

**DIPLOMADO EN REDES ELÉCTRICAS
DE DISTRIBUCIÓN Y TRANSMISIÓN**



FUNDAMENTOS DE CÁLCULO DE FLUJO DE CARGA Y CORTO CIRCUITO

MSc. Jorge Antonio Jaimes Báez

uts | EXTENSIÓN Y
PROYECCIÓN SOCIAL
extension@uts.edu.co

Tema 1: Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

Tema 2: Análisis de flujo de carga (estado estable)

Tema 3: Análisis de cortocircuito

- **Curso Protecciones Eléctricas** – Ingeniería Especializada Blandon – 2011
- **Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia.** William D. Stevenson. 1986. Mc Graw Hill
- **Sistemas Eléctricos de Potencia.** Gilberto Carrillo Caicedo. UIS – 2006
- **Sistemas de Potencia – GISEL – Notas de clase.** Hermann Raúl Vargas Torres. UIS - 2004
- **Curso Protecciones Eléctricas – Notas de clase.** Jorge Antonio Jaimes Báez. UIS - 2012.
- **Análisis de Fallas en Sistemas Eléctricos de Potencia.** Jorge Guillermo Calderón Guizar. Lima – 2008.

**DIPLOMADO EN REDES ELÉCTRICAS
DE DISTRIBUCIÓN Y TRANSMISIÓN**



TEMA 1: CONCEPTOS FUNDAMENTALES Y MODELAMIENTO DE ELEMENTOS DE LOS SISTEMAS DE POTENCIA

MSc. Jorge Antonio Jaimes Báez

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

Tema 1: Conceptos básicos de circuitos C.A.

Tema 2: Potencia y Energía

Tema 3: Definición

Tema 4: Estructura del sistema de potencia

Tema 5: Representación de los elementos que componen el sistema de potencia

Tema 6: Representación en p.u. del sistema de potencia

Tema 7: Representación matricial del sistema de potencia (Ybus, Zbus)

1. Conceptos Básicos de circuitos C.A.

☐ El Concepto de Fasor.

- Es un número complejo que representa la amplitud y fase de una función sinusoidal. 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

1. Conceptos Básicos de circuitos C.A.

- 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 $t=0$

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

1. Conceptos Básicos de circuitos C.A.

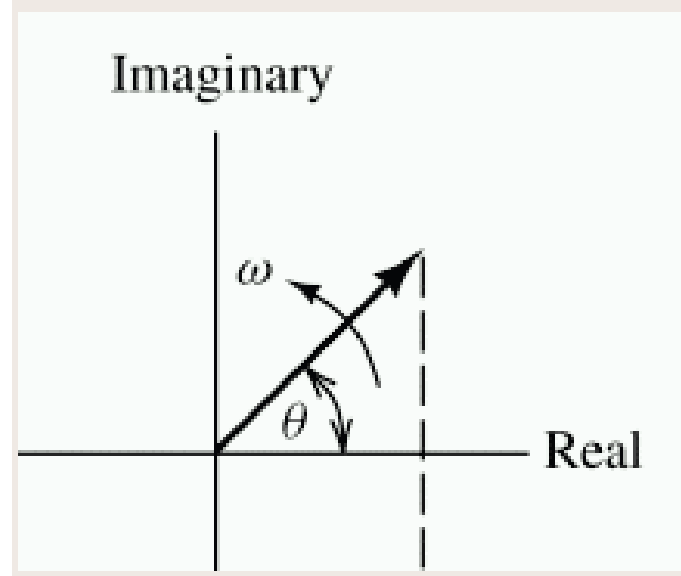
□ Representación Analítica del Fasor.

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

1. Conceptos Básicos de circuitos C.A.

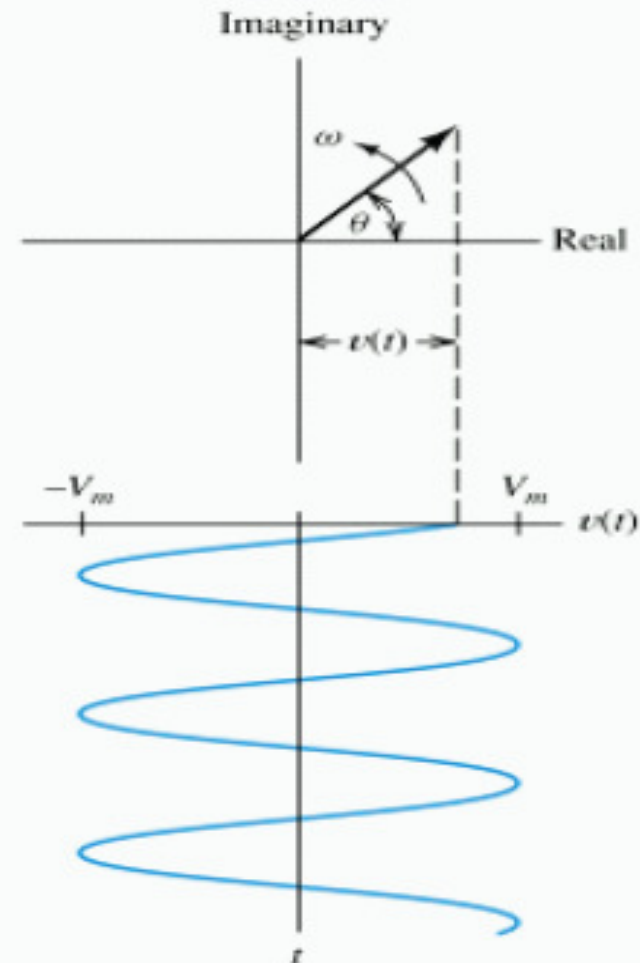
□ Representación Gráfica del Fazor.

- 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



1. Conceptos Básicos de circuitos C.A.

- 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.



1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

1. Conceptos Básicos de circuitos C.A.

☐ 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.

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

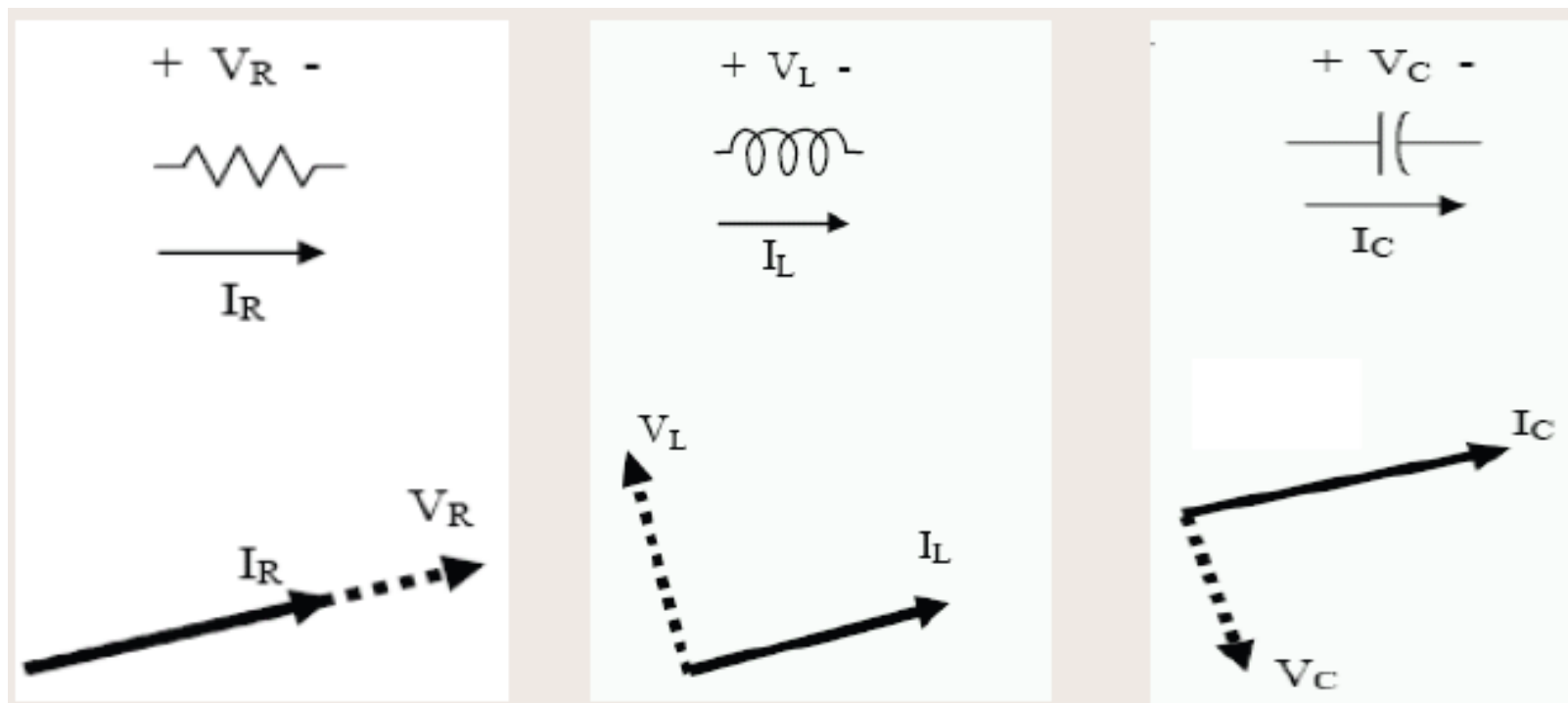
1. Conceptos Básicos de circuitos C.A.

☐ Diagramas Fasoriales de cantidades sinusoidales.

- 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

1. Conceptos Básicos de circuitos C.A.

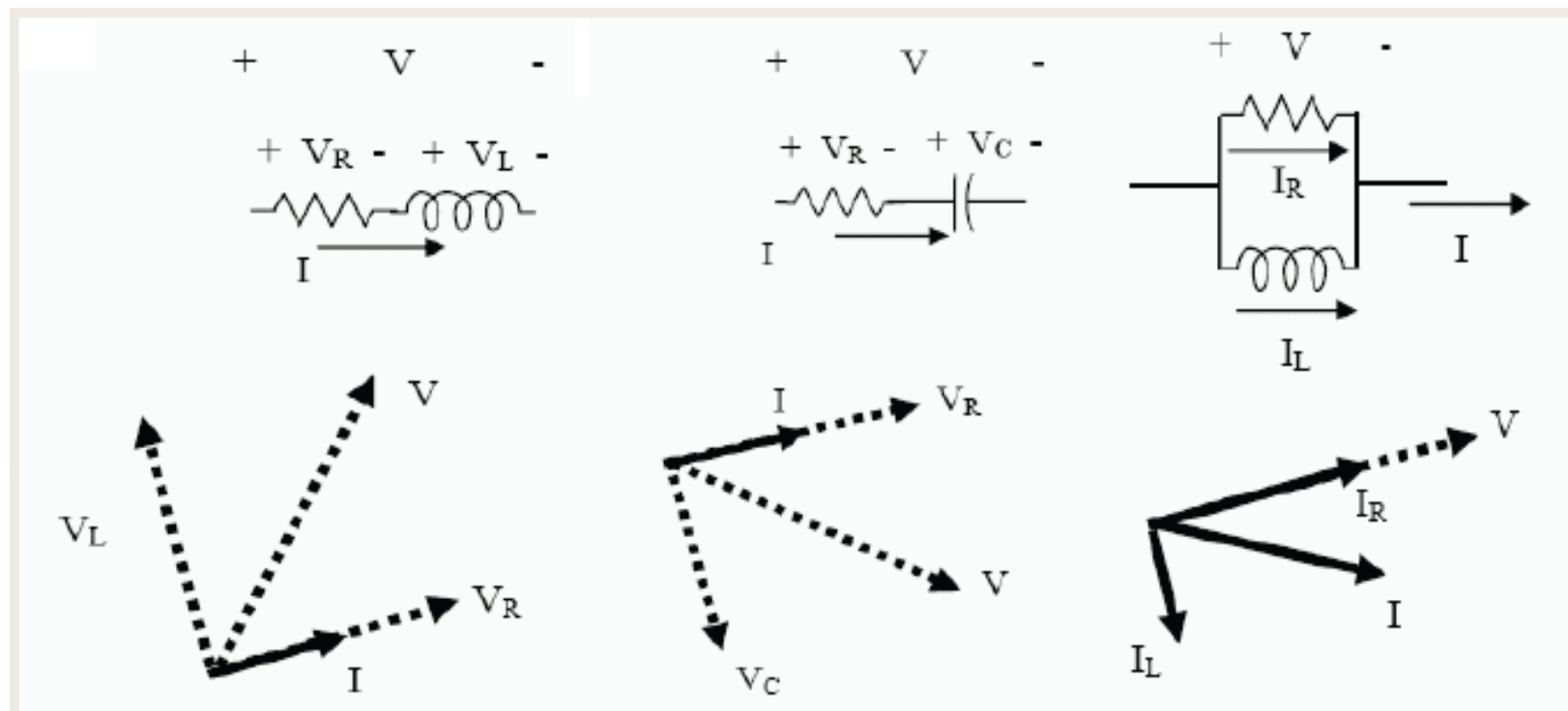
□ Diagramas Fasoriales simples.



1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

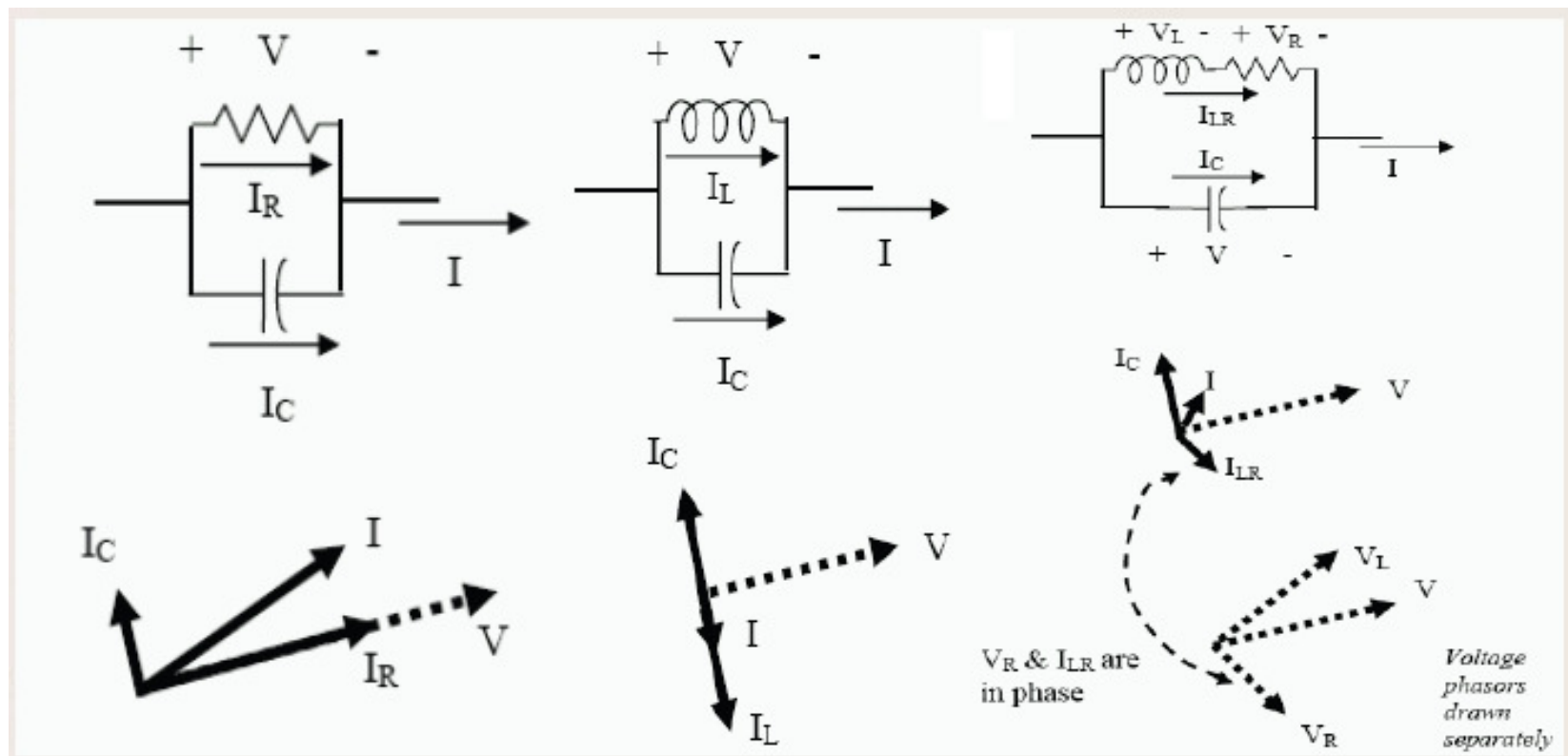
1. Conceptos Básicos de circuitos C.A.

□ Diagramas Fasoriales simples.



1. Conceptos Básicos de circuitos C.A.

□ Diagramas Fasoriales simples.



1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

1. Conceptos Básicos de circuitos C.A.

❑ 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
 - ✓ $(V/I) = (|V| / |I|) \angle (\alpha - \beta)$

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

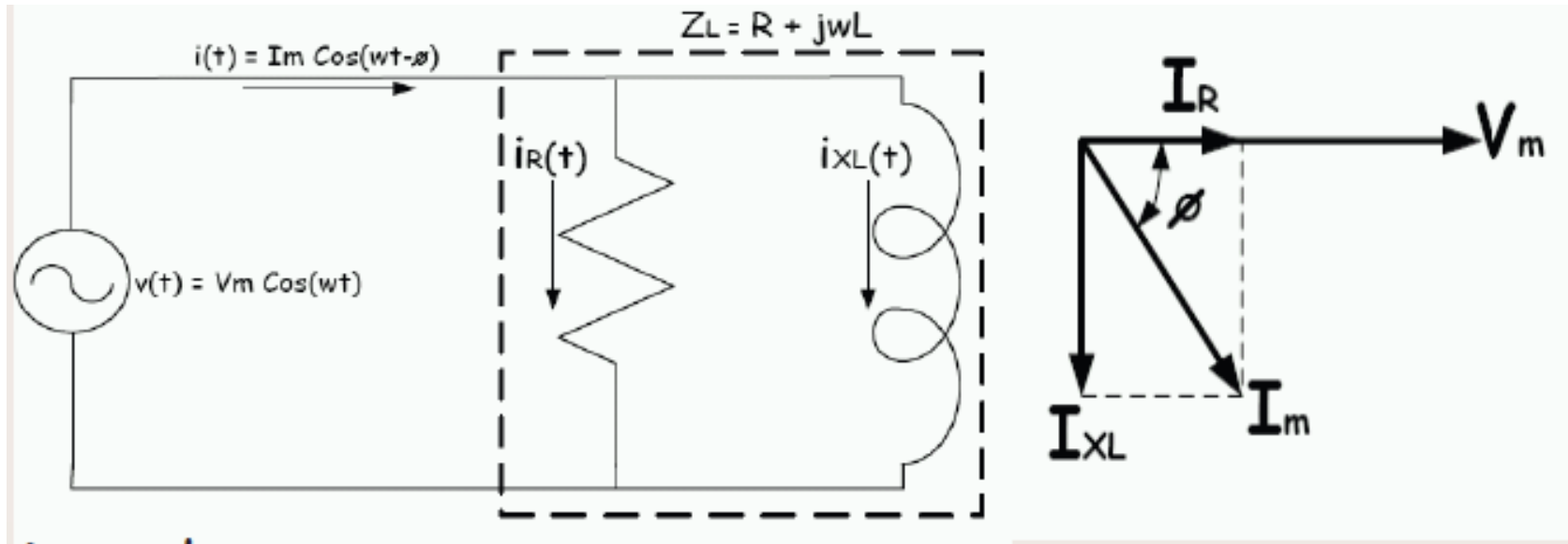
2. Potencia y Energía

❑ 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.
- Con el propósito de ilustrar este concepto se considerará el circuito RL que se muestra a continuación

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

2. Potencia y Energía



Donde:

$$I_m = V_m / |Z_L| \text{ y } \phi \text{ el ángulo de factor de potencia.}$$

Aplicando la definición de potencia instantánea se tiene que:

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

2. Potencia y Energía

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

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:

2. Potencia y Energía

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

Luego entonces,

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

por lo tanto,

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

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

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

2. Potencia y Energía

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.

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

2. Potencia y Energía

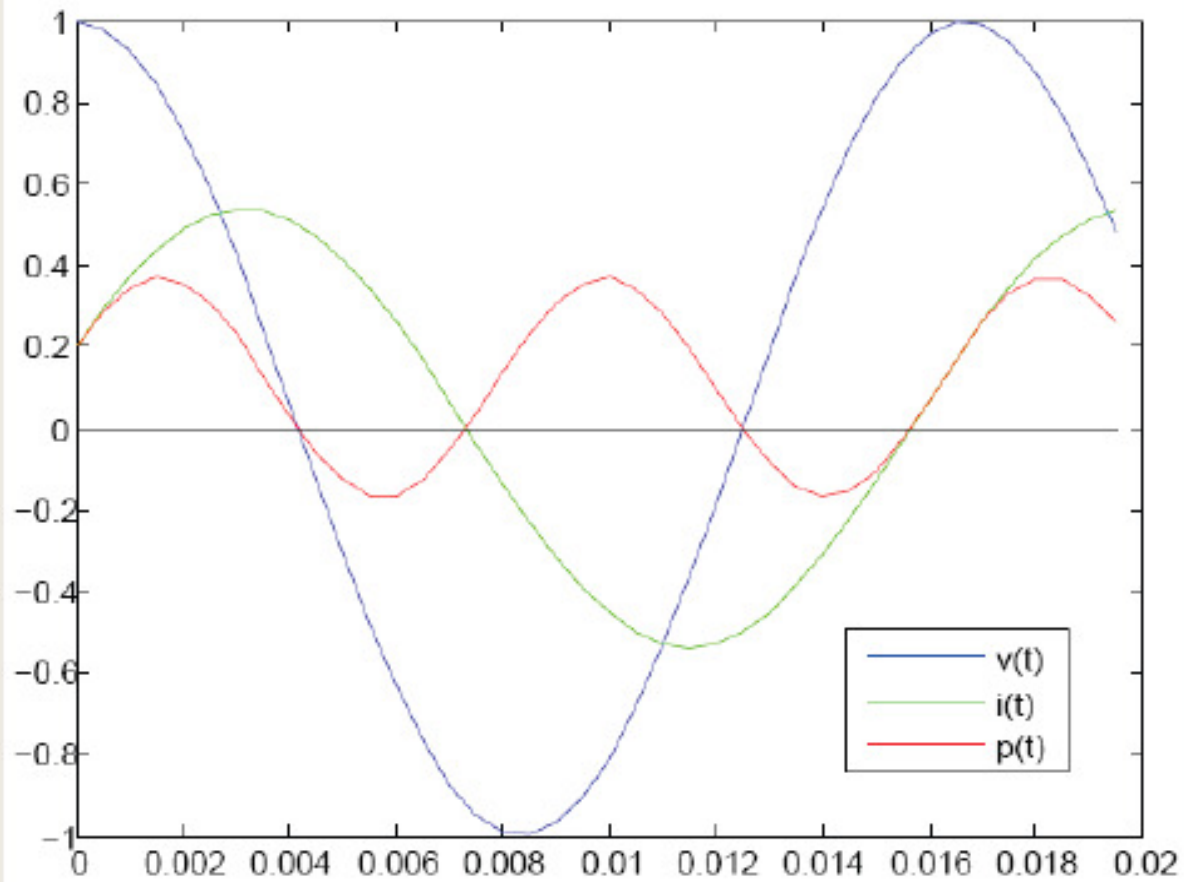


Figura 1. Potencia instantánea consumida por la carga.

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

2. Potencia y Energía

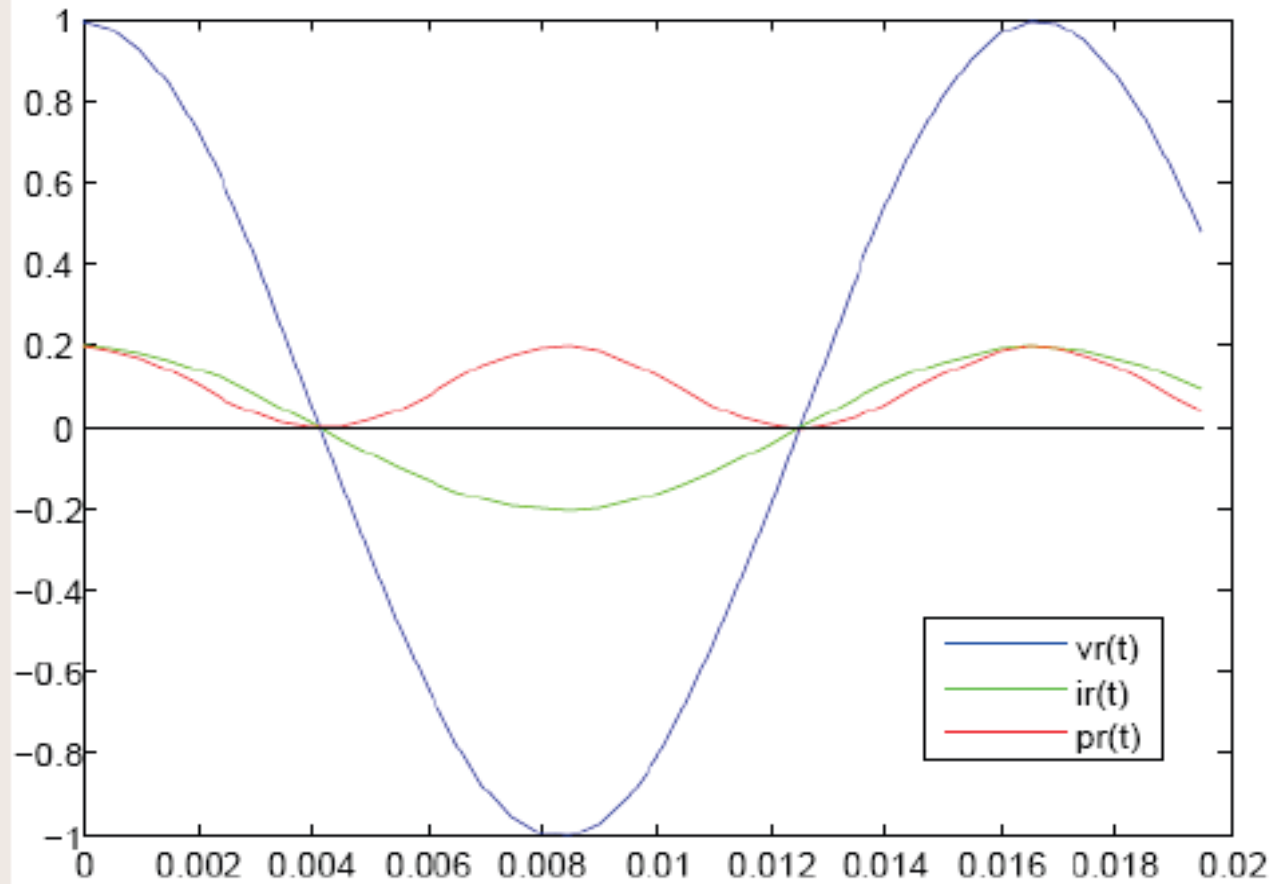


Figura 2. Potencia instantánea en la Resistencia

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

2. Potencia y Energía

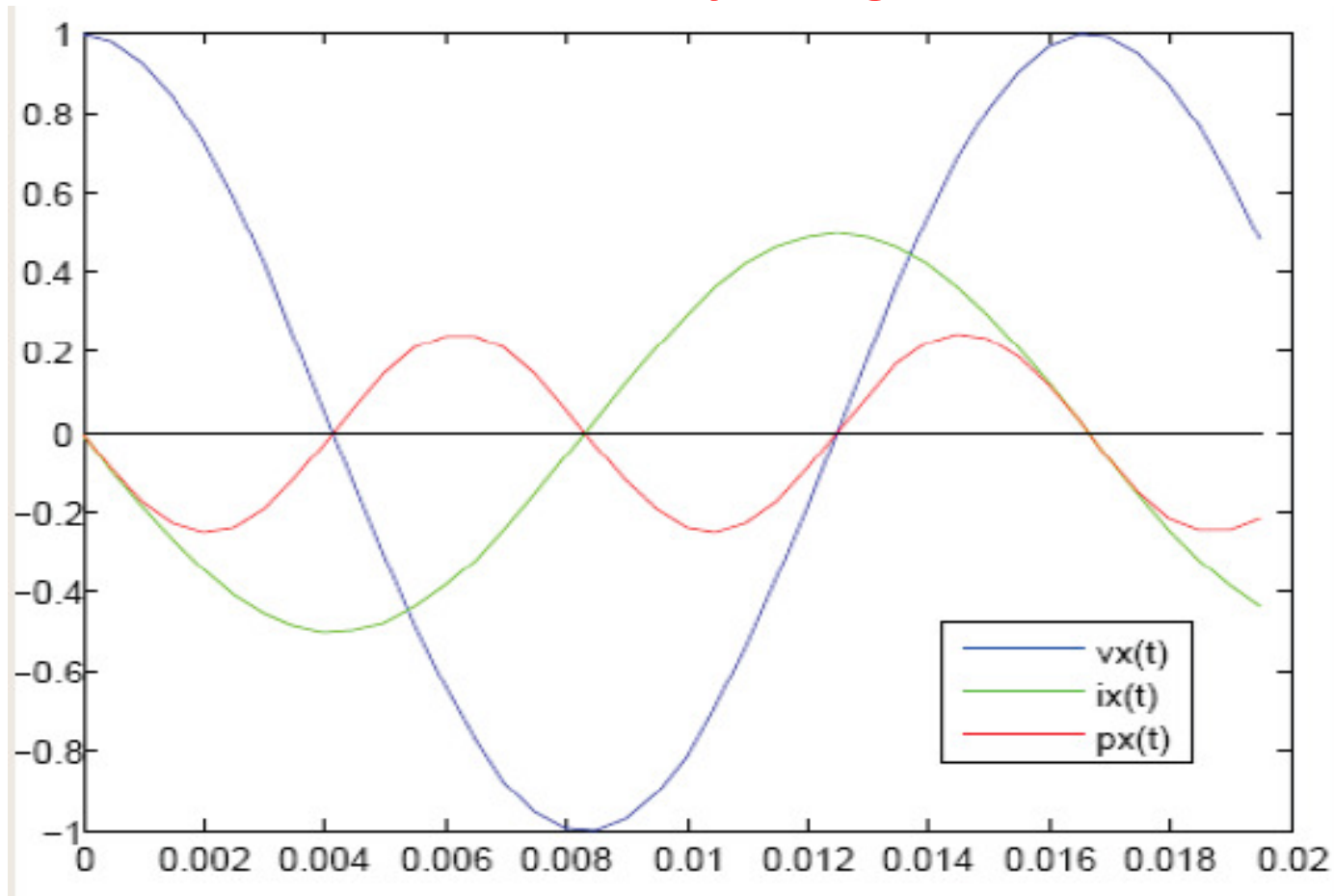


Figura 3. Potencia instantánea en la Inductancia

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

2. Potencia y Energía

- 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 ($\cos \Phi$)

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

2. Potencia y Energía

- 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:

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

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

2. Potencia y Energía

- 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 alternada esta componente de la carga.
- Al valor máximo de esta potencia “pulsante” se le denomina **potencia reactiva (Q)** o voltampere reactivos de la carga.

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

2. Potencia y Energía

- 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

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

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

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

2. Potencia y Energía

- 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:

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

2. Potencia y Energía

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

$$V = V_m \angle \alpha \quad , \quad I = I_m \angle \beta \quad e$$
$$I^* = I_m \angle -\beta \text{ conjugado del fasor corriente.}$$

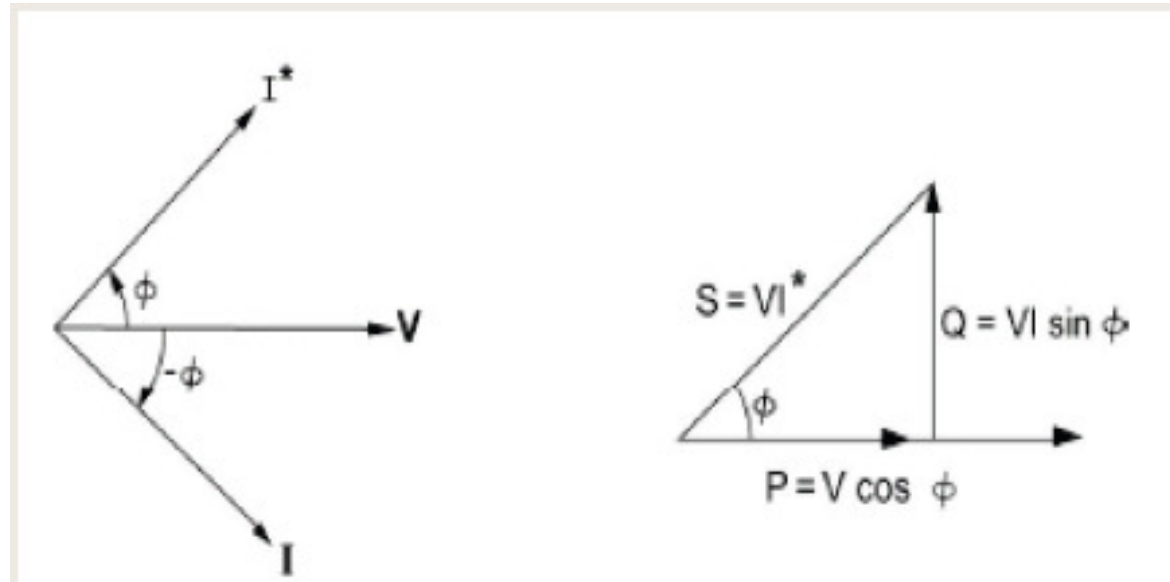
$$S = P + jQ = V I^* = V_m I_m \angle (\alpha - \beta) \quad (1)$$

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

2. Potencia y Energía

□ El Triangulo de Potencias.

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



1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

2. Potencia y Energía

☐ 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.

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

2. Potencia y Energía

- Un sistema de voltaje trifásico balanceado consiste tres fuentes monofásicas de igual magnitud y frecuencia, pero desfasadas 120° entre sí.
- 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.

2. Potencia y Energía

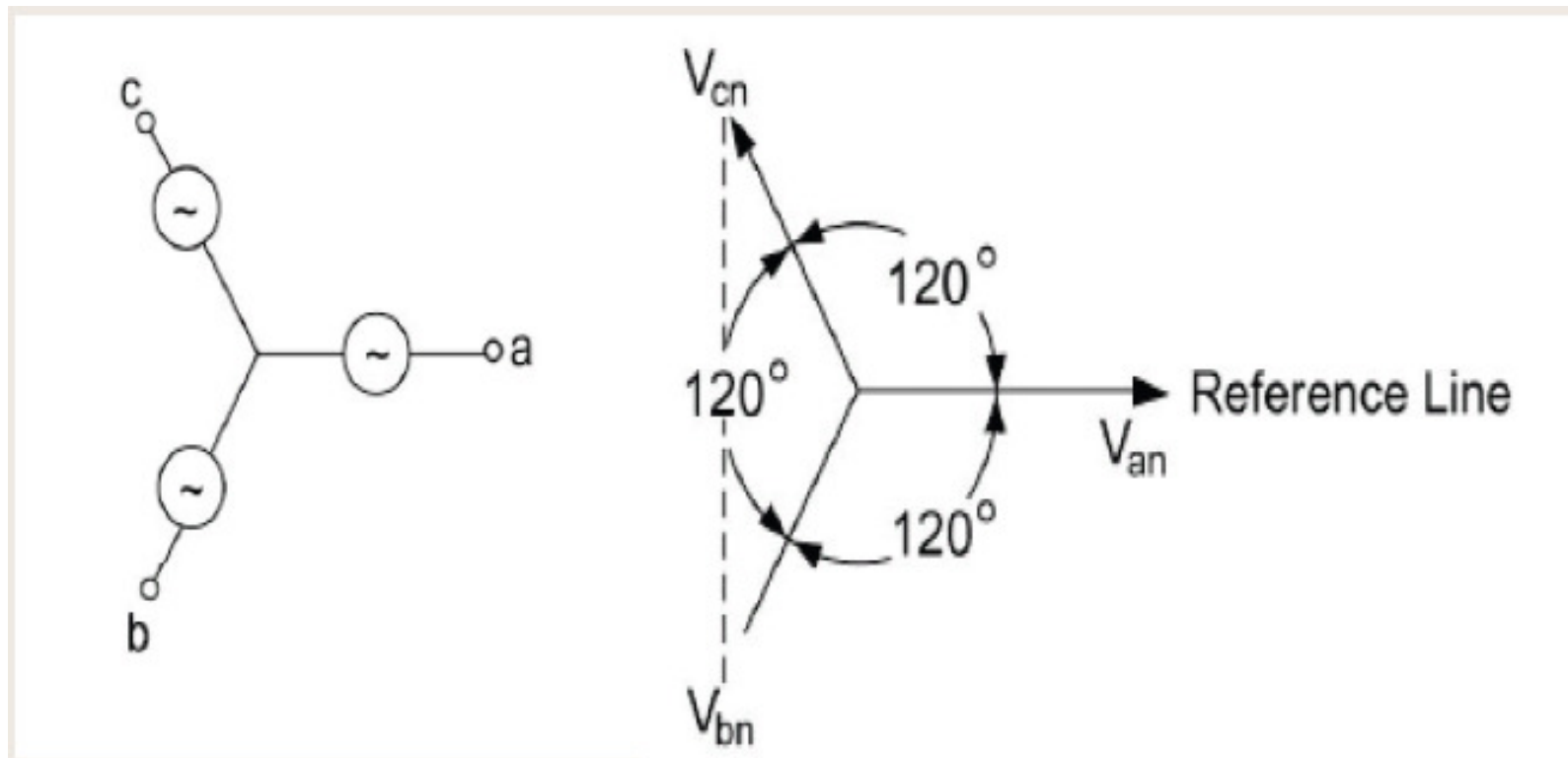


Figura 5. Sistema de Voltaje Trifásico balanceado y su correspondiente diagrama fasorial.

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

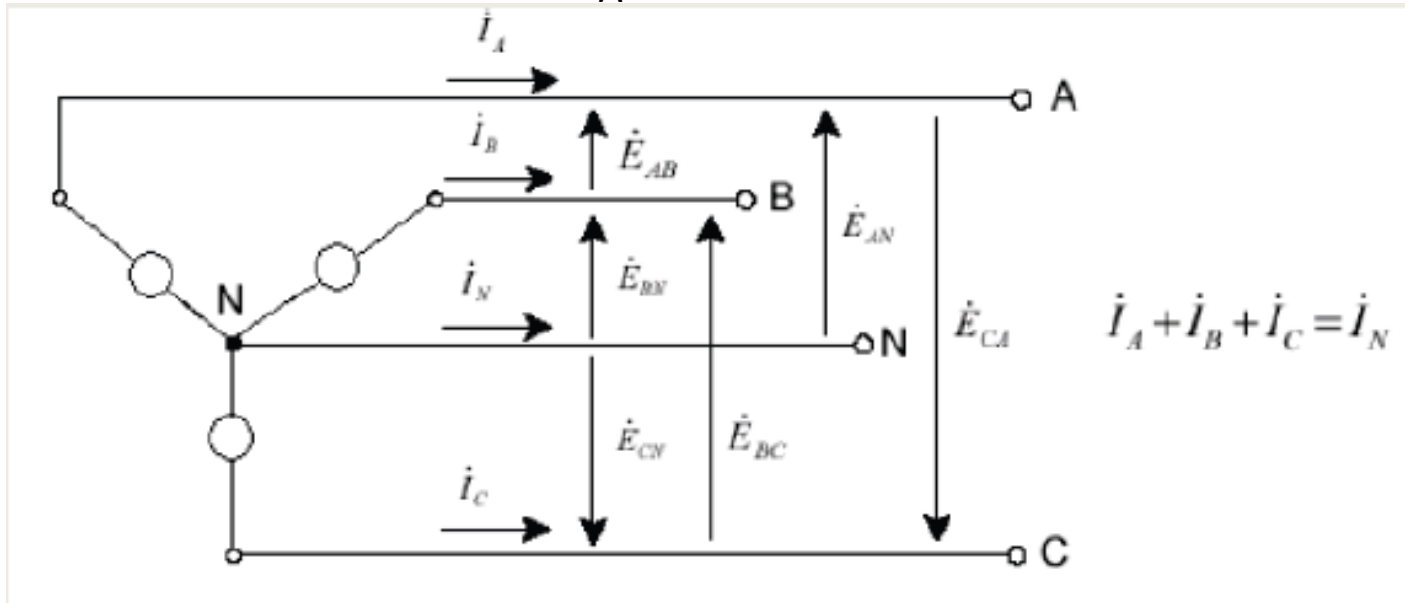
2. Potencia y Energía

☐ Voltajes y Corrientes en Circuitos Trifásicos Balanceados.

- Cada una de las componentes de un circuito trifásico exhiben cualquiera de las dos configuraciones siguientes:
 - Estrella 
 - Delta 
- Las relaciones voltaje-corriente dependiendo de la configuración se presenta a continuación:

2. Potencia y Energía

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

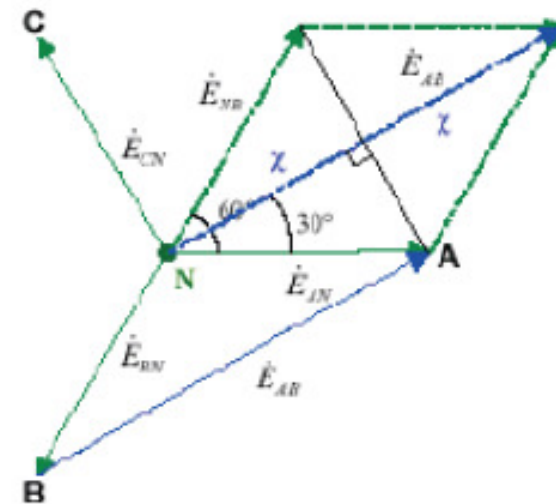


1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

2. Potencia y Energía

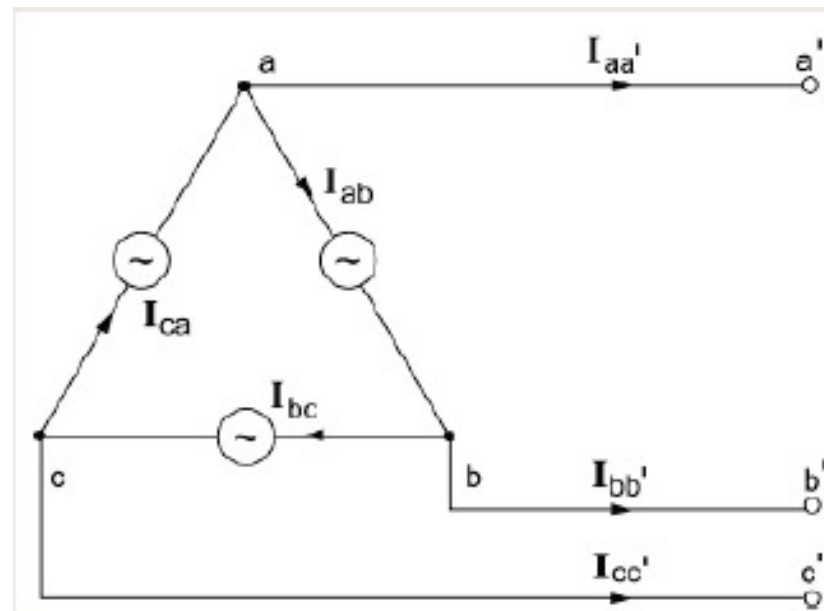
- En un sistema balanceado los voltajes tienen la misma magnitud, pero se encuentran desfasados 120° entre si.
- De la figura se deducen las siguientes relaciones:

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 $V_{LL} = \sqrt{3} V_p$



2. Potencia y Energía

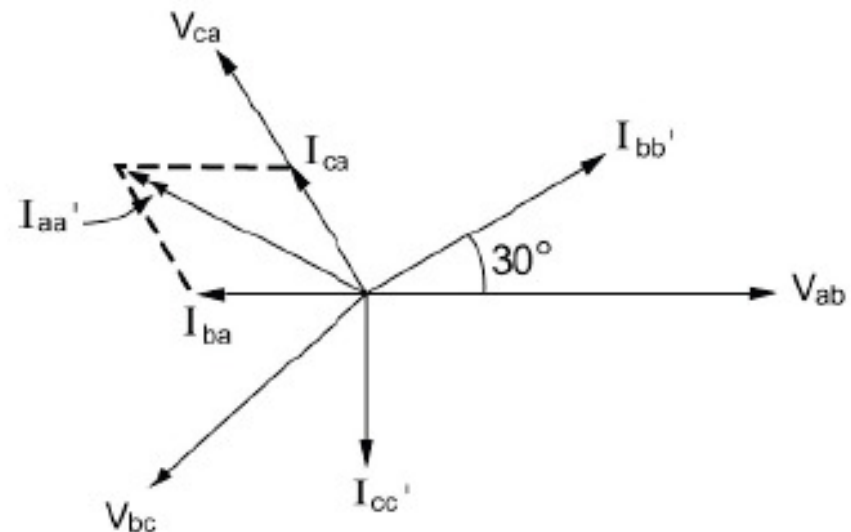
- Conexión en Delta.
 - Voltaje entre fases (de línea) V_{AB} .
 - Corriente de línea o fase $I_{aa'}$
 - Corriente entre líneas I_{ab}



2. Potencia y Energía

- En un sistema balanceado las corrientes tienen la misma magnitud, pero se encuentran desfasadas 120° entre sí.
- 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, $I_L = \sqrt{3} I_p$



1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

2. Potencia y Energía

☐ Potencia Instantánea y Compleja en Circuitos Trifásicos Balanceados.

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

$$\begin{aligned}v_a(t) &= \sqrt{2} V_p \cos(\omega t) & ; & \quad i_a(t) = \sqrt{2} I_p \cos(\omega t - \phi) \\v_b(t) &= \sqrt{2} V_p \cos(\omega t - 120^\circ) & ; & \quad i_b(t) = \sqrt{2} I_p \cos(\omega t - 120^\circ - \phi) \\v_c(t) &= \sqrt{2} V_p \cos(\omega t + 120^\circ) & ; & \quad i_c(t) = \sqrt{2} I_p \cos(\omega t + 120^\circ - \phi)\end{aligned}$$

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

2. Potencia y Energía

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

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

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

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

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

2. Potencia y Energía

- 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:

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

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

2. Potencia y Energía

- 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:

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

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

2. Potencia y Energía

En resumen, tenemos las siguientes definiciones para un sistema monofásico:

* La potencia activa: $P = VI \cos(\theta)$

* La potencia reactiva: $Q = VI \sin(\theta)$

* La potencia aparente: $S = VI$

* Factor de potencia: $F.P. = \frac{P}{S}$

2. Potencia y Energía

Para un trifásico:

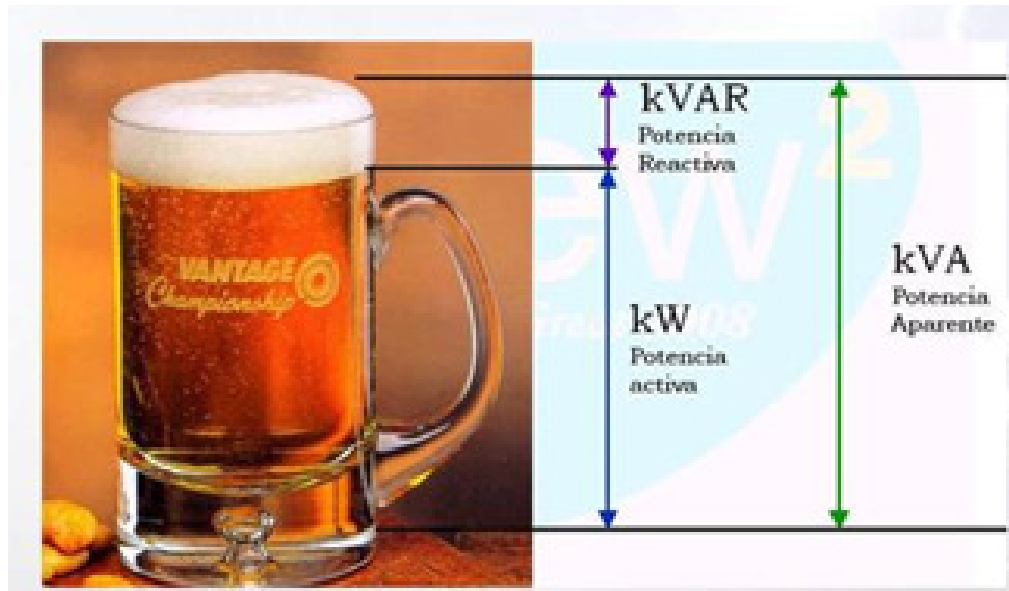
* La potencia activa: $P_{3\phi} = \sqrt{3}V_L I_L \cos(\theta)$

* La potencia reactiva: $Q_{3\phi} = \sqrt{3}V_L I_L \sin(\theta)$

* La potencia aparente: $S_{3\phi} = \sqrt{3}V_L I_L$

* Factor de potencia: $F.P. = \frac{P_{3\phi}}{S_{3\phi}}$

2. Potencia y Energía



Debido a la potencia reactiva presente (Q), las líneas de transmisión debe tener un dimensionamiento adicional. Para que la energía reactiva no utilice las líneas de transmisión para establecerse, se debe hacer compensación con condensadores en el lado de la carga, reduciéndose las pérdidas en la línea al disminuir la corriente que circula por ella.

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

2. Potencia y Energía

☐ 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).

2. Potencia y Energía

❑ Flujo de Potencia (convenciones)

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

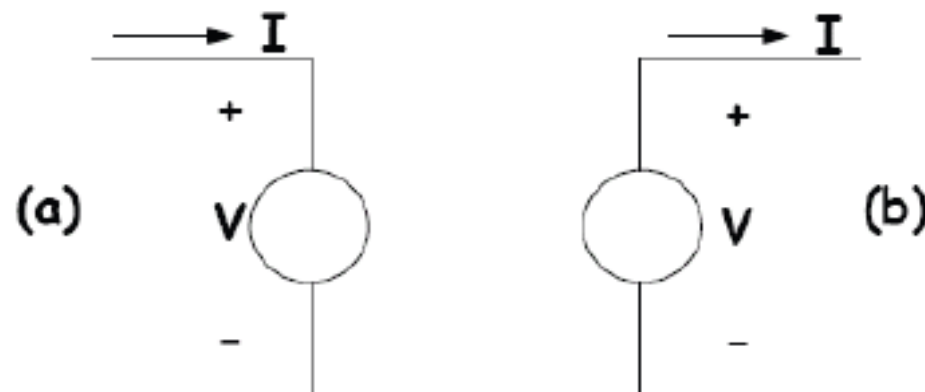
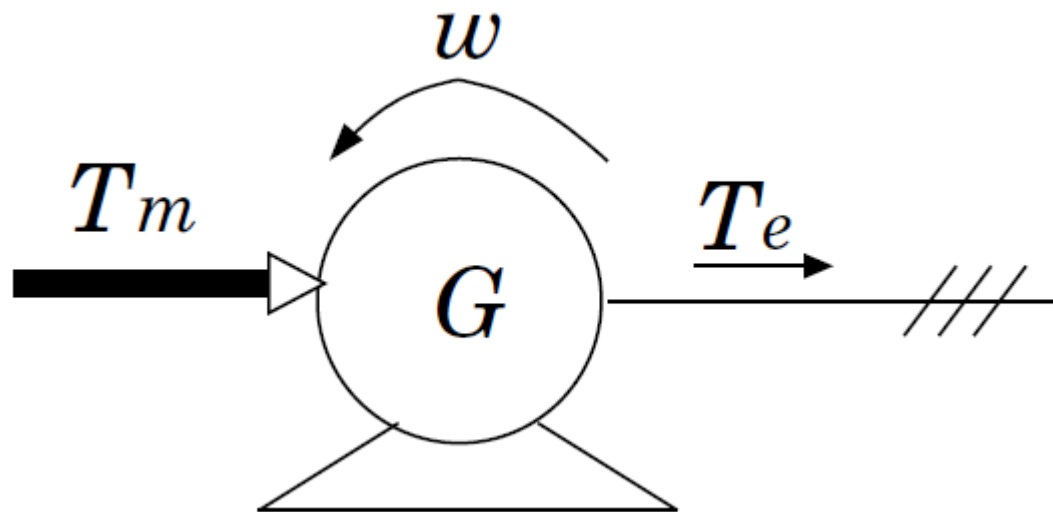


Figura 4. Convenciones de la carga (a) y del generador (b)

2.1. Balance de Potencia Activa - Frecuencia

Suponiendo el caso de que no hay pérdidas durante el proceso de generación, en estado estable debe haber un balance entre el par mecánico T_m y el par eléctrico T_e



1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

2.1. Balance de Potencia Activa - Frecuencia

En forma de ecuación se representa por:

$$T_m = T_e$$

En términos de potencia se representa por:

$$P_m = P_e$$

Si se presenta un desbalance entre estos dos torques o estas dos potencias, se tiene:

$$Jdw/dt = T_m - T_e$$

En otras palabras aparece el par de aceleración:

$$Jdw/dt$$

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

2.1. Balance de Potencia Activa - Frecuencia

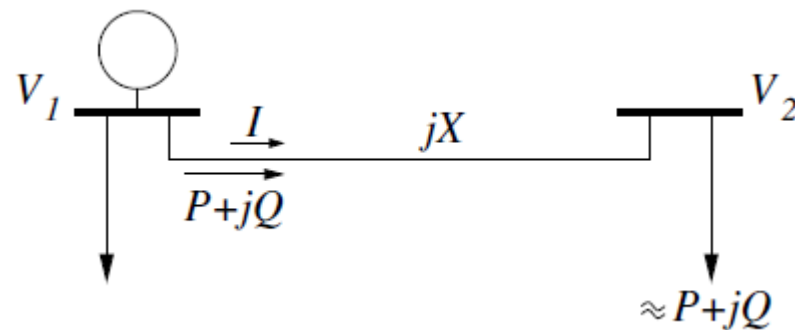
De $Jdw/dt = T_m - T_e$ se puede decir:

- Si T_m es mayor que T_e entonces el generador se acelera y la frecuencia aumenta
- Si T_e es mayor que T_m entonces el generador se frena y la frecuencia disminuye

Aquí se puede ver la relación directa entre la potencia y la frecuencia. Los cambios de potencia están asociados con aceleraciones o desaceleraciones de la máquina, las cuales implican un movimiento relativo del eje del rotor respecto al eje del campo magnético.

2.2. Relación Potencia Reactiva - Tensión

Se tiene el siguiente sistema:



Del circuito:

$$S_1 = P + jQ = V_1 I^*$$

$$V_2 = V_1 - jIX$$

Si se toma V_1 como referencia, $V_1 = |V_1| \angle 0^\circ$

2.2. Relación Potencia Reactiva - Tensión

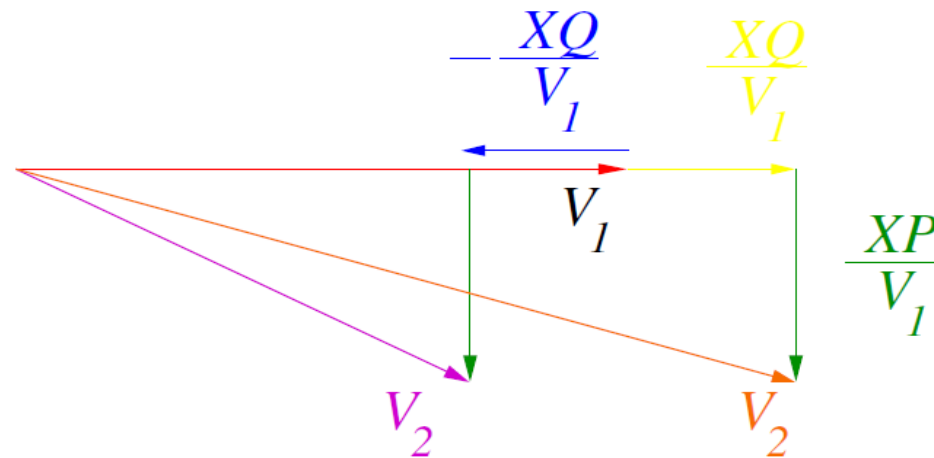
Para la corriente por la línea se tiene:

$$I = (P - jQ)/V_1$$

que al reemplazarla en la ecuación se tiene:

$$V_2 = V_1 - XQ/V_1 - jXP/V_1$$

Esto expresado en forma de diagrama fasorial:



1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

2.2. Relación Potencia Reactiva - Tensión

Se concluye:

- Al aumentar la P hacia la barra 2, aumenta la caída de tensión en cuadratura con V_1 , lo cual implica, básicamente, afectar el ángulo.
- Al aumentar la Q hacia la barra 2, aumenta la caída de tensión en fase con V_1 , lo cual implica, disminuir la magnitud del voltaje.
- Si se desea mantener constante la magnitud de V_2 , se debe controlar la demanda de reactivos en la carga, lo cual, considerando que ésta es normalmente inductiva se puede realizar compensándola mediante condensadores.
- El flujo de VARS por la línea está asociado a una caída de tensión, luego para compensar ésta caída es necesario generarlos, mejorando el nivel de tensión.

3. Definición del Sistema de Potencia

Es un conjunto de elementos dispuesto de tal forma que permiten la generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica a todos los usuarios ubicados en su zona de influencia cumpliendo con las especificaciones de calidad de servicio y de economía



1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

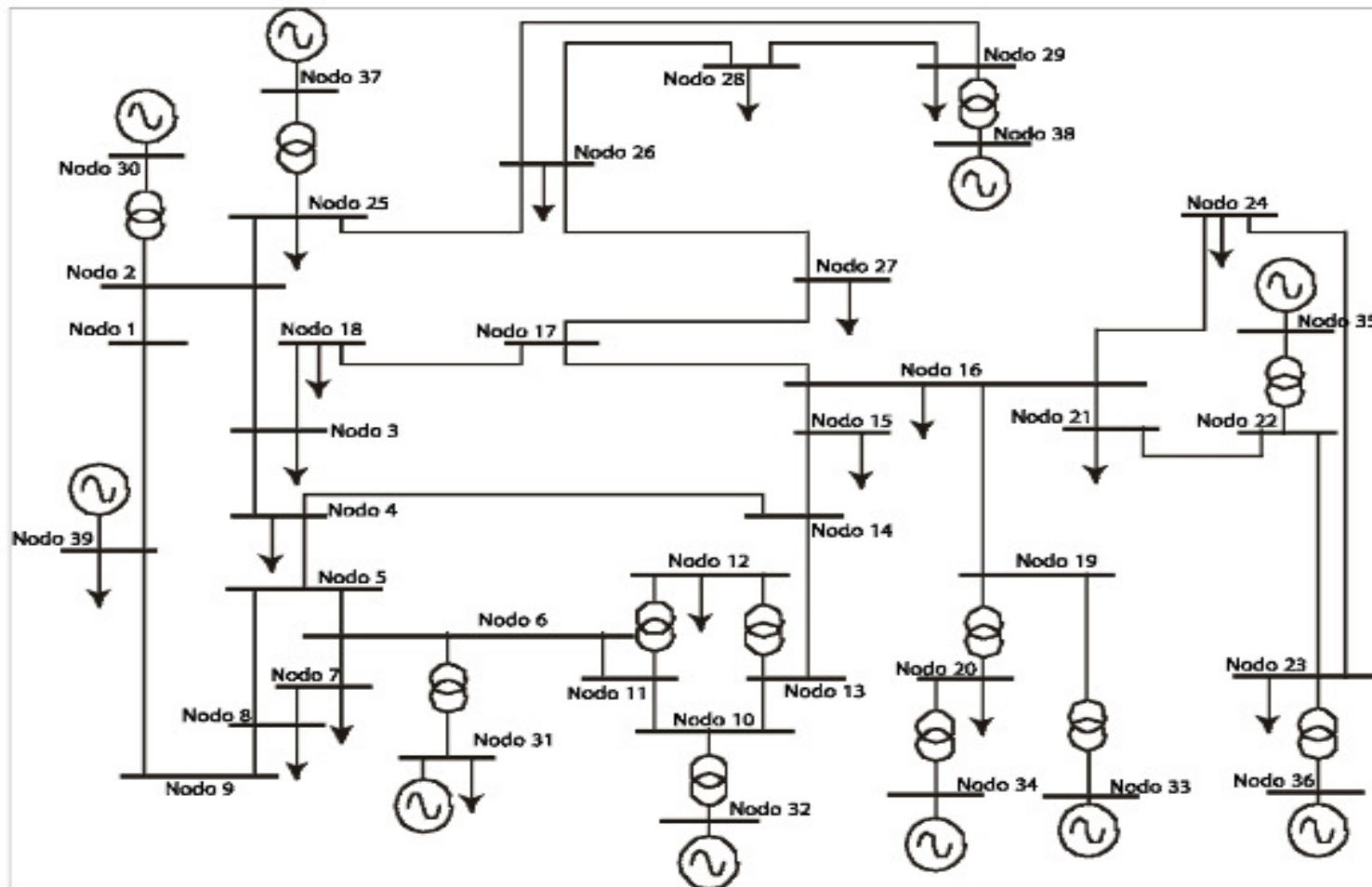


Figura 1.
Diagrama del sistema de potencia IEEE 39

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

3. Definición del Sistema de Potencia

Objetivos de un SP: Suministrar la energía eléctrica a los usuarios cumpliendo con los siguientes requisitos:

- a) Condiciones técnicas (tensión, límites de frecuencia):
 - No sobrepasar límites térmicos
 - Soportar variaciones (perturbaciones) sin pérdida de la estabilidad.
- b) Confiabilidad en cantidad y en tiempo (continuidad del servicio):
 - Nivel de generación suficiente para abastecer la demanda
 - Redes de respaldo (sistema enmallado)
 - Esquemas de deslastre de carga, si se requiere.
- c) Operación en estrictos márgenes económicos.

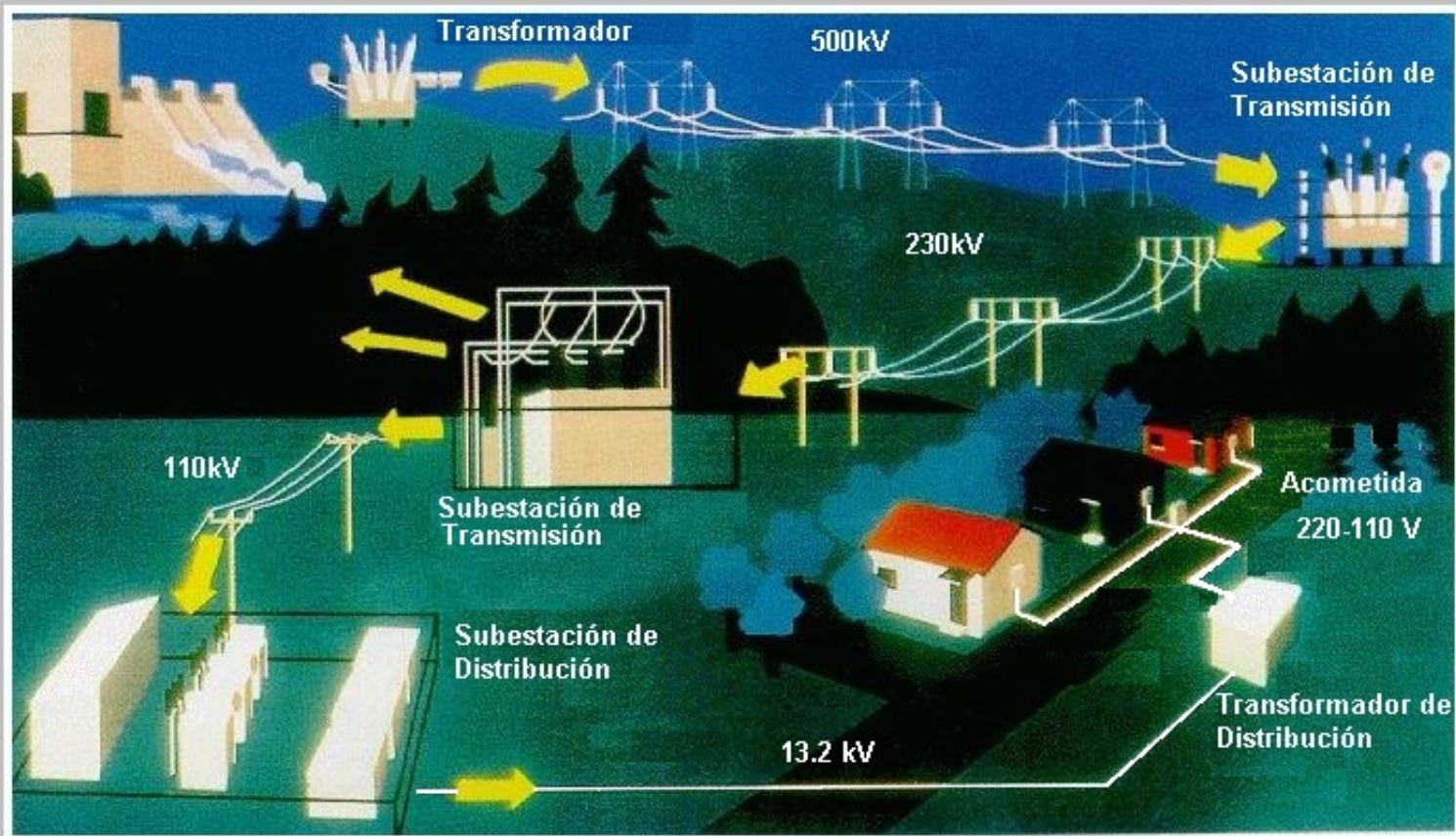
4. Estructura del Sistema de Potencia

Esta compuesto por los siguientes subsistemas, que se identifican por la función que desarrollan y por el nivel de tensión:

- a) **Generación:** 13.8 kV, 13.2 kV, 6.2 kV, 2.4 kV
- b) **Transmisión:** 500 kV, 230 kV
- c) **Subtransmisión:** 34.5 kV, 66 kV, 115 kV
- d) **Distribución:** 11 kV, 13.2 kV, 13.8 kV, 34.5 kV

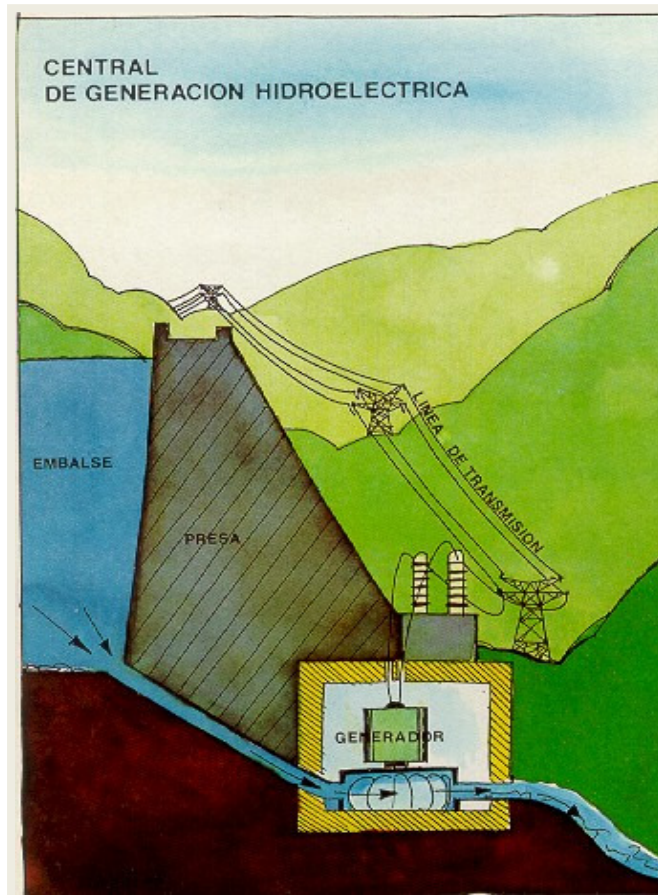
1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

4. Estructura del Sistema de Potencia



1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

4. Estructura del Sistema de Potencia



- **¿Cómo se puede convertir el agua en ENERGÍA?**

- El agua de los ríos es represada utilizando un dique o presa, formando así los embalses. De aquí es conducida por medio de tuberías hasta unos generadores ubicados en un lugar denominado casa de máquinas.
- La fuerza de la caída del agua hace mover a gran velocidad una rueda o turbina que tienen los generadores, transformando su fuerza en energía.

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

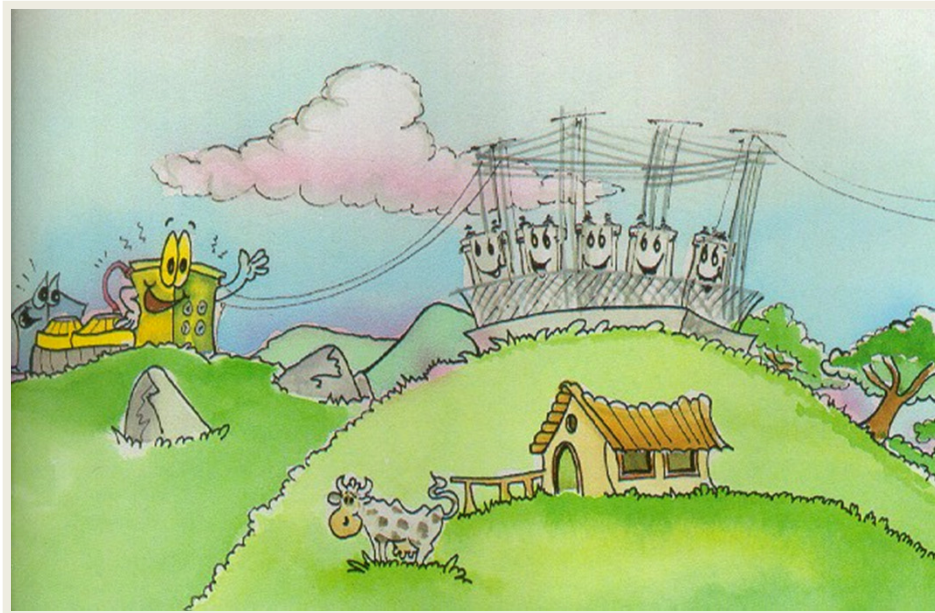
4. Estructura del Sistema de Potencia



- Existen otras centrales llamadas **TÉRMICAS** o termoeléctricas, que emplean gas, carbón u otros combustibles sacados del petróleo.
- Con estos combustibles se calienta agua y el vapor que se produce se emplea para mover las máquinas generadoras de energía.

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

4. Estructura del Sistema de Potencia

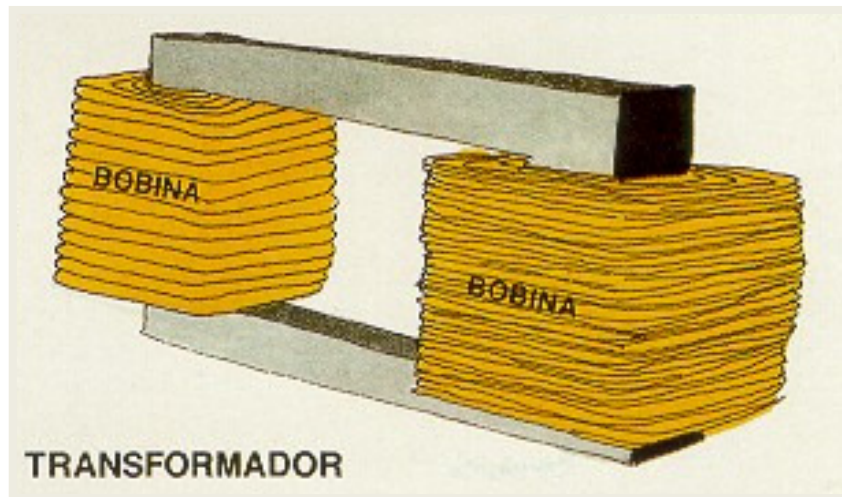


Las centrales están ubicadas en sitios lejanos y la energía eléctrica generada debe ser transportada hasta los sitios de consumo, es decir, casas, fábricas, alumbrados públicos o comercios.

- Para que la energía pueda empezar su recorrido por el país, es necesaria su conexión a un sitio especial llamado **SUBESTACIÓN**; de ahí empieza a transportarse.

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

4. Estructura del Sistema de Potencia



- Antes de ser transportada, la energía es conducida desde los generadores hasta los **TRANSFORMADORES** que se encuentran en la subestación.

- ➔ Un transformador está conformado por dos bobinas devanadas sobre un núcleo, que tienen por efecto aumentar o disminuir la tensión eléctrica que les llega (dependiendo del número de vueltas de alambre en cada lado).
- ➔ Los transformadores de una central elevan el voltaje hasta magnitudes de 115,000 / 230,000 y 500,000 voltios.

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

4. Estructura del Sistema de Potencia



- La manera más económica de transportar enormes cantidades de energía de un sitio a otro consiste en utilizar altos voltajes mediante cables o líneas conductoras de gran calibre, sostenidas en torres o estructuras especiales aisladas de los cables (**líneas de transmisión**)

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

4. Estructura del Sistema de Potencia



- Las líneas de transmisión deben ser protegidas contra descargas atmosféricas (rayos) mediante un cable de guarda que va de torre a torre por encima de los cables conductores.
- Los rayos caen sobre el cable de guarda y son enviados a tierra en la torre más próxima, evitando así daños en las líneas y en los equipos de las subestaciones.

4. Estructura del Sistema de Potencia



- ➔ Una vez transportada la energía eléctrica desde las centrales de generación hasta los centros de consumo, se hace necesario disminuir su voltaje hasta 110 y 220 voltios para ser utilizado por el usuario sin peligro.
- ➔ En cada sitio de consumo los alambres conductores llegan a una caja metálica en la cual se colocan fusibles para protección contra incendios y cortocircuitos.
- ➔ Después de los fusibles se instala un contador que mide la cantidad de energía consumida.

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

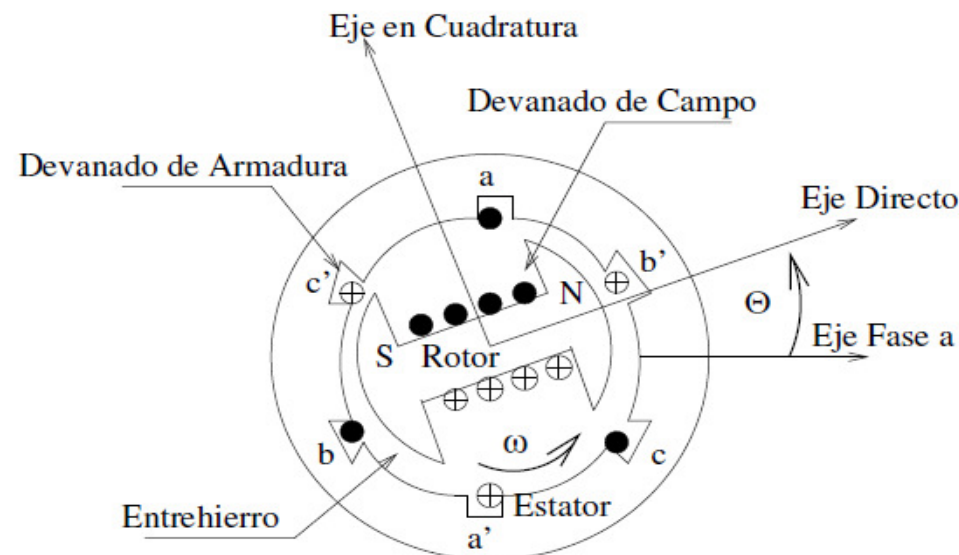
5. Representación de los elementos de un SP

- Diagrama unifilar – trifilar: Es una representación gráfica de la topología del SP 3ϕ , efectuado mediante símbolos estándares que recorren la fase a (diagrama unifilar) y las fases a, b, c (diagrama trifilar). Suministra información general del SP (la cantidad de información requerida depende del tipo de estudio).
- Simbología IEC 60617-3, IEEE Std 315

5. Representación de los elementos de un SP

❑ Modelo Generador Síncrono:

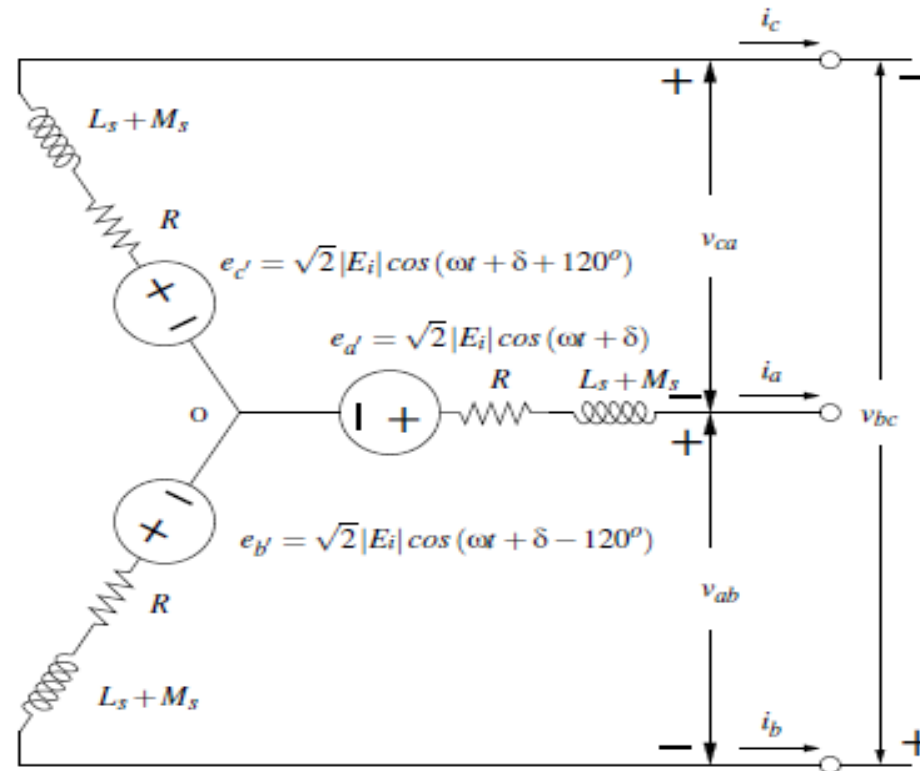
- Existen numerosos métodos para obtener la regulación de voltaje en una máquina síncrona. Trabajaremos con el método de Impedancia síncrona, porque ofrece un circuito equivalente para la máquina



5. Representación de los elementos de un SP

❑ Modelo Generador Síncrono:

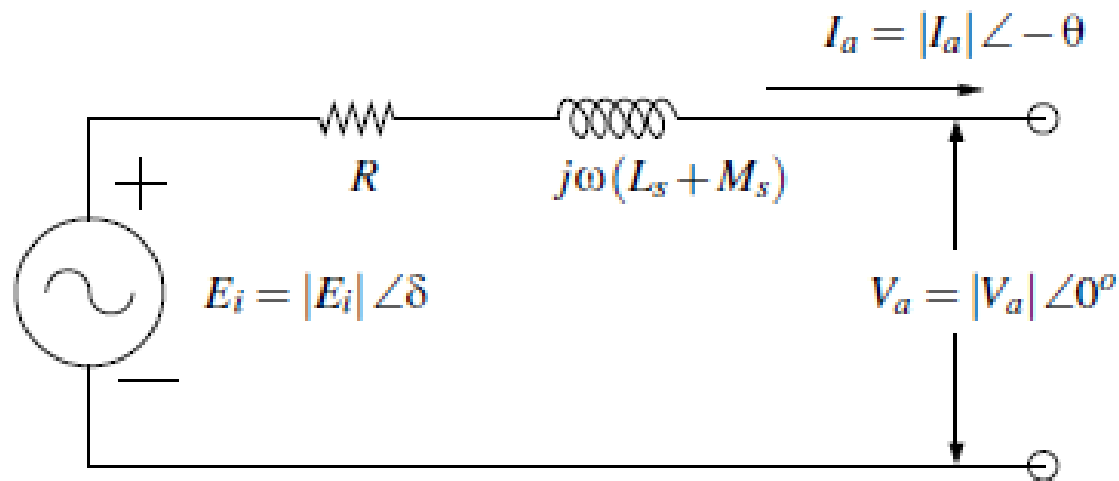
- El circuito equivalente de generación trifásica es:



5. Representación de los elementos de un SP

❑ Modelo Generador Síncrono:

- La representación fasorial apropiada de la máquina es entonces:



1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

5. Representación de los elementos de un SP

❑ Modelo Generador Síncrono:

- Conectado a una barra infinita:

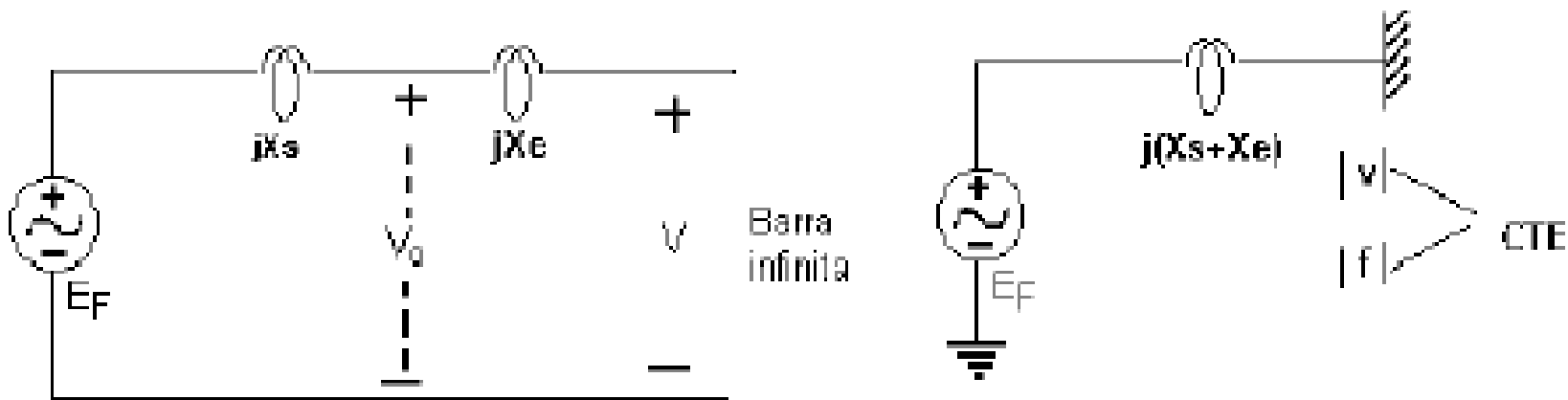
Normalmente la máquina síncrona se conecta al sistema a través de una reactancia externa X_e . Cuando el sistema es muy grande comparado con la máquina, un cambio en la potencia mecánica aplicada a la eje, o en la excitación de la máquina, no cambia la frecuencia del sistema o el voltaje en los terminales. A este sistema se le conoce como **Barra Infinita**

5. Representación de los elementos de un SP

❑ Modelo Generador Síncrono:

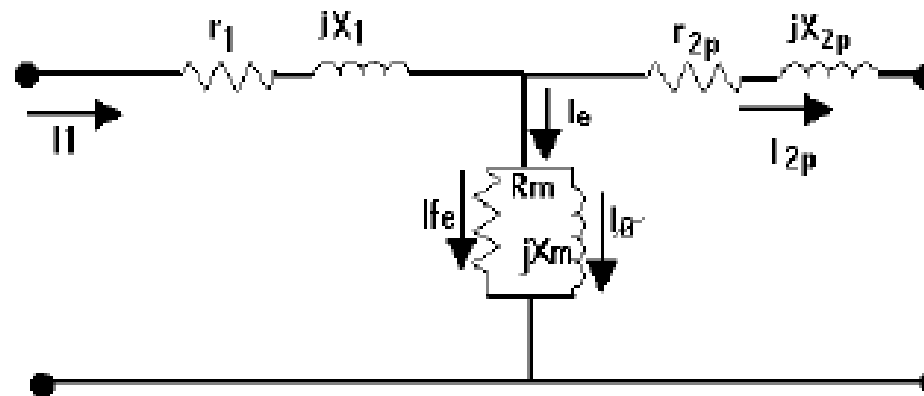
- Conectado a una barra infinita:

Alguna veces se considera V como el voltaje de Thévenin y X_e la reactancia de Thévenin, vista desde los terminales de la máquina.



5. Representación de los elementos de un SP

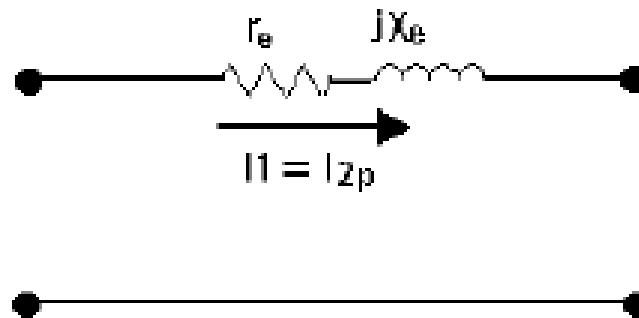
□ Modelo Transformador de potencia:



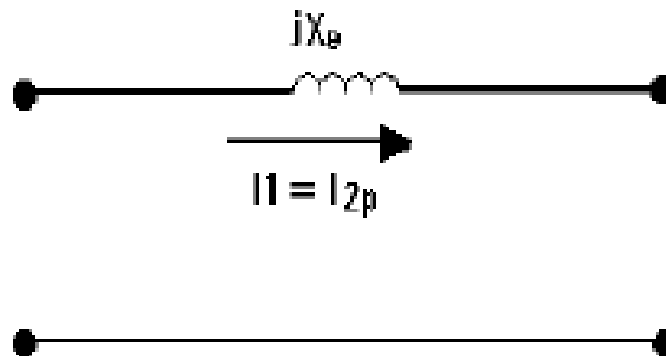
- El circuito equivalente en valores reales (ohmios) deben estar referidos a un lado, bien sea al lado primario o al lado secundario.
- En sistemas de potencia se tiene que la impedancia R_m y jX_m se desprecian por ser muy grandes sus valores. Entonces el circuito equivalente nos queda así:

5. Representación de los elementos de un SP

□ Modelo Transformador de potencia:



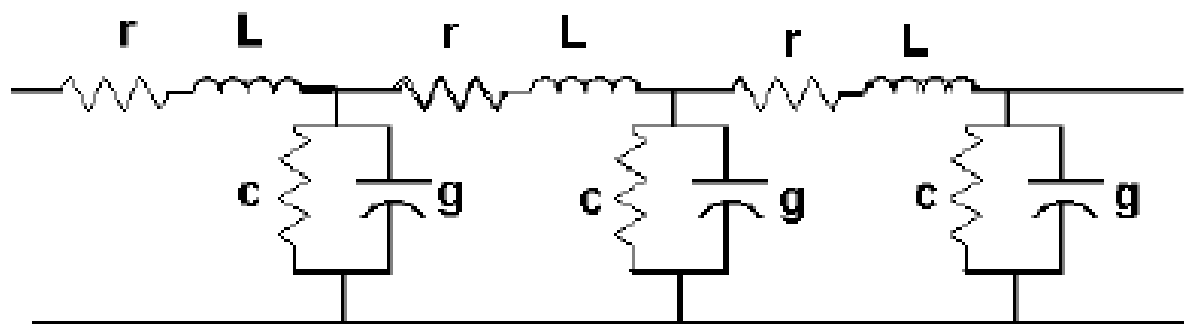
- Para términos prácticos, por lo general R_e se desprecia al compararla con X_e , entonces el circuito equivalente aproximado nos queda así



5. Representación de los elementos de un SP

❑ Modelo Línea de Transmisión:

- La manera de como se representan las líneas dependen de la longitud y de la exactitud exigida. Se acostumbra a realizar la clasificación de acuerdo a su longitud: Corta, medio, larga.
- La línea real tiene resistencia, inductancia, capacitancia y conductancia distribuidos por igual a lo largo de su longitud, como se ve en la figura:

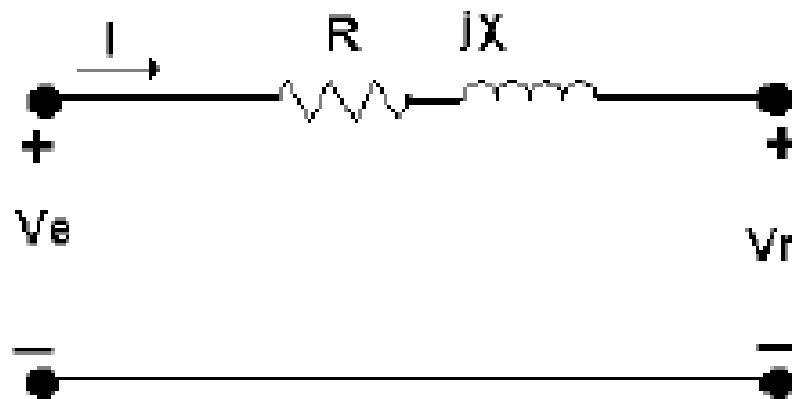


5. Representación de los elementos de un SP

□ Modelo Línea de Transmisión:

- Línea Corta:

- Son aquellas en las cuales no se requiere mucha exactitud y se pueden representar como en la figura en la cual se desprecian las capacitancias y las resistencias en paralelo. Se utiliza para representar líneas hasta unos 80 kms.

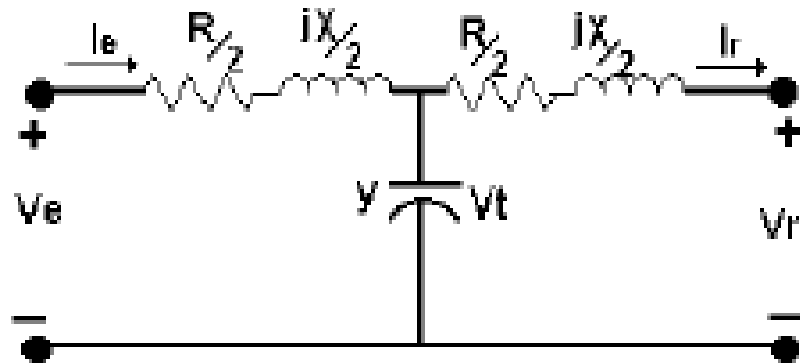
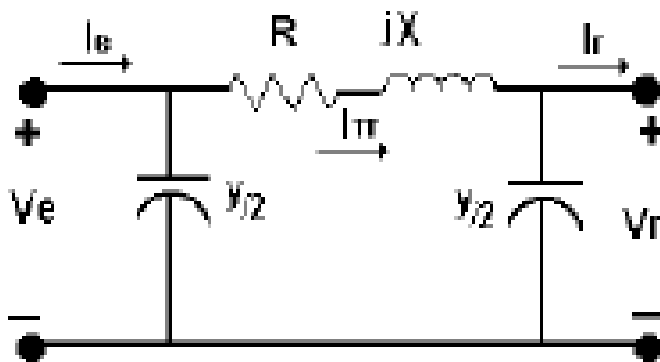


5. Representación de los elementos de un SP

□ Modelo Línea de Transmisión:

• Línea Mediana:

- En estas líneas se hace necesario incluir el efecto capacitivo, tal como se indica en la figura (**π o T**). La más usada es la **π** porque permite asociar las capacitancias paralelas ($y/2$) a las barras. Se utiliza para representar líneas hasta de unos 240 kms.

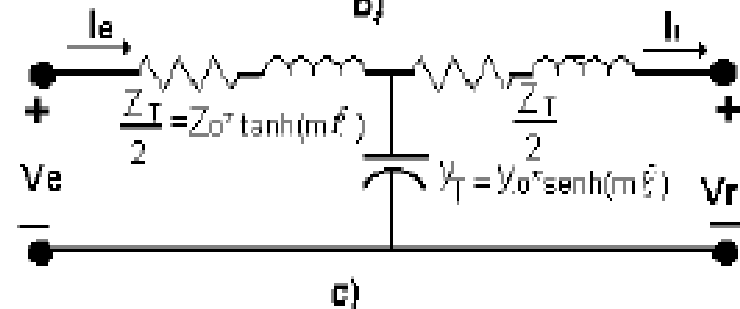
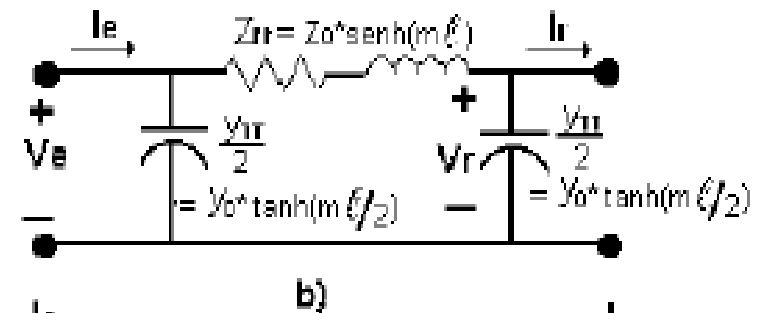
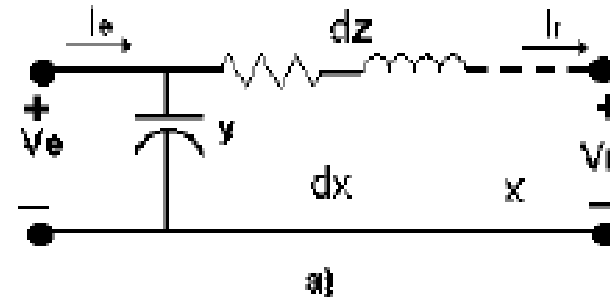


5. Representación de los elementos de un SP

❑ Modelo Línea de Transmisión

• Línea Larga:

- En estas líneas los parámetros están distribuidos. Se utiliza para representar líneas de una longitud mayor a 240 kms.



1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

6. Representación en p.u. del sistema de potencia

❑ Introducción:

- Los cálculos necesarios en un sistema de potencia se pueden hacer en ohmios, amperios, etc., pero algunas veces es preferible utilizar métodos relativo, como el sistema por unidad. Este sistema tiene algunas ventajas:
 - Son más significativos con respecto al sistema
 - Se elimina la posibilidad de confusión entre voltajes de fase y de línea, potencias monofásicas y trifásicas y voltajes primarios y secundarios de transformadores.
 - Al aplicarlo, la teoría de circuitos se sigue cumpliendo

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

6. Representación en p.u. del sistema de potencia

□ Definición:

- El valor en “por unidad” de cualquier cantidad es la razón de esa cantidad a su valor base. El valor resultante es una cantidad “adimensional”.

$$\text{Valor en pu} = \frac{\text{Valor real}}{\text{Valor base}}$$

- Donde el valor real está expresado en sus propias unidades (volts, amperes, ohms, watts, etc.). Mientras que el valor base es un valor arbitrario o “conveniente” que se selecciona como referencia para la cantidad en cuestión

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

6. Representación en p.u. del sistema 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 (volt-amperes). Prácticamente cualquier equipo esta cantidad es usualmente conocida

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

6. Representación en p.u. del sistema de potencia

□ Cantidades Base

- Sí se seleccionan como cantidades base al Voltaje (V_B Volts) y a la Potencia Aparente (S_B Volts-amperes) tanto la corriente como la impedancia base quedan determinadas por las siguientes dos expresiones:

$$Z_{base} = \frac{V_{base}}{I_{base}} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} \quad Z_{pu} = \frac{V_{pu}}{I_{pu}}$$

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

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

6. Representación en p.u. del sistema 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

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

6. Representación en p.u. del sistema de potencia

Cambio de base de cantidades en p.u.

- 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:

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

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

6. Representación en p.u. del sistema de potencia

❑ Consideraciones.

- Para pasar a pu se considera V_b y S_b en una parte del sistema; si el sistema es trifásico, se usa el voltaje de línea y potencia trifásica (o potencias monofásicas y voltaje línea-neutro).
- Para otras partes del sistema (en otros lados de transformadores), los voltajes base se terminan de acuerdo a la relación de transformación L-L/L-L. Las potencias bases serán las mismas en todo el sistema.
- Para las máquinas rotatorias y transformadores la impedancia estará en porcentaje (normalmente de la base determinada por los valores nominales). Hay que hacer cambio de base.

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

6. Representación en p.u. del sistema de potencia

❑ Consideraciones.

- Para transformadores monofásicos conectados como unidades trifásicas (bancos de transformadores) los valores nominales trifásicos se determinan de los valores monofásicos. La impedancia en por ciento o en pu para la unidad trifásica, es la misma que en cada transformador individual.
- La impedancia en pu dada en otra base diferente del sistema, se debe cambiar a la base apropiada (seleccionada)
- Para realizar los cálculos en p.u. es importante tener en cuenta que no pueden mezclarse valores monofásicos con valores trifásicos, es decir, se deben usar kV_{LL} con $kVA_{3\phi}$ o $MVA_{3\phi}$ y usar kV_{LN} con $kVA_{1\phi}$ o $MVA_{1\phi}$.

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

6. Representación en p.u. del sistema de potencia

❑ Consideraciones.

- Se acaba la **relación de vueltas en los transformadores** para referir tensiones o impedancias. No importan los diferentes niveles de tensión de los transformadores, las **impedancias en pu son iguales** en ambos lados.
- El **tipo de conexión** en transformaciones trifásicas no afecta el valor de las impedancias en pu aunque se introduce un pequeño error en el desfase (rectificable)
- Se acaba el riesgo de poner o no el $\sqrt{3}$.

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

6. Representación en p.u. del sistema de potencia

Variables Eléctricas	Valores base		Valores en p.u.	
	Valores generales (MKS)	Valores de Ingeniería	Valores generales (MKS)	Valores de Ingeniería
Potencia	$\vec{S}_b \text{ (VA}_{\phi})$	$MVA_{b3\phi} \angle 0^\circ$	$\vec{S}_{pu} = \frac{\vec{S}}{\vec{S}_b}$ (Definición)	$\vec{S}_{pu} = \frac{MVA_{3\phi}}{MVA_{b3\phi}} = \frac{MVA_{1\phi}}{MVA_{b1\phi}}$
Voltaje	$\vec{V}_b \text{ (V}_{LN})$	$kV_{bLL} \angle 0^\circ$	$\vec{V}_{pu} = \frac{\vec{V}}{\vec{V}_b}$ (Definición)	$\vec{V}_{pu} = \frac{kV_{LL}}{kV_{bLL}} = \frac{kV_{LN}}{kV_{bLN}}$
Corriente	$\vec{I}_b = \frac{\vec{S}_b^*}{\vec{V}_b^*} \text{ (A)}$	$\frac{MVA_{b3\phi}}{\sqrt{3}kV_{bLL}} \text{ (kA)}$	$\vec{I}_{pu} = \frac{\vec{I}}{\vec{I}_b}$ (Definición) $\vec{I}_{pu} = \frac{\vec{S}_{pu}^*}{\vec{V}_{pu}^*}$ (Teorema)	$\vec{I}_{pu} = \frac{kA}{kA_b} = \frac{kA \times \sqrt{3} \times kV_{bLL}}{MVA_{b3\phi}}$
Impedancia	$\vec{Z}_b = \frac{ \vec{V}_b ^2}{\vec{S}_b^*} \text{ (}\Omega\text{)}$	$\frac{(kV_{bLL})^2}{MVA_{b3\phi}} \text{ (}\Omega\text{)}$	$\vec{Z}_{pu} = \frac{\vec{Z}}{\vec{Z}_b}$ (Definición) $\vec{Z}_{pu} = \frac{\vec{V}_{pu}}{\vec{I}_{pu}}$ (Teorema)	$\vec{Z}_{pu} = \frac{Z(\Omega) \times MVA_{b3\phi}}{(kV_{bLL})^2}$

Cambios de bases: $\vec{Z}_{pu}^N = \vec{Z}_{pu}^V \left(\frac{MVA_b^N}{MVA_b^V} \right) \left(\frac{kV_b^V}{kV_b^N} \right)^2$

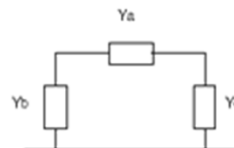
1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

6. Representación en p.u. del sistema de potencia

REGLAS GENERALES					
Variables del S.P.	Valores Base		Valores en p.u.		Cambio de base
	Usando datos 1 ϕ	Usando datos 3 ϕ	Usando datos 1 ϕ	Usando datos 3 ϕ	
Voltaje	$kV_{L-N \text{ base}}$	$kV_{L-L \text{ base}}$	$V_{p.u.} = \frac{kV_{L-N \text{ real}}}{kV_{L-N \text{ base}}}$	$V_{p.u.} = \frac{kV_{L-L \text{ real}}}{kV_{L-L \text{ base}}}$	$V_{base \text{ nuevo}} = V_{base \text{ viejo}} \times \frac{V_{\text{hacia donde voy}}}{V_{\text{de donde vengo}}}$
Potencia	$MVA_{1\phi \text{ base}}$	$MVA_{3\phi \text{ base}} = 3 \times MVA_{1\phi \text{ base}}$	$S_{p.u.} = \frac{MVA_{1\phi \text{ real}}}{MVA_{1\phi \text{ base}}}$	$S_{p.u.} = \frac{MVA_{3\phi \text{ real}}}{MVA_{3\phi \text{ base}}}$	Los MVA_{base} se conservan iguales en cualquier punto del sistema
Corriente	$I_{base} = \frac{MVA_{1\phi \text{ base}}}{kV_{L-N \text{ base}}} [kA]$	$I_{base} = \frac{MVA_{3\phi \text{ base}}}{\sqrt{3} \times kV_{L-L \text{ base}}} [kA]$	$I_{p.u.} = \frac{I_{real}}{I_{base}}$	$I_{p.u.} = \frac{I_{real}}{I_{base}}$	Este cambio de base no se utiliza normalmente.
Impedancia	$Z_{base} = \frac{kV_{L-N \text{ base}}}{I_{base}} [\Omega]$ $Z_{base} = \frac{(kV_{L-N \text{ base}})^2}{MVA_{1\phi \text{ base}}} [\Omega]$	$Z_{base} = \frac{kV_{L-L \text{ base}}}{I_{base}} [\Omega]$ $Z_{base} = \frac{(kV_{L-L \text{ base}})^2}{MVA_{3\phi \text{ base}}} [\Omega]$	$Z_{p.u.} = \frac{Z_{real}}{Z_{base}}$	$Z_{p.u.} = \frac{Z_{real}}{Z_{base}}$	$Z_{nueva \text{ p.u.}} = Z_{vieja \text{ p.u.}} \left(\frac{kV_{viejo \text{ base}}}{kV_{nuevo \text{ base}}} \right)^2 \left(\frac{MVA_{nuevo \text{ base}}}{MVA_{viejo \text{ base}}} \right)$

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

6. Representación en p.u. del sistema de potencia

Variables del S.P.	REGLAS PARA TRANSFORMADORES		
	Bancadas Trifásicas Conexión $Y_{11}\Delta_L$	Transformadores tridevanados 	Transformadores con taps 
Voltaje	$kV_{H(L-L)} = \sqrt{3} \times kV_{H(L-N)}$ $kV_{L(L-L)} = kV_L \text{ por fase}$	$kV_{H(L-L)} = \sqrt{3} \times kV_{H(L-N)}$ $kV_{L(L-L)} = kV_L \text{ por fase}$	$kV_{H(L-L)} = \sqrt{3} \times kV_{H(L-N)}$ $kV_{L(L-L)} = kV_L \text{ por fase}$
Potencia	$MVA_{3\phi} = 3 \times MVA_{1\phi}$	$MVA_H \neq MVA_X \neq MVA_T$	$MVA_{3\phi} = 3 \times MVA_{1\phi}$
Impedancia	$Z_{p.u. \text{ grupo}} = Z_{p.u. \text{ cada unidad}}$	$Z_{H(pu H)} = \frac{1}{2}(Z_{HX} + Z_{HT} - Z_{XT})$ $Z_{X(pu H)} = \frac{1}{2}(Z_{HX} + Z_{XT} - Z_{HT})$ $Z_{T(pu H)} = \frac{1}{2}(Z_{HT} + Z_{XT} - Z_{HX})$	$Z_{T \text{ nueva p.u.}} = Z_{T \text{ vieja p.u.}} \left(\frac{kV_{\text{vieja base}}}{kV_{\text{nuevo base}}} \right)^2 \left(\frac{MVA_{\text{nuevo base}}}{MVA_{\text{vieja base}}} \right)$ $Y_{T \text{ nueva p.u.}} = \frac{1}{Z_{T \text{ nueva p.u.}}}$ $Y_a = t \times Y_{T \text{ nueva p.u.}} \Rightarrow Z_a = \frac{1}{Y_a}$ $Y_b = t \times Y_{T \text{ nueva p.u.}} \times (t-1) \Rightarrow Z_b = \frac{1}{Y_b}$ $Y_c = Y_{T \text{ nueva p.u.}} \times (1-t) \Rightarrow Z_c = \frac{1}{Y_c}$
Observaciones	- En las bancadas trifásicas la potencia $MVA_{\text{vieja base}}$ se deben multiplicar por 3.	- En los transformadores tridevanados, todas las impedancias deben expresarse con respecto a uno de los devanados ya que en este caso la impedancia del transformador es diferente de acuerdo al devanado donde sea vista. - Los valores de Z_{HX}, Z_{HT} y Z_{XT} son datos. - Para calcular Z_H, Z_X y Z_T en p.u., es necesario pasar primero Z_{HX}, Z_{HT} y Z_{XT} a las bases del sistema. En este cálculo los MVA_{viejos} utilizados, son los del devanado de referencia en el cual están expresados los datos.	t se refiere a la posición del tap del transformador, por lo tanto, Y_a , Y_b y Y_c deben recalcularse en función de este valor

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

7. Representación matricial del sistema de potencia

- El objeto es modelar los sistemas de potencia con miras a la sistematización.
- Las principales formas de modelar son las matrices de impedancia y admitancia de lazo y las matrices de impedancia y admitancia de rama.

□ Matriz de admitancia de barra: Y_{barra}

- Corresponde a la expresión matricial de las ecuaciones de nodos, dadas por la teoría general de circuitos y se puede considerar como la relación entre la corrientes de barra (I_{barra}) y los volatjes de barra (V_{barra})

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

7. Representación matricial del sistema de potencia

□ Matriz de admitancia de barra: Y_{barra}

$$[I_{\text{barra}}] = [Y_{\text{barra}}] [V_{\text{barra}}]$$

$[V_{\text{barra}}]$: Vector formado por los voltajes de barra medidos con respecto a la barra de referencia.

$[I_{\text{barra}}]$: Vector formado por las corrientes inyectadas a las barras.

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

7. Representación matricial del sistema de potencia

□ Matriz de admitancia de barra: Y_{barra}

$$[I_{\text{barra}}] = [Y_{\text{barra}}] [V_{\text{barra}}]$$

$[V_{\text{barra}}]$: Vector formado por los voltajes de barra medidos con respecto a la barra de referencia.

$[I_{\text{barra}}]$: Vector formado por las corrientes inyectadas a las barras.

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

7. Representación matricial del sistema de potencia

❑ Formación [Ybarras]:

[Y] corresponde a la caracterización pasiva (admitiva) de una red para el cálculo de V_{nodo} por medio de la expresión $[I] = [Y] [V]$

El algoritmo fundamental para la formación de [Y] indica que:

$$Y_{ii} = \sum \text{todo } y_{ij} \text{ que sale de } i$$

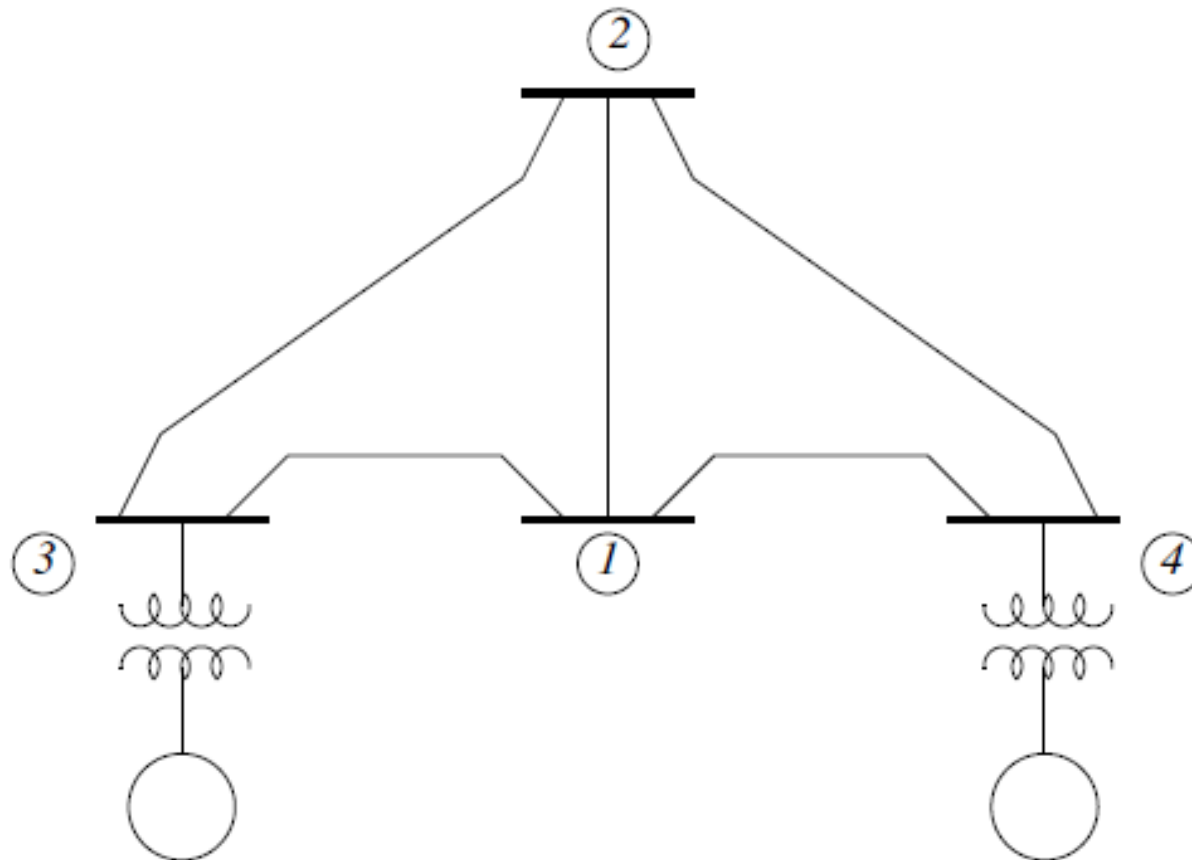
$$Y_{ij} = -y_{ij}$$

Se dan dos maneras de formación de [Y]:

- Formación analítica
- Formación secuencial (digitalizada)

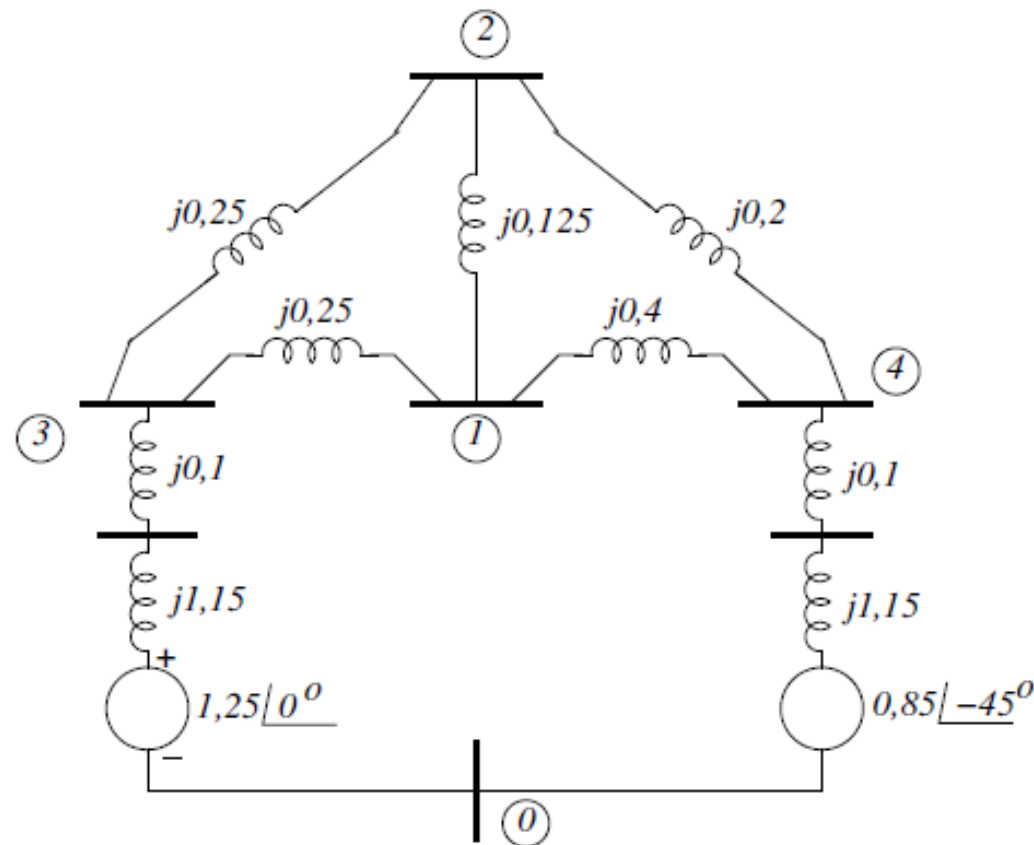
7. Representación matricial del sistema de potencia

□ **Ejemplo:** Circuito del ejemplo:



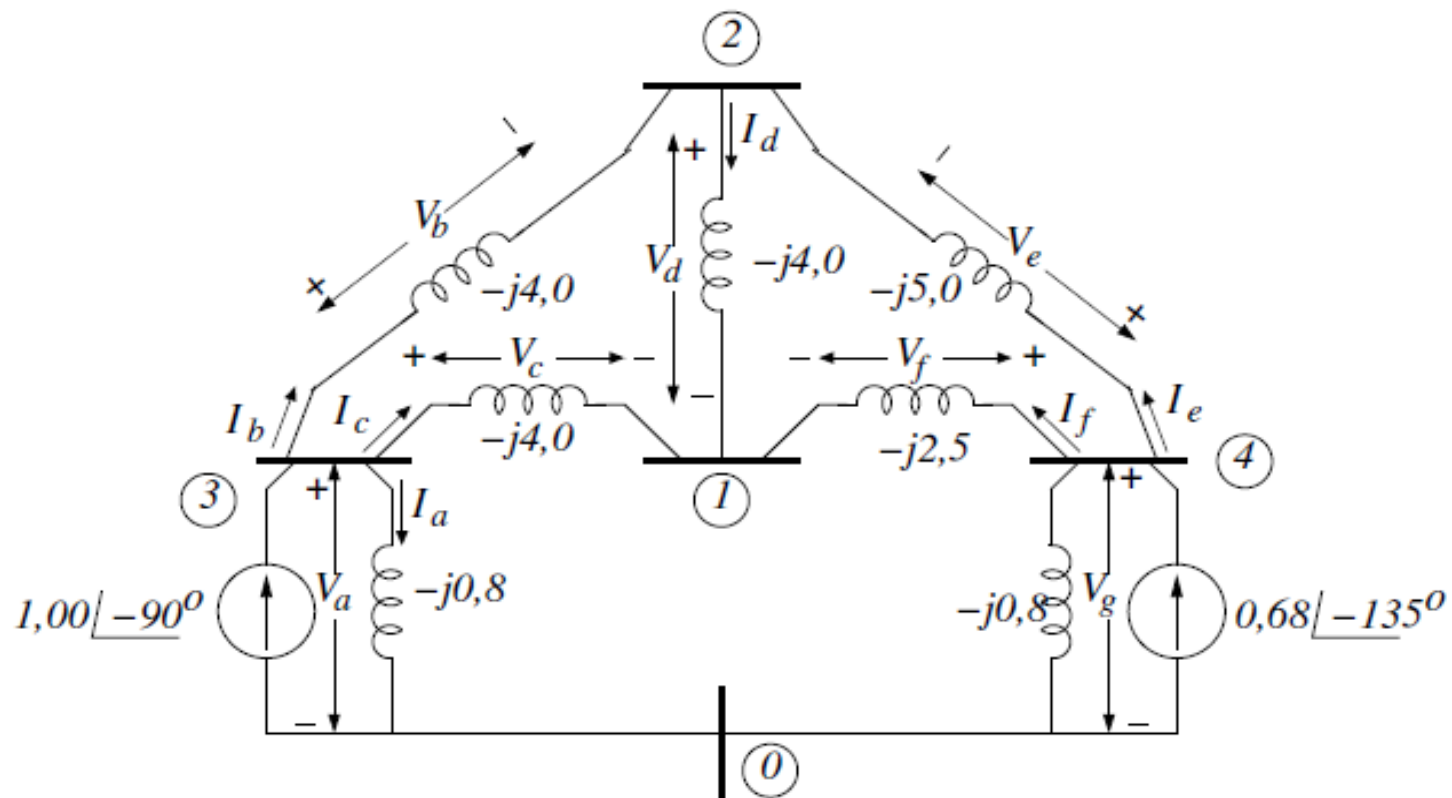
7. Representación matricial del sistema de potencia

- **Ejemplo:** Se obtiene el diagrama de reactancias y fuentes de tensión:



7. Representación matricial del sistema de potencia

- **Ejemplo:** Se obtiene el diagrama de admitancias ($1/Z$) y fuentes de corriente:



1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

7. Representación matricial del sistema de potencia

□ **Ejemplo:** Se obtiene una tabla para registrar las Y:

Nodo inicial	Nodo final	Admitancia
3	tierra	Y_a
3	2	Y_b
3	1	Y_c
4	tierra	Y_g
4	1	Y_f
4	2	Y_e
2	1	Y_d

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

7. Representación matricial del sistema de potencia

□ **Ejemplo:** Se obtiene una tabla incluyendo las matrices de almacenamiento:

Nodo inicial	Nodo final	Admitancia	Matriz de almacenamiento
3	tierra	Y_a	$[1]Y_a$
3	2	Y_b	$\begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} Y_b$
3	1	Y_c	$\begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} Y_c$
4	tierra	Y_g	$[1]Y_g$
4	1	Y_f	$\begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} Y_f$
4	2	Y_e	$\begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} Y_e$
2	1	Y_d	$\begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} Y_d$

1. Conceptos fundamentales y modelamiento de elementos de los Sistemas de Potencia

7. Representación matricial del sistema de potencia

□ **Ejemplo:** Se obtiene la matriz Ybarra:

$$Y_{barra} = \begin{bmatrix} (Y_c + Y_d + Y_f) & -Y_d & -Y_c & -Y_f \\ -Y_d & (Y_b + Y_d + Y_e) & -Y_b & -Y_e \\ -Y_c & -Y_b & (Y_a + Y_b + Y_c) & 0 \\ -Y_f & -Y_e & 0 & (Y_e + Y_f + Y_g) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -j14,5 & j8,0 & j4,0 & j2,5 \\ j8,0 & -j17,0 & j4,0 & j5,0 \\ j4,0 & j4,0 & -j8,8 & 0,0 \\ j2,5 & j5,0 & 0,0 & -j8,3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0 \\ 0,0 \\ 1,0 \angle -90^\circ \\ 0,68 \angle -135^\circ \end{bmatrix}$$

7. Representación matricial del sistema de potencia

❑ **Ejemplo:** Se obtiene la matriz Ybarra. Donde:

Y_{11} : Suma de las admitancias conectadas a la barra 1

Y_{22} : Suma de las admitancias conectadas a la barra 2

Y_{33} : Suma de las admitancias conectadas a la barra 3

Y_{44} : Suma de las admitancias conectadas a la barra 4

$Y_{12} = Y_{21}$: Suma de las admitancias conectadas entre las barras 1 y 2

$Y_{13} = Y_{31}$: Suma de las admitancias conectadas entre las barras 1 y 3

$Y_{14} = Y_{41}$: Suma de las admitancias conectadas entre las barras 1 y 4

$Y_{23} = Y_{32}$: Suma de las admitancias conectadas entre las barras 2 y 3

$Y_{24} = Y_{42}$: Suma de las admitancias conectadas entre las barras 2 y 4

$Y_{34} = Y_{43}$: Suma de las admitancias conectadas entre las barras 3 y 4

**DIPLOMADO EN REDES ELÉCTRICAS
DE DISTRIBUCIÓN Y TRANSMISIÓN**



TEMA 2: ANÁLISIS DE FLUJO DE CARGA (ESTADO ESTABLE)

MSc. Jorge Antonio Jaimes Báez

uts | **EXTENSIÓN Y
PROYECCIÓN SOCIAL**
extension@uts.edu.co

Tema 1: Introducción

Tema 2: Métodos matemáticos de solución

1. Introducción

□ Definición:

El flujo de carga es un estudio en estado estable, para una condición de demanda dada en el cual se determinan las tensiones en magnitud y ángulo de todas las barras del sistema. Con esta información pueden calcularse los flujos de potencia por las líneas, flujos de corriente, potencias de compensación y generación en la barra de referencia

1. Introducción

Los estudios de flujo de carga se realizan con el objeto de conocer:

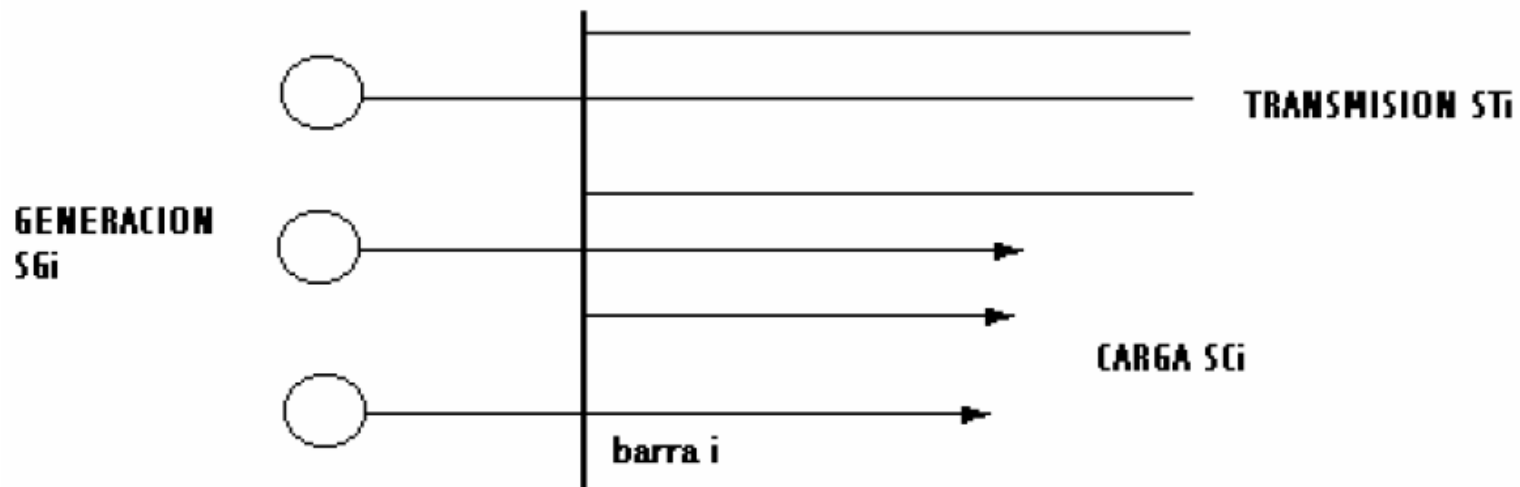
- Flujos de MW y MVAR en las ramas de la red
- Tensión en las barras
- Corrientes por las ramas
- Posición óptima y rango de las tomas de los transformadores
- Efectos de los cambios de la tensión en las barras y/o de la inyección de corrientes al sistema
- Efectos debidos a los cambios de tamaño de los conductores o a los cambios de los circuitos
- Efecto de entrada o salida de cargas y/o generadores
- Pérdidas del sistema

1. Introducción

❑ Planteamiento del problema:

- Para la solución de los problemas debe buscarse el método más rápido y eficiente.

Considere la barra i de la figura, para lo cual tiene:



1. Introducción

□ Planteamiento del problema:

$$S_{Gi} = S_{Ci} + S_{Ti}$$

$$S_{Gi} = p_{Gi} + jQ_{Gi}$$

$$S_{Ci} = p_{Ci} + jQ_{Ci}$$

$$S_{Ti} = p_{Ti} + jQ_{Ti}$$

$$Q_{Gi} = Q_{Ci} + Q_{Ti}$$

$$P_{Gi} = P_{Ci} + P_{Ti}$$

S_{Gi} :Potencia compleja generada trifásica (entrada a la barra i)

1. Introducción

Potencias asociadas a la barra i .

S_{ci} : Potencia compleja consumida trifásica (sale de la barra i)

S_{Ti} : Potencia compleja transmitida trifásica (sale de la barra i por el sistema de transmisión).

Como se ve, aparecen seis variables por barra relacionada por dos ecuaciones, por lo cual quiere decir que para un sistema de NB barras se tendría $2NB$ ecuaciones y $6NB$ variables.

Como los flujos de carga se realizan para condiciones determinadas de carga, P_{Ci} y Q_{Ci} se suponen conocidas. Los términos correspondientes a la generación (P_{Gi} , Q_{Gi}) son controlables, por lo cual solo se necesita obtener una expresión para las variables de transmisión (P_{Ti} , Q_{Ti}).

Para ello se emplea, normalmente, la representación de barras:

$$[I_{BARRAS}] = [Y_{BARRAS}][V_{BARRAS}]$$

1. Introducción

Pero: $S_{Ti} = V_i I_i^* = S_i$

$$[S_T] = [V_{BARRAS} D][I_{BARRAS}^*]$$

$$[V_{BARRAS} D] = \begin{bmatrix} V1 & 0 & 0 & . & . \\ 0 & V2 & 0 & . & . \\ 0 & 0 & V3 & . & . \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . \end{bmatrix} *$$

$$O \quad [S_T] = [Y_{BARRAS}^*][V_{BARRAS} D][V_{BARRAS}^*]$$

O en otras palabras:

$$[S_T] = [S_G] - [S_C] = S = \text{potencia neta inyectada a la sistema por cada una de las barras.}$$

1. Introducción

Por lo cual:

$$[S_T] = [Y^*_{BARRAS}] [V_{BARRAS} D] [V^*_{BARRAS}]$$

Que corresponde para el elemento i a:

$$S_i = S_{Gi} - S_{Ci} = \sum_{J=1}^{NB} V_i V_J^* Y_{iJ}^*$$

Expresándolo en sus componentes:

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Ci} = \sum_{J=1}^{NB} |V_i| |V_J| |Y_{iJ}| \text{SEN}(\delta_i - \delta_j - \gamma_{iJ})$$

$$P_i = P_{Gi} - P_{Ci} = \sum_{J=1}^{NB} |V_i| |V_J| |Y_{iJ}| \text{COS}(\delta_i - \delta_j - \gamma_{iJ})$$

donde γ_{iJ} es el ángulo de Y_{iJ}

2. ANÁLISIS DE FLUJOS DE CARGA

1. Introducción

cuando se hacen los flujos de carga se debe tener en cuenta las potencias de la carga conocidas. (estas se obtienen estadísticamente proyectando las curvas de carga diarias).

Las variables por barra son ahora $P_{Gi}, Q_{Gi}, |V_i|, \delta_i$ y se pueden considerar dos tipos: aquellas que muestran las condiciones en que esta trabajando el sistema (variables de estado como $|V_i|$ y δ_i), y las que se pueden controlar directamente (de control) como P_G y Q_G .

1. Introducción

Asociado con cada barra existen 4 cantidades:

- Potencia o potencia activa P
- Potencia reactiva Q
- Magnitud de la tensión $|V|$
- Ángulo de la tensión θ

☐ Tipos de barra:

- Barra de tensión controlada (PV)
- Barra de carga (PQ)
- Barra “slack” o de referencia $|V|$ y θ
- Barra de dispositivo

2. ANÁLISIS DE FLUJOS DE CARGA

1. Introducción

Tipo de barra	Naturaleza de la barra	Datos básicos	Datos netos	Incógnitas	Total de barras	Número de incógnitas	Número de ecuaciones reales	Comentarios adicionales
PQ	Carga	P_C (MW) Q_C (Mvar)	P_C (pu) Q_C (pu)	$ V_C $ θ_C	α	2α	2α	P_C, Q_C son conseguibles.
P V	Generación	P_G (MW) $ V_G $ (kV)	P_G (pu) $ V_G $ (pu)	Q_G θ_G	$n - \alpha - 1$	$2 (n - \alpha - 1)$	$2 (n - \alpha - 1)$	Q_G se resuelve por fuera de la ecuación: $\bar{I} = [Y] \bar{V}$
	V controlado	$P_G = 0$ $ V_G $ (kV)	$P_G = 0$ $ V_G $ (pu)	Q_G θ_G				También identificada como barra de condensador sincrónico.
	Combinada (b) (Generación + Carga)	P_{Cb} (MW) Q_{Cb} (Mvar) P_{Gb} (MW) $ V_G _b$ (kV)	P_{Cb} (pu) $ V _b$ (pu)	Q_b θ_b				Si $P_G \geq 0,1 P_C$, de lo contrario se asimila con una barra de carga.
Slack	Generador mayor	$ V _s$ (kV) $\theta_s = 0^\circ$	$ V _s$ (pu) $\theta_s = 0^\circ$	P_s Q_s	1	0	0	P_s, Q_s se resuelven al final y por fuera del sistema de ecuaciones.
Total		2 n	2 n	2 n	n	2 (n - 1)	2 (n - 1)	

Nota: Otros dos tipos de barras que se pueden identificar son: barra PQV (barra PQ convertible en PV) y barra PVQ (barra PV convertible en barra PQ).

2. ANÁLISIS DE FLUJOS DE CARGA

1. Introducción

Tipo de barra	Código	Variable conocida	Variable incógnita	número aprox
Referencia o c	0	δ_i $ V_i $	P_{Gi} Q_{Gi}	1
Carga	1	P_{Gi} Q_{Gi}	δ_i $ V_i $	85%
Generadora	2	P_{Gi} $ V_i $		10%
Voltaje control	3	P_{Gi} Q_{Gi} $ V_i $		5%

- **Barra de tensión controlada (PV):**
 - Se especifica la potencia y la magnitud de la tensión. Adicionalmente se especifican los límites de la potencia reactiva dependiendo de los dispositivos de forma individual. Ejemplos: Barras con generadores, condensadores síncronos y compensadores estáticos de potencia.

1. Introducción

- **Barra de carga (PQ):**
 - Se especifica la potencia activa y reactiva. Normalmente se supone que las cargas tienen una potencia constante. Se supone que la carga $P - Q$ varía en función de la tensión de la barra.
- **Barra de dispositivo:**
 - Tiene asociados valores límites especiales con los dispositivos tales como HVDC y FACTS

1. Introducción

- **Barra “slack” o de referencia o de compensación $|V|$ y θ :**
 - Se especifica la magnitud de la tensión y el ángulo de fase asociado. Debido a que las pérdidas de potencia en el sistema no se conocen a priori, al menos una barra debe tener valores de P y Q sin especificar. De tal forma que la barra de referencia es la única barra con la tensión conocida.
 - En algunas aplicaciones se desea mantener la Q asociada con la barra de referencia dentro de unos límites razonables. De otra forma la solución del flujo de potencia puede llegar a ser irreal. Para este caso, con el valor de Q al límite, solo se conoce el ángulo de la tensión del nodo de referencia.

2. Métodos matemáticos de solución

- Al plantear el flujo de carga se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$S_i = V_i \left[\sum_{J=1}^{NB} V_J^* Y_{iJ}^* \right] = P_i + JQ_i$$

$$V_i = \left(\frac{P_i - JQ_i}{Y_{ii}} \right) \frac{1}{V_i^*} - \sum_{J=1, J \neq i}^{NB} \left(\frac{Y_{iJ}}{Y_{ii}} \right) V_J$$

$$P_i = R_e[S_i] = |V_i| \sum_{J=1}^{NB} |V_J| |Y_{iJ}| \cos(\delta_{iJ} - \gamma_{iJ})$$

$$Q_i = I_m[S_i] = |V_i| \sum_{J=1}^{NB} |V_J| |Y_{iJ}| \sin(\delta_{iJ} - \gamma_{iJ})$$

2. ANÁLISIS DE FLUJOS DE CARGA

2. Métodos matemáticos de solución

- Las ecuaciones son no lineales, por lo cual se resuelven por métodos iterativos. Los métodos más populares son:
 - Jacobi
 - Gauss – Seidel
 - Newton Raphson

El método Jacobi se considera popular por ser uno de los métodos básicos para el desarrollo de los otros, más no por su uso actual.

2. Métodos matemáticos de solución

- En los métodos enumerados las ecuaciones se resuelven así:
 - Se supone una solución
 - Se obtiene una nueva solución tomando como base los valores dados y utilizando las ecuaciones consideradas.
 - Se toman estos nuevos valores para encontrar otros mejores, iterando hasta entrar en convergencia.

2. ANÁLISIS DE FLUJOS DE CARGA

2. Métodos matemáticos de solución

❑ Método Jacobi:

- Es un método simple pero lento, sigue el algoritmo:

$$X_i^{(K+1)} = F(X^{(K)})$$

Siendo k el número de la iteracción

2. Métodos matemáticos de solución

❑ Método Gauss - Seidel:

- Este método es más rápido que el anterior. En este se utilizan los valores tan rápido como se obtienen, esto es:

$$X_i^{(k+1)} = F(X_1^{(k+1)}, X_2^{(k+1)}, \dots, X_{i-1}^{(k+1)}, X_i^{(k)}, \dots, X_n^{(k)})$$

- Su convergencia se puede acelerar si:

$$x_{nuevo} = x_{viejo} + c(x_{nuevo} - x_{viejo}) \quad 1,4 < c < 1,7$$

2. ANÁLISIS DE FLUJOS DE CARGA

2. Métodos matemáticos de solución

Aplicación al caso de un sistema eléctrico de potencia:

Para la k -ésima barra se tiene:

$$\frac{P_k - jQ_k}{\tilde{V}_k^*} = Y_{kk}\tilde{V}_k + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n Y_{ki}\tilde{V}_i$$

De esta ecuación se puede obtener una expresión para $\tilde{V}_k$:

$$\tilde{V}_k = \frac{P_k - jQ_k}{Y_{kk}\tilde{V}_k^*} - \frac{1}{Y_{kk}} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n Y_{ki}\tilde{V}_i$$

2. Métodos matemáticos de solución

Entonces para el caso de una barra de carga PQ, la ecuación:

$$\tilde{V}_k = \frac{P_k - jQ_k}{Y_{kk}\tilde{V}_k^*} - \frac{1}{Y_{kk}} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n Y_{ki} \tilde{V}_i$$

es la empleada, renovando las tensiones que se vayan hallando en cada paso.

2. Métodos matemáticos de solución

- Ahora, si la barra es de generación PV, de la ecuación se obtiene:

$$Q_k = -\text{Im} \left[\tilde{V}_k^* \sum_{i=1}^n Y_{ki} \tilde{V}_i \right]$$

- Si está dentro de los límites de la generación se halla el ángulo de la tensión. Se conoce P y V.
- Si exceden los límites, se dejan estos y la tensión de la barra se halla como si fuera una barra PQ.

2. Métodos matemáticos de solución

❑ Método Newton Raphson:

- Aunque el método de Gauss Seidel se usa bastante, especialmente para sistemas pequeños, se ha desarrollado el método Newton Raphson, con el cual se puede obtener tiempos de procesamiento muy reducidos comparados con los otros.
- El método de Newton-Raphson se basa en la expansión de la función en series de Taylor:

$$F(X) = F(a) + F'(a)(X - a) + F''(a)\frac{(X - a)^2}{2!} + \dots + F^n(a)\frac{(X - a)^n}{n!} + \dots$$

2. Métodos matemáticos de solución

❑ Método Newton Raphson:

- La serie converge rápidamente para valores de x cerca a a , caso en el cual solo basta considerar los primeros términos

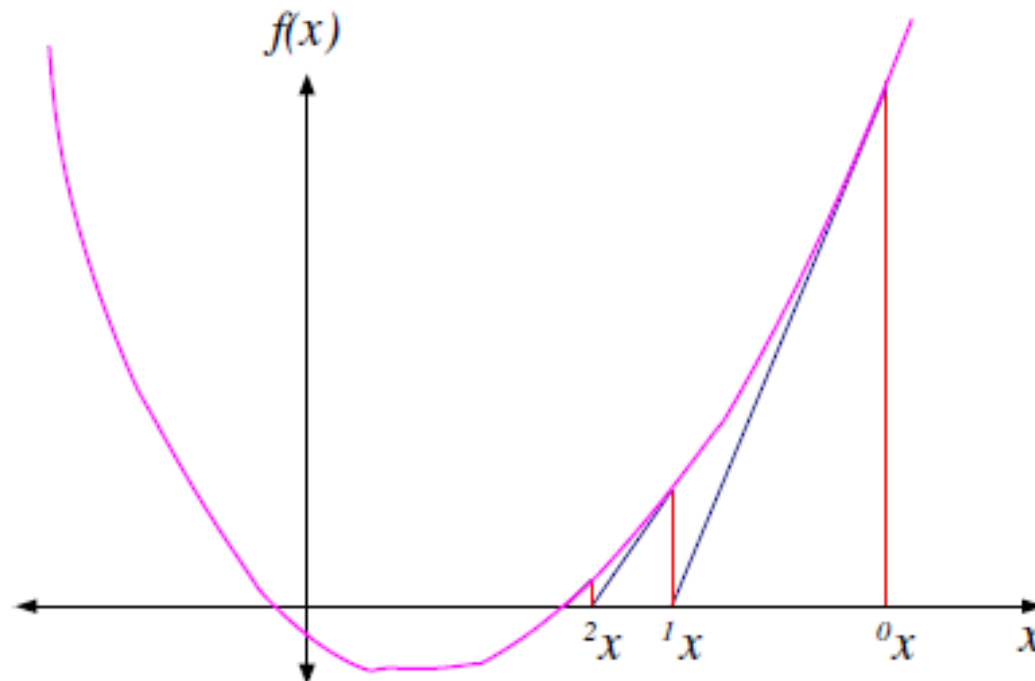
Se busca hallar la x tal que $f(x) = 0$. Esto se resuelve iterativamente con:

$${}^{k+1}x = {}^kx - f'({}^kx)^{-1} f({}^kx)$$

2. Métodos matemáticos de solución

❑ Método Newton Raphson:

- Gráficamente se ve como:



2. Métodos matemáticos de solución

- Aplicación a sistemas eléctricos de potencia. Si se recuerda que:
 - Para la admitancia entre el nodo i y el nodo n :

$$\begin{aligned}
 Y_{in} &= |Y_{in}| \angle \theta_{in} \\
 Y_{in} &= |Y_{in}| \cos(\theta_{in}) + j |Y_{in}| \sin(\theta_{in}) \\
 Y_{in} &= G_{in} + jB_{in}
 \end{aligned}$$

- Para la tensión en la barra i :

$$\begin{aligned}
 V_i &= |V_i| \angle \delta_i \\
 V_i &= |V_i| \cos(\delta_i) + j |V_i| \sin(\delta_i)
 \end{aligned}$$

2. Métodos matemáticos de solución

- Para la corriente inyectada a la barra i :

$$\begin{aligned} I_i &= Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 + \cdots + Y_{i(N-1)}V_{N-1} + Y_{iN}V_N \\ I_i &= \sum_{n=1}^N Y_{in}V_n \end{aligned}$$

- La potencia compleja inyectada a la barra i :

$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{n=1}^N Y_{in}V_n$$

2. ANÁLISIS DE FLUJOS DE CARGA

2. Métodos matemáticos de solución

- O de otra forma:

$$P_i - jQ_i = \sum_{n=1}^N |Y_{in} V_i V_n| \angle (\theta_{in} + \delta_n - \delta_i)$$

- Para la aplicación a sistemas eléctricos de potencia se parte de que todas las barras son de carga, menos la de compensación:

$$P_i = |V_i|^2 G_{ii} + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^N |V_i V_n Y_{in}| \cos (\theta_{in} + \delta_n - \delta_i)$$

$$Q_i = -|V_i|^2 B_{ii} - \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^N |V_i V_n Y_{in}| \sen (\theta_{in} + \delta_n - \delta_i)$$

2. ANÁLISIS DE FLUJOS DE CARGA

2. Métodos matemáticos de solución

- Con los valores programados y calculados se tiene:

$$\Delta P_i = P_{i,prog} - P_{i,calc}$$

$$\Delta Q_i = Q_{i,prog} - Q_{i,calc}$$

- Entonces para un sistema de 4 barras se tiene al aplicar la diferencial parcial a la potencia inyectada a la barra i :

$$\Delta P_i = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_2} \Delta \delta_2 + \frac{\partial P_i}{\partial \delta_3} \Delta \delta_3 + \frac{\partial P_i}{\partial \delta_4} \Delta \delta_4 + \dots$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_2|} \Delta |V_2| + \frac{\partial P_i}{\partial |V_3|} \Delta |V_3| + \frac{\partial P_i}{\partial |V_4|} \Delta |V_4|$$

2. ANÁLISIS DE FLUJOS DE CARGA

2. Métodos matemáticos de solución

- Multiplicando y dividiendo por las magnitudes de las respectivas tensiones se tiene:

$$\Delta P_i = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_2} \Delta \delta_2 + \frac{\partial P_i}{\partial \delta_3} \Delta \delta_3 + \frac{\partial P_i}{\partial \delta_4} \Delta \delta_4 + \dots$$

$$|V_2| \frac{\partial P_i}{\partial |V_2|} \frac{\Delta |V_2|}{|V_2|} + |V_3| \frac{\partial P_i}{\partial |V_3|} \frac{\Delta |V_3|}{|V_3|} + |V_4| \frac{\partial P_i}{\partial |V_4|} \frac{\Delta |V_4|}{|V_4|}$$

- Lo mismo se aplica a Q_i :

$$\Delta Q_i = \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_2} \Delta \delta_2 + \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_3} \Delta \delta_3 + \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_4} \Delta \delta_4 + \dots$$

$$|V_2| \frac{\partial Q_i}{\partial |V_2|} \frac{\Delta |V_2|}{|V_2|} + |V_3| \frac{\partial Q_i}{\partial |V_3|} \frac{\Delta |V_3|}{|V_3|} + |V_4| \frac{\partial Q_i}{\partial |V_4|} \frac{\Delta |V_4|}{|V_4|}$$

2. ANÁLISIS DE FLUJOS DE CARGA

2. Métodos matemáticos de solución

- El sistema matricial se expresa como:

$$\left[\begin{array}{cc|cc} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_4} & |V_2| \frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} & \cdots & |V_4| \frac{\partial P_2}{\partial |V_4|} \\ \vdots & \mathbf{J}_{11} & \vdots & \vdots & \mathbf{J}_{12} & \vdots \\ \frac{\partial P_4}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\partial P_4}{\partial \delta_4} & |V_2| \frac{\partial P_4}{\partial |V_2|} & \cdots & |V_4| \frac{\partial P_4}{\partial |V_4|} \\ \hline \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_4} & |V_2| \frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} & \cdots & |V_4| \frac{\partial Q_2}{\partial |V_4|} \\ \vdots & \mathbf{J}_{21} & \vdots & \vdots & \mathbf{J}_{22} & \vdots \\ \frac{\partial Q_4}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\partial Q_4}{\partial \delta_4} & |V_2| \frac{\partial Q_4}{\partial |V_2|} & \cdots & |V_4| \frac{\partial Q_4}{\partial |V_4|} \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} \Delta \delta_2 \\ \vdots \\ \Delta \delta_4 \\ \hline \frac{\Delta |V_2|}{|V_2|} \\ \vdots \\ \frac{\Delta |V_4|}{|V_4|} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_4 \\ \hline \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_4 \end{array} \right]$$

2. Métodos matemáticos de solución

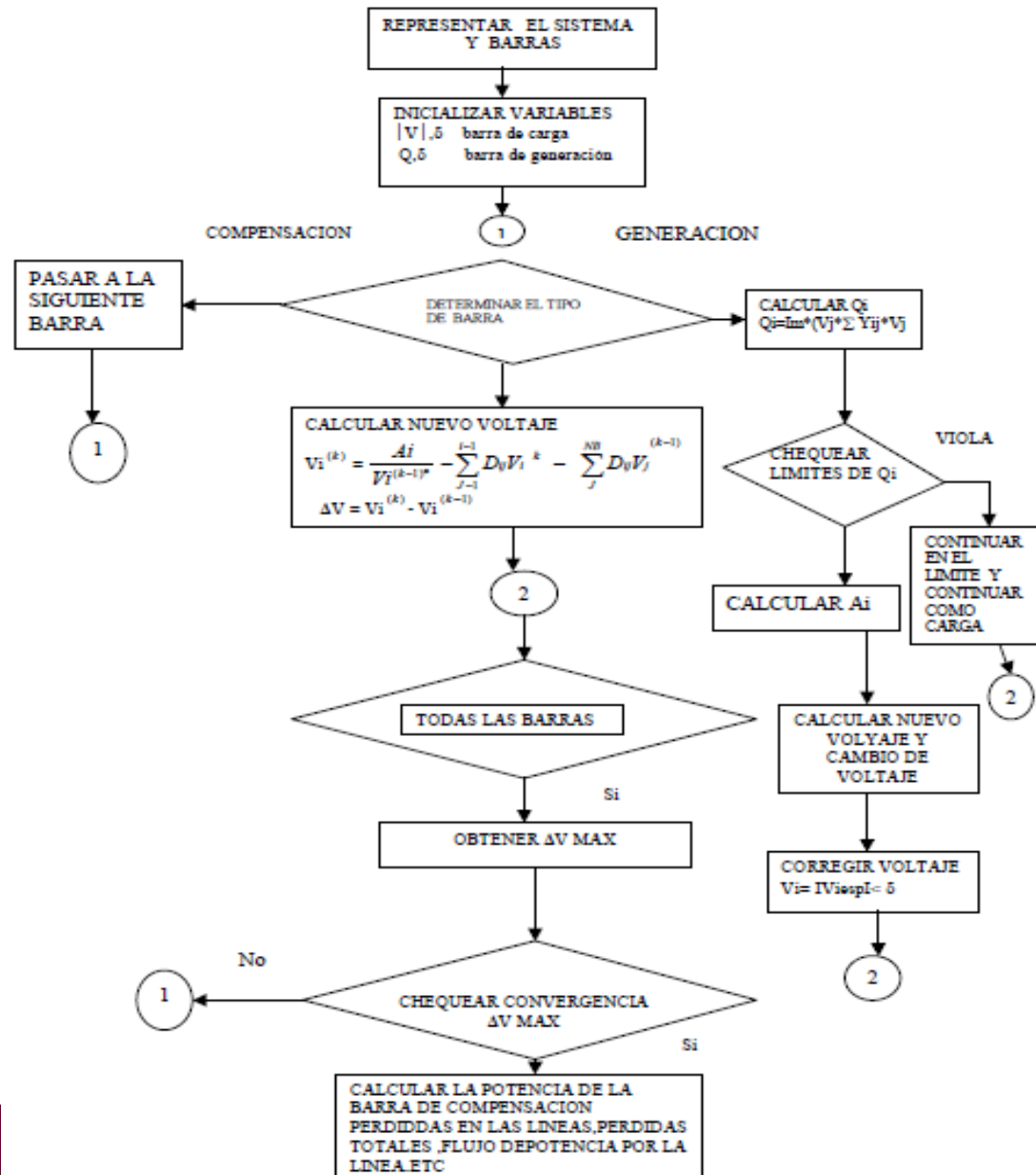
La solución de la ecuación matricial se encuentra iterando de la siguiente manera:

1. Estimar los valores iniciales de $^{(0)}\delta_i$ y $^{(0)}\Delta|V_i|$
2. Calcular $^{(0)}P_{i,calc}$ y $^{(0)}Q_{i,calc}$ de las ecuaciones indicadas.
3. Calcular $^{(0)}\Delta P_{i,calc}$ y $^{(0)}\Delta Q_{i,calc}$ de las ecuaciones.
4. Hallar los elementos del jacobiano.
5. Resolver la ecuación matricial para las correcciones iniciales

$$^{(0)}\delta_i \text{ y } \frac{^{(0)}\Delta|V_i|}{^{(0)}|V_i|}$$

6. Sumar las correcciones encontradas a los estimados iniciales para obtener: $^{(1)}\delta_i = ^{(0)}\delta_i + ^{(0)}\Delta\delta_i$ y $^{(1)}|V_i| = ^{(0)}|V_i| + ^{(0)}\Delta|V_i| = ^{(0)}|V_i| \left(1 + \frac{^{(0)}\Delta|V_i|}{^{(0)}|V_i|}\right)$
7. Emplear los nuevos valores de $^{(0)}\delta_i$ y $^{(0)}\Delta|V_i|$ como los valores iniciales de la iteración 2 y continuar el proceso.

2. ANÁLISIS DE FLUJOS DE CARGA



2. Métodos matemáticos de solución

**DIPLOMADO EN REDES ELÉCTRICAS
DE DISTRIBUCIÓN Y TRANSMISIÓN**



TEMA 3: ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO

MSc. Jorge Antonio Jaimes Báez

uts | **EXTENSIÓN Y
PROYECCIÓN SOCIAL**
extension@uts.edu.co

Tema 1: Componentes Simétricas

Tema 2: Cortocircuito Trifásico (capacidad de cortocircuito)

Tema 3: Cortocircuito monofásico:

- Representación de los equipos en redes de secuencia
- Redes de secuencia para tipos de falla

Tema 4: Cálculo de corrientes de cortocircuito

1. 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 $\pm 120^\circ$.
- 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.

1. Componentes Simétricas

- El método de componentes simétricas permite extender el análisis por fase a sistemas que contienen cargas desbalanceadas
- Este método fue presentado en 1918 por Charles LeGeyt Fortescue. Se utiliza para simplificar el análisis de los sistemas eléctricos trifásicos desbalanceados.
- Las componentes simétricas permiten escribir de forma general un sistema polifásico desbalanceado (con n fases) como la suma de n sistemas equilibrados aplicando el principio de superposición (uno de secuencia cero).

1. Componentes Simétricas

- 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.

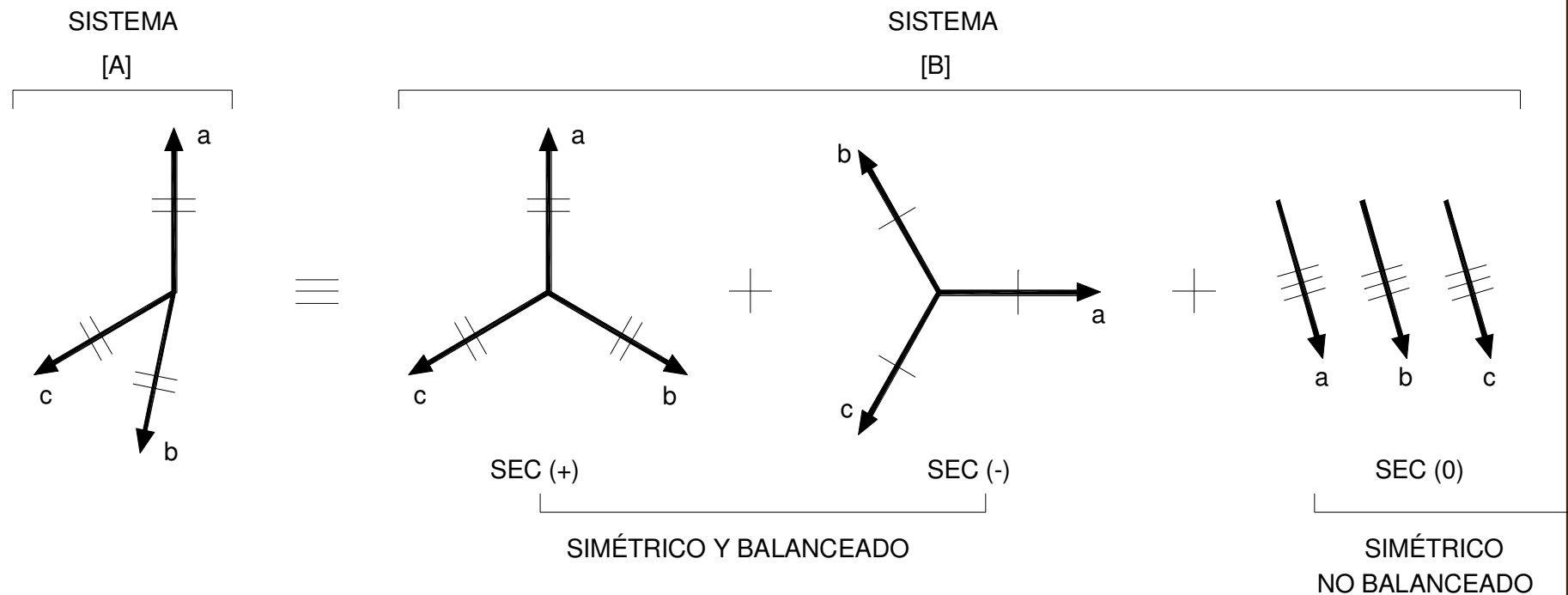
☐ Componentes Simétricas en Sistemas Trifásicos.

- Este método permite analizar un sistema de fasores trifásico desbalanceados mediante tres sistemas de tres fasores balanceados denominados de secuencia positiva, negativa y cero.

1. Componentes Simétricas

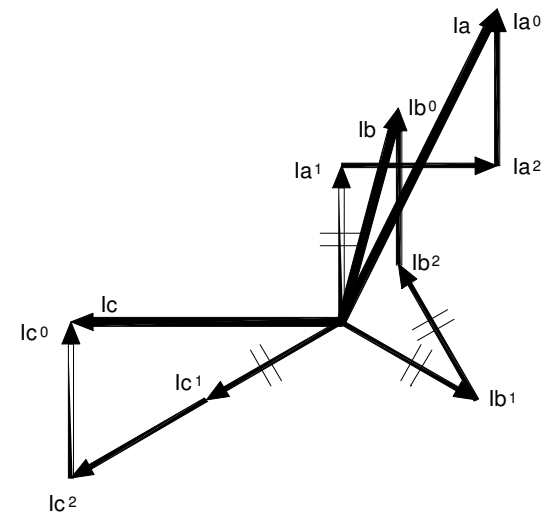
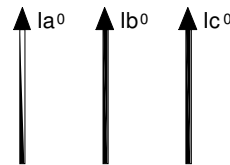
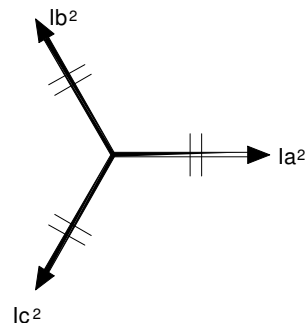
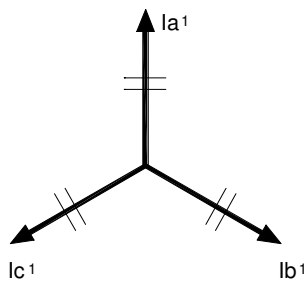
- Componentes de Secuencia Positiva:
 - Consiste en tres fasores de igual magnitud desfasados 120° con la misma secuencia de fase que los fasores originales.
- Componentes de Secuencia Negativa:
 - Consiste en tres fasores de igual magnitud desfasados 120° con una secuencia de fase opuesta a la de los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

1. Componentes Simétricas



1. Componentes Simétricas

- La relación es biunívoca, es decir, que sólo hay una forma de pasar del Sistema A al Sistema B y viceversa.



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

$$I_b = I_{b0} + I_{b1} + I_{b2}$$

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

1. Componentes Simétricas

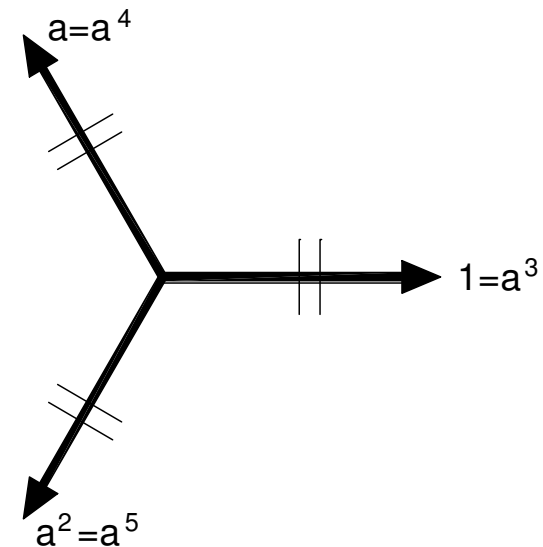
- Representación de la relación ortonormal

Operador a:

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

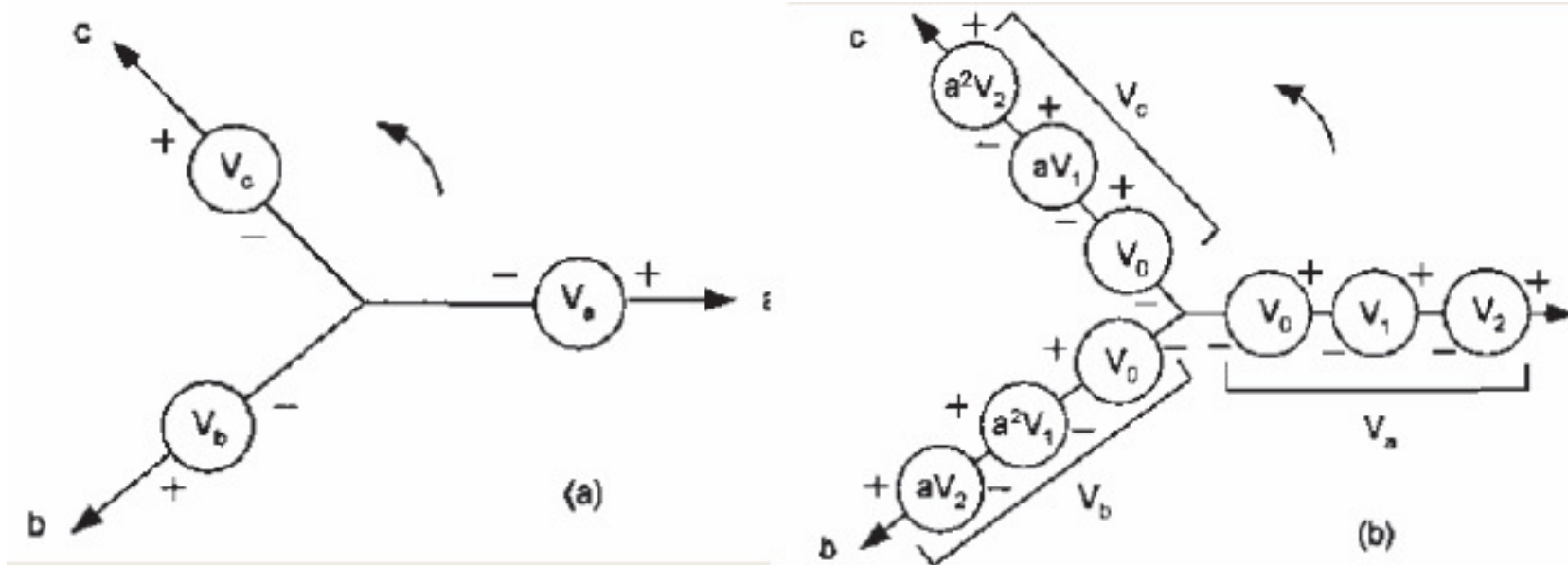
$$I_b = I_{a0} + a^2 I_{a1} + a I_{a2}$$

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

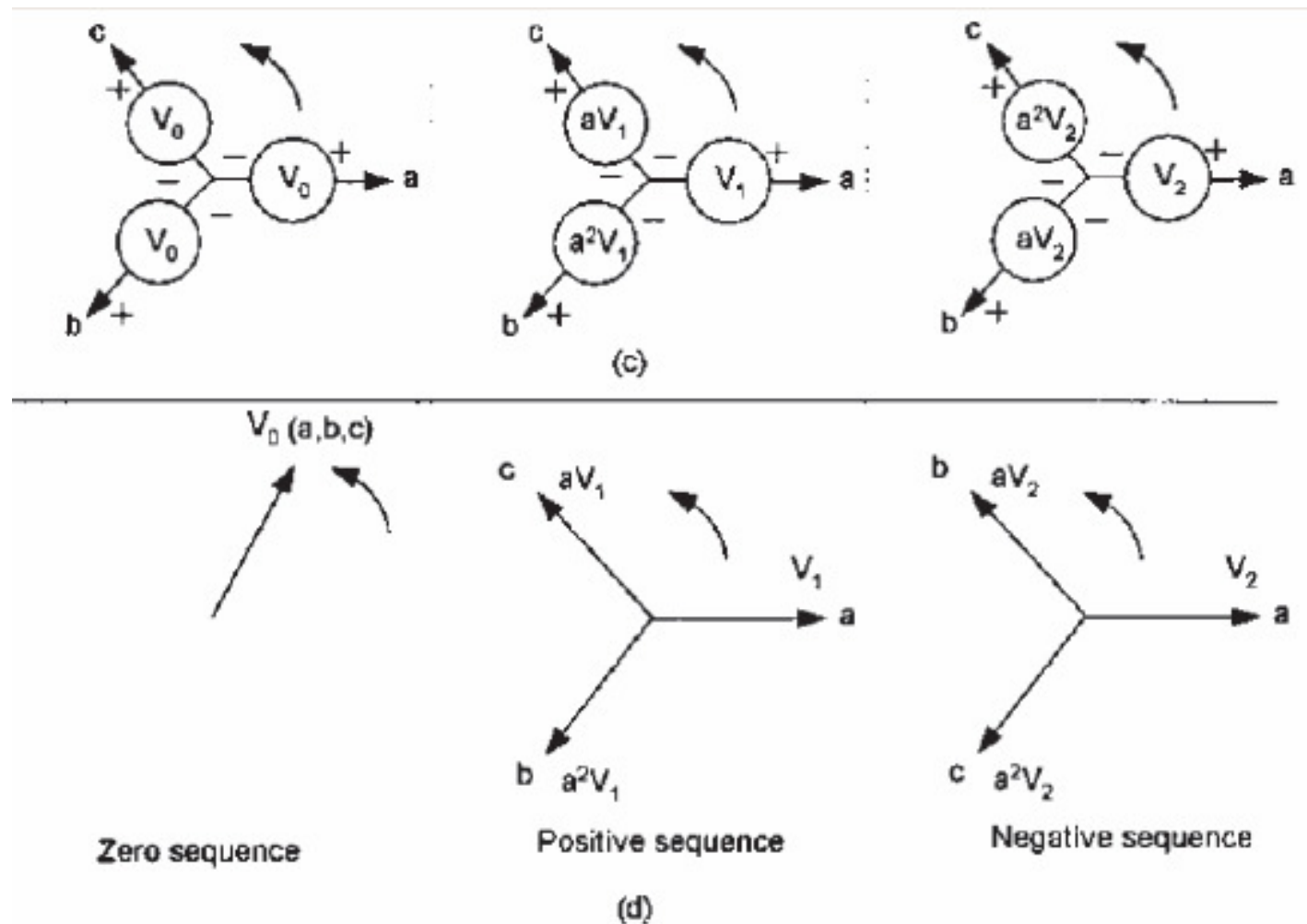


1. Componentes Simétricas

- Gráficamente, la evolución progresiva de pasar de cantidades de fase a cantidades de secuencia se presentan en las figuras:

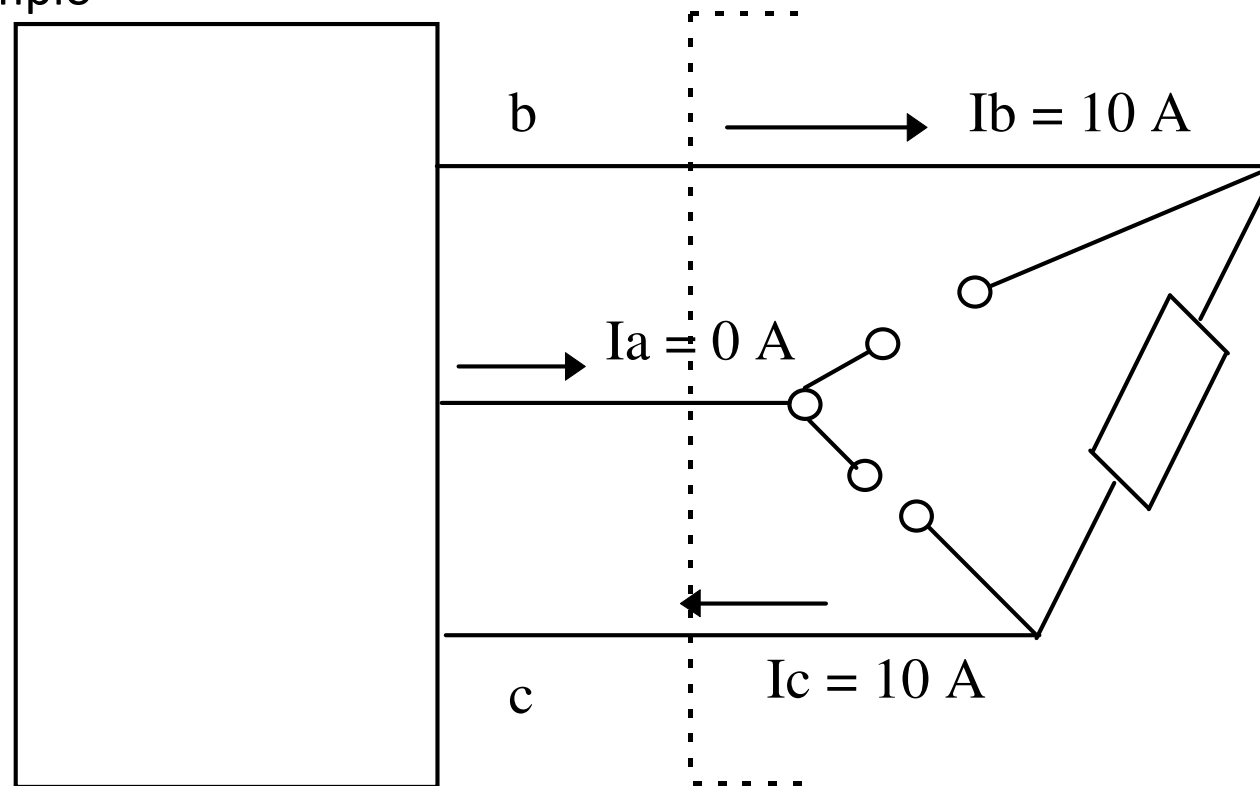


1. Componentes Simétricas



1. Componentes Simétricas

- Ejemplo



La fase “rara”
siempre es la fase “a”

1. Componentes Simétricas

- En general

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} \end{bmatrix}^{-1}$$

Para el ejemplo:

1. Componentes Simétricas

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 10 \\ -10 \end{bmatrix}$$

$10 \angle 180^\circ \leftarrow$

$$I_{a0} = \frac{1}{3}(10 - 10) = 0 \quad \text{No involucra tierra}$$

$$I_{a1} = \frac{1}{3}(10a - 10a^2) = \frac{10}{3}(a - a^2) = \frac{10}{\sqrt{3}} \angle 90^\circ$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3}(10a^2 - 10a) = \frac{10}{3}(a^2 - a)$$

$$I_{a1} = -I_{a2} = \frac{10}{\sqrt{3}} \angle 90^\circ$$

$$I_a = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = 0 + \frac{10}{\sqrt{3}} \angle 90^\circ + \frac{10}{\sqrt{3}} \angle -90^\circ = 0$$

2. Cortocircuito - Definición

Un Cortocircuito (CC) es la unión eléctrica inapropiada de dos o más puntos de la red del SP a través de una $Z_{cc} \rightarrow 0$

Los CC son causados por múltiples agentes internos y externos:

- **Internos:** Fallas de aislamiento (en bobinas, en subestaciones, en equipos de control, etc.)
- **Externos:**
 - Atmosféricos: Los rayos crean un $\Delta|V|$ grande entre fases y se rompe el aislamiento. (50%)
 - Maniobras: Operación de interruptores provocando TRV (Transient Recovery Voltage) el cual produce $\Delta|V|$ grandes y cortocircuitos por ruptura del aislamiento. (30%)
 - Naturales, humanos: bosques, animales, fundaciones de torres que pierden solidez, niños que juegan, violencia, explosiones, alambres entre fases, madera húmeda, etc. (20%)

2. Cortocircuito - Clasificación

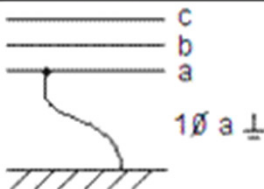
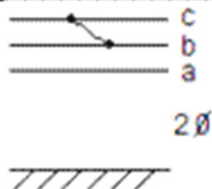
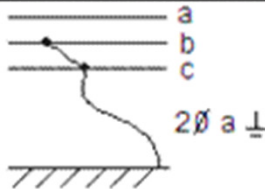
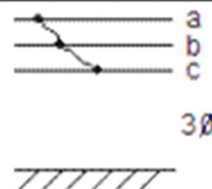
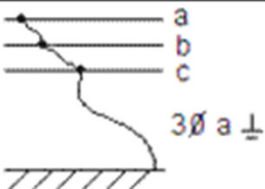
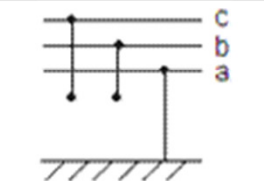
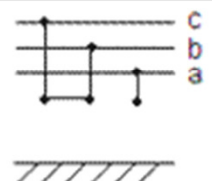
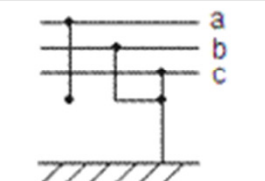
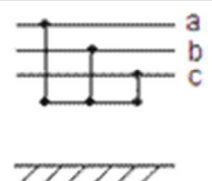
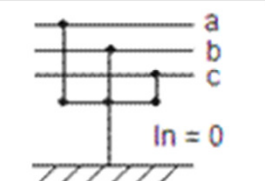
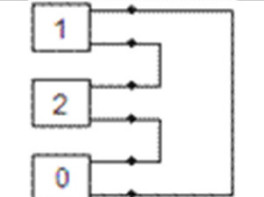
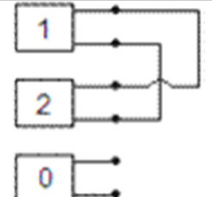
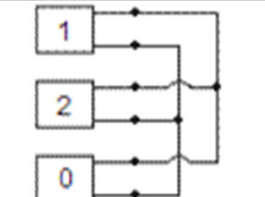
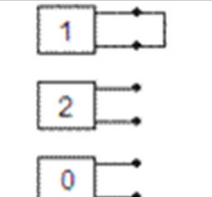
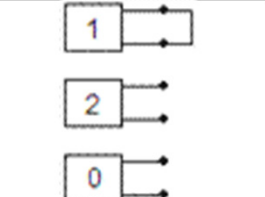
Simétricos:

- Contacto entre las tres fases con $Z_{cc} \rightarrow 0$
- Contactos entre las tres fases y el neutro con $Z_{cc} \rightarrow 0$ (no importa “n”)
- Estudio sobre la fase “a” solamente. Estudio de simetría fasorial (módulos iguales en a, b, c; ángulos 0° , -120° , 120°)
- Son los más graves en cuanto al bloqueo en la transferencia de potencia.
- Es el menos frecuente y provoca reacciones especiales (no senoidales) en máquina rotativa y en la red eléctrica.

- Asimétricos:

- Involucra necesariamente las tres fases (a, b, c), por ejemplo, dos fases a tierra, 2 fases, una fase a tierra, etc.
- Siempre se tienen dos fases contra una, la fase diferente en el análisis matemático de la red se designa como fase a

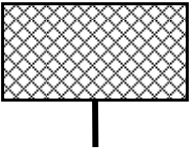
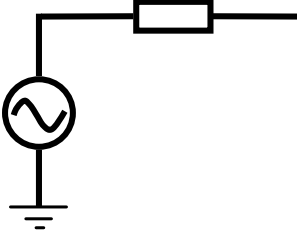
2. Cortocircuito – Definición - Clasificación

Fallas Simétricas y Asimétricas en Sistemas de Potencia					
Tipo de falla					
Fallas	Asimétricas			Simétricas	
Frecuencia de aparición	0,7	0,15	0,08	0,05	0,02
Gravedad en P_{ij}	30%	45%	75%	100%	100%
Gravedad en $I I_{falla}$	120%	60%	70%	100%	100%
Modelo de la falla - Conexión					
Diagramas de conexión de secuencias (1, 2, 0)					

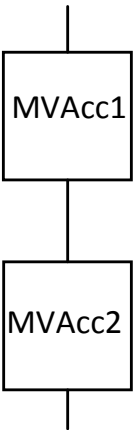
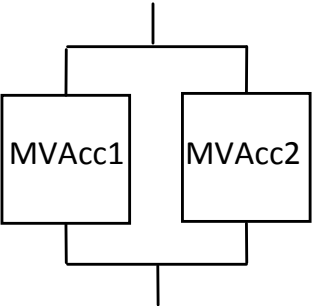
2. Cortocircuito Trifásico

- Este cortocircuito es el que se calcula más fácilmente debido a que es completamente simétrico, es decir, que en las tres fases del sistema de potencia ocurre exactamente lo mismo y por consiguiente es suficiente calcular el cortocircuito solo en una fase. Para el cálculo de este cortocircuito se puede utilizar el concepto de los Megavoltamperios de cortocircuito teniendo en cuenta que éstos son proporcionales a la admitancia, por lo tanto, cuando los circuitos están en paralelo, éstos se suma, y cuando los circuitos están en serie, el resultado es el producto sobre la suma.

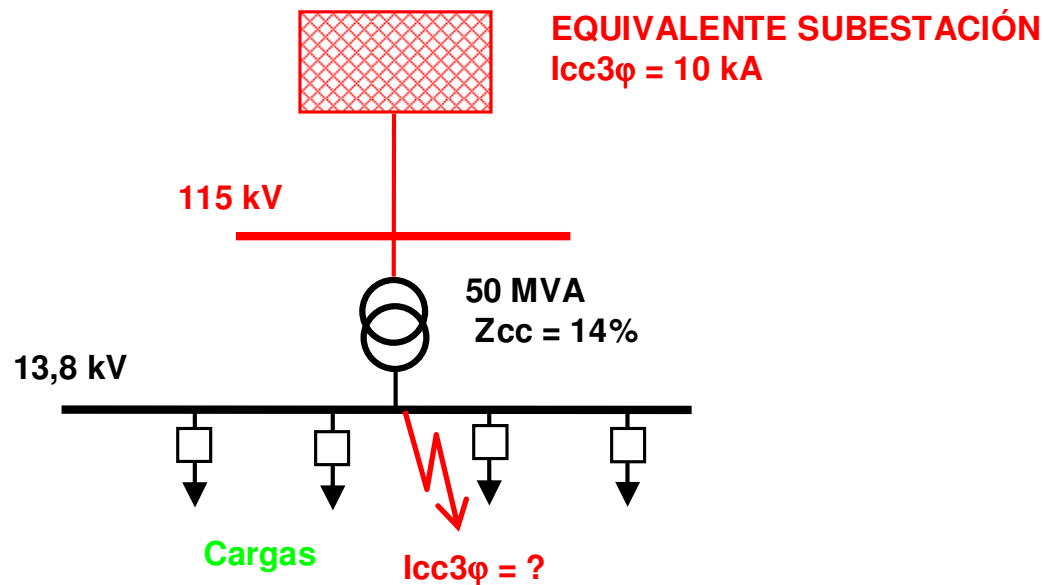
2. Cortocircuito Trifásico

Símbolo	Descripción	Equivalente eléctrico	MVAcc equivalentes
	Equivalente de cortocircuito		$MVAcc3\varphi_{sistema} = \sqrt{3} \times V \times I_{cc3\varphi_{sistema}}$
	Transformador de potencia		$MVAcc3\varphi_{trafo} = \frac{S_{trafo}}{Z_{1cc}}$
	Circuito de distribución, línea de transmisión		$MVAcc3\varphi_{circuito} = \frac{V^2}{Z_1}$

2. Cortocircuito Trifásico

	Conexión serie $MVA_{cc} = \frac{MVA_{cc1} \times MVA_{cc2}}{MVA_{cc1} + MVA_{cc2}}$
	Conexión paralelo $MVA_{cc} = MVA_{cc1} + MVA_{cc2}$

2. Cortocircuito Trifásico



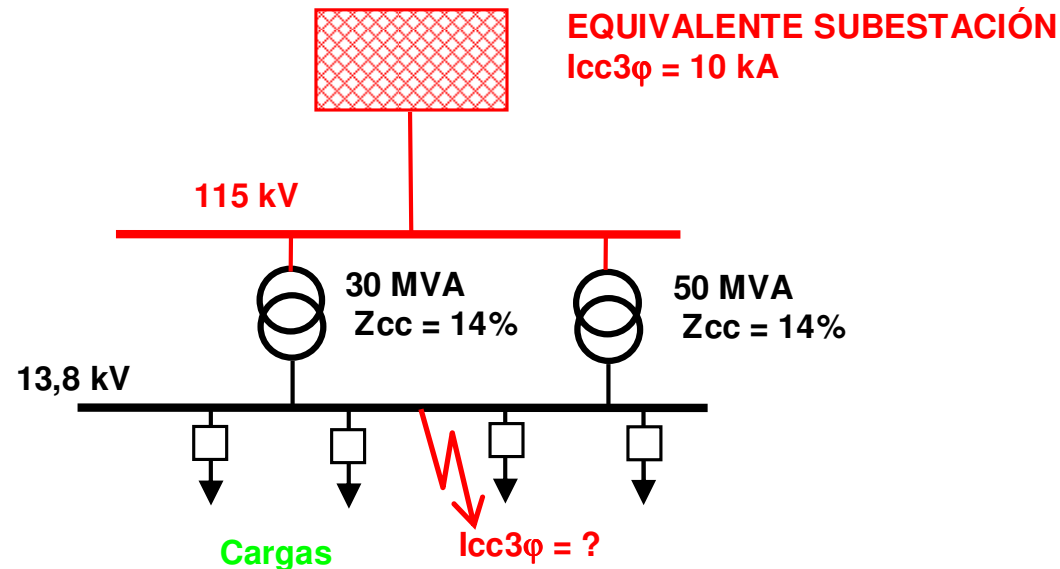
$$MVAcc3\phi_{sistema} = \sqrt{3} \times V \times I_{cc3\phi_{sistema}} = \sqrt{3} \times 115 \times 10 = 1991,9 \text{ MVA}$$

$$MVAcc3\phi_{trafo} = \frac{S_{trafo}}{Z_{1cc}} = \frac{50}{0,14} = 357,1 \text{ MVA}$$

$$MVAcc3\phi_{barra13,8} = \frac{MVAcc3\phi_{trafo} \times MVAcc3\phi_{sistema}}{MVAcc3\phi_{trafo} + MVAcc3\phi_{sistema}} = \frac{357,1 \times 1991,9}{357,1 + 1991,9} = 302,81 \text{ MVA}$$

$$I_{cc3\phi_{barra13,8}} = \frac{MVAcc3\phi_{barra13,8}}{\sqrt{3} \times V} = \frac{302,81}{\sqrt{3} \times 13,8} = 12,67 \text{ kA}$$

2. Cortocircuito Trifásico



$$MVAcc3\phi_{sistema} = \sqrt{3} \times V \times I_{cc3\phi_{sistema}} = \sqrt{3} \times 115 \times 10 = 1991,9 \text{ MVA}$$

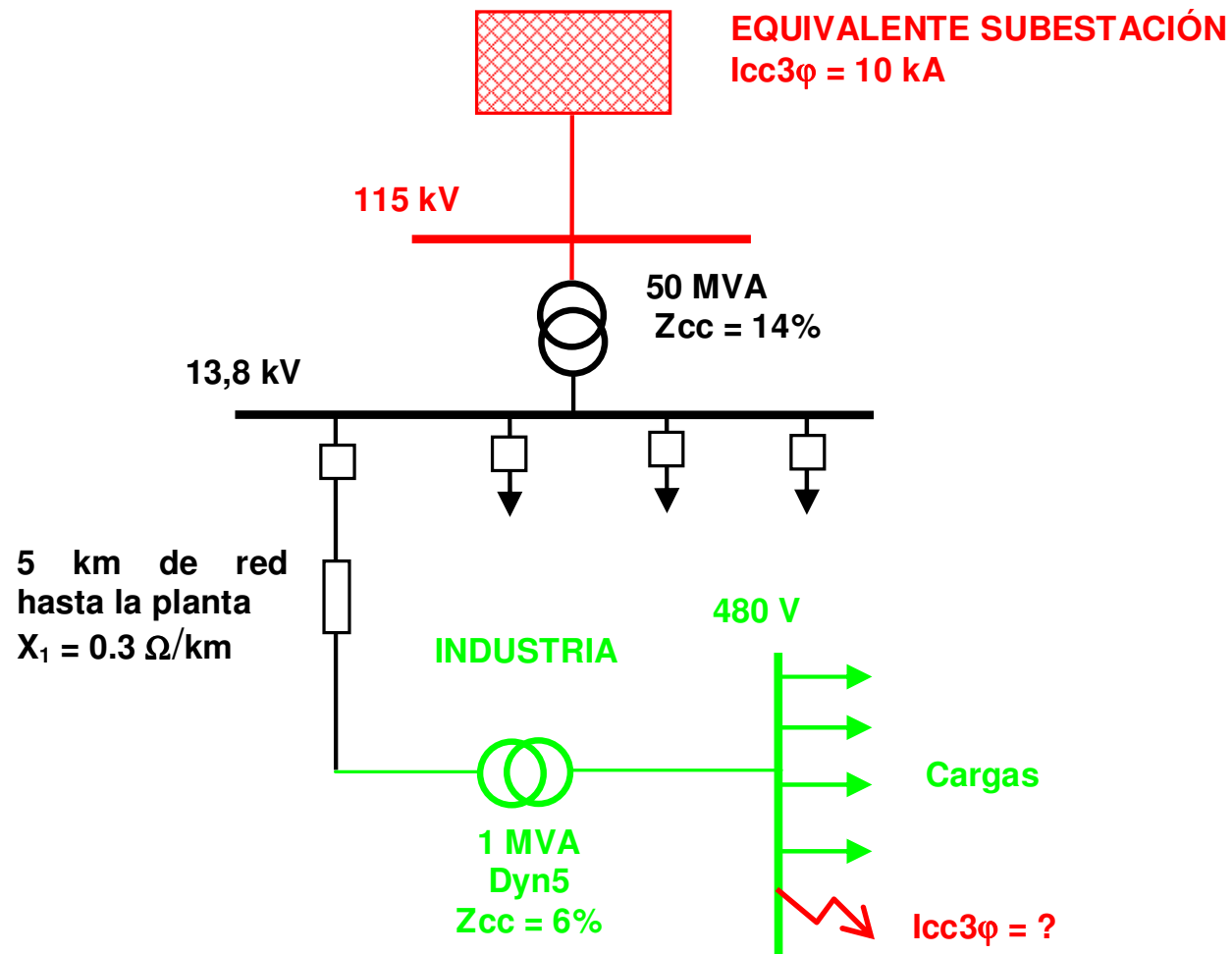
$$MVAcc3\phi_{trafo1} = \frac{S_{trafo1}}{Z_{1cc}} = \frac{30}{0,14} = 214,3 \text{ MVA} \quad MVAcc3\phi_{trafo2} = \frac{S_{trafo2}}{Z_{1cc}} = \frac{50}{0,14} = 357,1 \text{ MVA}$$

$$MVAcc3\phi_{trafos} = MVAcc3\phi_{trafo1} + MVAcc3\phi_{trafo2} = 357,1 + 214,3 \text{ MVA} = 571,4 \text{ MVA}$$

$$MVAcc3\phi_{barra13,8} = \frac{MVAcc3\phi_{trafos} \times MVAcc3\phi_{sistema}}{MVAcc3\phi_{trafos} + MVAcc3\phi_{sistema}} = \frac{571,4 \times 1991,9}{571,4 + 1991,9} = 440 \text{ MVA}$$

$$I_{cc3\phi_{barra13,8}} = \frac{MVAcc3\phi_{barra13,8}}{\sqrt{3} \times V} = \frac{440}{\sqrt{3} \times 13,8} = 18,58 \text{ kA}$$

2. Cortocircuito Trifásico



3. Cortocircuito Monofásico

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.

3. Cortocircuito Monofásico

Redes de secuencia

- 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.

3. Cortocircuito Monofásico

Redes de secuencia

- 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.

3. Cortocircuito Monofásico

Redes de secuencia

- 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”.

3. Cortocircuito Monofásico

3.1 Representación de los equipos en redes de secuencia

- 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
- El modelo matemático del SEP describe la interacción de las redes de secuencia positiva, negativa y cero interconectadas en el **“punto de falla”**.

3. Cortocircuito Monofásico

3.1 Representación de los equipos en redes de secuencia

☐ Impedancias de Secuencia de las componentes del SEP.

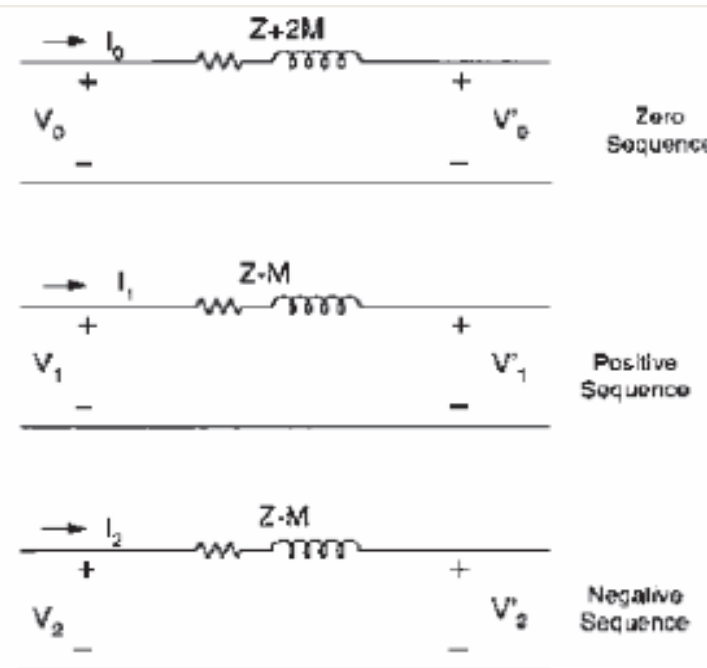
- Una característica de las impedancias de secuencia positiva y negativa de elementos estáticos, lineales y simétricos son idénticas.
- La impedancia de este tipo de elementos es independiente de la secuencia de fases siempre que los voltajes que se les apliquen sean balanceados.
- Las impedancias de 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.

3. Cortocircuito Monofásico

3.1 Representación de los equipos en redes de secuencia

□ Líneas de Transmisión.

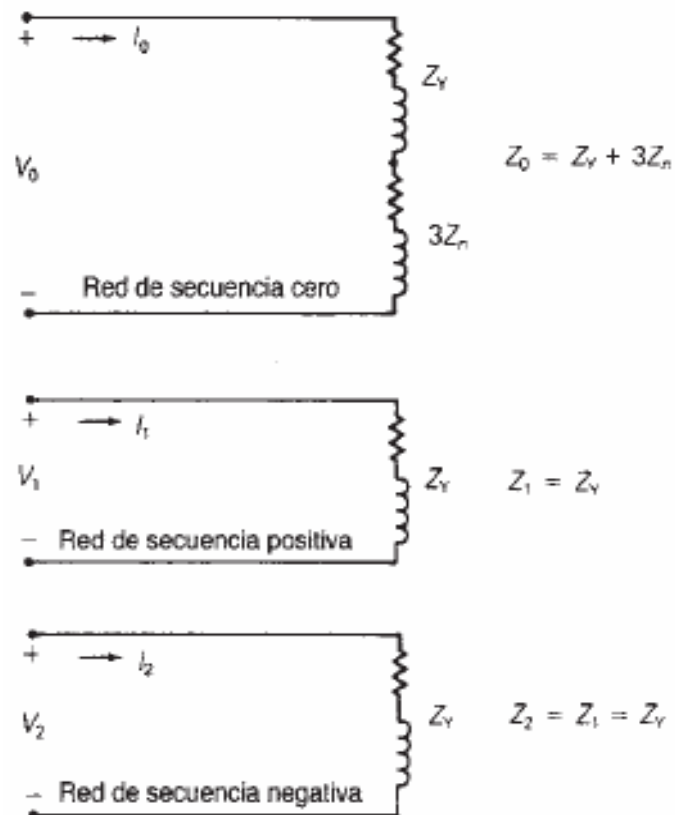
- Los circuitos equivalentes de las impedancias de secuencia de una línea trifásica balanceada simétrica son:



3. Cortocircuito Monofásico

3.1 Representación de los equipos en redes de secuencia

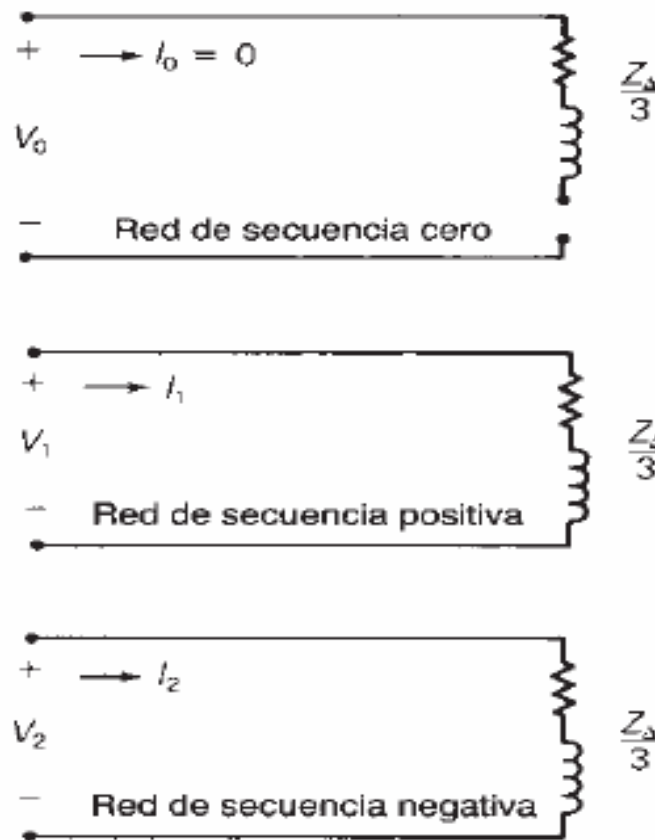
❑ Cargas conectadas en estrella aterrizada.



3. Cortocircuito Monofásico

3.1 Representación de los equipos en redes de secuencia

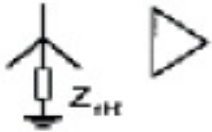
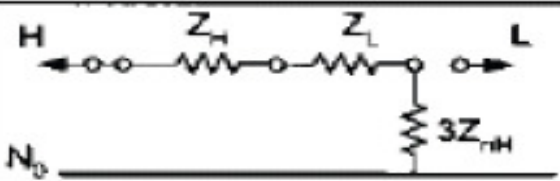
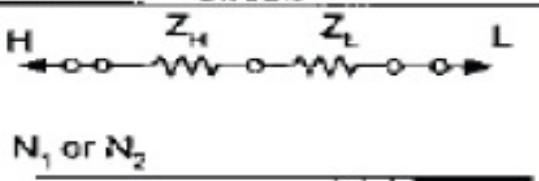
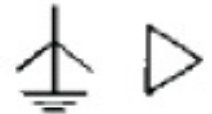
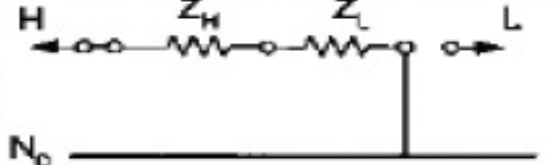
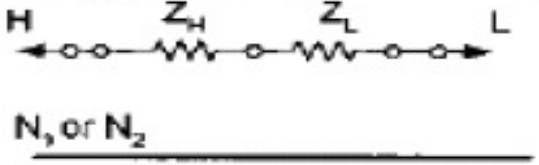
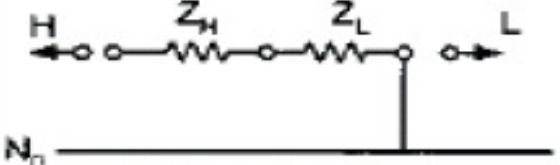
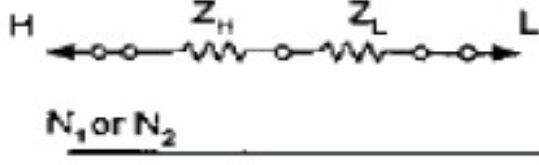
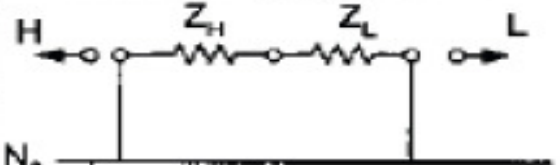
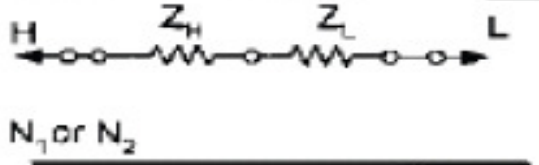
- Cargas conectadas en estrella sin conexión a tierra o en delta.



3. Cortocircuito Monofásico

3.1 Representación de los equipos en redes de secuencia

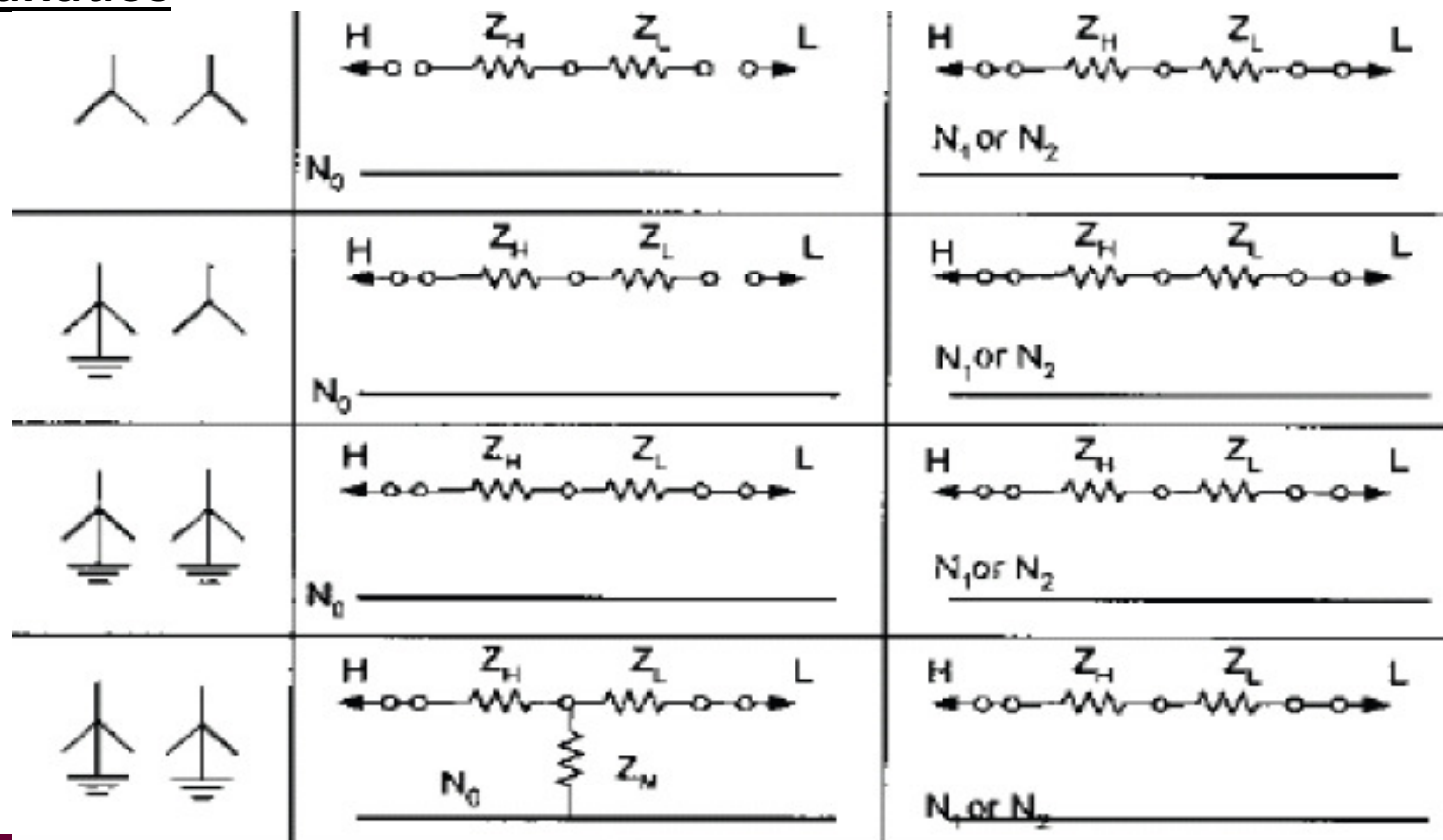
- Transformador trifásico bidevanado con varias conexiones en devanados

Winding Connections	Zero Sequence Circuit	Positive or Negative Sequence Circuit
		
		
		
		

3. Cortocircuito Monofásico

3.1 Representación de los equipos en redes de secuencia

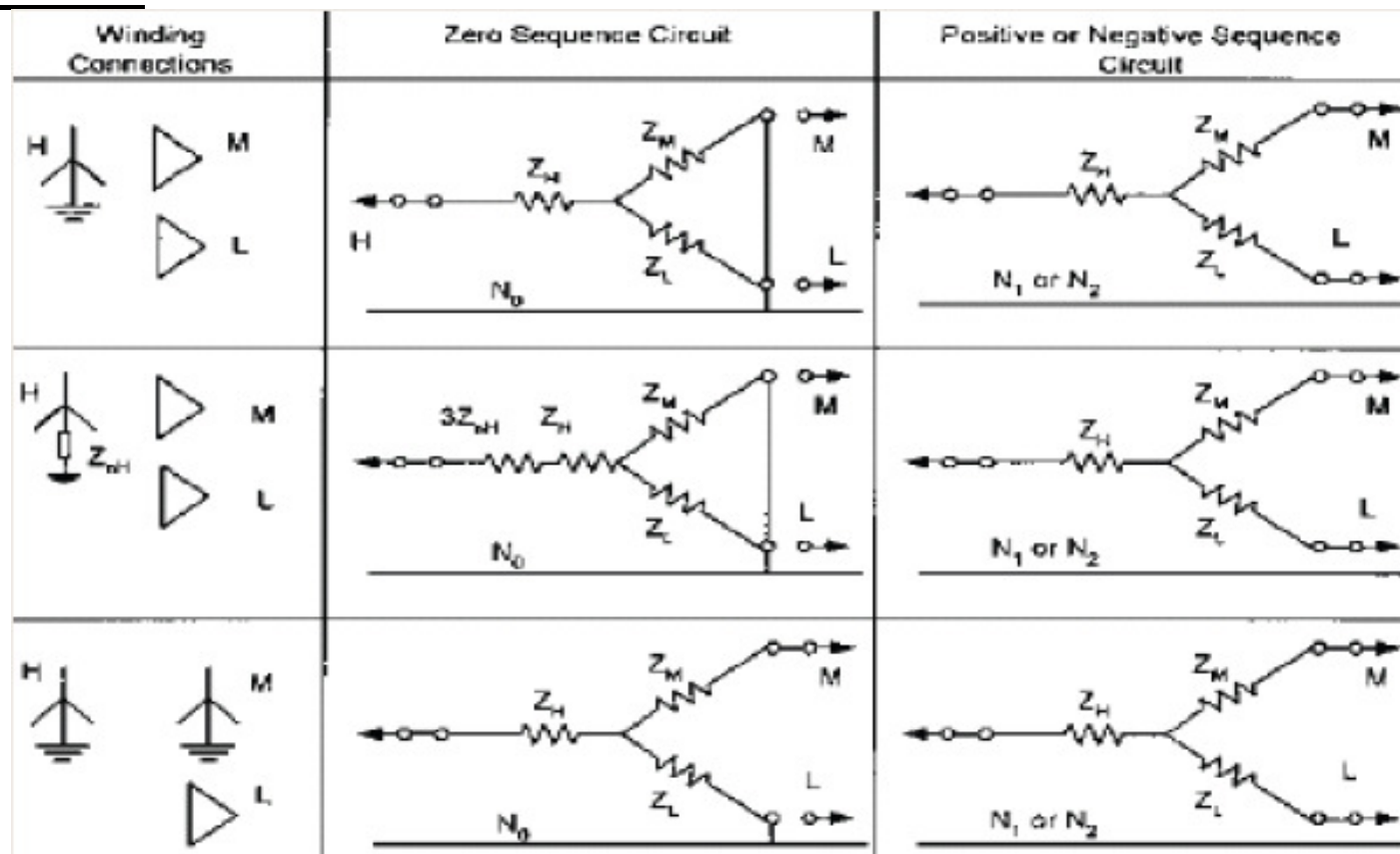
- ☐ Transformador trifásico bidevanado con varias conexiones en devanados



3. Cortocircuito Monofásico

3.1 Representación de los equipos en redes de secuencia

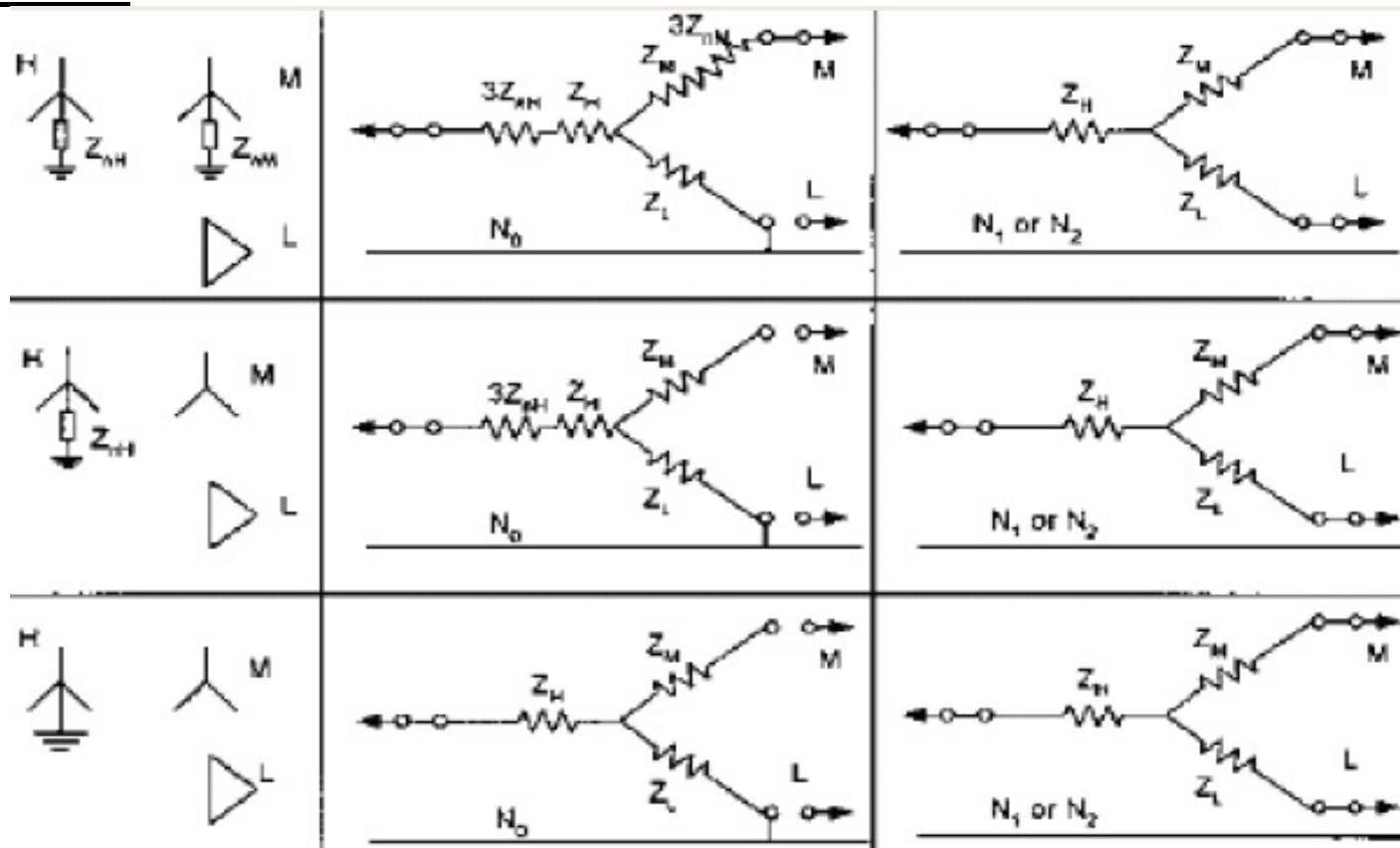
- Transformador trifásico tridevanado con varias conexiones en devanados



3. Cortocircuito Monofásico

3.1 Representación de los equipos en redes de secuencia

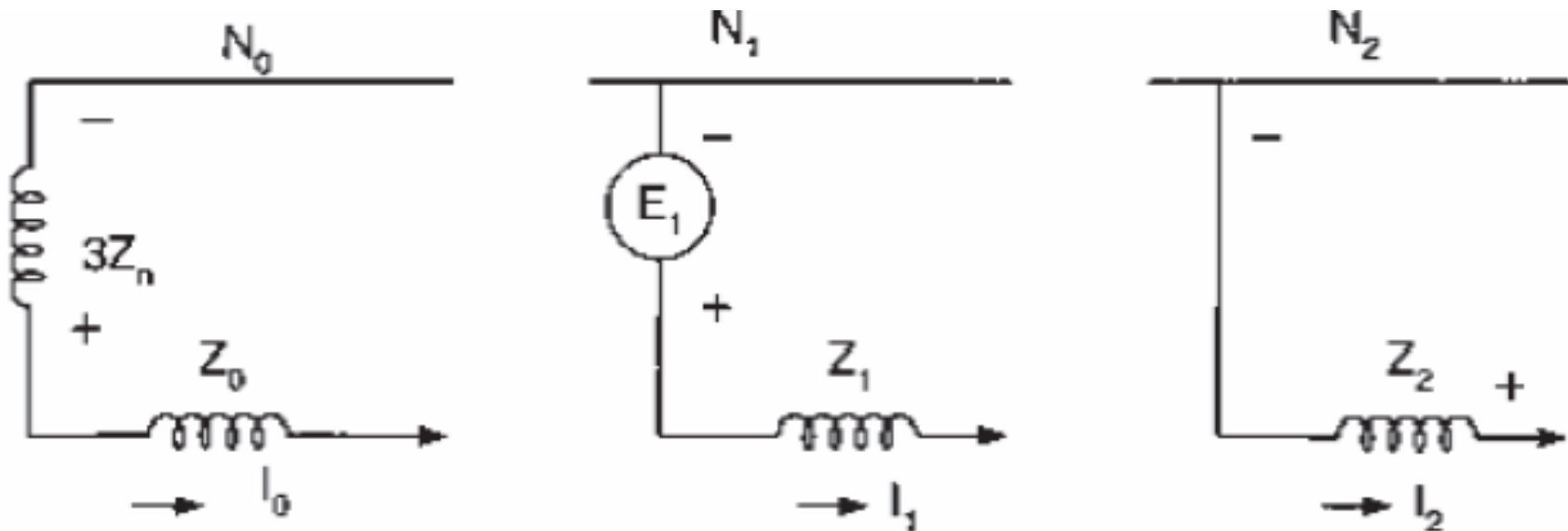
- Transformador trifásico tridevanado con varias conexiones en devanados



3. Cortocircuito Monofásico

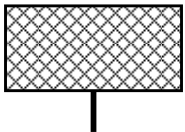
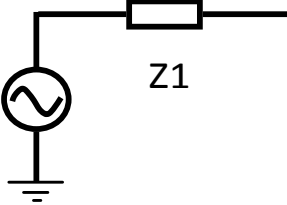
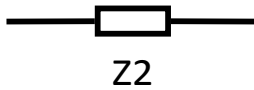
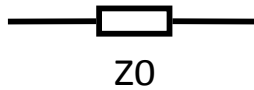
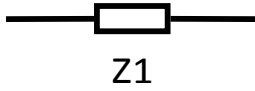
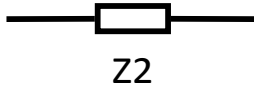
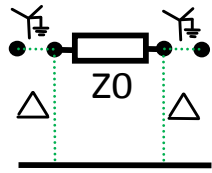
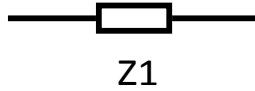
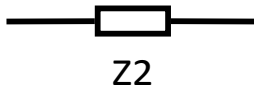
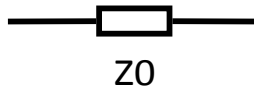
3.1 Representación de los equipos en redes de secuencia

□ Generador Síncrono:



3. Cortocircuito Monofásico

3.1 Representación de los equipos en redes de secuencia

Símbolo	Descripción	Secuencia (+)	Secuencia (-)	Secuencia (0)
	Equivalente de cortocircuito			
	Transformador de potencia			
	Circuito de distribución, línea de transmisión			

3. Cortocircuito Monofásico

3.2 Análisis de fallas – Redes de Secuencia

- 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

3. Cortocircuito Monofásico

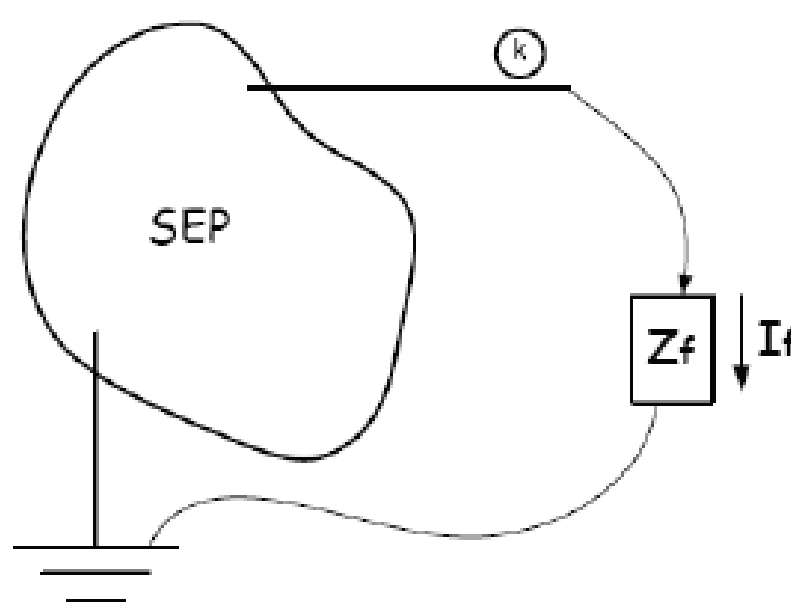
3.2 Análisis de fallas – Redes de Secuencia

- 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

3. Cortocircuito Monofásico

3.2 Análisis de fallas – Redes de Secuencia

- 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:



3. Cortocircuito Monofásico

3.2 Cálculo de corrientes de fallas – Redes de Secuencia

- El procedimiento para el cálculo de las corrientes de falla en sistemas trifásicos balanceados, el modelo del SEP estará definido por la interconexión de sus redes de secuencia según el tipo de falla que habrá de ser analizada.
- El tipo de fallas que con mayor frecuencia experimenta un SEP son las asimétricas o desbalanceadas.

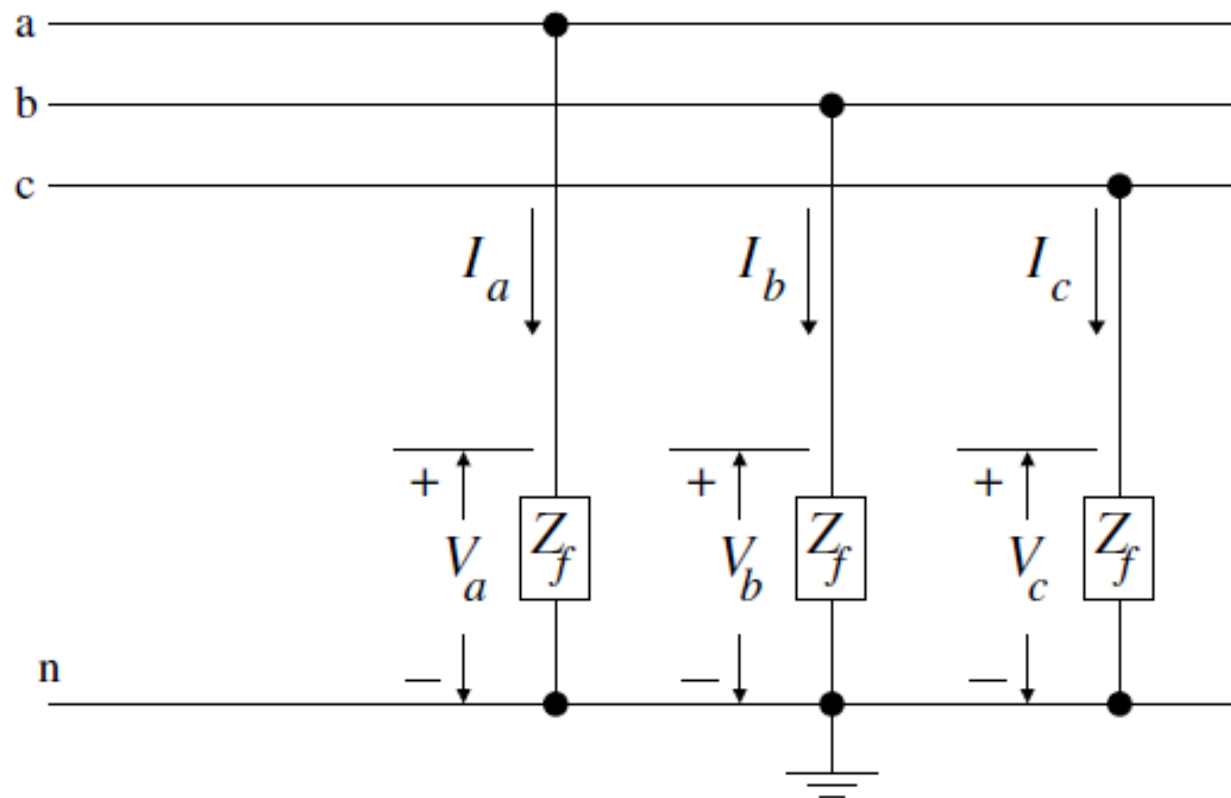
3. Cortocircuito Monofásico

3.2 Cálculo de corrientes de fallas – Redes de Secuencia

- 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

3. Cortocircuito Monofásico

3.2 Redes de secuencia – Falla trifásica a tierra



3. Cortocircuito Monofásico

Redes de secuencia – Falla trifásica a tierra

Condiciones de Falla:

$$V_a = I_a Z_f$$

$$V_b = I_b Z_f$$

$$V_c = I_c Z_f$$

3. Cortocircuito Monofásico

Redes de secuencia – Falla trifásica a tierra

Matrices secuencias:

- En forma matricial:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_f & 0 & 0 \\ 0 & Z_f & 0 \\ 0 & 0 & Z_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

- En función de sus componentes simétricas, se tiene:

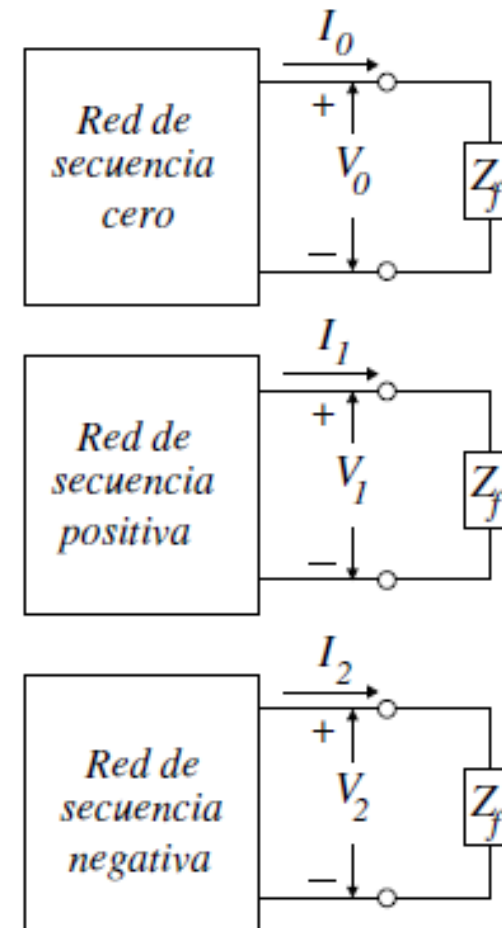
$$\begin{bmatrix} V_{a(0)} \\ V_{a(1)} \\ V_{a(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_f & 0 & 0 \\ 0 & Z_f & 0 \\ 0 & 0 & Z_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a(0)} \\ I_{a(1)} \\ I_{a(2)} \end{bmatrix}$$

3. Cortocircuito Monofásico

Redes de secuencia – Falla trifásica a tierra

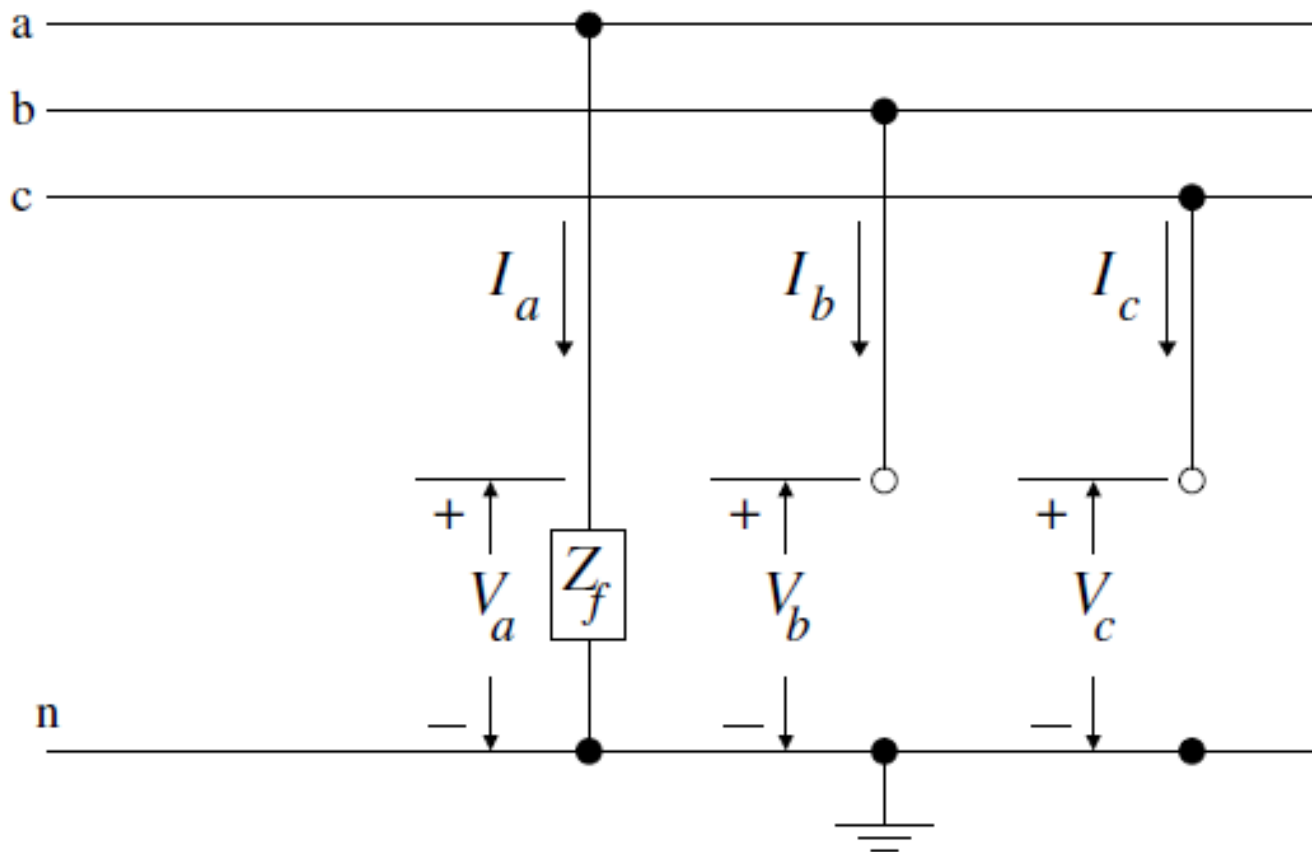
Red de secuencias:

- Las ecuaciones de secuencia de la ecuación se representan graficamente:



3. Cortocircuito Monofásico

Redes de secuencia – Falla línea a tierra



3. Cortocircuito Monofásico

Redes de secuencia – Falla línea a tierra

Condiciones de Falla:

- De la figura se obtiene:

$$I_b = 0, I_c = 0 \wedge V_a = I_a Z_f$$

- De la anterior ecuación $I_b = I_c$, por tanto reemplazando en sus componentes, se tiene:

$$I_{a(0)} + a^2 I_{a(1)} + a I_{a(2)} = I_{a(0)} + a I_{a(1)} + a^2 I_{a(2)}$$

- Si se manipula la ecuación:

$$(a^2 - a) I_{a(1)} = (a^2 - a) I_{a(2)}$$

3. Cortocircuito Monofásico

Redes de secuencia – Falla línea a tierra

- Por tanto: $I_{a(1)} = I_{a(2)}$
- También: $I_b = I_{a(0)} + a^2 I_{a(1)} + a I_{a(2)} = 0$

$$I_{a(0)} + (a + a^2) I_{a(1)} = 0$$

$$I_{a(0)} = - (a + a^2) I_{a(1)}$$

$$I_{a(0)} = I_{a(1)}$$

3. Cortocircuito Monofásico

Redes de secuencia – Falla línea a tierra

- Además por la ecuación de definición:

$$V_a = Z_f I_a$$

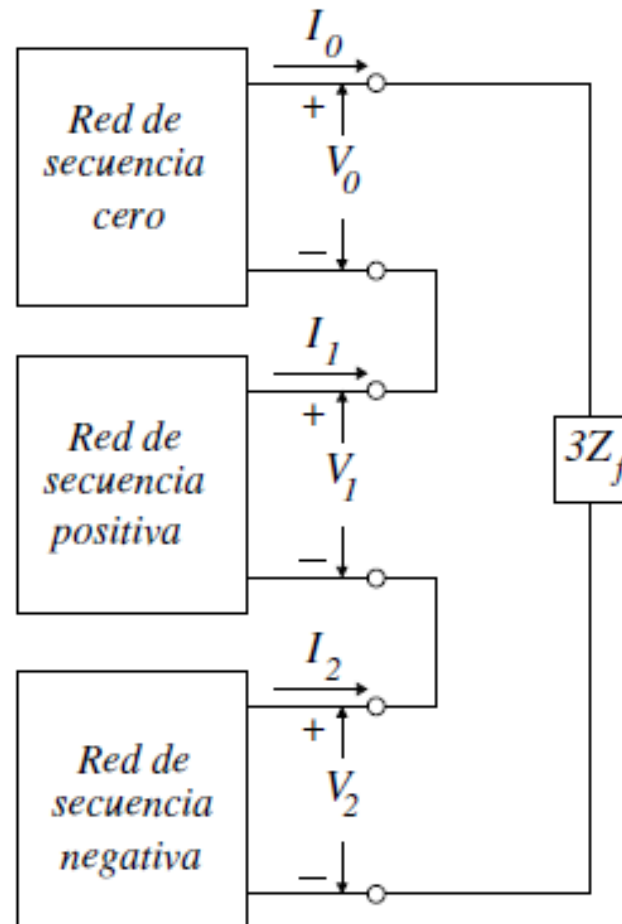
$$V_{a(0)} + V_{a(1)} + V_{a(2)} = Z_f (I_{a(0)} + I_{a(1)} + I_{a(2)})$$

$$V_{a(0)} + V_{a(1)} + V_{a(2)} = 3Z_f I_{a(1)}$$

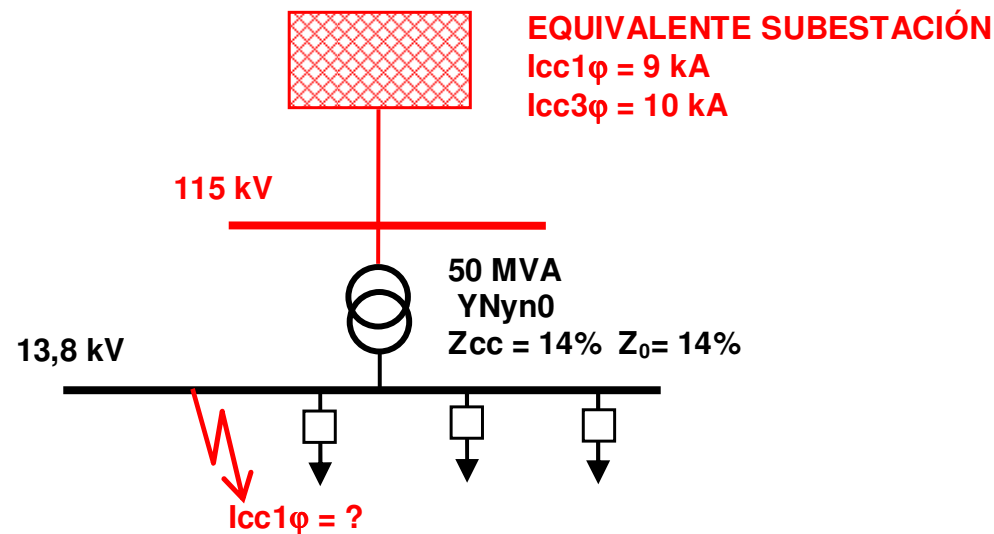
- Reemplazando éstas ecuaciones en conexión de redes de secuencia, obtenemos lo siguiente:

3. Cortocircuito Monofásico

- Interconexión de redes de secuencia para una falla línea a tierra:



3. Cortocircuito Monofásico



- Se llevan todas las impedancias al lado de 13,8 kV
- Impedancia del transformador de potencia
- Para el transformador de potencia

$$Z(\Omega) = Z_{base} \times Z_{pu} \quad Z_{base} = \frac{V^2}{S} = \frac{13,8^2}{50} = 3,81\Omega$$

$$Z_{trafo}(\Omega_{13,8}) = Z_{base} \times Z_{pu} = 3,81 \times 0,14 = 0,5334\Omega$$

3. Cortocircuito Monofásico

- Para el sistema:
- Primero se debe hallar la impedancia de secuencia positiva, la cual solo está relacionada con el nivel de cortocircuito trifásico

$$Z1(\Omega_{115}) = \frac{V}{\sqrt{3} I_{cc3\phi}} = \frac{115000}{\sqrt{3} \times 10000} = 6,64\Omega$$

$$Z0(\Omega_{115}) = \frac{\sqrt{3}V}{I_{cc1\phi}} - Z1(\Omega) - Z2(\Omega) = \frac{\sqrt{3} \times 115000}{9000} - 2 \times 6,64 = 8,85\Omega$$

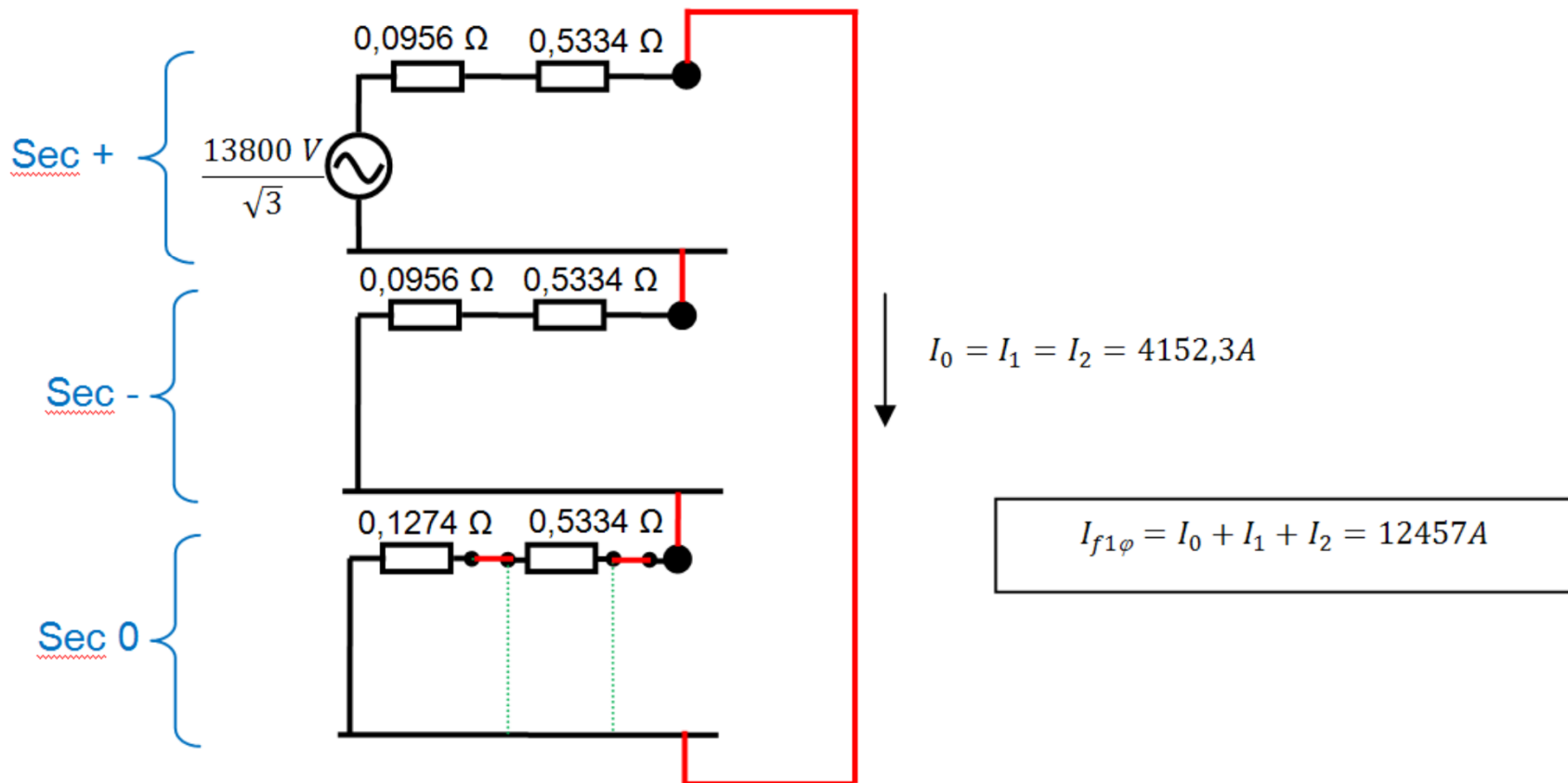
- Ahora, estos resultados se deben pasar a los valores vistos en el lado de 13,8 kV

$$Z1(\Omega_{13,8}) = Z1(\Omega_{115}) \frac{13,8^2}{115^2} = 0,0956\Omega$$

$$Z0(\Omega_{13,8}) = Z0(\Omega_{115}) \frac{13,8^2}{115^2} = 0,1274\Omega$$

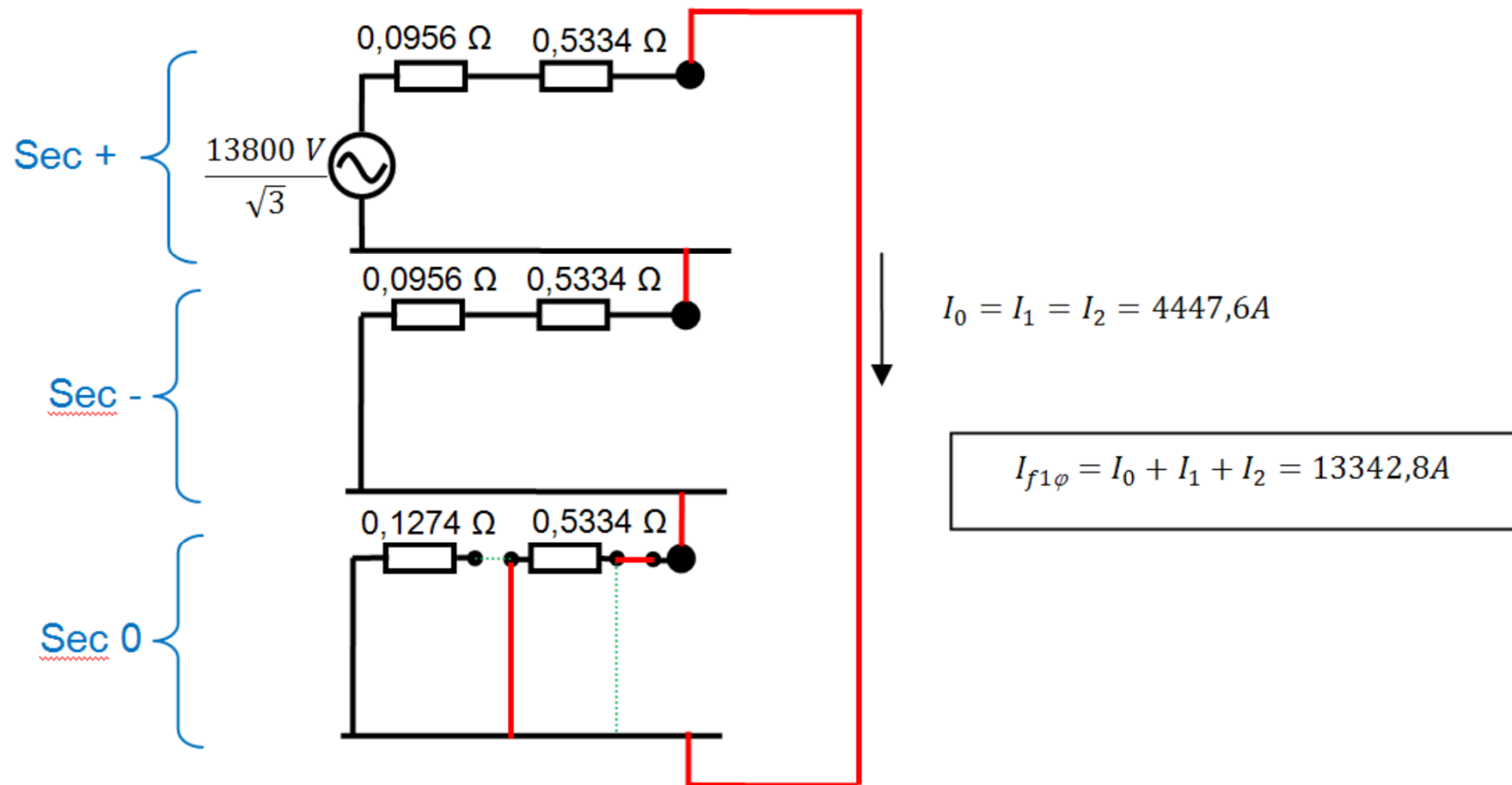
3. Cortocircuito Monofásico

• Transformador en conexión YNyn



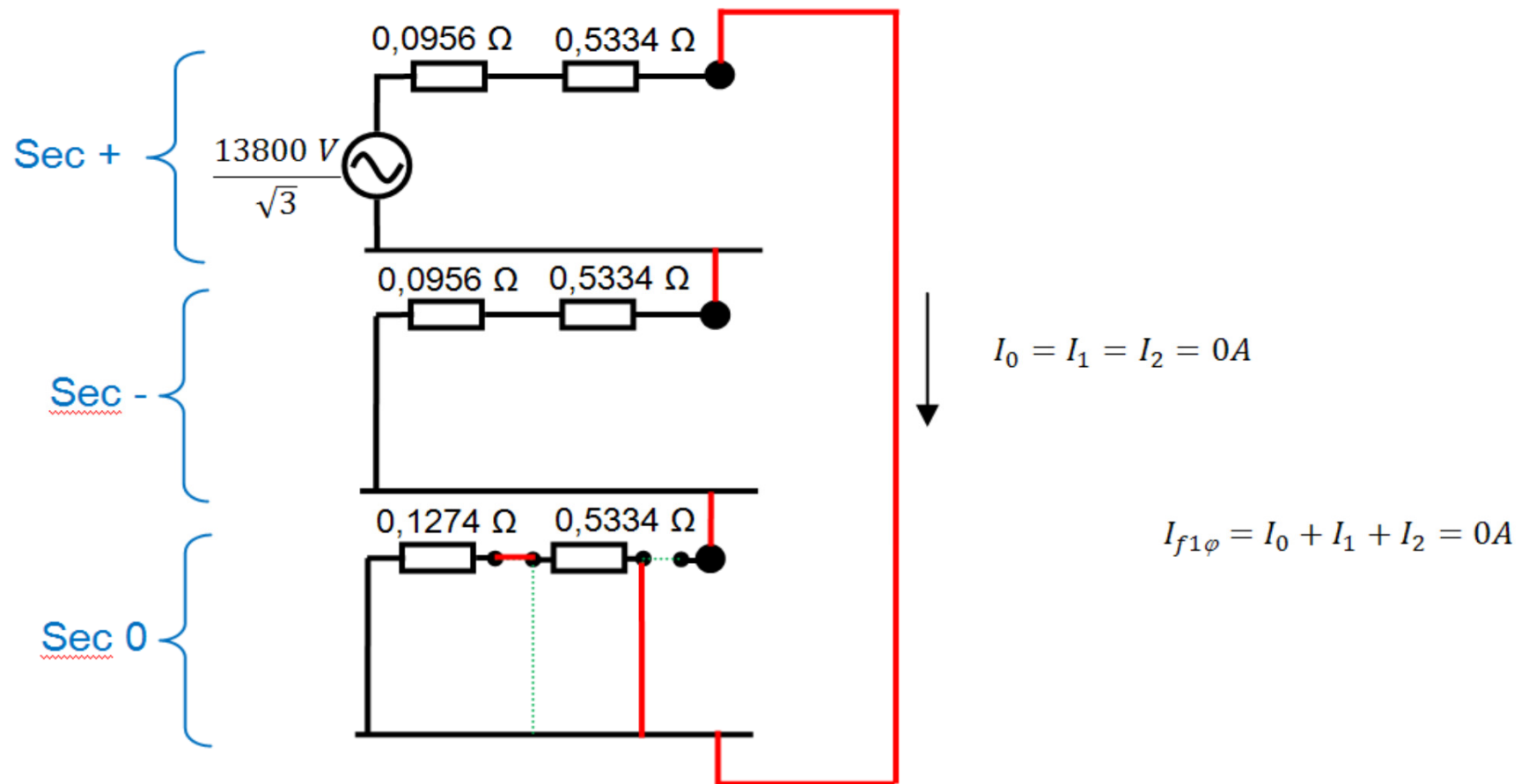
3. Cortocircuito Monofásico

- Transformador en conexión Dyn

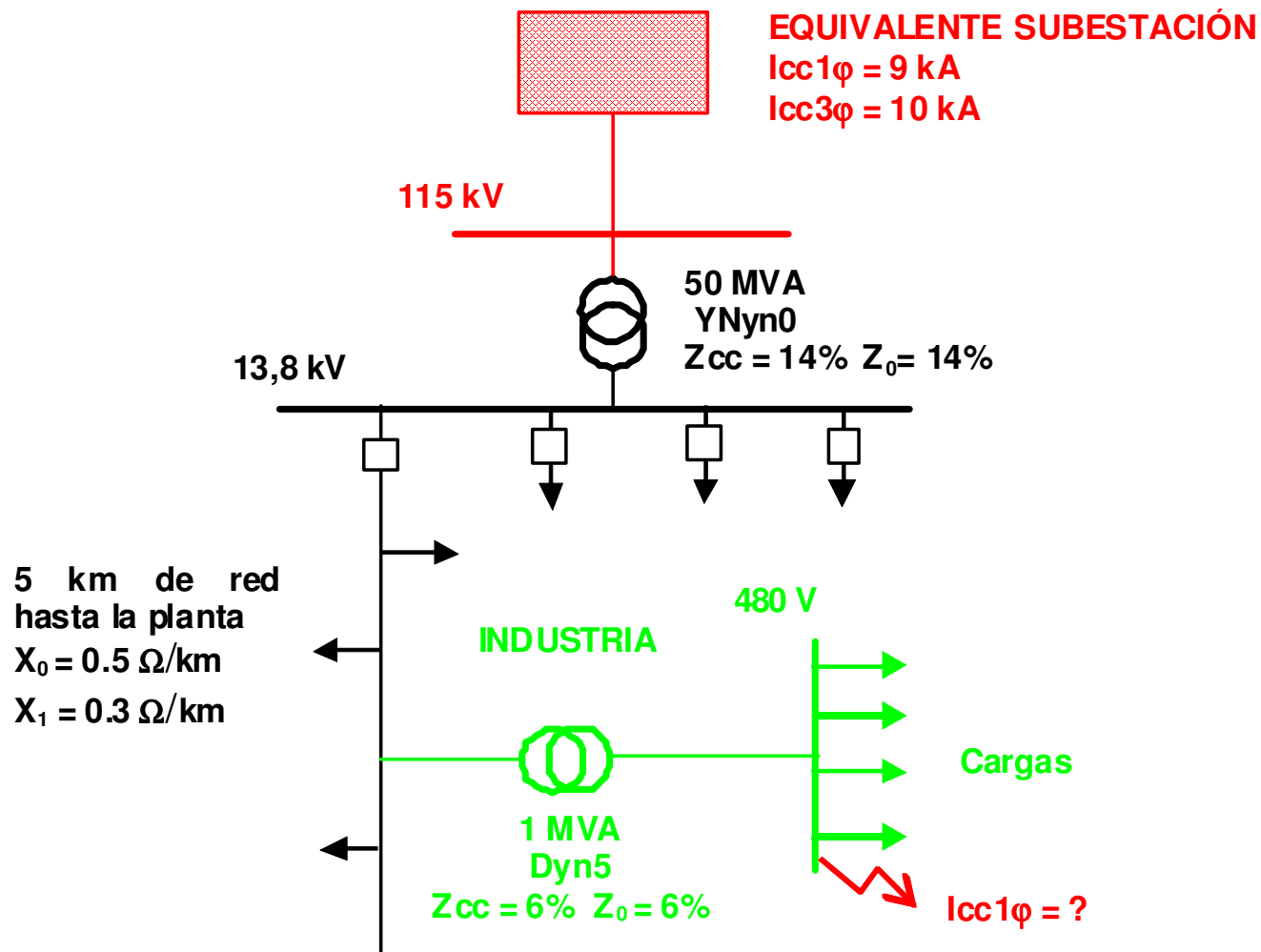


3. Cortocircuito Monofásico

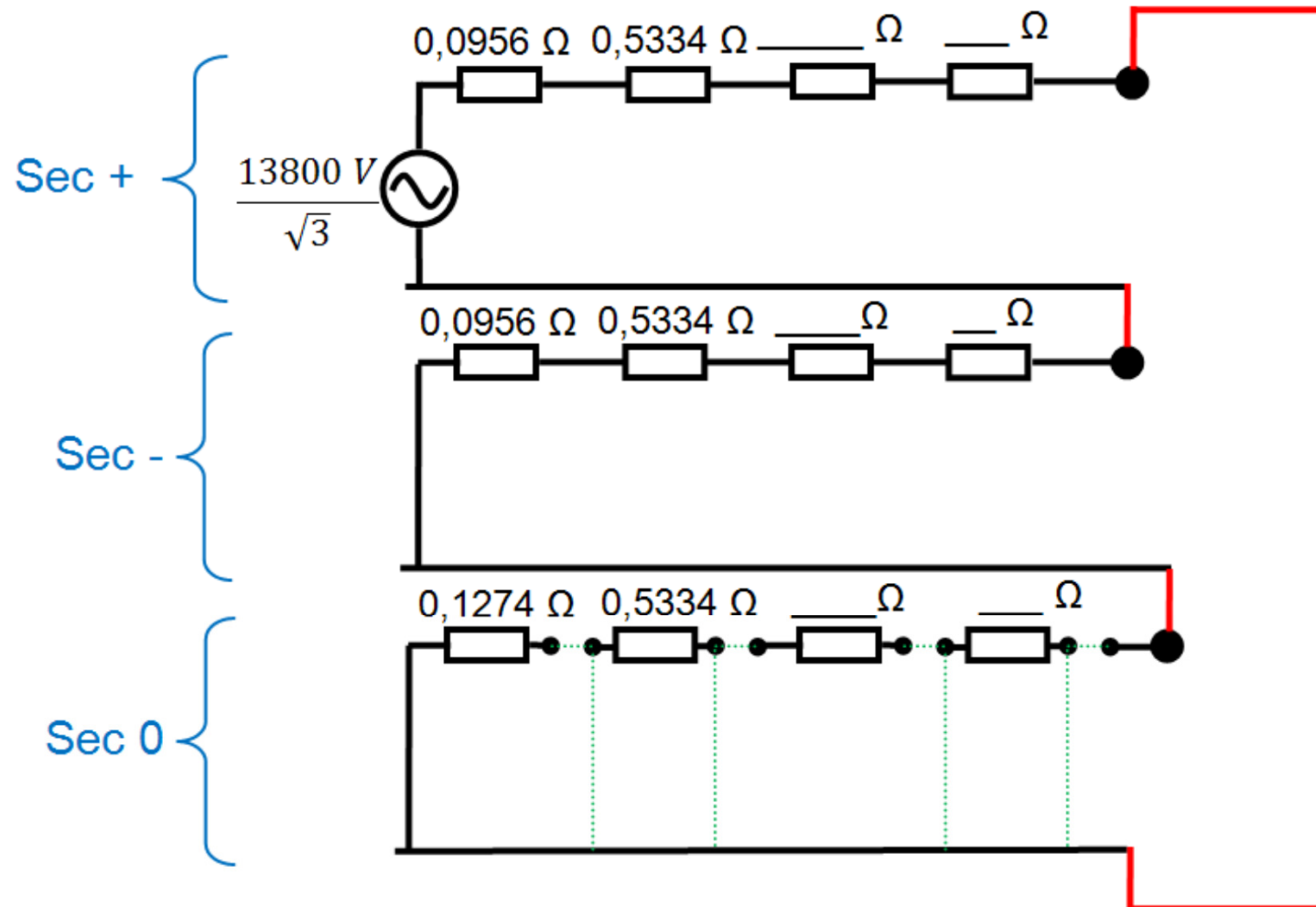
• Transformador en conexión YD



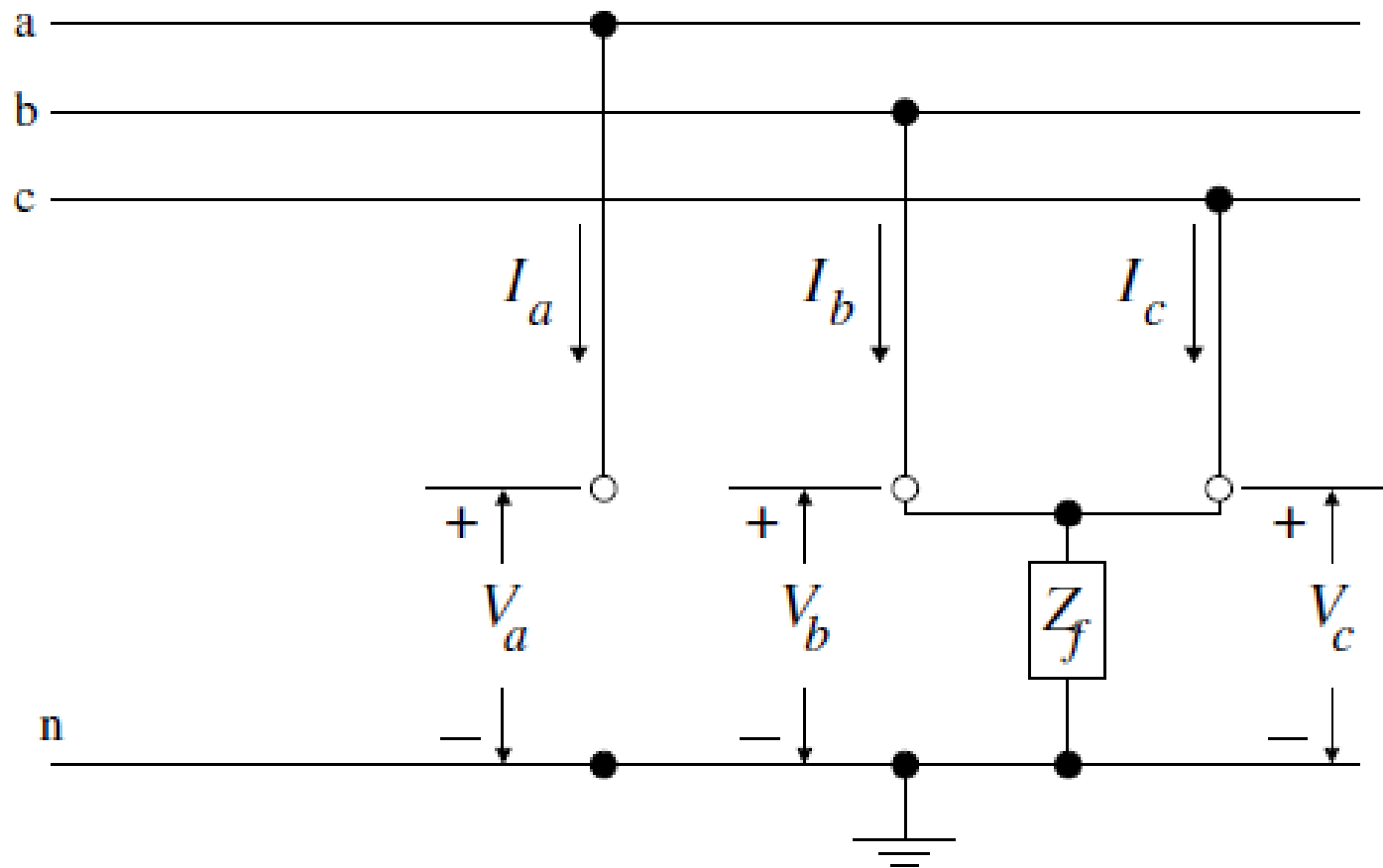
3. Cortocircuito Monofásico



3. Cortocircuito Monofásico



CORTOCIRCUITO BIFÁSICO A TIERRA ***Redes de secuencia – Falla línea-línea a tierra***



CORTOCIRCUITO BIFÁSICO A TIERRA

Redes de secuencia – Falla línea-línea a tierra

Condiciones de Falla:

$$I_a = 0$$

$$V_b = V_c$$

$$V_b = Z_f(I_b + I_c)$$

- De la ecuación la se tiene que:

$$I_{a(0)} + I_{a(1)} + I_{a(2)} = 0$$

CORTOCIRCUITO BIFÁSICO A TIERRA ***Redes de secuencia – Falla línea-línea a tierra***

- De la ecuación $V_b = V_c$ se tiene:

$$V_{a(0)} + a^2 V_{a(1)} + a V_{a(2)} = V_{a(0)} + a V_{a(1)} + a^2 V_{a(2)}$$

- Si se simplifica se tiene:

$$V_{a(1)} = V_{a(2)}$$

- De la ecuación V_b se tiene:

$$V_{a(0)} + a^2 V_{a(1)} + a V_{a(2)} = (I_{a(0)} + a^2 I_{a(1)} + a I_{a(2)} + I_{a(0)} + a I_{a(1)} + a^2 I_{a(2)}) Z_f$$

CORTOCIRCUITO BIFÁSICO A TIERRA ***Redes de secuencia – Falla línea-línea a tierra***

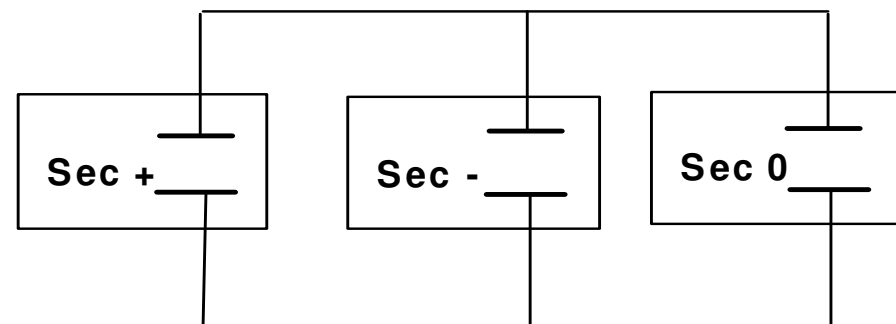
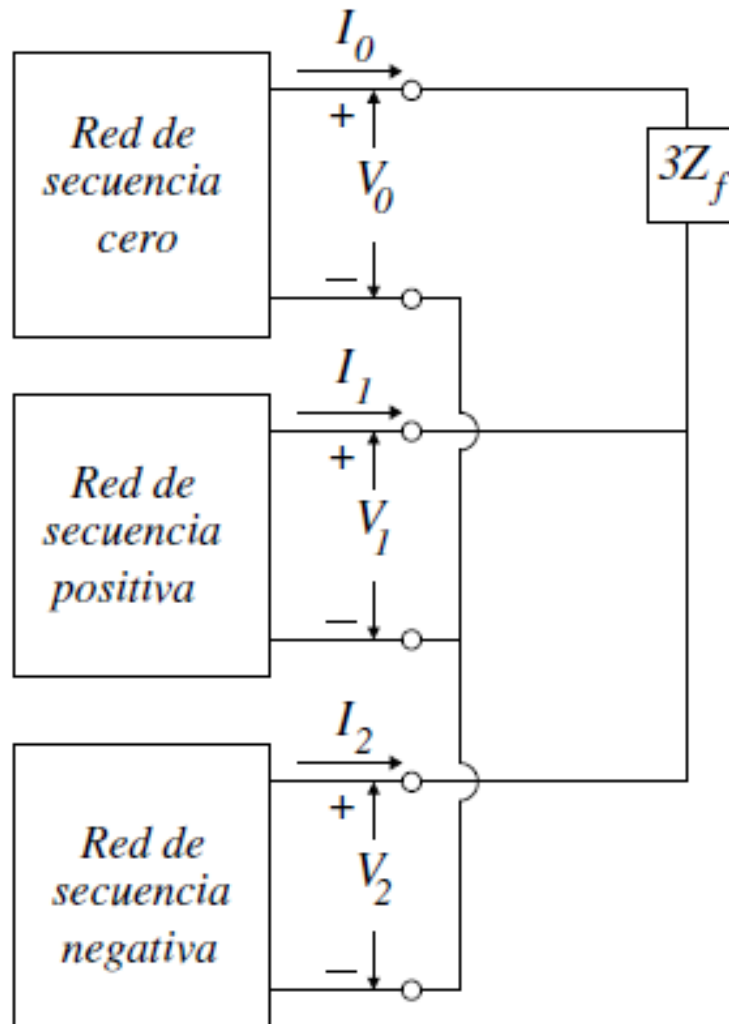
- Que se simplifica:

$$V_{a(0)} - V_{a(1)} = [2I_{a(0)} + (a^2 + a)(I_{a(1)} + I_{a(2)})] Z_f$$

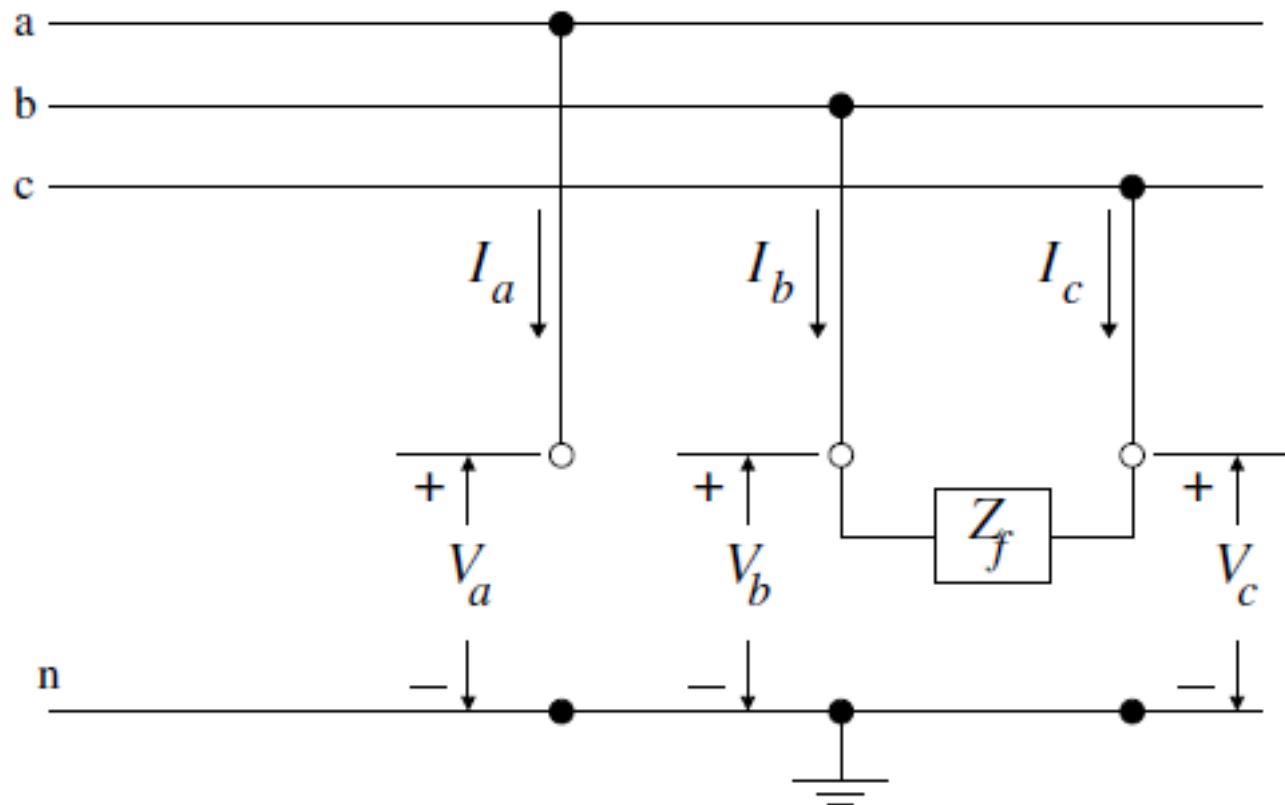
$$V_{a(0)} - V_{a(1)} = 3I_{a(0)}Z_f$$

- Lo mismo que para los casos anteriores, en general y de manera simultánea se deben satisfacer las ecuaciones planteada mediante la interconexión de las redes de secuencia:

CORTOCIRCUITO BIFÁSICO A TIERRA



CORTOCIRCUITO BIFÁSICO A TIERRA ***Redes de secuencia – Falla línea-línea***



CORTOCIRCUITO BIFÁSICO A TIERRA ***Redes de secuencia – Falla línea-línea***

Condiciones de Falla:

$$I_a = 0$$

$$I_b = -I_c$$

$$V_b = Z_f I_b + V_c$$

- De la ecuación la se tiene que:

$$I_{a(0)} + I_{a(1)} + I_{a(2)} = 0$$

CORTOCIRCUITO BIFÁSICO A TIERRA ***Redes de secuencia – Falla línea-línea***

- Y de la ecuación $I_b = -I_c$ se tiene:

$$I_{a(0)} + a^2 I_{a(1)} + a I_{a(2)} = - (I_{a(0)} + a I_{a(1)} + a^2 I_{a(2)})$$

- Al manipular la ecuación anterior:

$$2I_{a(0)} + (a^2 + a) (I_{a(1)} + I_{a(2)}) = 0$$

- Al reemplazar la en la ecuación anterior:

$$3I_{a(0)} = 0$$

- Entonces:

$$I_{a(0)} = 0$$

CORTOCIRCUITO BIFÁSICO A TIERRA ***Redes de secuencia – Falla línea-línea***

- Se puede simplificar la ecuación $I_a + I_b + I_c = 0$ así:

$$I_{a(1)} = -I_{a(2)}$$

- También se puede transformar la ecuación $I_b = -I_c$ en sus componentes de secuencia:

$$V_{a(0)} + a^2 V_{a(1)} + a V_{a(2)} = Z_f (I_{a(0)} + a^2 I_{a(1)} + a I_{a(2)}) + V_{a(0)} + a V_{a(1)} + a^2 V_{a(2)}$$

- Si se simplifica esta ecuación y se manipula se tiene:

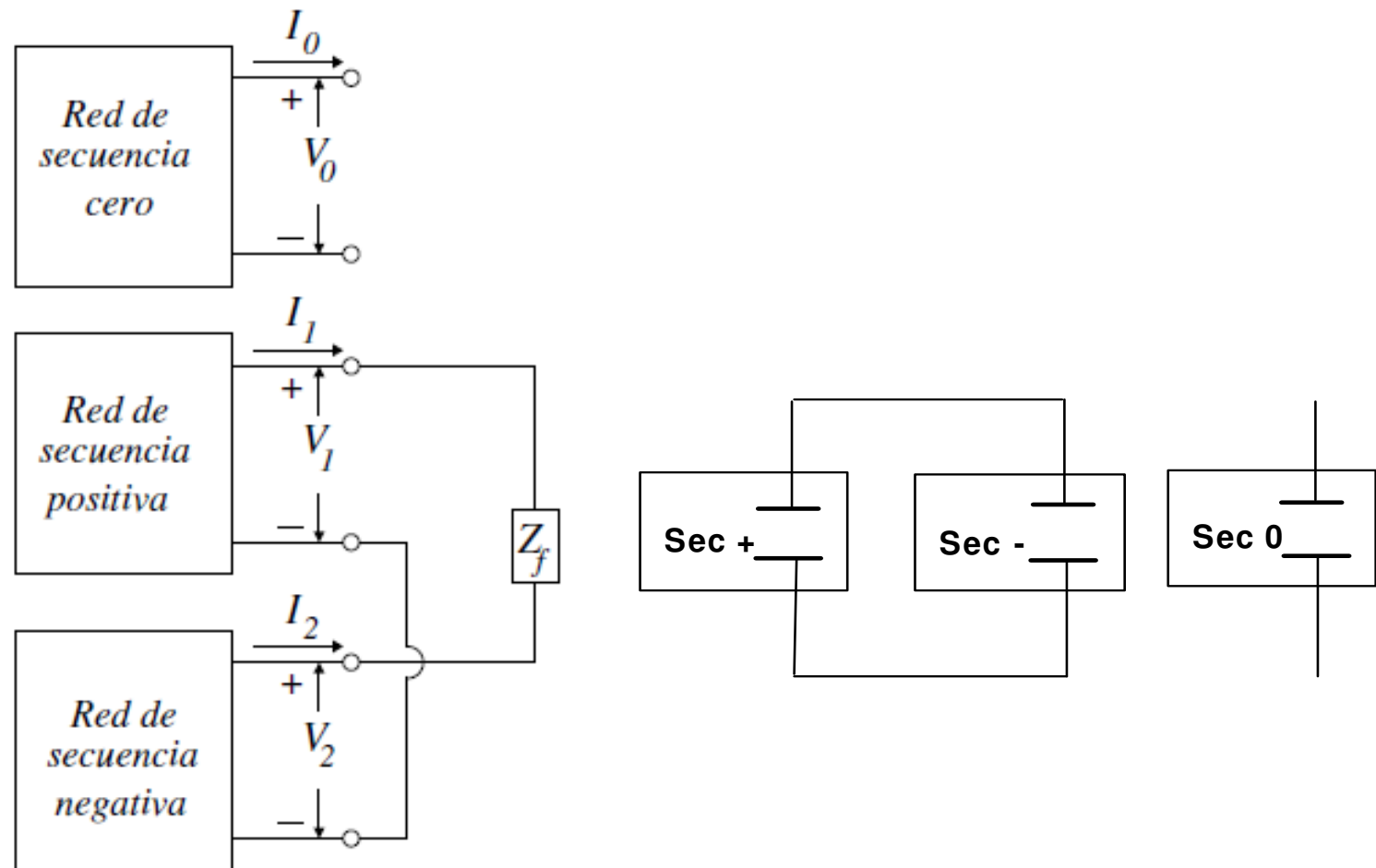
$$(a^2 - a) V_{a(1)} = (a^2 - a) I_{a(1)} Z_f + (a^2 - a) V_{a(2)}$$

CORTOCIRCUITO BIFÁSICO A TIERRA ***Redes de secuencia – Falla línea-línea***

- 0:
$$V_{a(1)} = I_{a(1)}Z_f + V_{a(2)}$$
- En general y de manera simultánea se deben satisfacer las ecuaciones anteriores mediante la conexión de las redes de secuencia:

CORTOCIRCUITO BIFÁSICO

- Interconexión de redes de secuencia para una falla línea a línea:



FIN