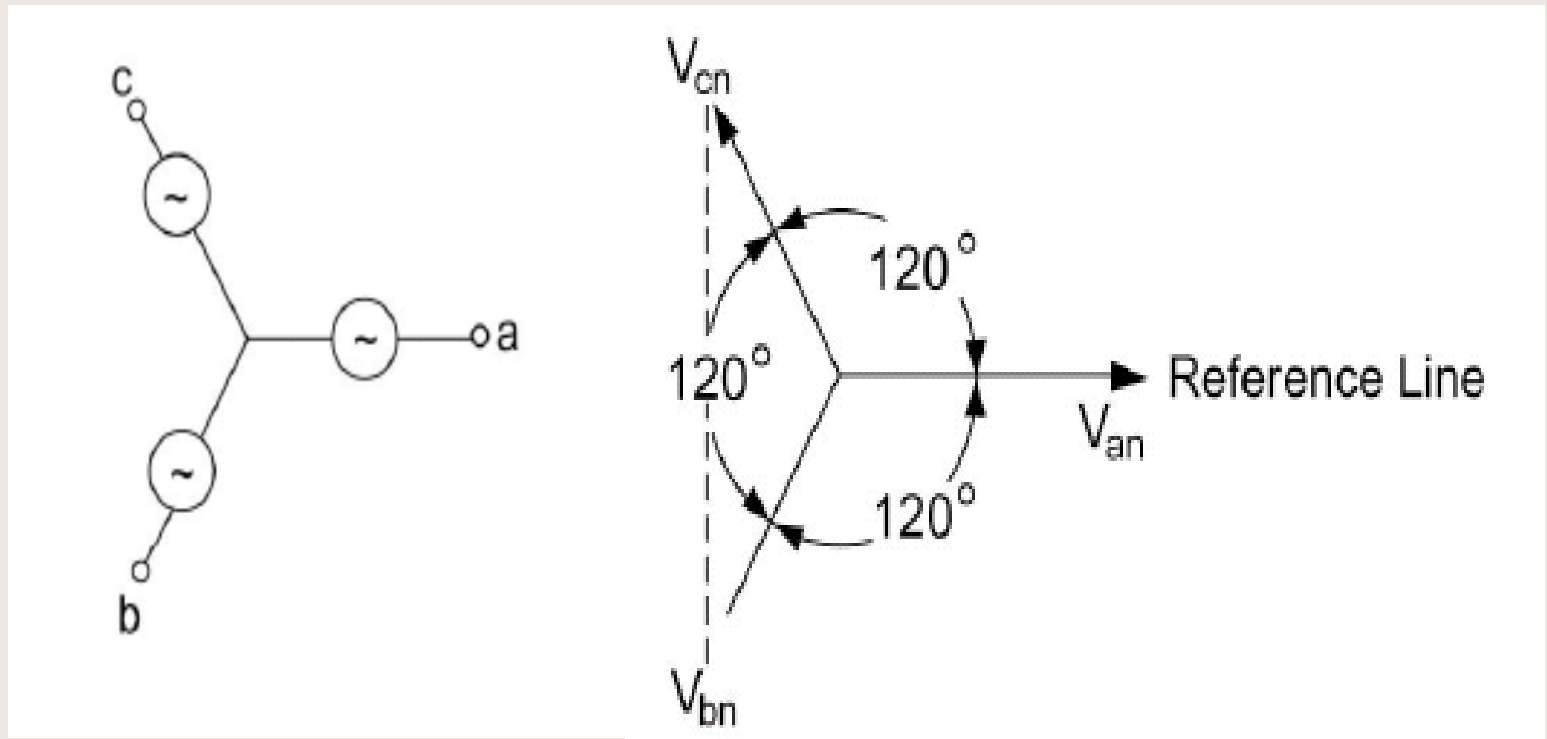


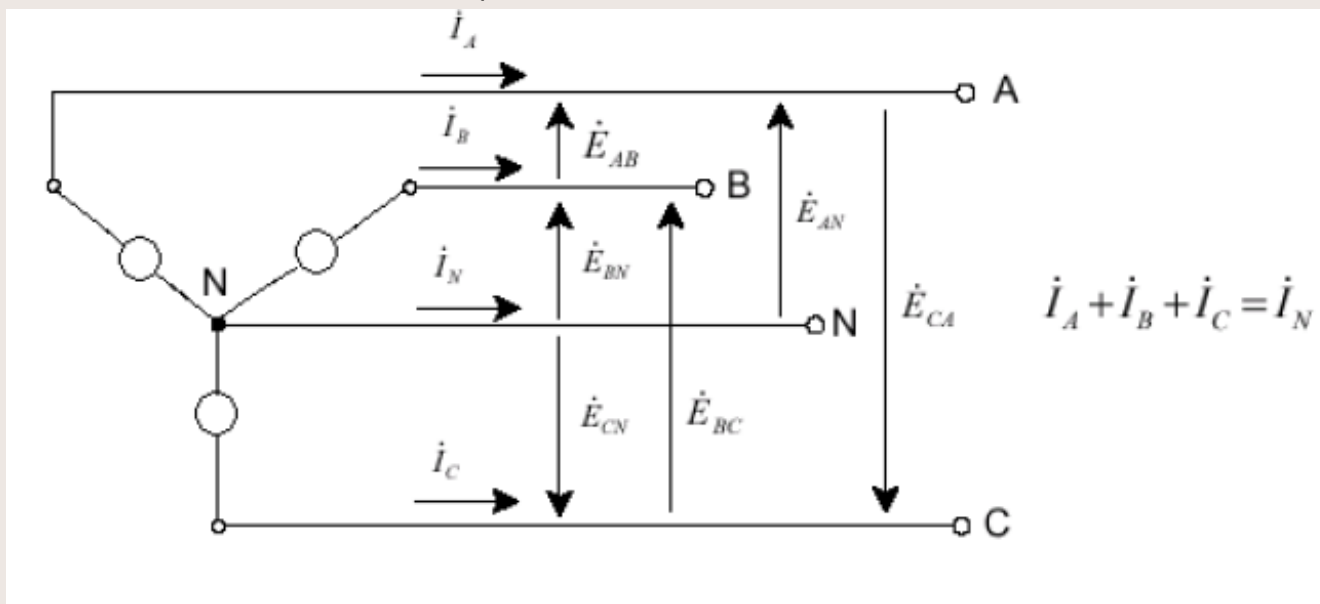
Figura 5. Sistema de Voltaje Trifásico balanceado y su correspondiente diagrama fasorial.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- Voltajes y Corrientes en Circuitos Trifásicos Balanceados.
 - Cada una de las componentes de un circuito trifásico exhiben cualquiera de las dos configuraciones siguientes:
 - Estrella Y
 - Delta Δ
 - Las relaciones voltaje-corriente dependiendo de la configuración se presenta a continuación:

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

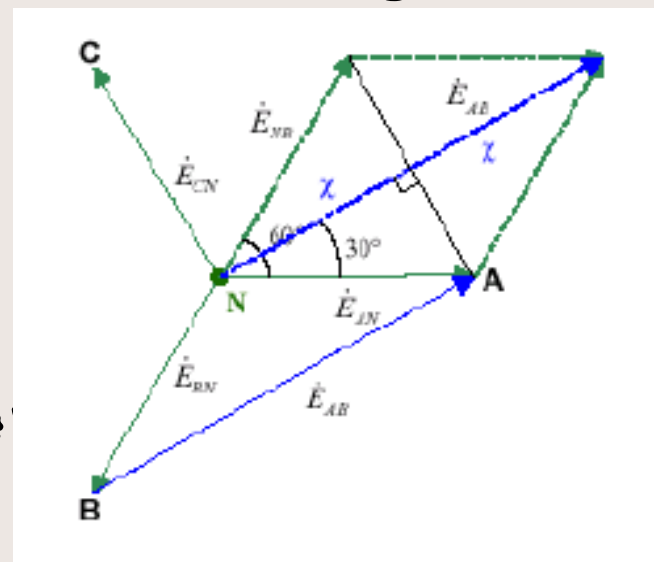
- Conexión en Estrella.
 - Voltaje entre fases E_{AB} .
 - Voltaje entre fase y neutro E_{AN} .
 - Corriente de fase I_A .



Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- En un sistema balanceado los voltajes tienen la misma magnitud, pero se encuentran desfasados 120° entre si.
- De la figura se deducen las siguientes relaciones:

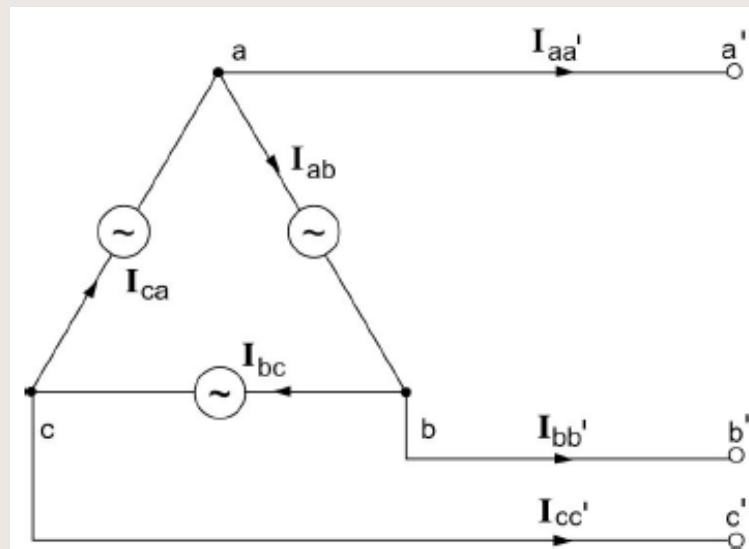
- Sea $E_A = V_p \angle 0^\circ$
- $E_{AB} = \sqrt{3} V_p \angle 30^\circ$
- $E_{BC} = \sqrt{3} V_p \angle -90^\circ$
- $E_{CA} = \sqrt{3} V_p \angle 150^\circ$
- Por lo tanto $V_{LL} = \sqrt{3} V_p$



Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- Conexión en Delta.

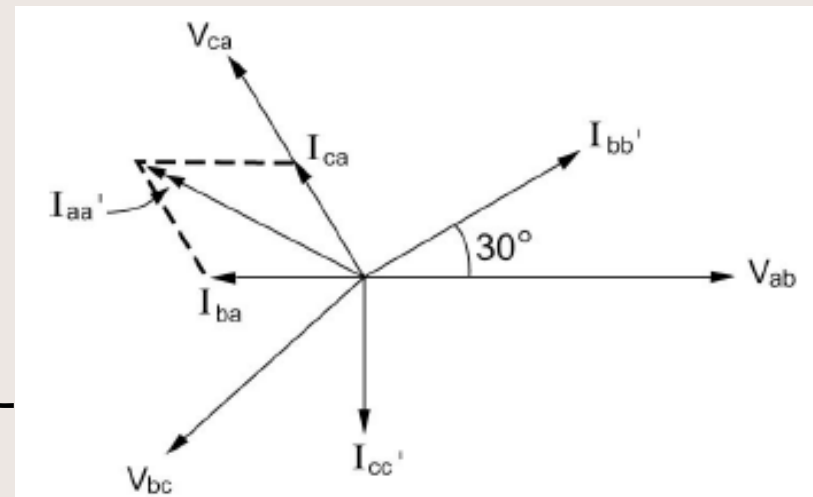
- Voltaje entre fases (de línea) V_{AB} .
- Corriente de línea o fase $I_{aa'}$
- Corriente entre líneas I_{ab}



Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- En un sistema balanceado las corrientes tienen la misma magnitud, pero se encuentran desfasadas 120° entre si.
- De la figura se deducen las siguientes relaciones:

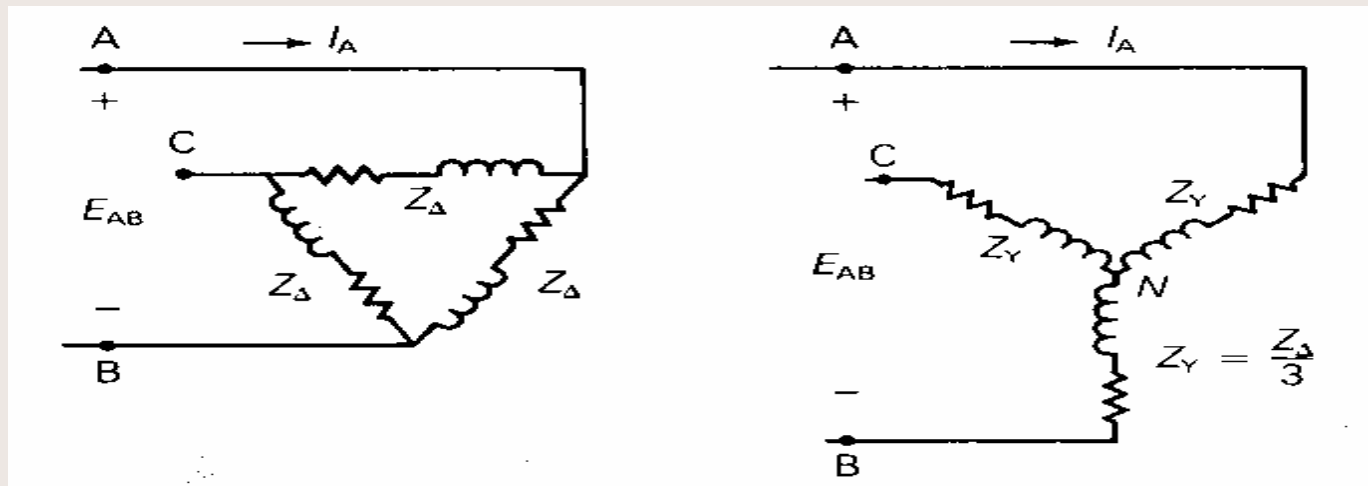
- Sea $I_{ab} = I_p \angle 0^\circ$
- $I_{aa'} = \sqrt{3} I_p \angle 150^\circ$
- $I_{bb'} = \sqrt{3} I_p \angle 30^\circ$
- $I_{cc'} = \sqrt{3} I_p \angle 90^\circ$
- Esto es, $\odot I_L \odot = \sqrt{3} I_p$



Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

➤ Transformaciones Y- Δ y Δ -Y

- En ocasiones resulta útil representar una configuración en Y por su Δ equivalente o viceversa.



Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- En el caso representado en la figura anterior, todas las ramas de la delta son idénticas, esto es una delta balanceada, la impedancia de cada una de las ramas de la estrella equivalente también son iguales y su valor es de $1/3$ del valor de la impedancia de una de las ramas de la delta.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- En el caso general, en que las impedancias de cada rama de la delta son Z_{ab} , Z_{bc} y Z_{ca} la relación con la impedancia de las ramas de la estrella Z_{an} , Z_{bn} y Z_{cn} es la siguiente:

$$Z_{an} = \frac{Z_{ab}Z_{ca}}{Z_{ab} + Z_{bc} + Z_{ca}} \quad ; \quad Z_{bn} = \frac{Z_{ab}Z_{bc}}{Z_{ab} + Z_{bc} + Z_{ca}}$$
$$Z_{cn} = \frac{Z_{bc}Z_{ca}}{Z_{ab} + Z_{bc} + Z_{ca}}$$

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- En el caso en que la transformación es de Y- Δ , y las impedancias de cada rama de la Y son Z_{an} , Z_{bn} y Z_{cn} , la relación con las ramas de la Δ son Z_{ab} , Z_{bc} y Z_{ca} es la siguiente:

$$Z_{ab} = \frac{Z_{an}Z_{bn} + Z_{bn}Z_{cn} + Z_{cn}Z_{an}}{Z_{cn}} \quad ; \quad Z_{bc} = \frac{Z_{an}Z_{bn} + Z_{bn}Z_{cn} + Z_{cn}Z_{an}}{Z_{an}}$$
$$Z_{ca} = \frac{Z_{an}Z_{bn} + Z_{bn}Z_{cn} + Z_{cn}Z_{an}}{Z_{bn}}$$

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- Potencia Instantánea y Compleja en Circuitos Trifásicos Balanceados.

- Sí un generador trifásico de C.A., alimenta una carga trifásica balanceada, en general los voltajes y corrientes de este sistema pueden expresarse como;

$$v_a(t) = \sqrt{2} V_p \cos(\omega t) \quad ; \quad i_a(t) = \sqrt{2} I_p \cos(\omega t - \phi)$$

$$v_b(t) = \sqrt{2} V_p \cos(\omega t - 120^\circ) ; \quad i_b(t) = \sqrt{2} I_p \cos(\omega t - 120^\circ - \phi)$$

$$v_c(t) = \sqrt{2} V_p \cos(\omega t + 120^\circ) ; \quad i_c(t) = \sqrt{2} I_p \cos(\omega t + 120^\circ - \phi)$$

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- En este caso la potencia instantánea será la suma de las potencias instantáneas de las tres fases. Esto es,

$$p_{3\phi}(t) = v_a(t)i_a(t) + v_b(t)i_b(t) + v_c(t)i_c(t)$$

$$p_{3\phi}(t) = V_p I_p \{3 \cos\phi + \cos(2\omega t - \phi) + \cos(2\omega t - 240^\circ - \phi) + \cos(2\omega t + 240^\circ - \phi)\}$$

$$p_{3\phi}(t) = 3 V_p I_p \cos\phi$$

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- Se deduce que la potencia trifásica instantánea en un circuito balanceado es **constante** y es igual a tres veces la potencia promedio de una fase.
- Se deduce también que la potencia reactiva trifásica instantánea en un circuito balanceado es cero. Sin embargo, esto no implica que la potencia reactiva sea cero también en cada una de las fases.
- La potencia compleja o aparente se determina por la siguiente expresión:

$$S_{3\phi} = S_a + S_b + S_c$$

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- La magnitud de la potencia que entrega cada fase en un circuito trifásico balanceado es la misma, por lo que la potencia compleja puede ser calculada utilizando los fasores de voltaje y corriente mediante las siguientes expresiones, donde V_L e I_L son los fasores de las cantidades de línea, mientras que V_p e I_p son los de las cantidades de fase.

$$S_{3\phi} = P_{3\phi} + jQ_{3\phi} = 3 V_p I_p^*$$

$$S_{3\phi} = P_{3\phi} + jQ_{3\phi} = \sqrt{3} V_L I_L^*$$

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

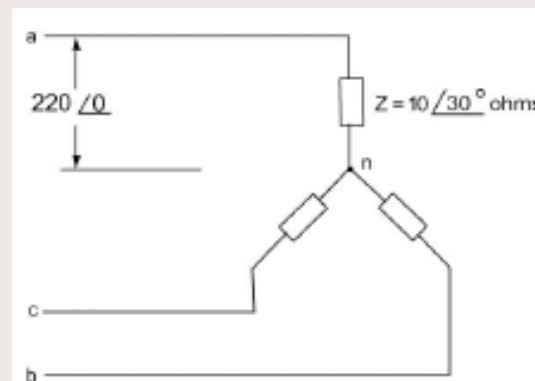
➤ Ejemplo 1

- Una carga balanceada conectada en estrella Y, 3 impedancias de $10 \angle 30^\circ \Omega$ cada una, es alimentada por una fuente trifásica, con voltajes de fase a neutro; $V_{an} = 220 \angle 0^\circ$; $V_{bn} = 220 \angle 240^\circ$; $V_{cn} = 220 \angle 120^\circ$. Determinar:
 - Las corrientes de fase
 - Los fasores de los voltajes de línea
 - Las potencias totales activa y reactiva suministradas a la carga

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

➤ Solución

- Conexión de la carga $\Rightarrow$



Las corrientes de fase se obtienen como; Los voltajes de línea se obtienen como;

$$I_{an} = \frac{220}{10 \angle 30^\circ} = 22 \angle -30^\circ$$

$$I_{bn} = \frac{220 \angle 240^\circ}{10 \angle 30^\circ} = 22 \angle 210^\circ$$

$$I_{cn} = \frac{220 \angle 120^\circ}{10 \angle 30^\circ} = 22 \angle 150^\circ$$

$$V_{ab} = V_{an} - V_{bn}$$

$$= 220 \angle 0^\circ - 220 \angle 240^\circ = 220\sqrt{3} \angle 30^\circ$$

$$V_{bc} = 220\sqrt{3} \angle (30^\circ - 120^\circ) = 220\sqrt{3} \angle -90^\circ$$

$$V_{ca} = 220\sqrt{3} \angle (30^\circ - 240^\circ) = 220\sqrt{3} \angle -210^\circ$$

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

La potencia compleja en la fase a se determina como;

$$S_a = V_{an} I^*_{an} = 220 * 22 \angle 30^\circ = 4840 \angle 30^\circ \text{ VA}$$

La potencia compleja total es igual a 3 veces la potencia monofásica, por lo tanto;

$$\begin{aligned} S_{\text{tot}} &= 3S_a = 3 * 4840 \angle 30^\circ \text{ VA} \\ &= 6287.35 + j3630.00 \end{aligned}$$

Luego entonces las potencias activa y reactiva son:

$$P = 12574.69 \text{ watts} \quad ; \quad Q = 7260 \text{ var}$$

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

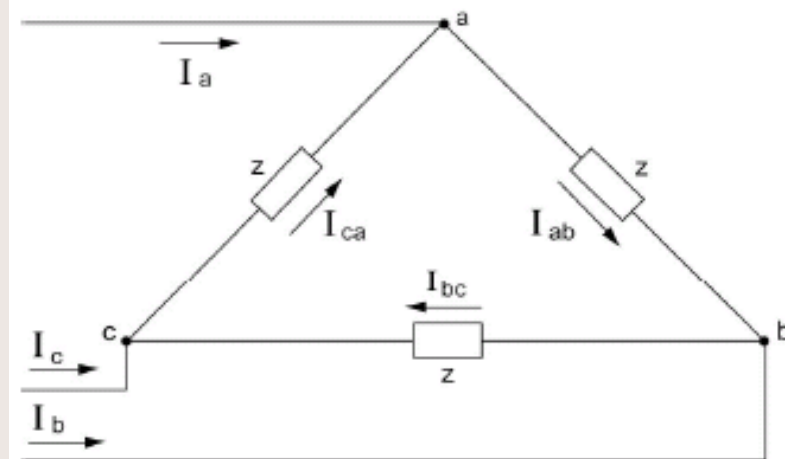
➤ Ejemplo 2

- La misma fuente de voltaje del ejemplo 1 alimenta ahora una carga balanceada conectada en delta , la impedancia de cada rama de la delta es de $10 \angle 30^\circ \Omega$.
- Determinar:
 - Las corrientes de fase
 - Los fasores de los voltajes de línea
 - Las potencias totales activa y reactiva suministradas a la carga

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

➤ Solución

- Conexión de la carga



En el ejemplo 1, se determino que: Las corrientes de las ramas de la Δ son;

$$V_{ab} = 220\sqrt{3} \angle 30^\circ$$

$$V_{bc} = 220\sqrt{3} \angle -90^\circ$$

$$V_{ca} = 220\sqrt{3} \angle -210^\circ$$

$$I_{ab} = \frac{220\sqrt{3} \angle 30^\circ}{10 \angle 30^\circ} = 22\sqrt{3} \angle 0^\circ$$

$$I_{bn} = 22\sqrt{3} \angle -120^\circ$$

$$I_{cn} = 22\sqrt{3} \angle 120^\circ$$

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- El sentido de referencia de las corrientes de líneas es el mostrado en la figura anterior. Luego entonces:

$$I_a = I_{ab} - I_{ca} = 22\sqrt{3}(1\angle 0^\circ - 1\angle -120^\circ) = 66\angle 30^\circ$$

$$I_b = I_{bc} - I_{ab} = 66\angle -90^\circ$$

$$I_c = I_{ca} - I_{bc} = 66\angle -210^\circ$$

La potencia compleja en la impedancia entre "a" y "b"

$$S_{ab} = V_{ab} I_{ab}^* = (220\sqrt{3}\angle 30^\circ)(22\sqrt{3}\angle 0^\circ)$$

$$S_{ab} = 14520\angle 30^\circ$$

Así pues, la potencia total trifásica es,

$$S_{tot} = 43560\angle 30^\circ = 37724.04 + j21780.0$$

$$P_{tot} = 37724.04 \text{ watts} \quad y \quad Q_{tot} = 21780.0 \text{ vars}$$

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

La potencia compleja en la fase a se determina como;

$$S_a = V_{an} I^*_{an} = 220 * 22 \angle 30^\circ = 4840 \angle 30^\circ \text{ VA}$$

La potencia compleja total es igual a 3 veces la potencia monofásica, por lo tanto;

$$\begin{aligned} S_{\text{tot}} &= 3S_a = 3 * 4840 \angle 30^\circ \text{ VA} \\ &= 6287.35 + j3630.00 \end{aligned}$$

Luego entonces las potencias activa y reactiva son:

$$P = 12574.69 \text{ watts} \quad ; \quad Q = 7260 \text{ var}$$

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- Se infiere que cuando se trata con problemas de circuitos trifásicos balanceados, basta con calcular los resultados para una sola fase y posteriormente predecir el resultado de las otras dos, haciendo uso de la simetría trifásica. El circuito que se utiliza en este tipo de análisis, se conoce usualmente como circuito equivalente por fase.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

➤ El Sistema Por Unidad.

- Definición.

- La unidad más comúnmente empleada para definir el voltaje de operación en los SEP's es el "kilovolt" (kV). Mientras que los "kilovolts-ampere" (kVA) y megavolts-ampere (MVA) son las unidades usadas para el flujo de potencia (aparente).
- Las unidades anteriores junto con los "kilowatts", "kilovars", amperes, ohms, etc., suelen expresarse en "por unidad" o "por ciento" de una referencia o valor base.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- El valor en "por unidad" de cualquier cantidad (C) es la razón de esa cantidad a su valor base. El valor resultante es una cantidad "adimensional". Mientras que el valor en "porcentaje" (%) de dicha cantidad es el valor en por unidad de la misma multiplicado por 100.

$$C \text{ (pu)} = \text{valor real de } C / \text{valor base de } C \quad (\text{B.1})$$

$$C \text{ (\%)} = C \text{ (p.u.)} * 100$$

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- Donde el valor real de C esta expresado en sus propias unidades (volts, amperes, ohms, watts, etc.). Mientras que el valor base de C es un valor arbitrario o "conveniente" que se selecciona como referencia para la cantidad en cuestión.
- En el análisis de SEP's las cantidades más comúnmente utilizadas son las siguientes:

✓ Corriente (A)	I
✓ Voltaje (Volts)	V
✓ Potencia (Voltamperes)	$S = P + jQ = VI$
✓ Impedancia (Ω)	$Z = R + jX = V/I$

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- ✓ Ángulo de fase (rad, grados) $\square$, $\times$
- ✓ Tiempo (segundos) $\dagger$
- Se infiere fácilmente que de las seis cantidades anteriores 2 son independientes y las otras 4 son función de únicamente 2 de ellas.
- Así pues, si seleccionan de manera arbitraria como cantidades base dos de entre I , V , P , y Z , las otras cantidades base son automáticamente determinadas.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

➤ Ventajas del Sistema p.u.

- Históricamente la razón de expresar los valores de las variables y parámetros del SEP fue simplificar los cálculos numéricos que se realizaban en forma manual. El uso de la computadora "eliminó" esta ventaja. Sin embargo, permanecen las siguientes:
 - En p.u., la impedancia equivalente de un transformador es la misma referida al primario o al secundario de éste.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- En p.u., la impedancia equivalente de un transformador en un sistema trifásico es la misma sin importar el tipo de conexión entre sus devanados (estrella-delta, delta-estrella, estrella-estrella o delta-delta).
- El sistema p.u., es independiente de los diferentes niveles de voltaje del SEP y desfases introducidos por los transformadores si los voltajes base en sus devanados son proporcionales al número de vueltas de éstos.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- Los fabricantes usualmente especifican las impedancias de sus equipos en "por unidad" o en "por ciento" del valor base de sus datos de placa (kVA y kV nominales).
- El producto de dos cantidades expresadas en p.u., es siempre otra cantidad en p.u.
- En el caso de cantidades expresadas en % el producto resultante debe ser dividido entre 100 para obtener su valor en %. Por esta razón se prefiere usar los valores en p.u., en lugar de %.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

➤ Cantidades Base

- En el análisis de SEP's el voltaje (volts) de operación de cualquier componente del SEP es generalmente conocida, por lo que su selección como cantidad base es también una práctica común.
- Otra de las cantidades que usualmente se selecciona como base es la potencia aparente (voltamperes). En prácticamente cualquier equipo esta cantidad es usualmente conocida.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- En el análisis de SEP's comúnmente se selecciona el valor de 100 MVA como potencia aparente (S) base.
- Sí se seleccionan como cantidades base al Voltaje (V_B Volts) y a la Potencia Aparente (S_B Voltsampers) tanto la corriente como la impedancia base quedan determinadas por las siguientes dos expresiones:

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

Corriente Base

$$I_B = \frac{S_B}{V_B} \text{ Amp}$$

Impedancia Base

$$Z_B = \frac{V_B}{I_B} = \frac{V_B^2}{S_B} \Omega$$

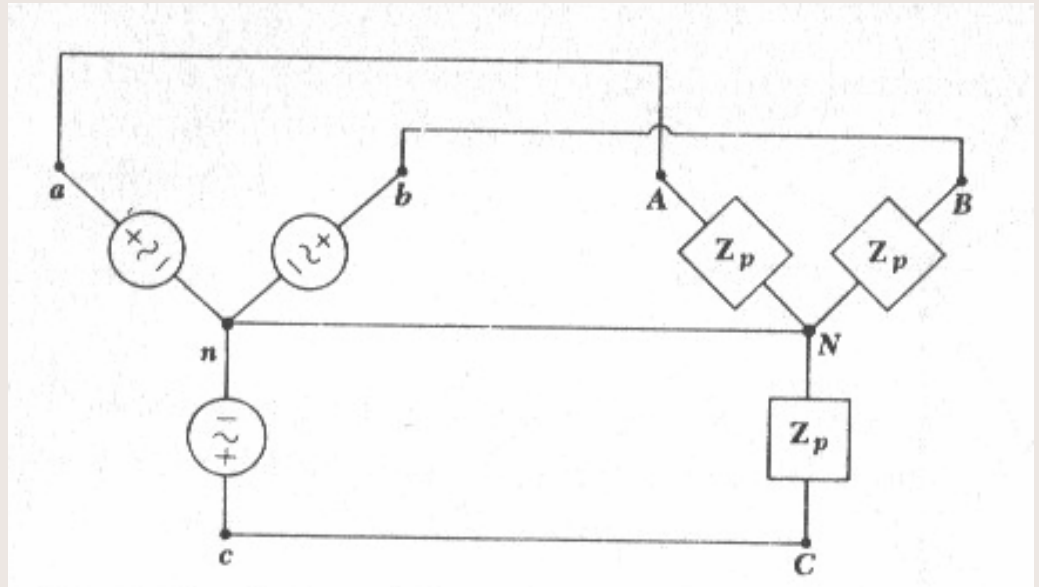
- Así pues, teniendo definidas todas las cantidades base cualquiera de las cantidades puede ser entonces convertidas a p.u. de acuerdo con la relación (B.1)

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

➤ Ejemplo 3

- Una fuente trifásica balanceada con secuencia de fases "abc", alimenta una carga balanceada conectada en Y, de 240 kVA con $fp=0.6$ (+)
- Sí $V_{LL} = 2400$ Volts y $S_{3\phi} = 300$ kVA son las cantidades base, expresar en p.u. el voltaje, impedancia por fase de cada carga y la corriente de fase.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia



➤ Solución,

- La figura representa al circuito en cuestión. Así pues, la potencia base por fase es $S_{1\phi b} = 300/3 = 100 \text{ kVA}$.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

El Voltaje base de línea a neutro es :

$$V_{BLN} = V_{LN\alpha} = \frac{2400}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ \approx 1386 \angle 0^\circ \text{ V}$$

La potencia de la carga por fase es :

$$S_{1\phi\alpha} = \frac{240}{3} \angle -53.13^\circ = 80 \angle -53.13^\circ \text{ kVA}$$

La corriente por fase se determina como;

$$I_{fa}^* = \frac{S_{1\phi\alpha}}{V_{LN\alpha}} = \frac{80000 \angle -53.13^\circ}{1386 \angle 0^\circ} = 57.72 \angle -53.13^\circ \text{ A}$$

$$\therefore I_{fa} = 57.72 \angle 53.13^\circ \text{ A}$$

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

La impedancia por fase de la carga se determina como;

$$Z_{fa} = \frac{V_{LNa}^2}{S_{1\phi a}} = \frac{1386^2 \angle 0^\circ}{80000 \angle -53.13^\circ} \approx 24 \angle 53.13^\circ \Omega$$

Luego entonces, las cantidades base para la impedancia y corriente se determinan como

$$Z_{Bf} = \frac{V_{BLN}^2}{S_{B1\phi}} = \frac{1386^2 \angle 0^\circ}{100000 \angle -53.13^\circ} = 19.21 \angle 53.13^\circ \Omega$$

$$I_{Bf} = \frac{S_{B1\phi}}{V_{BLN}} = \frac{100000 \angle -53.13^\circ}{1386 \angle 0^\circ} \approx 72.15 \angle -53.13^\circ A$$

valores de V_{BLN} , $S_{B1\phi}$, I_{Bf} y Z_{Bf} , las magnitudes en p.u. son :

$$V_{LN} = \frac{1386}{1386} = 1.0 \text{ p.u.} ; S_{1f} = \frac{80}{100} = 0.8 \text{ p.u.}$$

$$I_f = \frac{57.72}{72.15} = 0.8 \text{ p.u.} ; Z_f = \frac{24}{19.21} = 1.25 \text{ p.u.}$$

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

➤ Relaciones Generales en Circuitos Trifásicos

- Las siguientes relaciones entre voltaje, corriente y potencia son aplicables a cualquier circuito trifásico, sin importar si su configuración es Y o Δ .

$$S_{3\phi} = \sqrt{3} V_{LL} I_L \quad (VA)$$

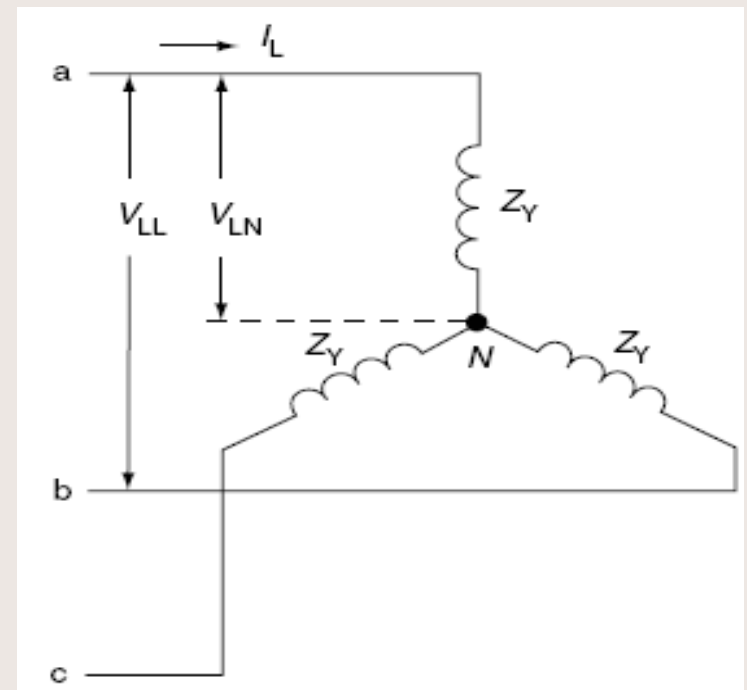
$$V_{LL} = \sqrt{3} V_{LN} \angle + 30^\circ \quad (V) \quad ; \quad I_L = \frac{S_{3\phi}}{\sqrt{3} V_{LL}} \quad (A)$$

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- En el caso de la conexión en Y se tiene,

$$Z_Y = \frac{V_{LN}}{I_L} = \frac{V_{LL} \angle -30^\circ \sqrt{3} V_{LL}}{\sqrt{3} S_{3\phi}}$$

$$= \frac{V_{LL}^2 \angle -30^\circ}{S_{3\phi}} \quad \Omega$$



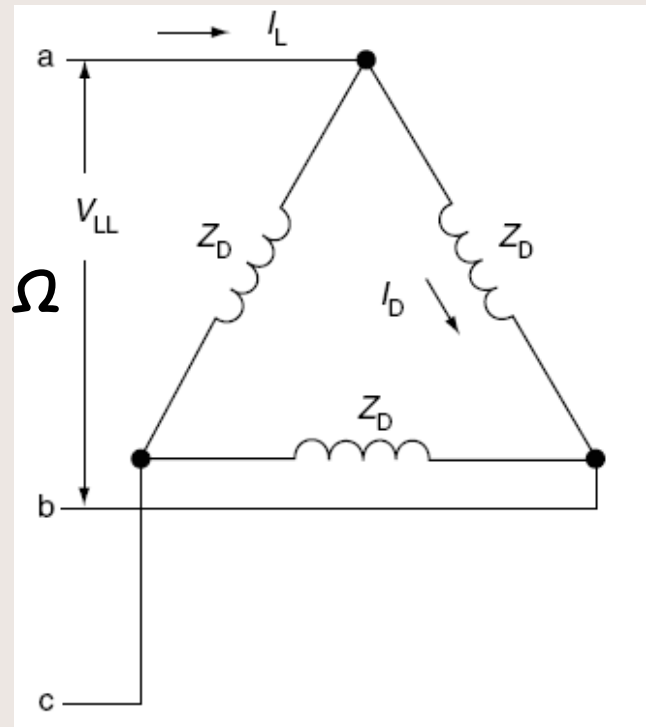
Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- En el caso de la conexión en Δ se tiene,

$$I_D = \frac{I_L \angle 30^\circ}{\sqrt{3}} \quad ; \quad Z_D = \frac{V_{LL}}{I_D} = \frac{\sqrt{3} \angle -30^\circ}{I_L}$$

$$Z_D = \frac{\sqrt{3} V_{LL} \angle -30^\circ * \sqrt{3} V_{LL}}{S_{3\phi}} = \frac{3 V_{LL}^2 \angle -30^\circ}{S_{3\phi}} \quad \Omega$$

$$I_D = \frac{V_{LL}}{Z_D} = \frac{S_{3\phi} \angle 30^\circ}{3 V_{LL}} \quad A$$



Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

➤ Relaciones en por unidad

- En la práctica es más común el usar kVA o MVA y kV en lugar de $S_{3\phi}$ y V_{LLB} para referirse a la potencia y voltaje base. Así pues,

$$\text{Potencia Base} \Rightarrow kVA_b = \sqrt{3} kV_b I_b \quad (\text{kVA})$$

$$\text{Corriente Base} \Rightarrow I_b = \frac{kVA_b}{\sqrt{3} kV_b} \quad (\text{A})$$

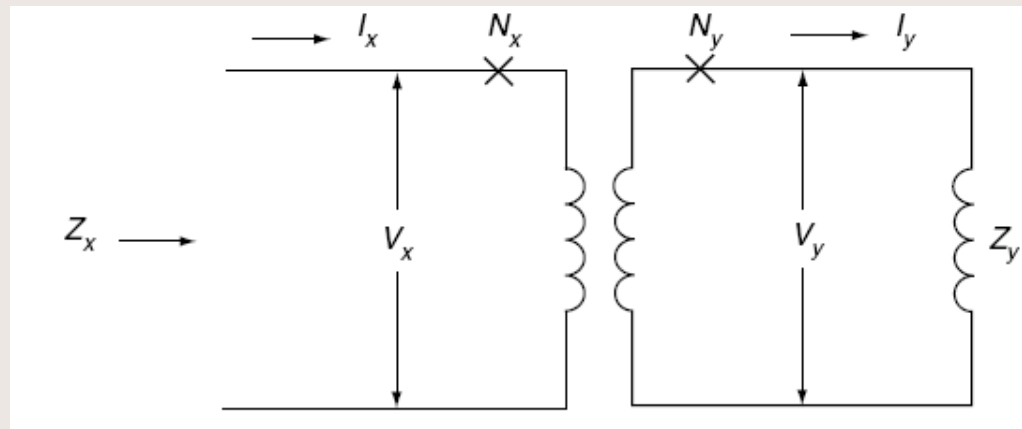
$$\text{Impedancia Base} \Rightarrow Z_b = \frac{kV_b^2 * 1000}{kVA_b} \quad (\Omega) = \left(\frac{kV_b^2}{MVA_b} \right) (\Omega)$$

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- Impedancias de transformadores en por unidad (p.u.)
 - Una de las ventajas del sistema p.u. es su independencia de los niveles de voltaje del SEP y el desfase debido a los transformadores si los voltajes base en sus devanados son proporcionales al número de vueltas de éstos.
 - La impedancia de un transformador es reflejada a través del transformador por el cuadrado de la razón del número de vueltas de sus devanados.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- Sí los voltajes son proporcionales al número de vueltas de sus devanados, la impedancia se refleja también al cuadrado de la razón de los voltajes de sus devanados. En el caso de una de las fases del transformador se tiene:



Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- Se deduce que la impedancia Z_y en el devanado de N_y vueltas se refleja como Z_x en el devanado de N_x vueltas. Esto es:

$$Z_x = \left(\frac{N_x}{N_y} \right)^2 Z_y = \left(\frac{V_x}{V_y} \right)^2 Z_y$$

La impedancia base en cada lado del transformador es,

$$Z_{xb} = \frac{kV_x^2}{MVA_b}, \quad kV_x \text{ es el voltaje base en el lado } x$$

$$Z_{yb} = \frac{kV_y^2}{MVA_b}, \quad kV_y \text{ es el voltaje base en el lado } y$$

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- La razón de las impedancias Z_{xb} y Z_{yb} indica que las vueltas en cada devanado son proporcionales a sus voltajes;

$$\frac{Z_{xb}}{Z_{yb}} = \frac{kV_x^2}{kV_y^2} = \left(\frac{V_x}{V_y} \right)^2$$

Las impedancias en por unidad son,

$$Z_x \text{ pu} = \frac{Z_x \Omega}{Z_{xb}} = \left(\frac{N_x}{N_y} \right)^2 \left(\frac{N_y}{N_x} \right)^2 \frac{Z_y \Omega}{Z_{yb}} = \frac{Z_y \Omega}{Z_{yb}} = Z_y \text{ pu}$$

Esto es la impedancia en p.u. es la misma en ambos lados del transformador

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

➤ Ejemplo 4

- Un transformador monofásico tiene como valores nominales 110/440 Volts, 2.5 kVA y una reactancia de dispersión de 0.06Ω . Expresar la reactancia de dispersión en p.u.

➤ Solución

- La impedancia base en el lado de baja se determina como:

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

$$Z_b^{baja} = \frac{kV_b^2 * 1000}{kVA_b} = \frac{0.11^2 * 1000}{2.5} = 4.84 \Omega$$

Luego entonces, $X_i \text{ pu} = \frac{0.06}{4.84} = 0.0124 \text{ pu}$

La reactancia medida en el lado de alta es,

$$X_{lalta} = 0.06 \left(\frac{440}{110} \right)^2 = 0.96 \Omega$$

$$Z_b^{alta} = \frac{kV_b^2 * 1000}{kVA_b} = \frac{0.44^2 * 1000}{2.5} = 77.5 \Omega$$

Luego entonces, $X_i \text{ pu} = \frac{0.96}{77.5} = 0.0124 \text{ pu}$

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

➤ Impedancias de generadores en por unidad (p.u.)

- Las impedancias de los generadores son proporcionadas usualmente por el fabricante en p.u. teniendo como cantidades base los valores de potencia y voltaje nominales.
- Las impedancias de los generadores son predominantemente inductivas y su parte resistiva puede ser ignorada en estudios de fallas.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- Los datos de los generadores consideran diferentes valores de reactancias adecuados para el estudio del comportamiento del generador en distintas condiciones de operación.
- Los diferentes tipos de reactancias que usualmente se proporcionan son las de los ejes directo "d" y en cuadratura "q", síncrona (X_d , X_q), transitoria (X'_d , X'_q) y subtransitoria (X''_d , X''_q).

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- Las reactancias del eje directo son las que comúnmente se emplean en estudios de fallas, porque la trayectoria del flujo en el eje directo es la predominante durante condiciones de falla, ya que las corrientes de falla presentan un retraso de fase considerable.
- El valor de la reactancia del generador cambia en el tiempo después de ocurrir una falla, ya que los enlaces de flujo no pueden variar instantáneamente.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- La reactancia subtransitoria X''_d es la del valor más pequeño y representa a la reactancia del generador al momento de ocurrir la falla. Este valor dura pocos ciclos hasta que el efecto de los devanados de amortiguamiento sobre las variaciones del flujo disminuye. El rango de tiempo válido para esta reactancia es aproximadamente 6 ciclos después de ocurrir la falla.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- La reactancia transitoria $X'd$ es mayor que $X''d$ y se estima que su valor es válido en el rango de los 6 hasta los 30 o 60 ciclos después de ocurrir la falla.
- La reactancia síncrona X_d es la que presenta el valor mayor de las tres y representa la reactancia que exhibe el generador en condiciones de operación de estado estable. El valor de X_d es usualmente mayor que 1.0 en p.u.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- Impedancias de líneas de transmisión en por unidad (p.u.)
 - La impedancia de las líneas de transmisión de resistencia, reactancia inductiva y reactancia capacitiva. Sin embargo la reactancia capacitiva usualmente se ignora en estudios de fallas, por tener una influencia mínima en las corrientes que resultan al ocurrir una falla en el SEP.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- Para expresar el valor de impedancia de las líneas de transmisión (Ω) en valores p.u. usualmente se selecciona como voltaje base el voltaje nominal de operación de la línea, y se calcula de la manera siguiente:

$$Z_{pu} = \frac{Z_{\Omega}}{Z_b} = \frac{MVA_b Z_{\Omega}}{kV_b^2} = \frac{kVA_b Z_{\Omega}}{1000 * kV_b^2}$$

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- Cambio de base de cantidades en p.u.
 - Usualmente las cantidades en p.u. de los equipos tienen como cantidades base sus valores nominales (kVA o MVA y kV)
 - En la mayoría de los casos estas cantidades base son diferentes a las seleccionadas como base para el SEP.
 - Cualquier tipo de estudio en SEPs requiere que todas las impedancias del SEP se expresen en la misma base.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- Para el caso de una impedancia de $Z \Omega$ expresada en p.u. en dos bases diferentes se tienen dos valores Z_{pu1} y Z_{pu2} calculados como:

$$Z_{pu1} = \frac{MVA_{b1} Z_{\Omega}}{kV_{b1}^2} \quad y \quad Z_{pu2} = \frac{MVA_{b2} Z_{\Omega}}{kV_{b2}^2}$$

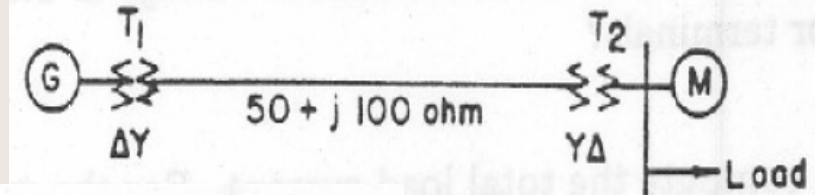
De la razón de estas expresiones se infiere que:

$$Z_{pu2} = \left(\frac{MVA_{b2} kV_{b1}^2}{MVA_{b1} kV_{b2}^2} \right) Z_{pu1} \quad (Z.1)$$

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

➤ Ejemplo 5

- Expresar en p.u. las impedancias de las componentes del SEP mostrado en la figura siguiente, sobre la base de 161 kV y 20 MVA.



Generator: 15 MVA, 13.8 kV, $x = 0.15$ pu

Motor: 10 MVA, 13.2 kV, $x = 0.15$ pu

T1: 25 MVA, 13.2-161 kV, $x = 0.10$ pu

T2: 15 MVA, 13.8-161 kV, $x = 0.10$ pu

Load: 4 MVA at 0.8 *pf* lag

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

➤ Solución

- Aplicando las expresiones, $Z_{pu} = \frac{MVA_b Z_{\Omega}}{kV_b^2}$
 $Z_{pu2} = \left(\frac{MVA_{b2} kV_{b1}^2}{MVA_{b1} kV_{b2}^2} \right) Z_{pu1}$ se obtiene;

$$X_{li} = \left(\frac{20}{161^2} \right) (50 + j100) = 0.0386 + j0.0772$$

$$X_g = \left(\frac{20 * 13.8^2}{15 * 161^2} \right) 0.15 = 0.0015$$

$$X_m = \left(\frac{20 * 13.2^2}{10 * 161^2} \right) 0.15 = 0.0020$$

$$X_{t1} = \left(\frac{20}{25} \right) 0.1 = 0.0 \quad ; \quad X_{t2} = \left(\frac{20}{15} \right) 0.1 = 0.1333$$

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

➤ Transformadores (conexiones y desfasamientos).

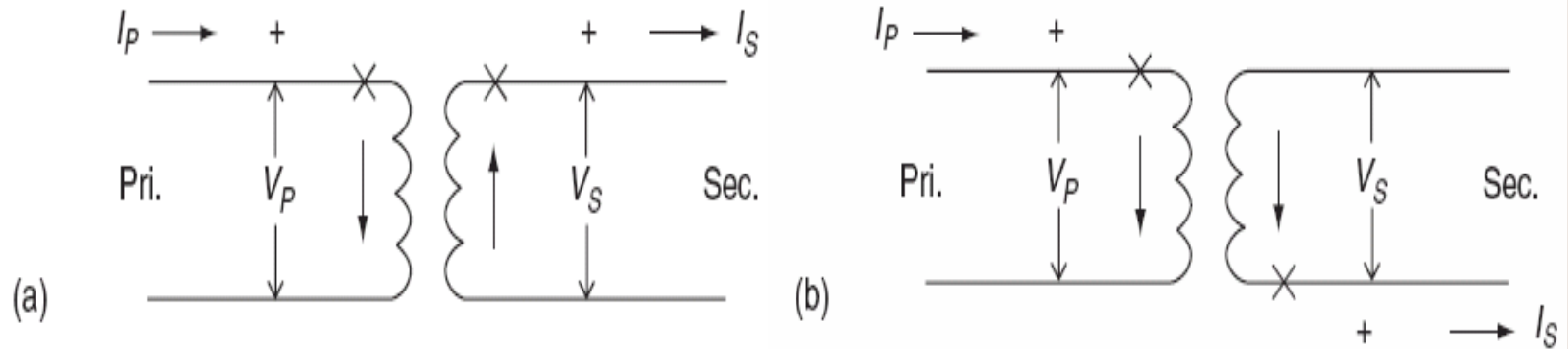
- Importancia de la Polaridad.

- La importancia del concepto de polaridad en transformadores es básica para la correcta conexión en paralelo de transformadores monofásicos o trifásicos con sistemas eléctricos ya existentes.
- Permite conocer la dirección tanto de la corriente como de la caída de tensión en los devanados del transformador en cualquier instante de tiempo.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- Polaridad del Transformador.
 - Se refiere a la dirección relativa de los voltajes inducidos entre las terminales del lado de alta y las de baja tensión.
- Marca de polaridad en Transformadores
 - La marca de polaridad en transformadores es definida por estándares mundialmente aceptados, usualmente ésta se indica por un punto • , un cuadrado o las letras H y X.
 - Existen dos tipos de polaridades definidas "aditiva" y "sustractiva".

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia



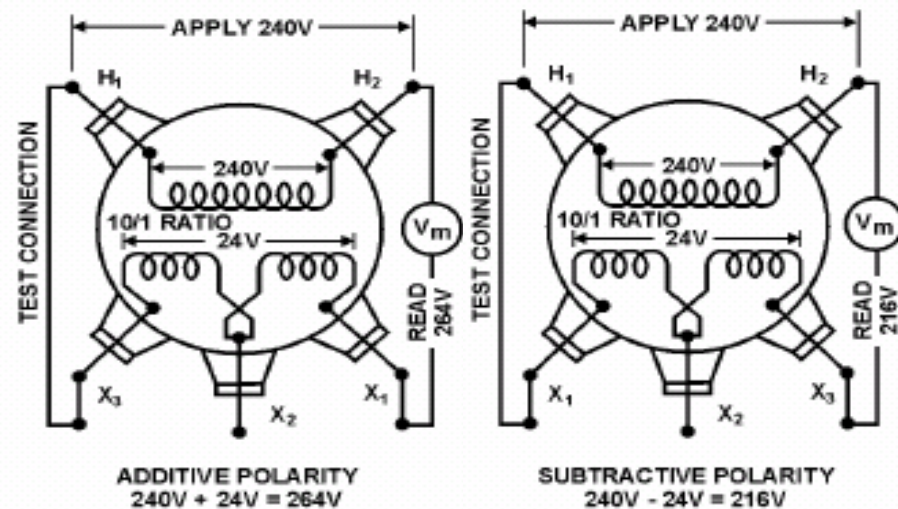
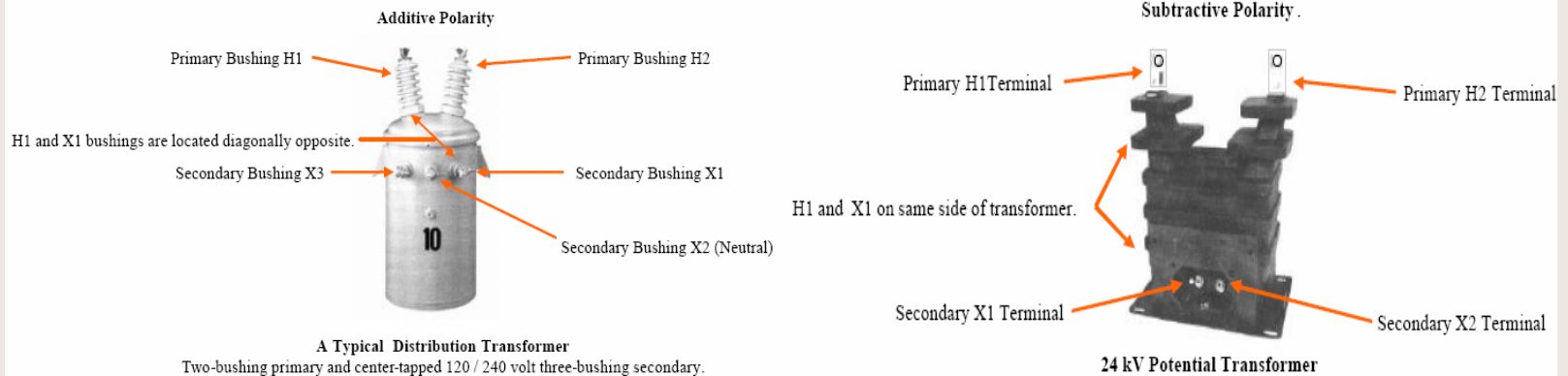
Polaridad en transformadores, (a) sustractiva, (b) aditiva.

- Las reglas fundamentales para definir las marcas de polaridad de un transformador ilustradas en la figura anterior son las siguientes:

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- La corriente que entra por el punto de marca en un devanado sale por el punto de marca del otro. Estas corrientes se encuentran prácticamente en fase.
- Mientras que, la caída de tensión de entre el punto de marca y el de no marca en un devanado y la caída de el punto de marca y el de no marca del otro, se encuentran prácticamente en fase.

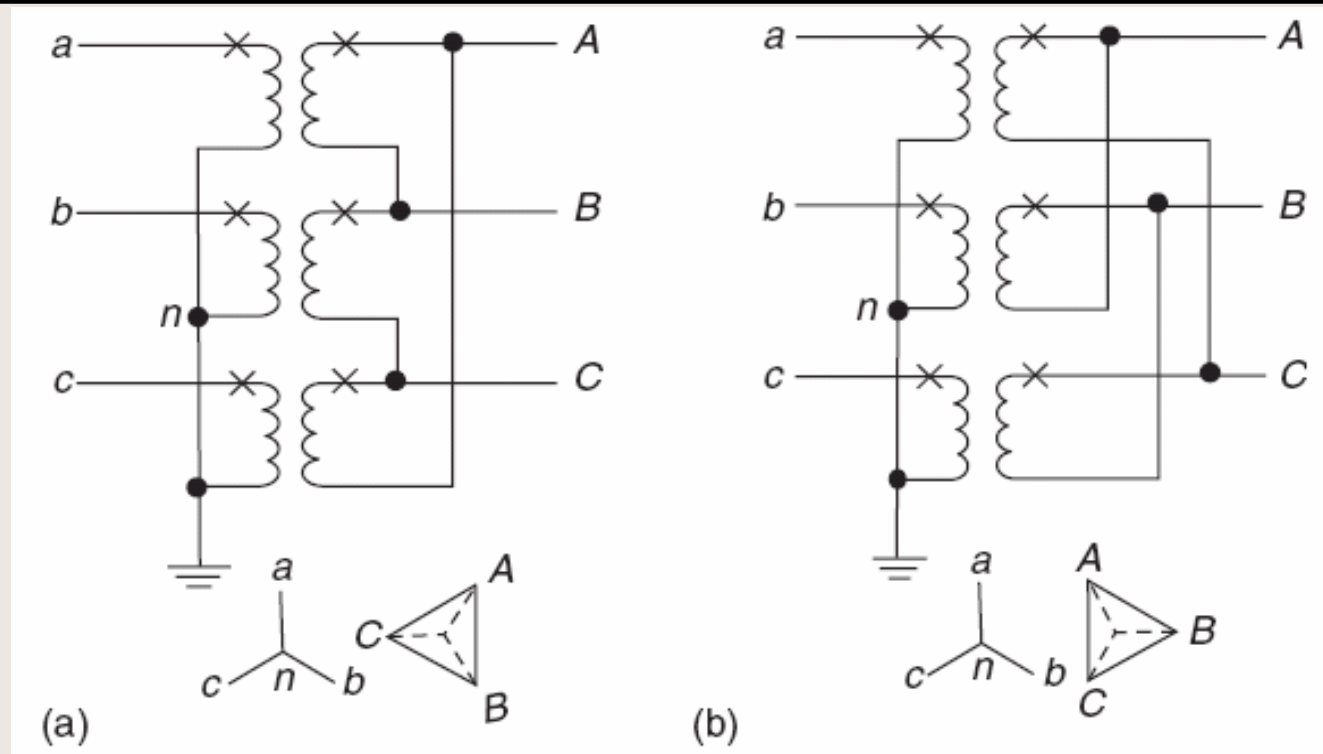
Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia



Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- Desfasamientos en transformadores trifásicos conectados en Y- Δ y en Δ -Y
 - El estandar ANSI/IEEE establece que para marcar transformadores trifásicos se use H1, H2 y H3 para las terminales del lado de alta tensión y X1, X2 y X3 para el lado de baja.
 - En transformadores conectados en Y- Δ o en Δ -Y el voltaje en el lado de alta tensión en 30° al voltaje del lado de baja tensión.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia



Diagramas de conexiones y fasoriales de transformadores conectados en Y-Δ y Δ-Y según el estandar ANSI/IEEE

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- En el caso de la figura (a) se tiene que:
 - La caída de tensión entre la marca y la no marca de "a" a "n" esta en fase con la caída de tensión entre la "fase A" y la "fase B".
 - La caída de tensión entre la marca y la no marca de "b" a "n" esta en fase con la caída de tensión entre la "fase C" y la "fase C".
 - La caída de tensión entre la marca y la no marca de "c" a "n" esta en fase con la caída de tensión entre la "fase C" y la "fase A".

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- En el caso de la figura (b) se tiene que:
 - La caída de tensión entre la marca y la no marca de "a" a "n" esta en fase con la caída de tensión entre la "fase A" y la "fase C".
 - La caída de tensión entre la marca y la no marca de "b" a "n" esta en fase con la caída de tensión entre la "fase B" y la "fase A".
 - La caída de tensión entre la marca y la no marca de "c" a "n" esta en fase con la caída de tensión entre la "fase C" y la "fase B".

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

➤ Componentes Simétricas

- La evaluación del comportamiento de sistemas trifásicos balanceados, es posible realizarlo utilizando la representación "por fase". Esto es, se resuelve el problema de la misma manera que si fuese un sistema monofásico, y las cantidades de las otras dos fases difieren de los fasores obtenidos en la representación por fase en $\pm 120^\circ$

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- En el caso de sistemas desbalanceados, no es posible evaluar su comportamiento con la representación por fase de la manera tan directa que se hace con los sistemas balanceados, lo cual provoca que el análisis de estos sistemas se complique.
- El método de componentes simétricas propuesto por Fortescue [3] permite extender el análisis por fase a sistemas que contienen cargas desbalanceadas.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- El método establece la manera en que un sistema de " n " fasores desbalanceados puede ser analizado por " $n-1$ " sistemas de " n " fasores balanceados de diferente secuencia y uno de secuencia cero.
- El método de componentes simétricas, desde el punto de vista matemático es una transformación lineal ya que permite desacoplar un sistema balanceado de orden " n " en " n " sistemas independientes.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

➤ Componentes Simétricas en Sistemas Trifásicos.

- Este método permite analizar un sistema de fasores trifásico desbalanceados mediante tres sistemas de tres fasores balanceados denominados de secuencia positiva, negativa y cero.
- La particularidades de cada uno de los sistemas resultantes son las siguientes:

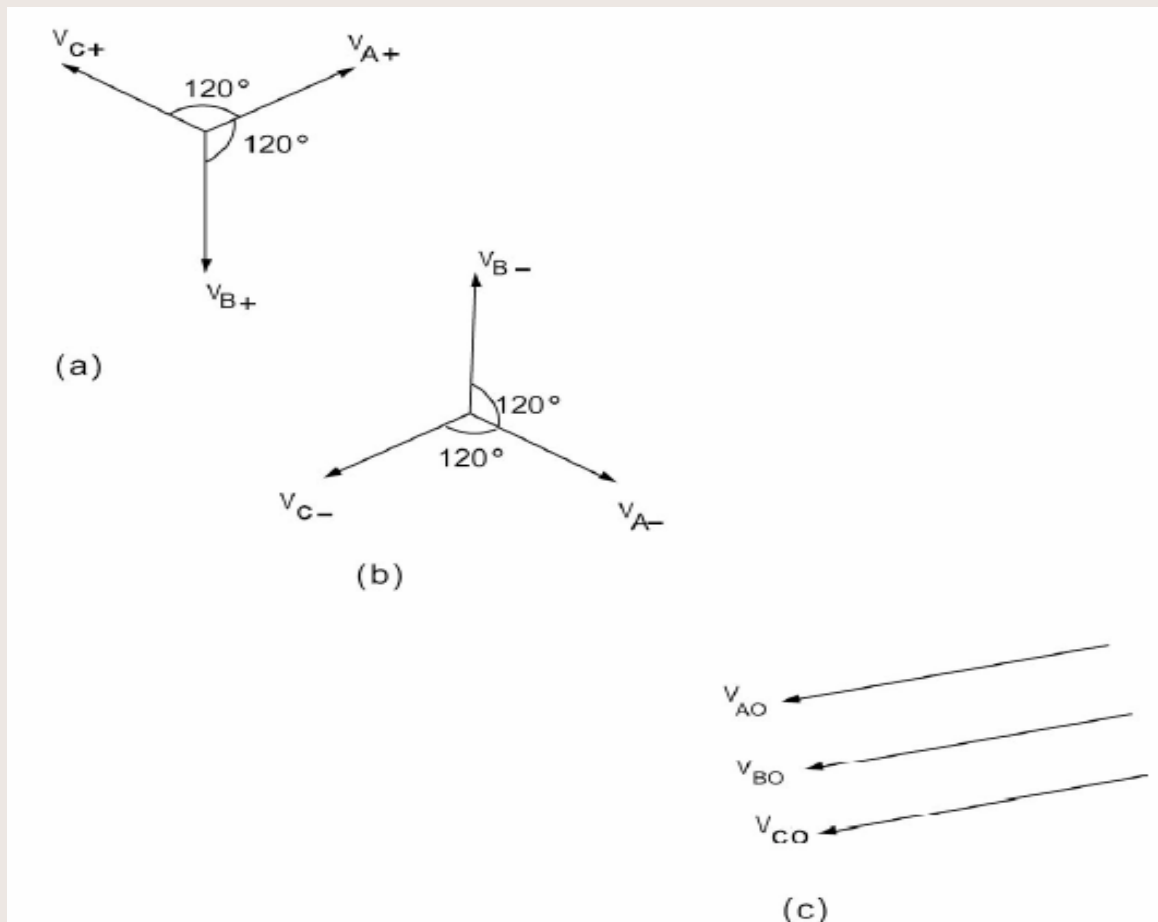
Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- Componentes de Secuencia Positiva.
 - Consiste en tres fasores de igual magnitud desfasados 120° con la misma secuencia de fase que los fasores originales.
- Componentes de Secuencia Negativa.
 - Consiste en tres fasores de igual magnitud desfasados 120° con una secuencia de fase opuesta a la de los fasores originales.
- Componentes de Secuencia Cero.
 - Consiste en tres fasores de igual magnitud y desfaseamiento cero entre ellos.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- La representación gráfica de la aplicación del método de componentes simétricas, sobre un sistema de fasores trifásico desbalanceado con secuencia de fase "abc" se muestra en las siguientes figuras. La figura (a) corresponde a las cantidades de secuencia positiva, la (b) a las cantidades de secuencia negativa y la (c) a las cantidades de secuencia cero.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia



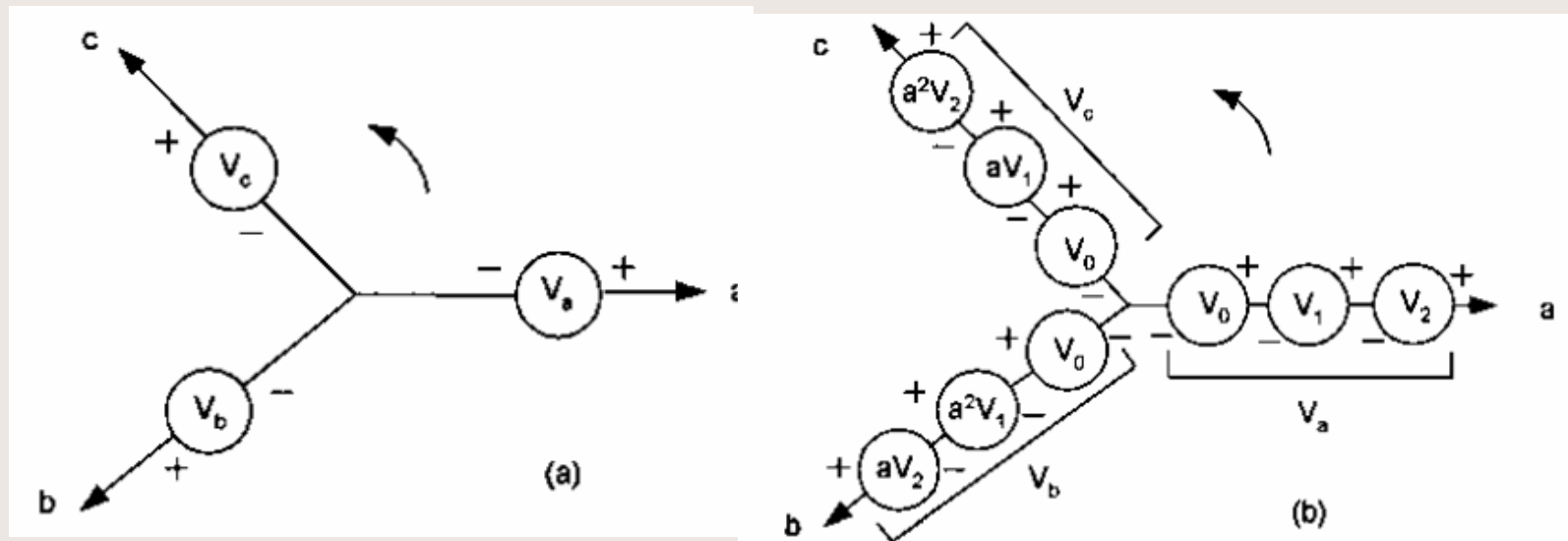
Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- La relación matemática entre el conjunto las cantidades de secuencia de fases y los fasores originales esta definida por el producto de la inversa de la matriz de componentes simétricas y las fasores originales como se muestra a continuación:

$$V_{012} = A^{-1} V_{abc} \Rightarrow \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- Gráficamente, la evolución progresiva de pasar de cantidades de fase a cantidades de secuencia se presentas en las figuras (a), (b), (c) y (d).



Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

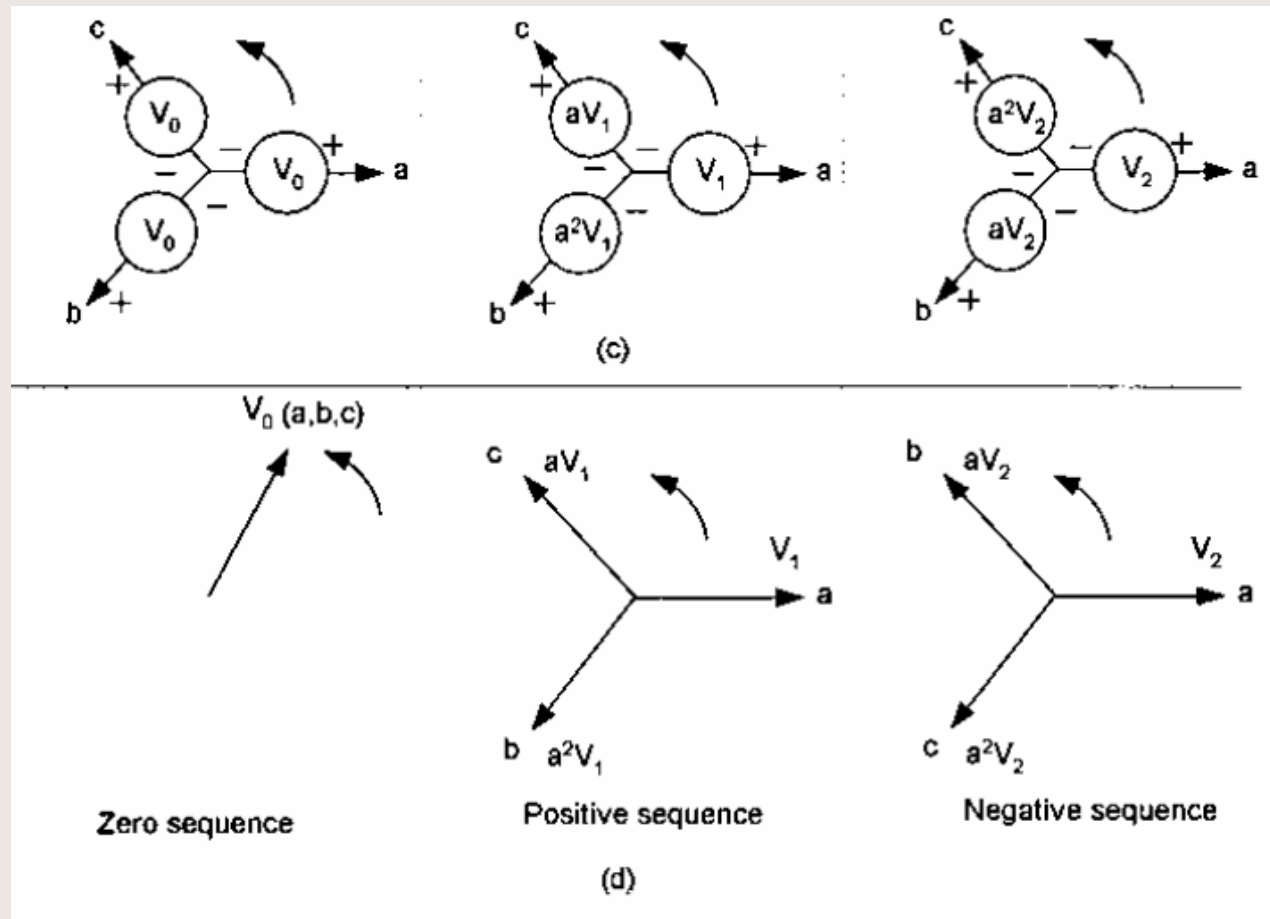
- La relación matemática entre el conjunto de fasores originales las cantidades de secuencia de fase esta definida por el producto de la llamada matriz de componentes simétricas y las cantidades de fase como se muestra a continuación:

$$V_{abc} = A V_{012} \quad \Rightarrow \quad \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

Donde : A es la Matriz de Componentes Simétricas

$$a = 1 \angle 120^\circ \quad \text{y} \quad a^2 = 1 \angle 240^\circ$$

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia



Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

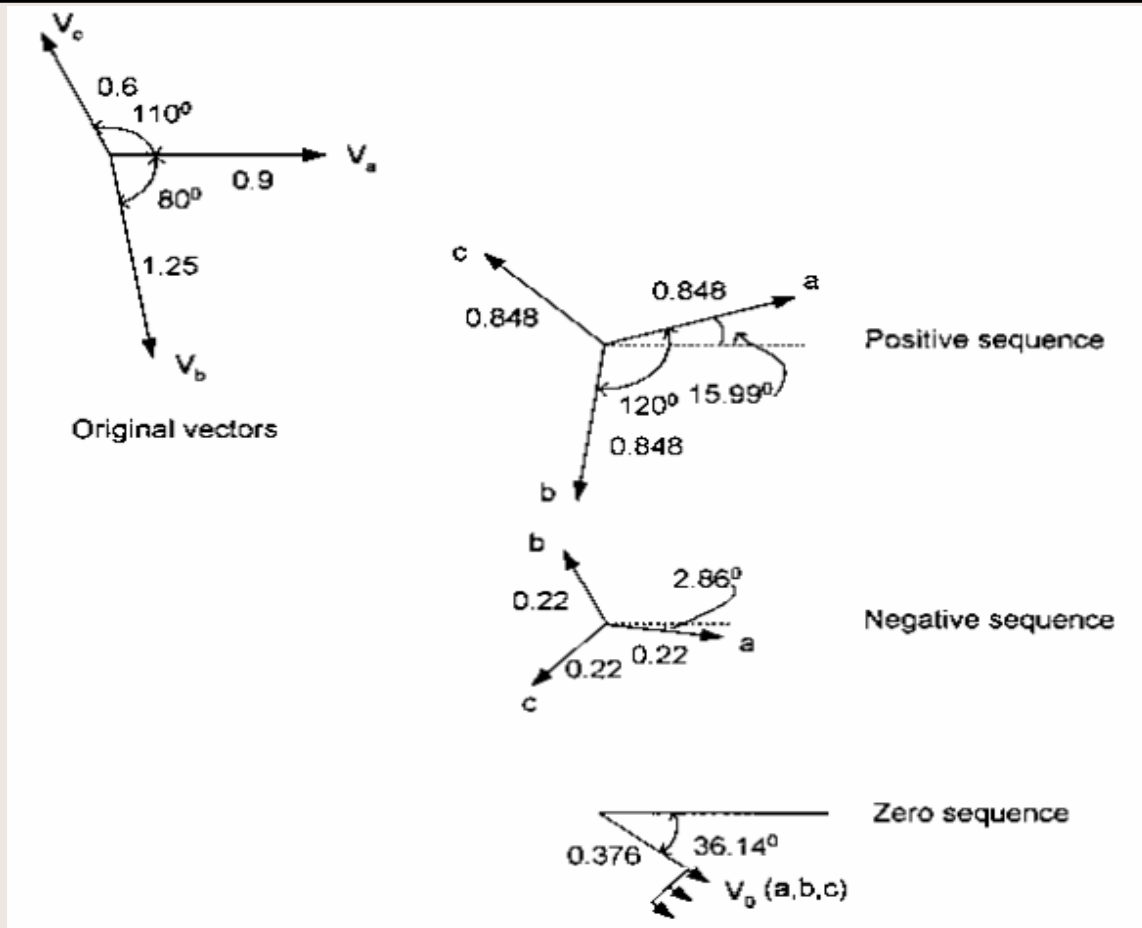
➤ Ejemplo 6

- Los voltajes de un sistema trifásico desbalanceado en p.u. son $V_a = 0.9 \angle 0^\circ$, $V_b = 1.25 \angle 280^\circ$ y $V_c = 0.6 \angle 110^\circ$, la secuencia de fases de este sistema es "abc". Obtener las cantidades de secuencia.

- Solución;

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.90 \angle 0^\circ \\ 1.25 \angle 280^\circ \\ 0.60 \angle 110^\circ \end{bmatrix}$$

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia



Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

➤ Ejemplo 7

- Durante una falla en un sistema trifásico, con secuencia de fases abc, se registró el siguiente amperaje en cada fase $I_A = 150 \angle 45^\circ$, $I_B = 250 \angle 150^\circ$ e $I_C = 100 \angle 300^\circ$. Determinar las cantidades de secuencia positiva, negativa y cero correspondientes.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- Solución;

$$\begin{aligned} I_0 &= \frac{1}{3}(I_A + I_B + I_C) \\ &= \frac{1}{3}(106.04 + j106.07 + j106.07 - 216.51 + j125.00 + 50 - j86.6) \\ &= 52.2 \angle 112.7^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_+ &= \frac{1}{3}(I_A + \alpha I_B + \alpha^2 I_C) = \frac{1}{3}(150 \angle 45^\circ + 250 \angle 270^\circ + 100 \angle 180^\circ) \\ &= 48.02 \angle -87.6^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_- &= \frac{1}{3}(I_A + \alpha^2 I_B + \alpha I_C) \\ &= 163.21 \angle 40.45^\circ \end{aligned}$$

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

➤ Potencia (S) en el Dominio de las Componentes Simétricas.

- La potencia S en un circuito trifásico esta definida como la suma de los productos del fasor de voltaje por el conjugado de la corriente de cada fase, esto es;

$$S = V_a I_a^* + V_b I_b^* + V_c I_c^* = V_{abc}^\dagger I_{abc}^*$$

En el dominio de las C.S. se tiene

$$S = (A V_{012})^\dagger (A I_{012})^* = V_{012}^\dagger A^\dagger A^* I_{012}^*$$

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

Puesto que el producto $A^+ A^* = 3U$

$$\text{Donde } U = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Se tiene entonces que,

$$S = 3(V_0 I_0 + V_1 I_1 + V_2 I_2)$$

Lo anterior muestra, que la potencia compleja (S) trifásica puede ser calculada a partir de las cantidades de secuencia de los fasores de Voltaje y Corriente. Esto es, la potencia (S) es invariante ante la transformación de C. S.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

➤ Redes de Secuencia.

- Las redes de secuencia son la representación de una de las tres fases (fase a tierra o neutro) de un sistema trifásico balanceado y muestran como fluirían las corrientes de secuencia en el SEP en caso de existir. Estas redes se construyen a partir del "punto de falla", por la interconexión de las impedancias de secuencia de las componentes del SEP.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- En el análisis de SEP's se asume que en condiciones normales de operación éste es perfectamente balanceado (simétrico) y el desbalance (asimetría) ocurre únicamente en el punto de falla.
- En la realidad ésta consideración no se cumple en forma estricta. Sin embargo, el error de mantener esta consideración es despreciable en la mayoría de las veces.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- En análisis de SEP's el "punto de falla" se considera como el punto del SEP, donde ocurre el desbalance (ocurre algún corto circuito, apertura de alguna fase o un desbalance en la carga).
- Los voltajes representados en las redes de secuencia son de línea a neutro.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- De las redes de secuencia, la única red activa (con fuentes de voltaje) es la red de secuencia positiva.
- El voltaje de la fase "a" se toma como referencia, y los voltajes de las fases restantes se expresan con referencia a la fase "a".

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- Modelado del SEP para Estudios de Fallas
 - Los estudios típicos de fallas en los SEP's consideran únicamente un instante de tiempo después de ocurrir la falla o el desbalance en el SEP.
 - El modelo matemático del SEP para estudios de fallas es descrito adecuadamente por conjuntos de ecuaciones puramente algebraicas.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- El modelo matemático del SEP describe la interacción de las redes de secuencia positiva, negativa y cero interconectadas en el "punto de falla".
- Impedancias de Secuencia de las componentes del SEP.
 - Una característica de las impedancias de secuencia positiva y negativa de elementos estáticos, lineales y simétricos son idénticas.

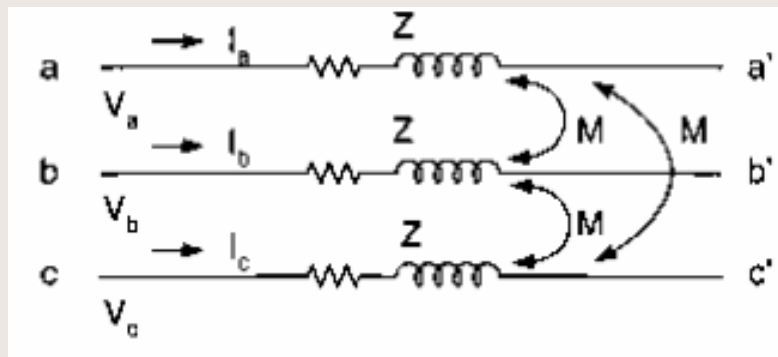
Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- La impedancia de este tipo de elementos es independiente de la secuencia de fases siempre que los voltajes que se les apliquen sean balanceados.
- Las impedancias de secuencia positiva, negativa y cero de las componentes del SEP se obtienen aplicando la transformación de componentes simétricas a su modelo matemático en el marco de referencia de fase.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

➤ Líneas de Transmisión

- Las impedancias de secuencia de una LT trifásica simétrica balanceada pueden derivarse teniendo como referencia la siguiente figura:



Relación voltajes - corrientes en el marco de referencia de fase

$$\begin{bmatrix} V_{aa'} \\ V_{bb'} \\ V_{cc'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z & M & M \\ M & Z & M \\ M & M & Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

$$V_{abc} = Z_{abc} I_{abc}$$

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- Expresando los voltajes y corrientes de fase por sus valores de secuencia respectivamente, se tiene que;

$$V_{abc} = A V_{012} \quad ; \quad I_{abc} = A I_{012} \quad ; \quad A V_{012} = Z_{abc} A I_{012}$$

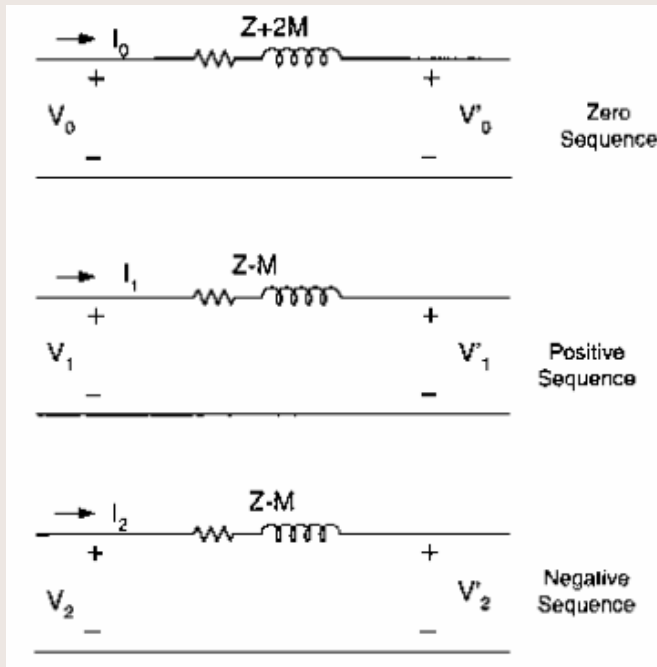
$$V_{012} = A^{-1} Z_{abc} A I_{012} \quad , \quad \text{luego entonces se tiene que;}$$

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z & M & M \\ M & Z & M \\ M & M & Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z + 2M & 0 & 0 \\ 0 & Z - M & 0 \\ 0 & 0 & Z - M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} Z_0 \\ Z_1 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z + 2M \\ Z - M \\ Z - M \end{bmatrix}$$

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

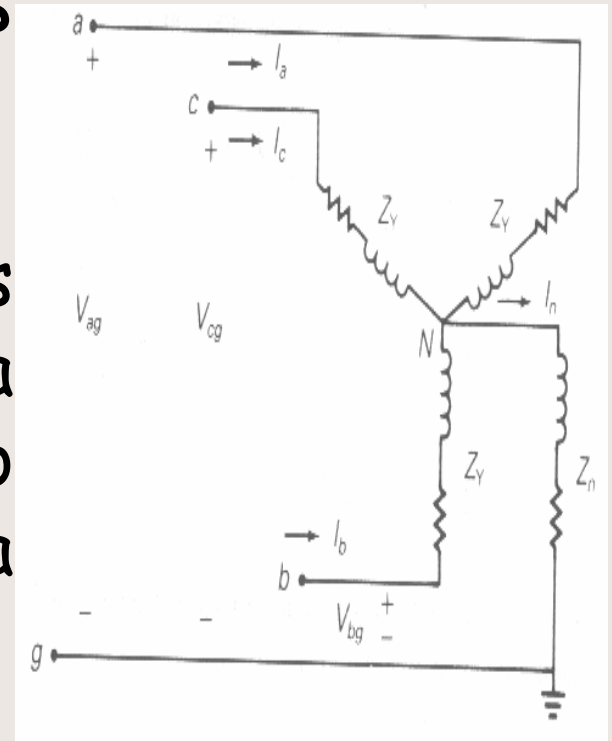
- Los circuitos equivalentes de las impedancias de secuencia de una línea trifásica balanceada simétrica son:



Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

➤ Cargas (configuraciones estrella y delta)

- Para la obtención de sus impedancias de secuencia se sigue un proceso similar al empleado con la línea trifásica.



Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- En el caso de una configuración en estrella aterrizada, en condiciones balanceadas la corriente I_N es cero. Sin embargo, al ocurrir un desbalance en el sistema habrá un flujo de corriente a través de la impedancia conectada a tierra, por lo que en este caso resulta más representativo para propósitos de análisis el voltaje de fase a tierra V_g que el voltaje de fase a neutro V_N como se muestra en la siguiente figura.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

En este caso se tiene que;

$$\begin{aligned} V_{ag} &= Z_Y I_a + Z_N I_N = Z_Y I_a + Z_N (I_a + I_b + I_c) \\ &= (Z_Y + Z_N) I_a + Z_N I_b + Z_N I_c \end{aligned}$$

En forma similar V_{bg} y V_{cg}

$$\begin{aligned} V_{bg} &= Z_N I_a + (Z_Y + Z_N) I_b + Z_N I_c \\ V_{cg} &= Z_N I_a + Z_N I_b + (Z_Y + Z_N) I_c \end{aligned}$$

En forma matricial se tiene,

$$\begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (Z_Y + Z_N) & Z_N & Z_N \\ Z_N & (Z_Y + Z_N) & Z_N \\ Z_N & Z_N & (Z_Y + Z_N) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$
$$V_{abc} = Z_{YN} I_{abc}$$

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

Luego entonces,

$$V_{abc} = Z_{YN} I_{abc} \Rightarrow AV_{012} = Z_{YN} AI_{012} \Rightarrow V_{012} = A^{-1} Z_{YN} AI_{012}$$

En forma matricial se tiene,

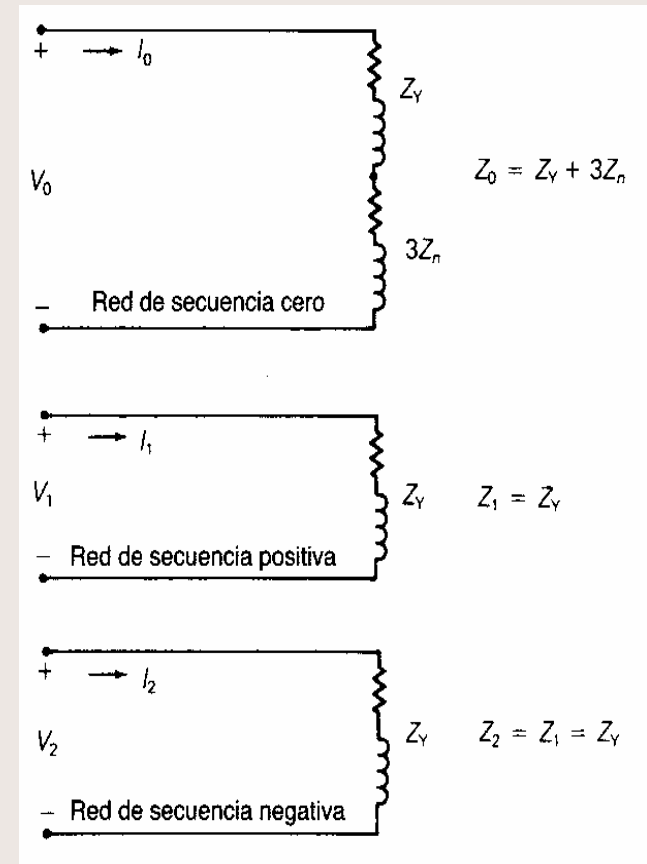
$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (Z_y + Z_N) & Z_N & Z_N \\ Z_N & (Z_y + Z_N) & Z_N \\ Z_N & Z_N & (Z_y + Z_N) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

Luego entonces

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (Z_y + 3Z_N) & 0 & 0 \\ 0 & Z_y & 0 \\ 0 & 0 & Z_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- Circuitos equivalentes de las impedancias de secuencia de una carga trifásica balanceada en Y aterrizada.
- La impedancia del neutro no aparece en las redes de secuencia positiva o negativa.

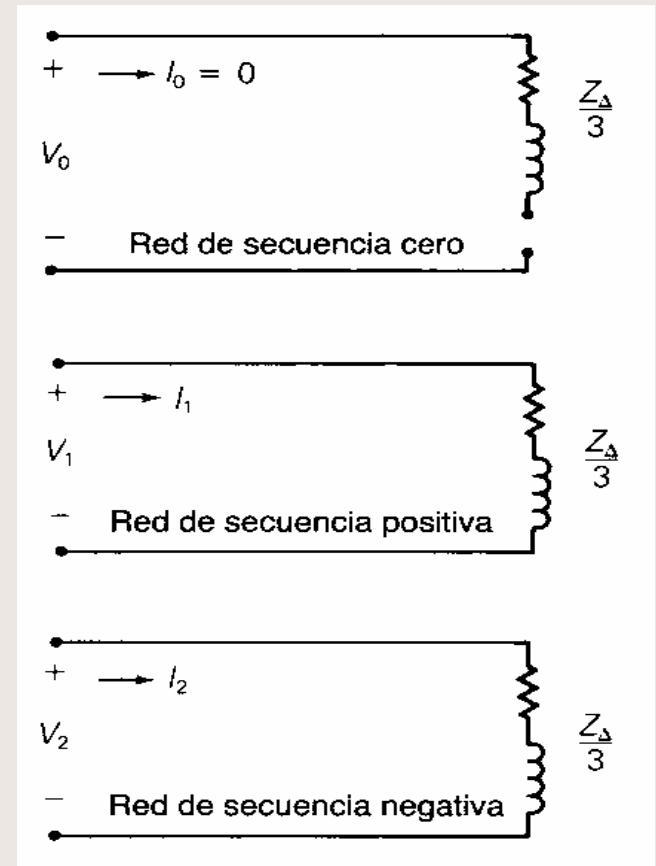


Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- Las corrientes de secuencia positiva o negativa no fluyen en impedancias de aterrizamiento (al neutro).
- La impedancia de aterrizamiento multiplicada por 3 aparece en la red de secuencia cero.
- La caída de tensión ($3Z_N I_0$) de la impedancia de aterrizamiento es la caída de tensión $I_N Z_N$, luego entonces $I_N = 3I_0$

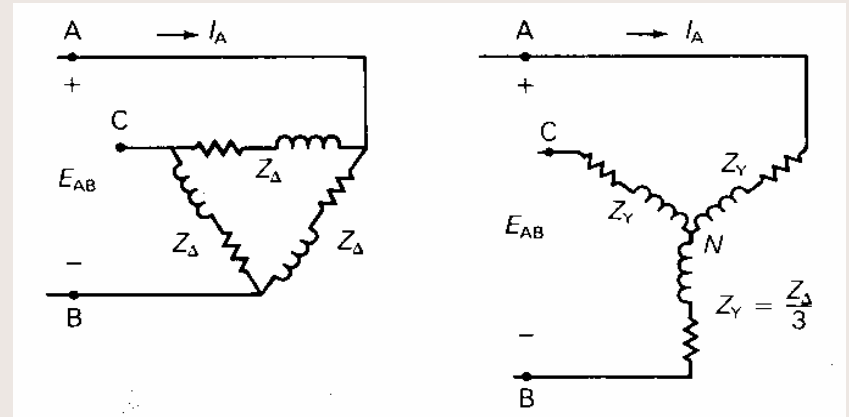
Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- Sí el neutro de la carga conectada en estrella no está aterrizado, Z_N es infinito, por lo que el término $3Z_N$ de la red de secuencia cero se convierte en un circuito abierto y no existe corriente de secuencia cero.



Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- El neutro de la conexión Y equivalente de una carga trifásica balanceada conectada en Δ , no está conectado a tierra. Por lo tanto las redes de secuencia de una carga conectada en Δ son similares a las de una estrella no aterrizada.



Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

➤ Transformadores de Potencia.

- En los SEP's, es común satisfacer las necesidades de transformación con transformadores trifásicos o mediante la interconexión adecuada de tres transformadores monofásicos.
- La última opción resulta mejor desde el punto de vista de confiabilidad ya que resulta más fácil instalar un transformador monofásico de respaldo que uno trifásico.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- Existen cuatro configuraciones básicas en que los devanados de los transformadores trifásicos suelen conectarse:

$Y-\Delta$; $\Delta-Y$; $\Delta-\Delta$; $Y-Y$

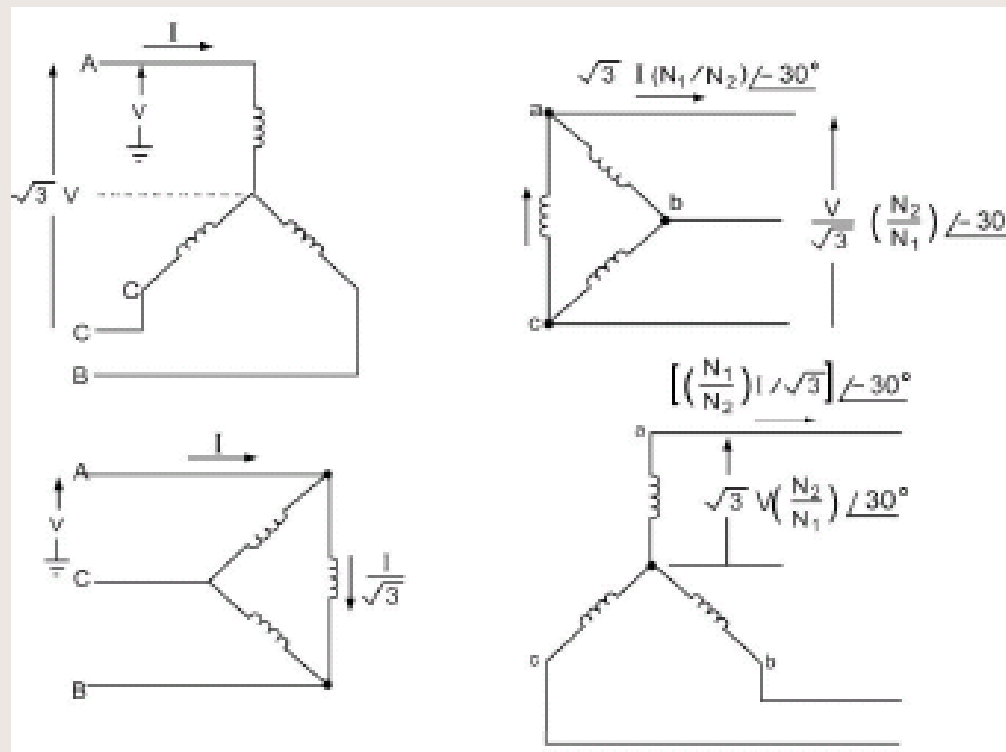
- Los devanados conectados en Y pueden o no estar conectados a tierra.
 - Las impedancias de secuencia positiva y negativa de un transformador pueden ser consideradas iguales a la reactancia de dispersión.
-

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

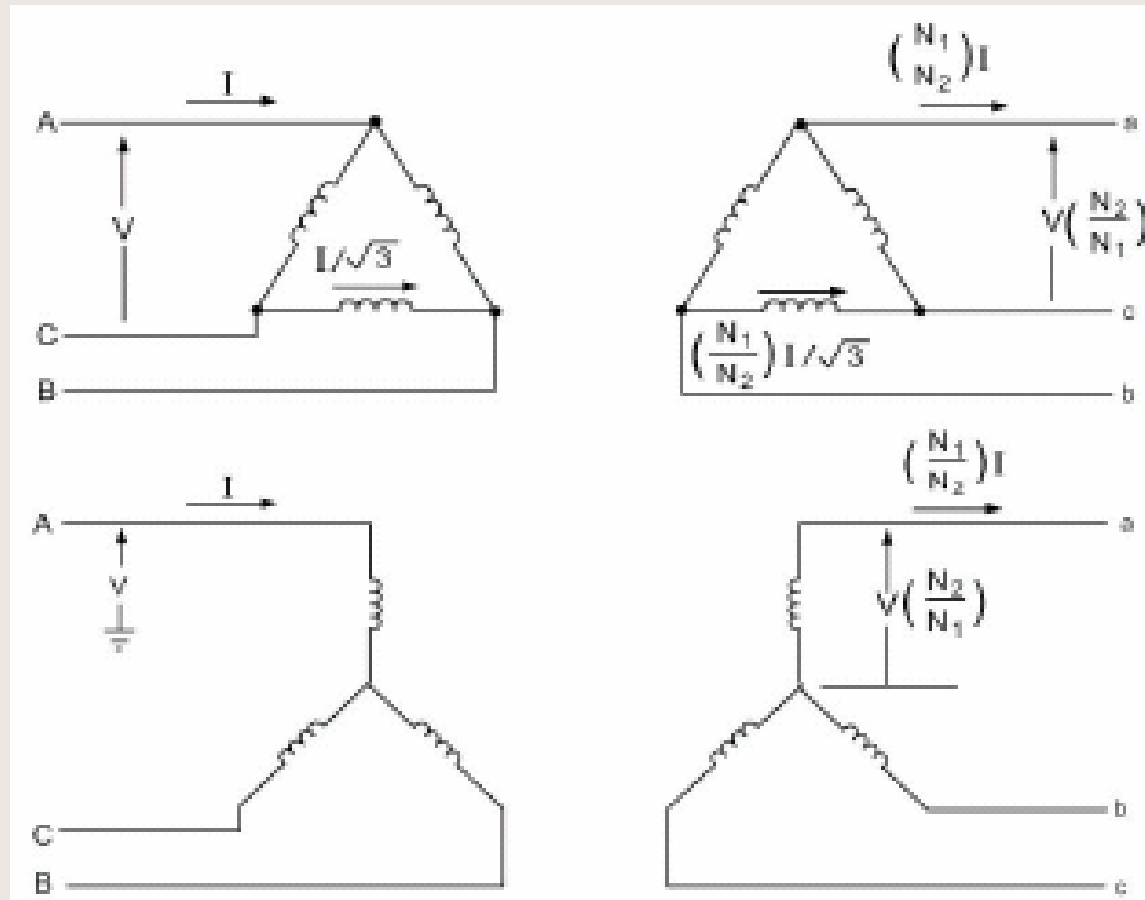
- Los transformadores son componentes estáticos, por lo que sus impedancias de secuencia positiva y negativa no cambian dependiendo de la secuencia de fases, siempre que los voltajes aplicados sean balanceados.
- La impedancia de secuencia cero varia desde ser un circuito abierto, hasta un corto circuito dependiendo de la conexión de sus devanados y el método de aterrizamiento usado.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

Conexiones Típicas de los Devanados de Transformadores Trifásicos.



Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia



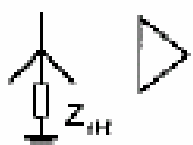
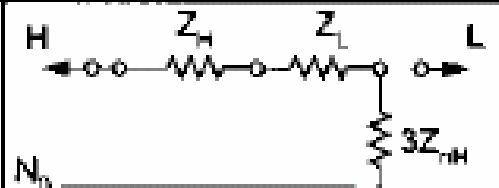
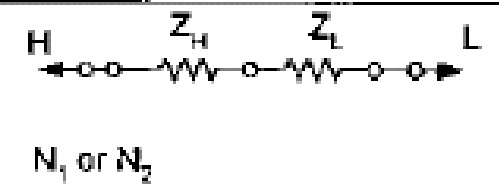
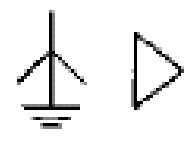
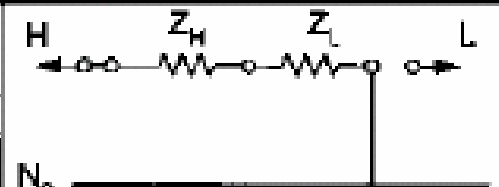
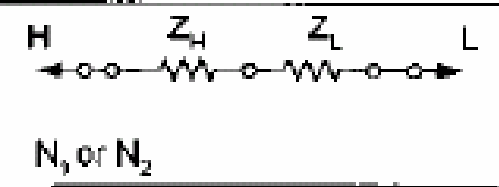
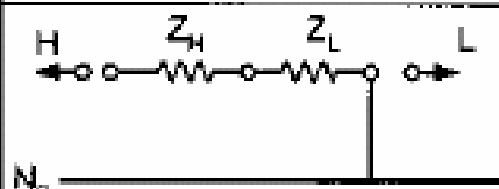
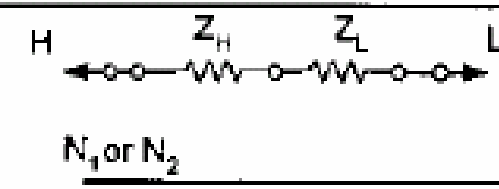
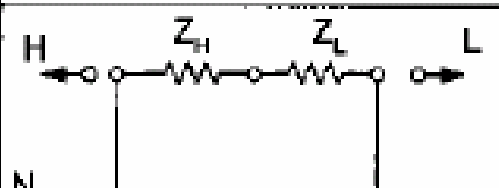
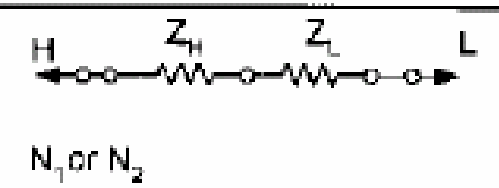
Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- La conexión Y- Δ es comúnmente usada en transformadores "reductores". El lado de alta tensión se conecta en Y, permitiendo aterrizar el lado de alta, y el de baja es conectado en Δ .
- La conexión Δ -Y es comúnmente usada en transformadores "elevadores".
- La conexión Δ - Δ permite sacar de servicio a uno de los bancos para mantenimiento, mientras que los otros dos continúan operando en abierta, con capacidad reducida.

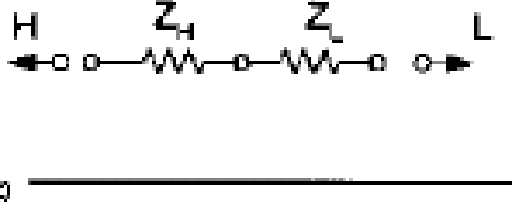
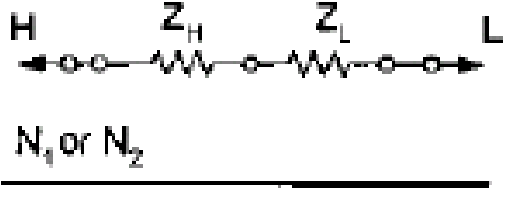
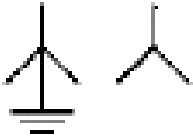
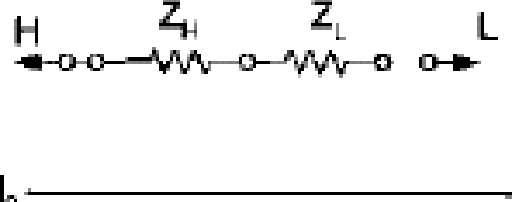
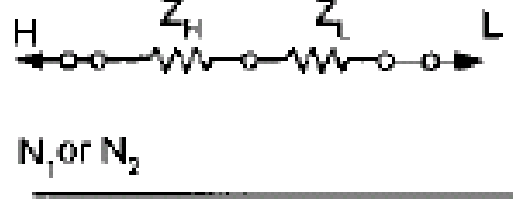
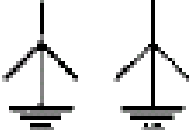
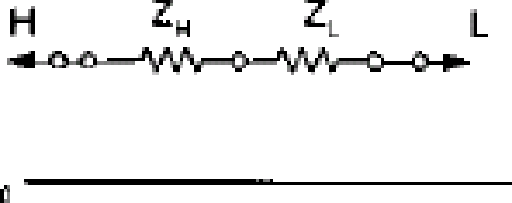
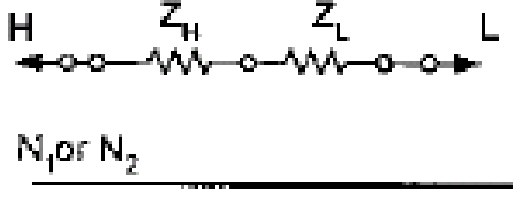
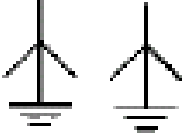
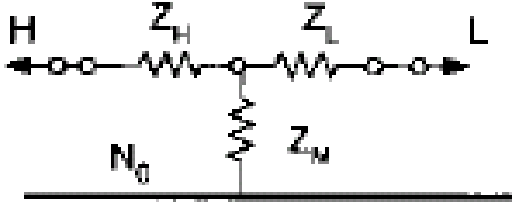
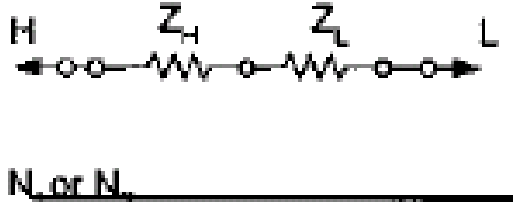
Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- La conexión Y- Δ es raramente utilizada, debido al contenido de armónicas asociado con la corriente de excitación de los transformadores.
- La siguiente figura muestra redes de secuencia positiva, negativa y cero para las diferentes combinaciones de las conexiones en los devanados de transformadores trifasicos, de dos devanados.

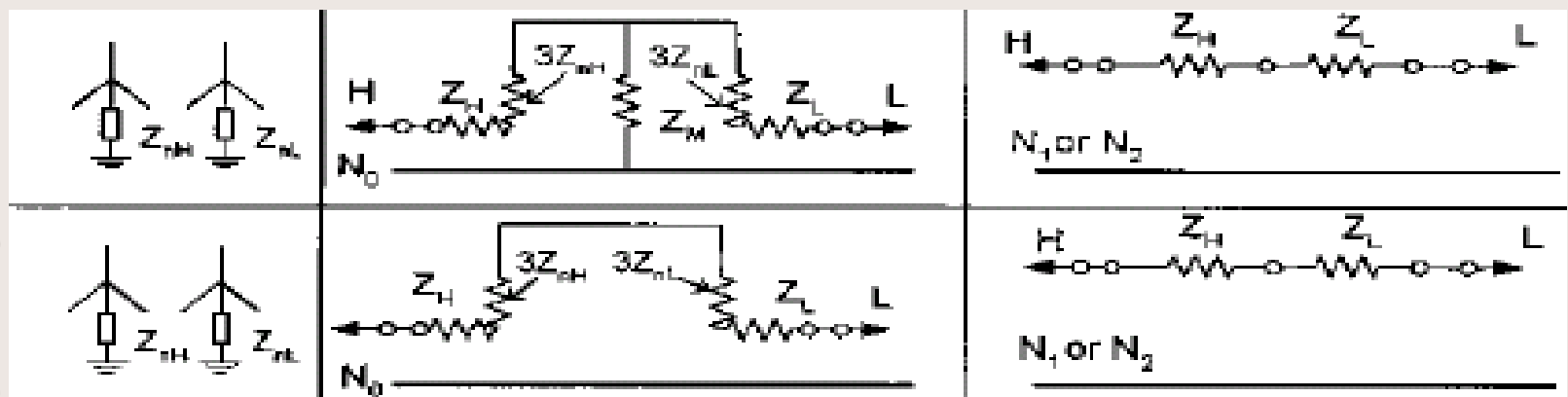
Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

Winding Connections	Zero Sequence Circuit	Positive or Negative Sequence Circuit
		
		
		
		

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

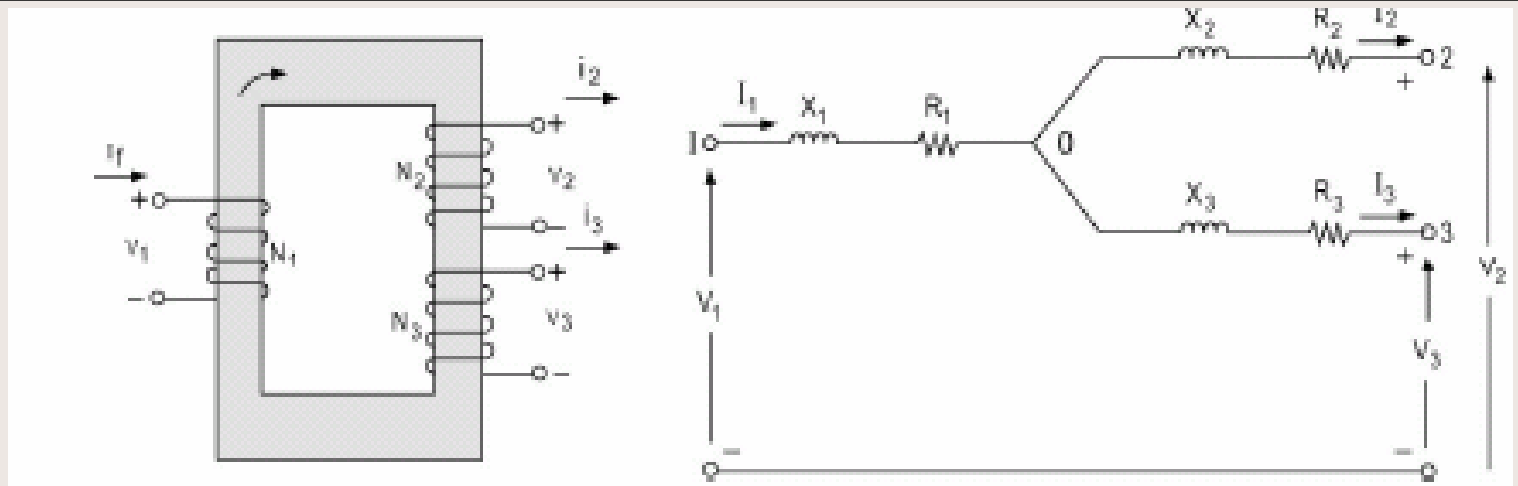
Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia



➤ Transformadores de tres devanados (terciario)

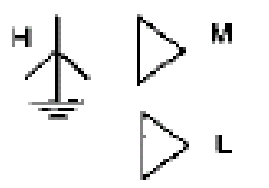
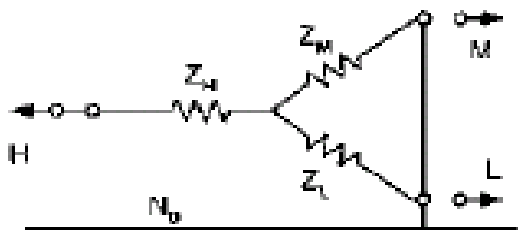
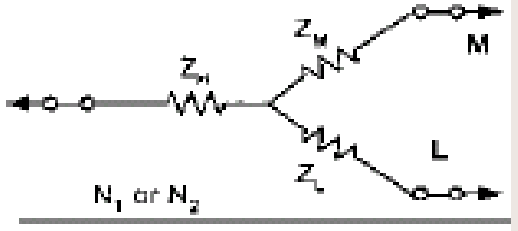
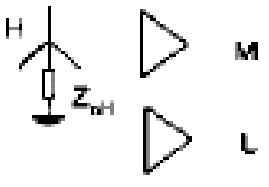
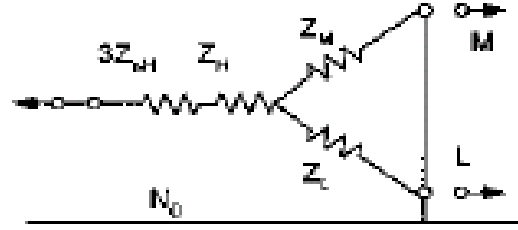
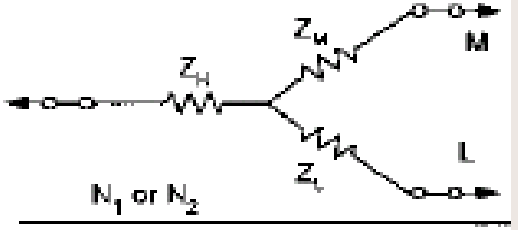
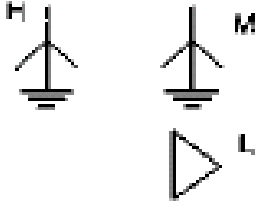
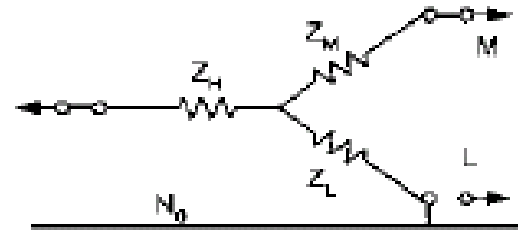
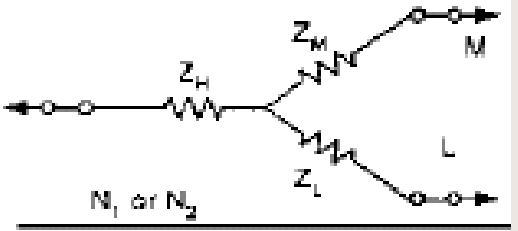
- Se usan con mucha frecuencia en los SEP's por sus inherentes ventajas económicas.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

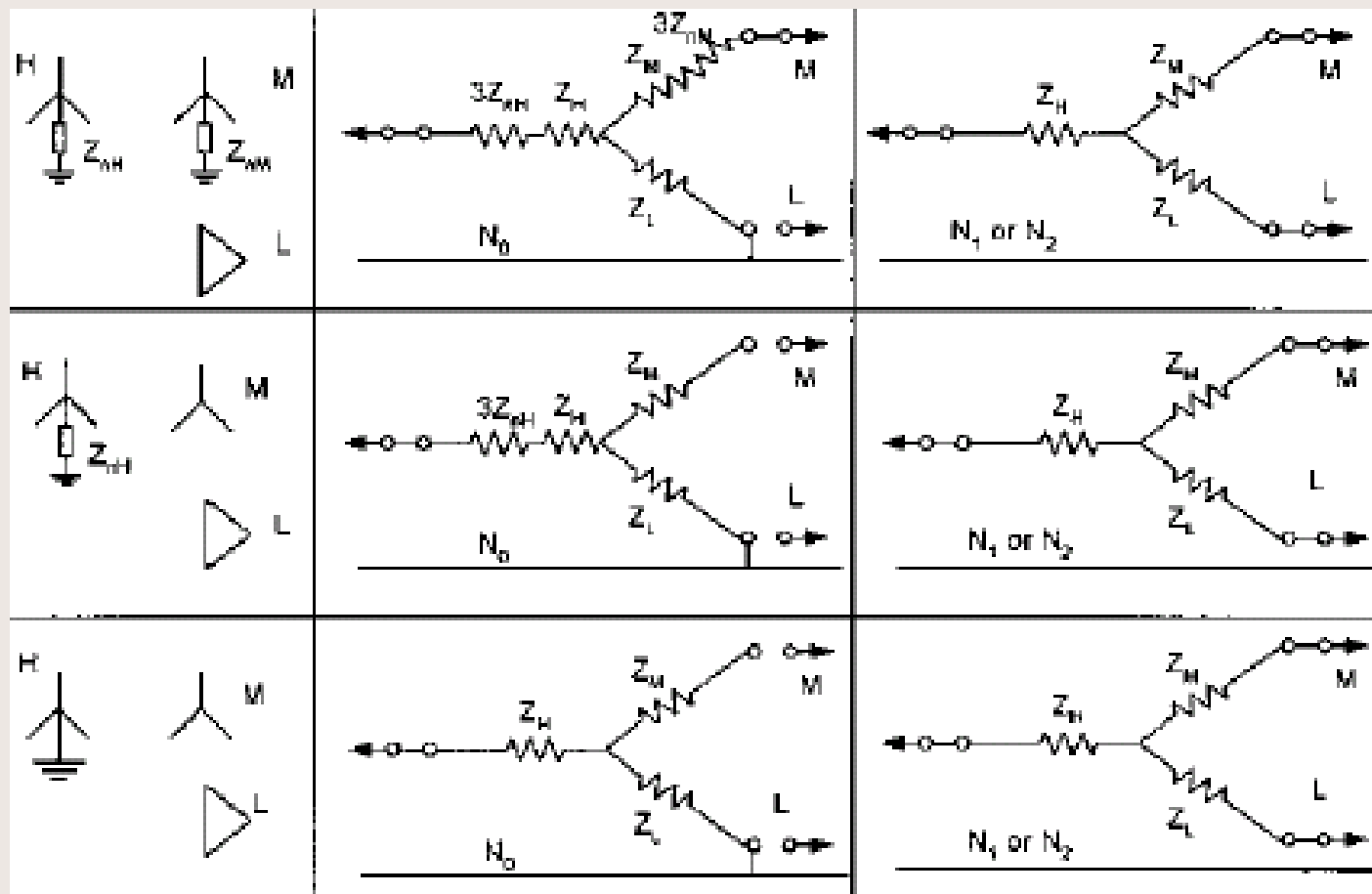


- Las redes de secuencia positiva, negativa y cero de las configuraciones típicas de transformadores con tres devanados se muestran en la siguiente figura.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

Winding Connections	Zero Sequence Circuit	Positive or Negative Sequence Circuit
		
		
		

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia



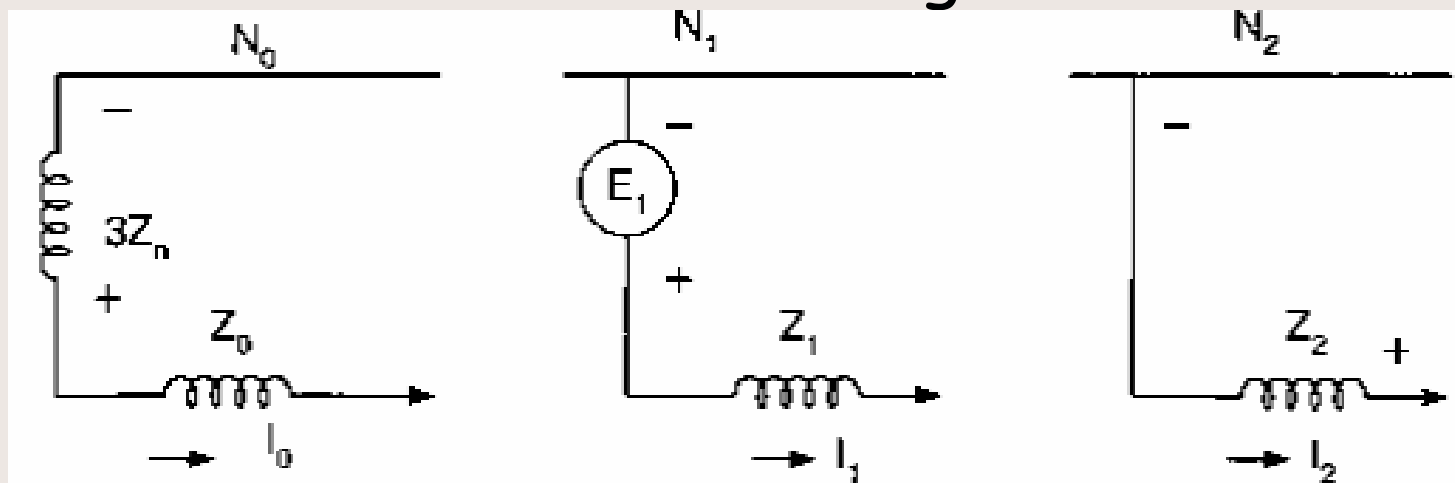
Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

➤ Generadores Síncronos.

- Las impedancias de secuencia positiva, negativa y cero de los generadores síncronos, por lo general no son iguales y normalmente, los fabricantes de éstos, las obtienen en base a pruebas.
 - La impedancia de secuencia negativa se mide con la máquina girando a velocidad nominal, el circuito de campo cortocircuitado y aplicando voltajes balanceados de secuencia negativa.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

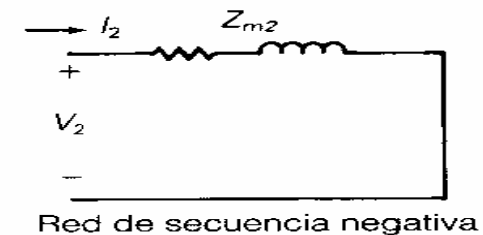
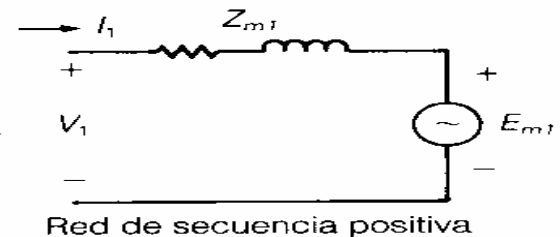
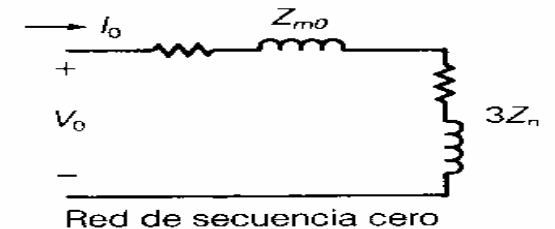
- La impedancia de secuencia cero se mide con la máquina girando a velocidad nominal, el circuito de campo cortocircuitado, las tres fases conectadas en serie y haciendo circular una corriente aplicando un voltaje monofásico.
- Redes de secuencia de un generador.



Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

➤ Motores Síncronos.

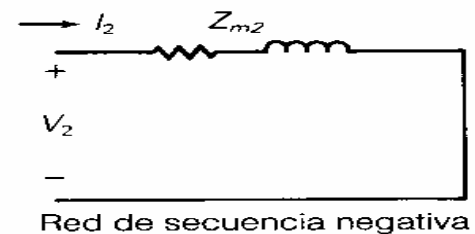
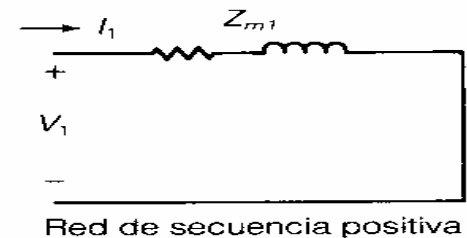
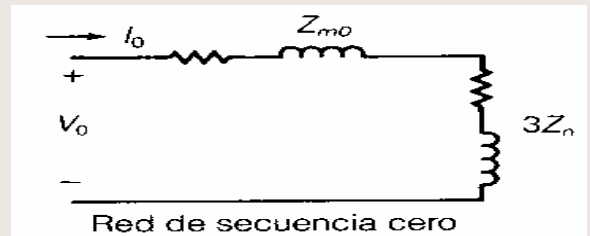
- Las redes de secuencia positiva, negativa y cero de los motores síncronos, son las mismas que las de los generadores, solo que en los motores las corrientes entran a las redes en vez de salir de ellas, como se indica en las siguientes figuras.



Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

➤ Motores de Inducción.

- Las redes de secuencia positiva, negativa y cero de los motores de inducción, son iguales a las de los síncronos, solo que se elimina la fuente de tensión en la red de secuencia positiva, como se indica en las siguientes figuras.



Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- Los motores de inducción no tienen una fuente de CD que mantenga excitado su circuito del rotor al ocurrir una falla cercana al motor la excitación que obtiene de la línea se abate, por lo que la fuente que aparece en la red de secuencia positiva del motor síncrono, en el caso del motor de inducción se convierte en un corto circuito. Esto es, $E_{m1} = 0$.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

➤ Análisis de Fallas.

- Los propósitos con que se realiza un estudio de fallas en un SEP's son diversos.
- En ocasiones, la especificación de equipo de interrupción es el objetivo principal.
- La definición de estrategias operativas dentro de ciertos niveles de corto circuito, así como el ajuste de equipo de protección requieren del análisis de fallas.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

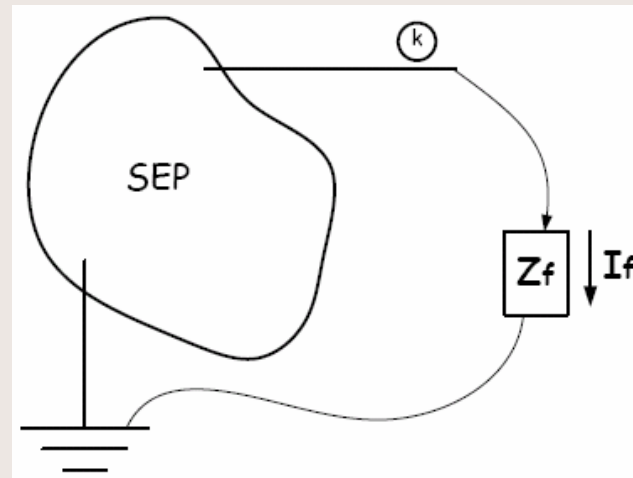
- La ocurrencia de fallas o corto circuitos en SEP's es un fenómeno de naturaleza aleatoria.
- Una falla es en realidad una conexión no planeada que modifica drásticamente la condición de operación de un SEP.
- El impacto de la falla en la operación del SEP en el tiempo, siendo en los primeros ciclos después de su ocurrencia donde se presentan los valores mayores de corrientes.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- El estudio completo de fallas en SEP's requiere de estudios dinámicos (estabilidad transitoria) con el propósito de conocer el impacto de éstas, sobre el comportamiento de diversas variables del SEP conforme transcurre el tiempo.
- En forma genérica, las fallas en un SEP suelen ser clasificadas como fallas simétricas y asimétricas, o fallas en derivación y fallas serie.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- Conceptualmente, la ocurrencia de una falla en el SEP's puede representarse como la conexión de una impedancia (Z_f) a través de la cual circulará una corriente (I_f) como se muestra en la siguiente figura



Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- En los estudios de fallas es común hacer ciertas consideraciones que permiten simplificar el modelado del SEP, sin que los resultados sean drásticamente influenciado de manera negativa.
 - La corriente de magnetización y pérdidas en el nucleo de los transformadores se ignoran.
 - La capacitancia en derivación de las líneas se ignora.
 - El SEP opera en forma balanceada y puede ser evaluado usando técnicas de análisis de circuitos en estado estable sinusoidal.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- El voltaje de pre-falla en todos los buses del SEP es igual a 1.0 p.u.
- Desde el punto de vista del SEP, el interés principal es conocer la inyección de corriente en el punto de falla.
- Sí el valor de I_f es conocido, el comportamiento del SEP puede analizarse sin conectar la impedancia de falla Z_f , esto es, $V_f = [Z] (I_{pf} + I_f)$, $[Z]$ es la matriz de impedancia de bus, e I_{pf} las corrientes de prefalla.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

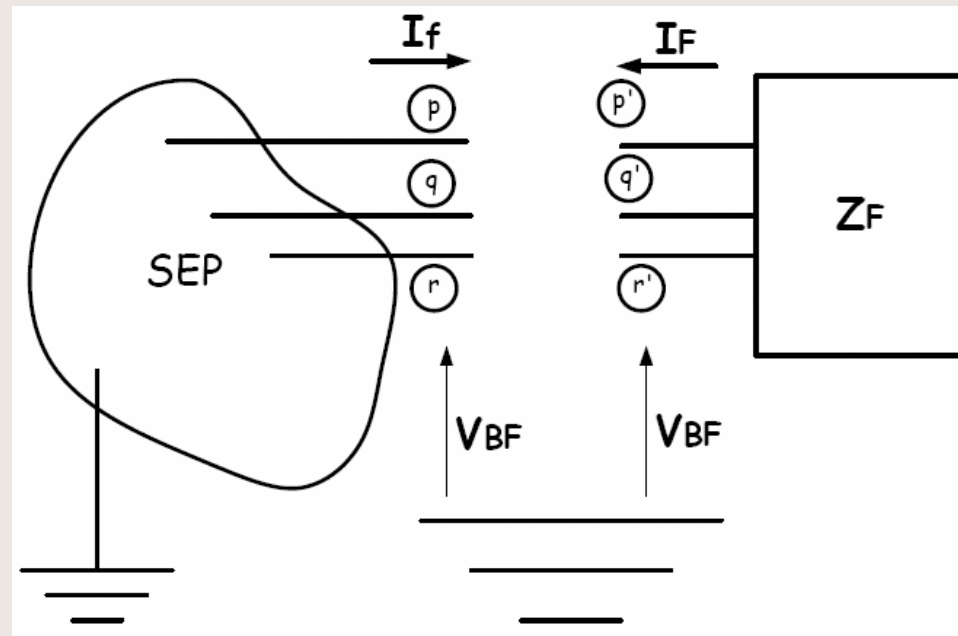
➤ Cálculo de Corrientes de Falla.

- El principal problema en un estudio de fallas consiste en determinar la corriente de falla. Este problema puede ser resuelto aplicando el principio de superposición y el equivalente de Thevenin del SEP visto desde el (los) punto(s) en que se presenta(n) la(s) falla(s). Matemáticamente, esto puede expresarse como $V_{BF} = V_{PBF} + Z_{BF} I_f$

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- Esta expresión representa al equivalente de Thevenin del SEP visto desde el (los) nodo(s) en que se presenta(n) la(s) falla(s).
- En forma similar, la(s) falla(s) puede(n) ser expresada(s) como: $V_{BF} = Z_F I_F$, relacionando el voltaje en el(los) nodo(s) de falla con la inyección de la(s) corriente(s) de falla. Esta relación puede representarse gráficamente como se muestra en la siguiente figura.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia



- La corriente de falla se determina conectando los nodos del SEP (p, q, r) con los de la impedancia de falla (p', q', r').

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- En consecuencia los voltajes son iguales y las corrientes I_f e I_F son de igual magnitud, pero con sentido contrario, esto es $I_f = -I_F$. Se tiene entonces que:

$$V_{PBF} - Z_{BF} I_F = Z_F I_F$$

$$I_F = (Z_{BF} + Z_F)^{-1} V_{PBF}$$

- V_{PBF} es el voltaje de prefalla en el(los) bus(es) que se presenta(n) la(s) falla(s) e I_F es la corriente de falla

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- Z_{BF} es la impedancia de Thevenín del SEP vista desde el(los) bus(es) en que se presenta(n) la(s) falla(s) y Z_F es la (matriz de) impedancia(s) de falla.
- Se infiere, que la corriente de falla depende tanto del equivalente de Thevenin del SEP visto desde el (los) nodo(s) en que ocurre(n) la(s) fallas como de la (matriz de) impedancia(s) de falla.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- Cálculo de Corrientes de Falla en Sistemas Trifásicos.
 - El procedimiento para el cálculo de las corrientes de falla en sistemas trifásicos balanceados, es similar al descrito anteriormente, solo que en el caso el modelo del SEP estará definido por la interconexión de sus redes de secuencia según el tipo de falla que habrá de ser analizada.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

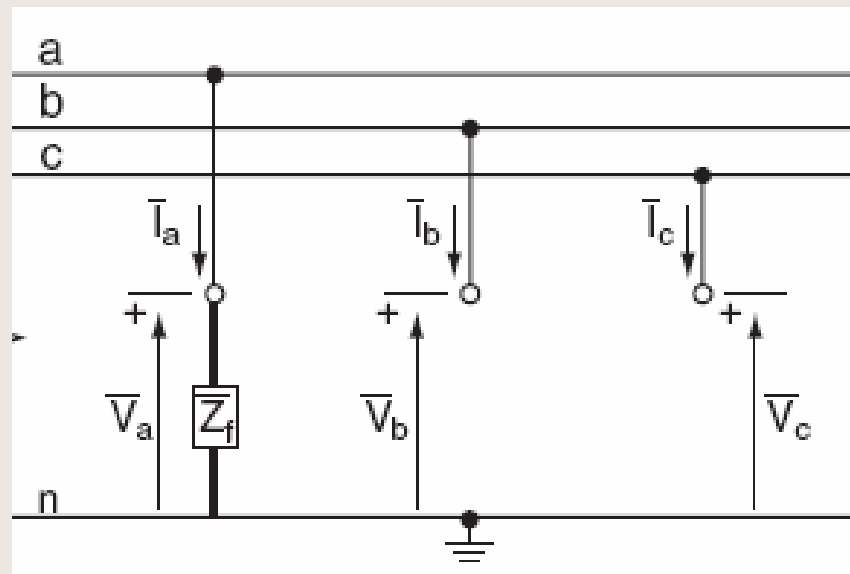
- El tipo de fallas que con mayor frecuencia experimenta un SEP son las asimétricas o desbalanceadas.
- Según la frecuencia con que ocurren en un SEP, se tiene el orden siguiente:
 - Falla sencilla línea (fase) a tierra, representa aproximadamente el 70% de las fallas que experimenta un SEP.
 - Falla línea a línea (fase a fase).
 - Fallas doble línea a tierra.
 - Fallas trifásicas balanceadas

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

➤ Fallas en Derivación.

- Línea a Tierra.

- Se asume que la falla ocurre en la fase "a". En el punto de falla se presenta la condición siguiente,



Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- La transformación de componentes simétricas aplicada a las condiciones en el punto de falla en el marco de referencia "abc" indica que las redes de secuencia deberán conectarse en serie, como se muestra en la figura siguiente.

$$\bar{I}_b = 0 \quad \bar{I}_c = 0 \quad \bar{V}_a = \bar{I}_a \bar{Z}_f$$

$$\bar{I}_0 + a^2 \bar{I}_1 + a \bar{I}_2 = \bar{I}_0 + a \bar{I}_1 + a^2 \bar{I}_2 = 0$$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_2$$

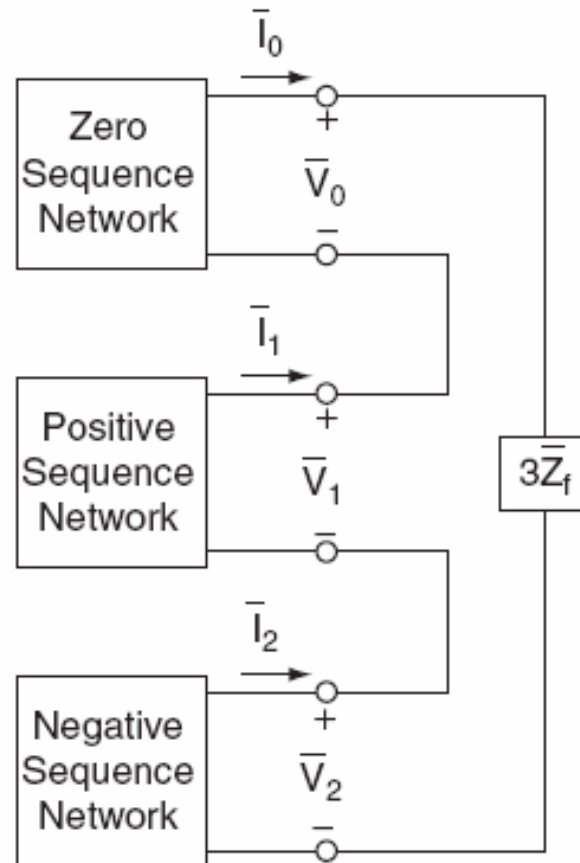
$$\bar{I}_b = \bar{I}_0 + a^2 \bar{I}_1 + a \bar{I}_2 = \bar{I}_0 + (a^2 + a) \bar{I}_1 = 0$$

$$\bar{I}_0 = \bar{I}_1 = \bar{I}_2$$

$$\bar{V}_a = \bar{Z}_f \bar{I}_a$$

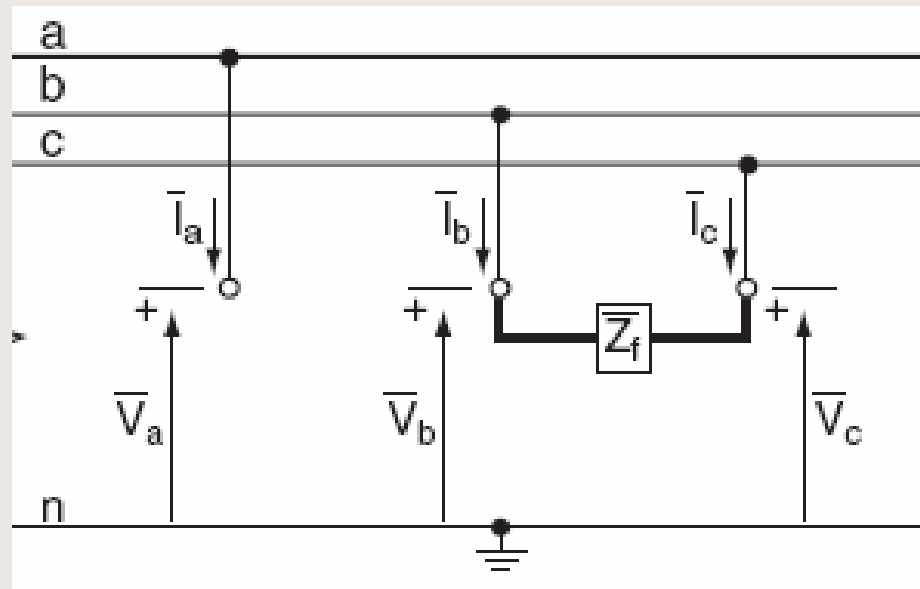
$$\bar{V}_0 + \bar{V}_1 + \bar{V}_2 = 3 \bar{Z}_f \bar{I}_1$$

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia



Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- Falla Línea a Línea.
 - Se asume que la falla ocurre entre las fases "b" y "c". En el punto de falla se presenta la condición siguiente,



Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- La transformación de componentes simétricas aplicada a las condiciones en el punto de falla en el marco de referencia "abc" indica que no existe corriente de secuencia cero y las redes de secuencia deberán conectarse como se muestra en la figura siguiente.

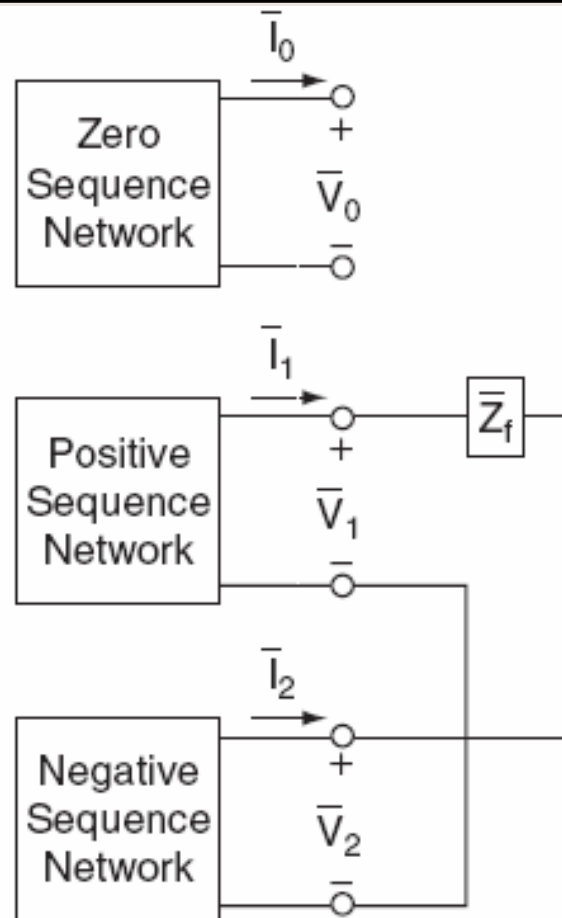
$$\bar{I}_0 = 0 \quad \bar{I}_b = -\bar{I}_c \quad \bar{V}_b = \bar{Z}_f \bar{I}_b + \bar{V}_c$$

$$\bar{I}_0 + \bar{I}_1 + \bar{I}_2 = 0$$

$$\bar{I}_0 = 0$$

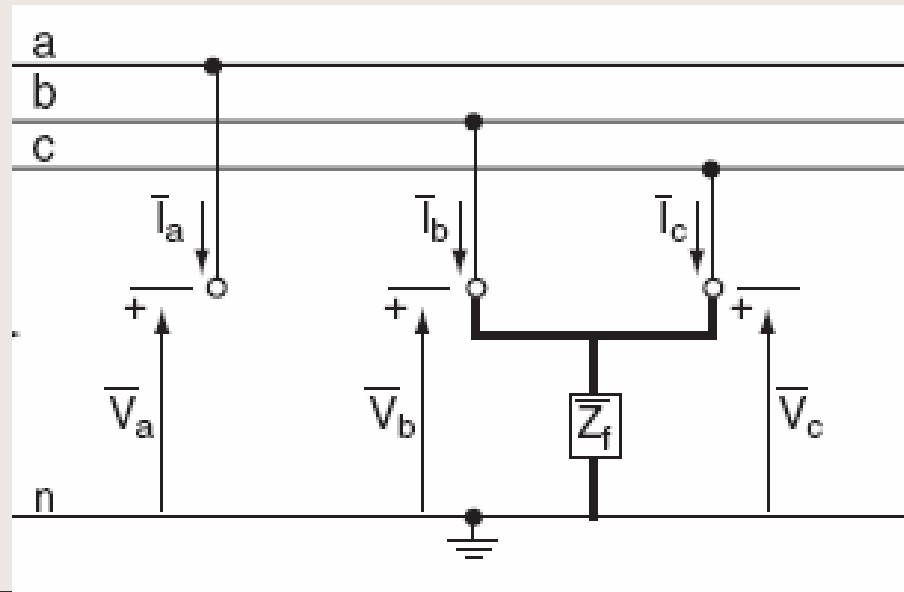
$$\bar{I}_1 = -\bar{I}_2$$

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia



Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- Falla Doble Línea a Tierra.
 - Se asume que la falla ocurre entre las fases "b" y "c" y tierra. En el punto de falla se presenta la condición siguiente,



Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- La transformación de componentes simétricas aplicada a las condiciones en el punto de falla en el marco de referencia "abc" indica que las redes de secuencia positiva y negativa entre ellas se conectan en paralelo y en serie con la red de secuencia cero, como se muestra en la figura siguiente.

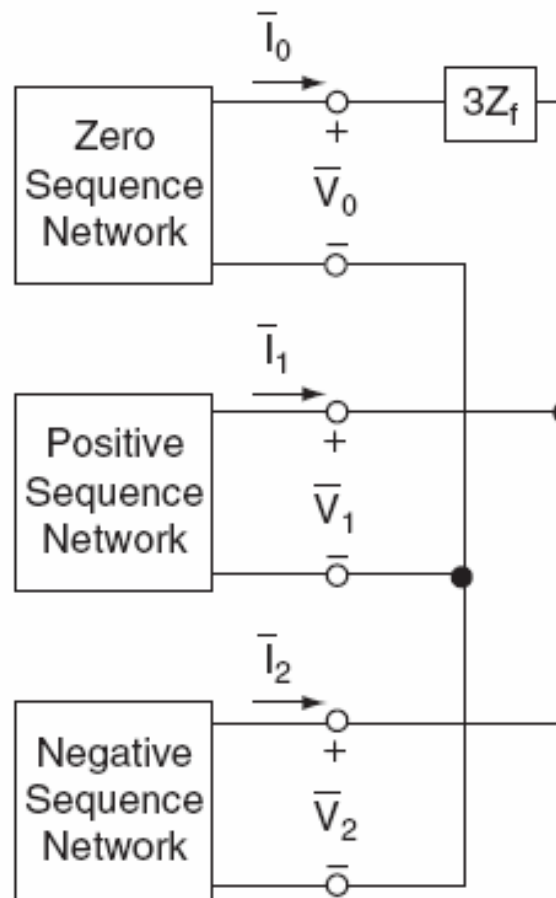
$$\bar{I}_a = 0 \quad \bar{V}_b = \bar{V}_c \quad \bar{V}_b = (\bar{I}_b + \bar{I}_c)\bar{Z}_f$$

$$\bar{I}_0 + \bar{I}_1 + \bar{I}_2 = 0$$

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_2$$

$$\bar{V}_0 - \bar{V}_1 = 3\bar{Z}_f\bar{I}_0$$

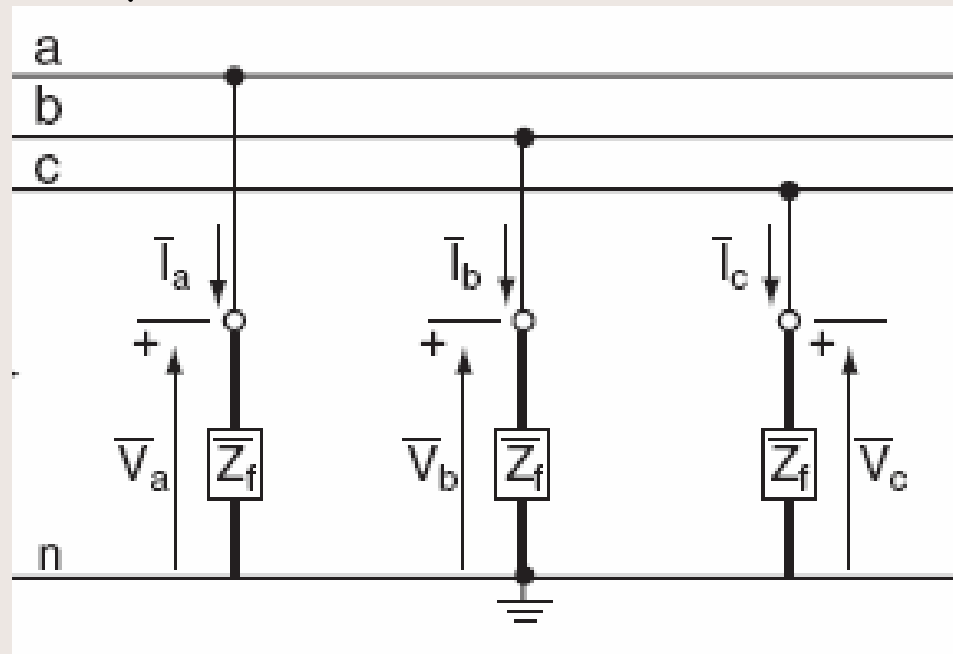
Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia



Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- Falla Trifásica.

- En el punto de falla se presenta la condición siguiente,



Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- La transformación de componentes simétricas aplicada a las condiciones en el punto de falla en el marco de referencia "abc" indica que las tres redes de secuencia quedan desacopladas, como se muestra en la figura siguiente.

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_a \\ \bar{V}_b \\ \bar{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_f & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}_f & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \end{bmatrix}$$

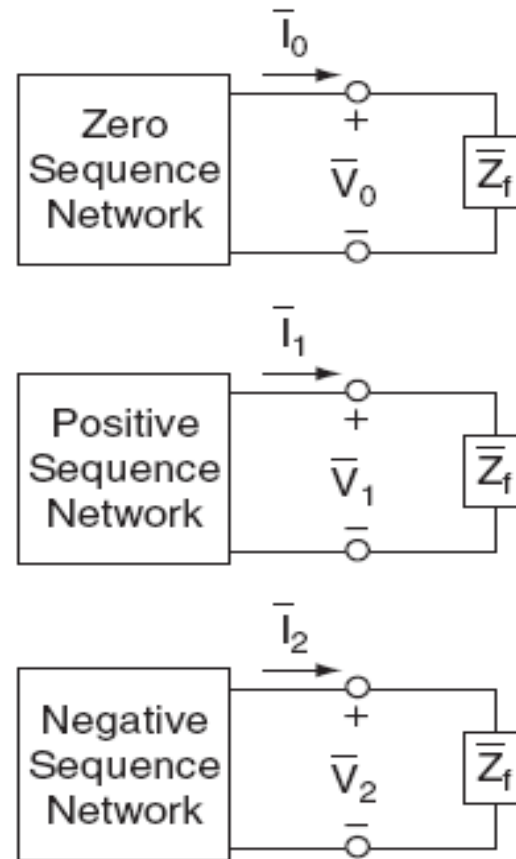
$$[Z_{012}] = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \bar{Z}_f & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}_f & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_f \end{bmatrix} [T] = \begin{bmatrix} \bar{Z}_f & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}_f & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_f \end{bmatrix}$$

$$\bar{V}_0 = \bar{V}_2 = 0$$

$$\bar{I}_0 = \bar{I}_2 = 0$$

$$\bar{V}_1 = \bar{Z}_f \bar{I}_1$$

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

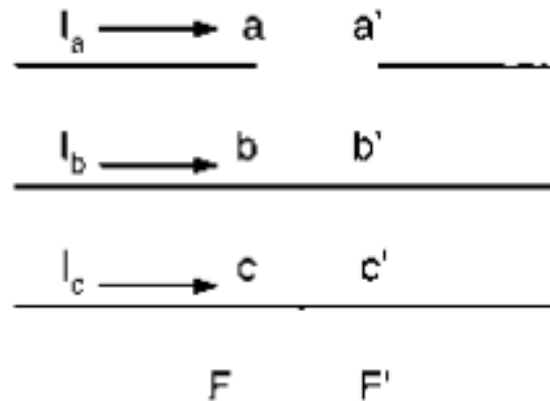


Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

➤ Fallas Serie.

- Fase Abierta.

- Se asume que la falla ocurre en la fase "a". En el punto de falla se presenta la condición siguiente



Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

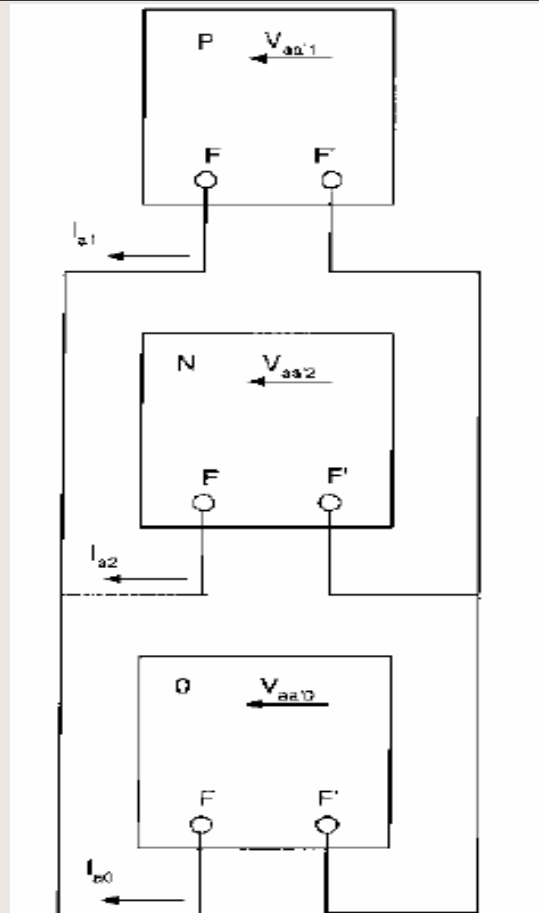
- La transformación de componentes simétricas aplicada a las condiciones en el punto de falla en el marco de referencia "abc" indica que las tres redes de secuencia correspondientes a la fase abierta, deberán ser conectadas en paralelo como se muestra en la figura siguiente.

$$I_a = 0 \quad V_{b0} - V_{c0} = 0$$

$$V_{ao1} = V_{ao2} = V_{ao0} = \frac{1}{3} V_{ao}$$

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

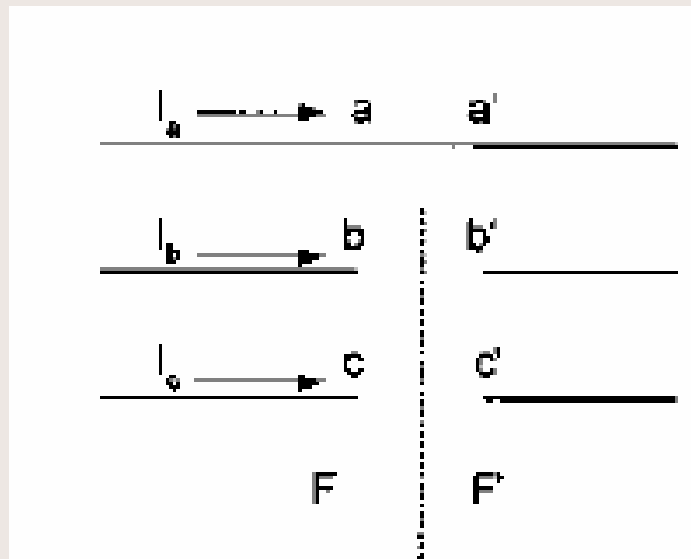
Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia



Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

- Dos Fases Abiertas.

- Se asume que la falla ocurre en las fases "b" y "c". En el punto de falla se presenta la condición siguiente,



Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

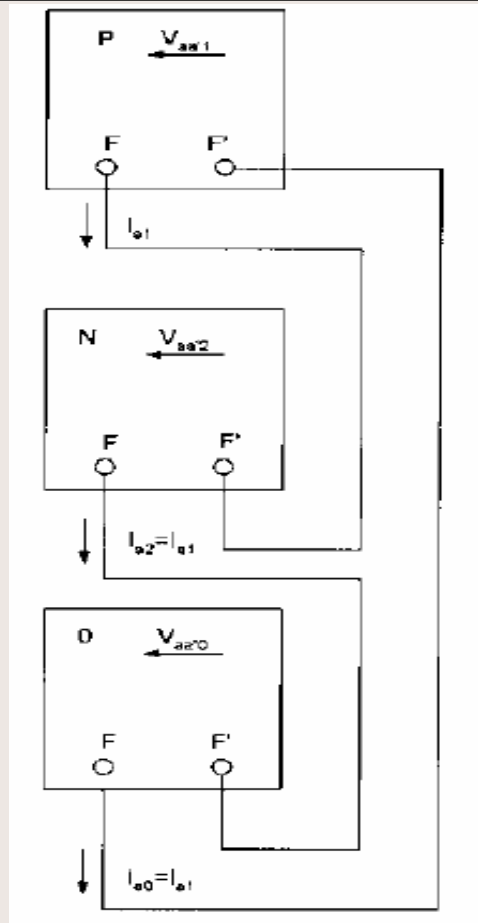
- La transformación de componentes simétricas aplicada a las condiciones en el punto de falla en el marco de referencia "abc" indica que las tres redes de secuencia correspondientes a las dos fases abiertas, deberán ser conectadas en serie como se muestra en la figura siguiente.

$$I_b = I_c = 0$$

$$V_{a0} = V_{a10} + V_{a20} + V_{a00} = 0$$

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = \frac{1}{3} I_a$$

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia



Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

➤ Referencias y Bibliografía

1. The IEEE Dictionary, Ed. CRC. 2000.
2. W. D. Stevenson, Elements of Power System Analysis, 4th. Edition McGraw Hill 1983.
3. Fortescue, C. L., "Method of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks", Trans AIEE 37, pp 1027-1140, 1918.

Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia

4. Duncan Glover J., Sarma S. M., Sistemas de Potencia; Análisis y Diseño, 3ra ed., Editorial Thompson.
5. C.A. Gross, Análisis de Sistemas de Potencia, 1ra Edición en Español, Ed. Interamericana 1982.