

Material Clase

Análisis de Sistemas de Potencia

John E. Candelo-Becerra

Profesor Asociado

2024

6. CORTO CIRCUITO

Estudio de cortocircuitos

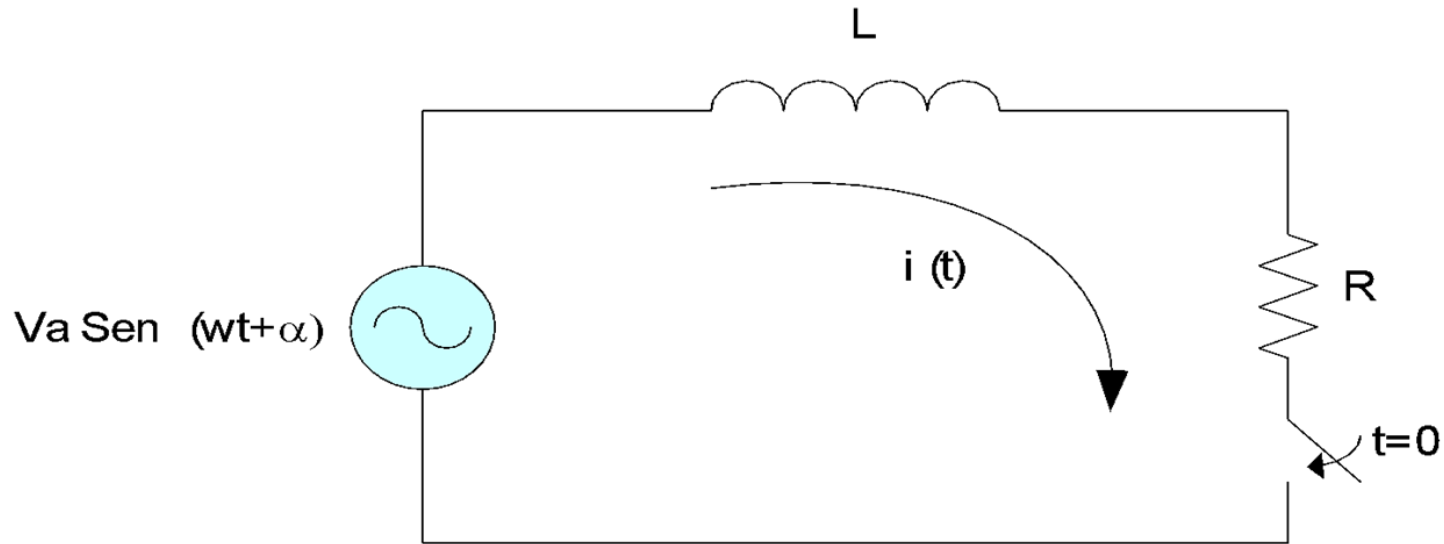
Cortocircuito Simétrico (Balanceado)

- Fallas trifásicas

Cortocircuito Asimétrico (Desbalanceado)

- Fallas línea a tierra (monofásica)
- Fallas línea a línea (bifásicas)
- Fallas línea-línea-tierra (bifásicas a tierra)

Modelo para estudiar cortocircuito



$$e(t) = L \frac{di(t)}{dt} + R * i(t)$$

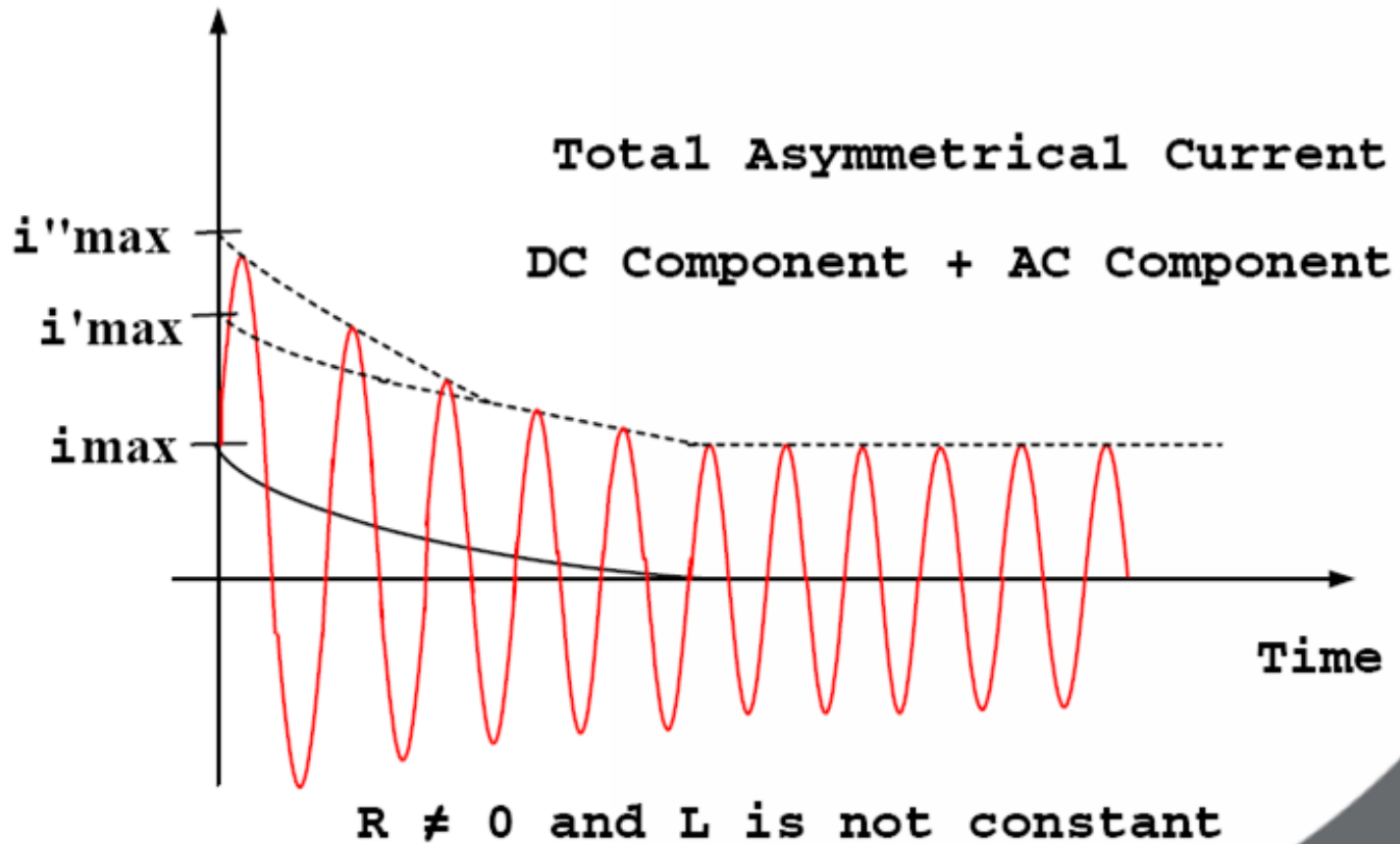
Modelo para estudiar cortocircuito

$$i(t) = \frac{V_a}{Z} * [\text{Sen}(wt + \alpha - \phi)] - \text{Sen}(\alpha - \phi) * e^{-\left(\frac{R}{L}\right) \cdot t}$$

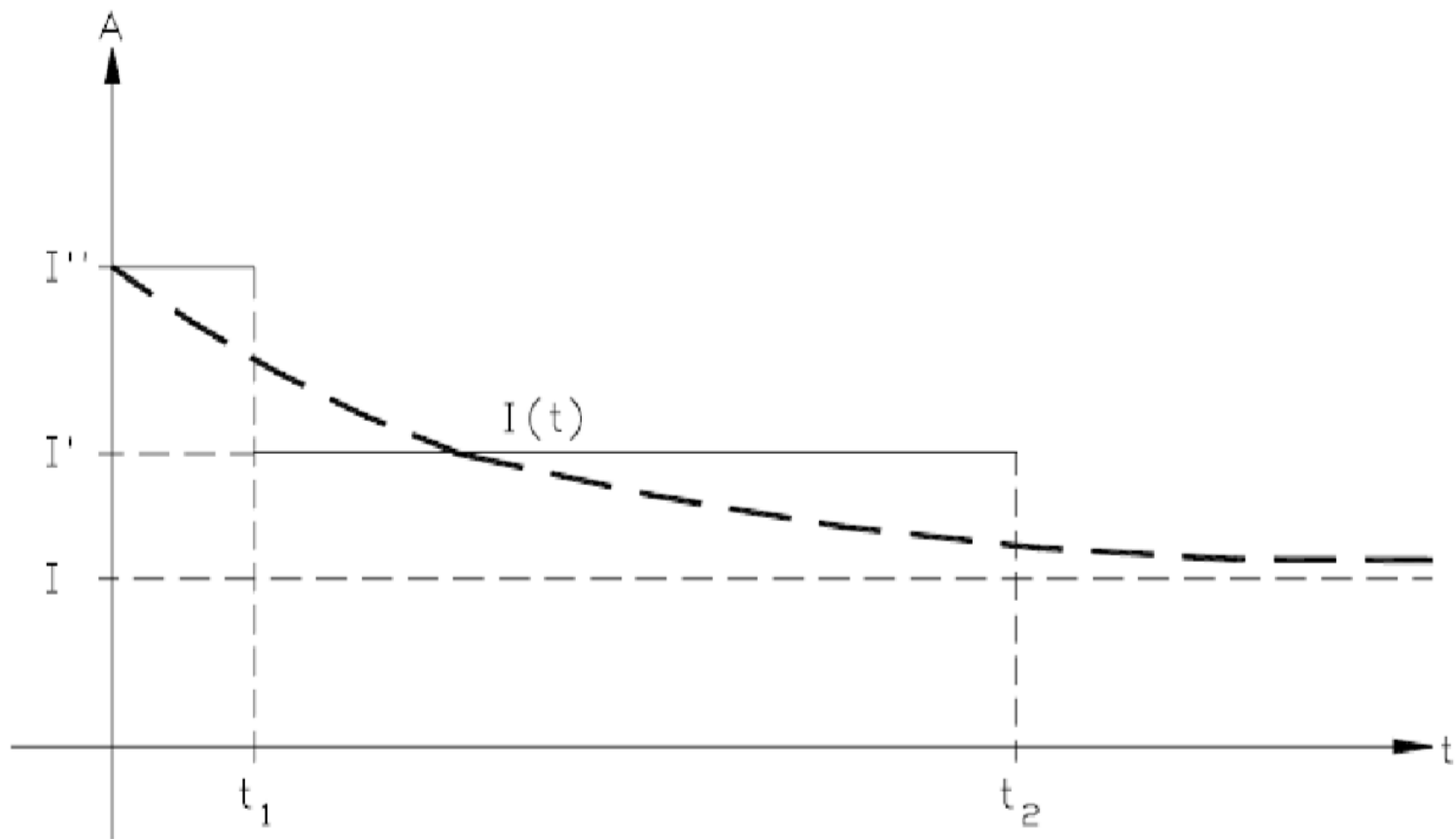
$$Z = \sqrt{R^2 + w^2 * L^2}$$

$$\phi = \text{Tan}^{-1} \left(\frac{w * L}{R} \right)$$

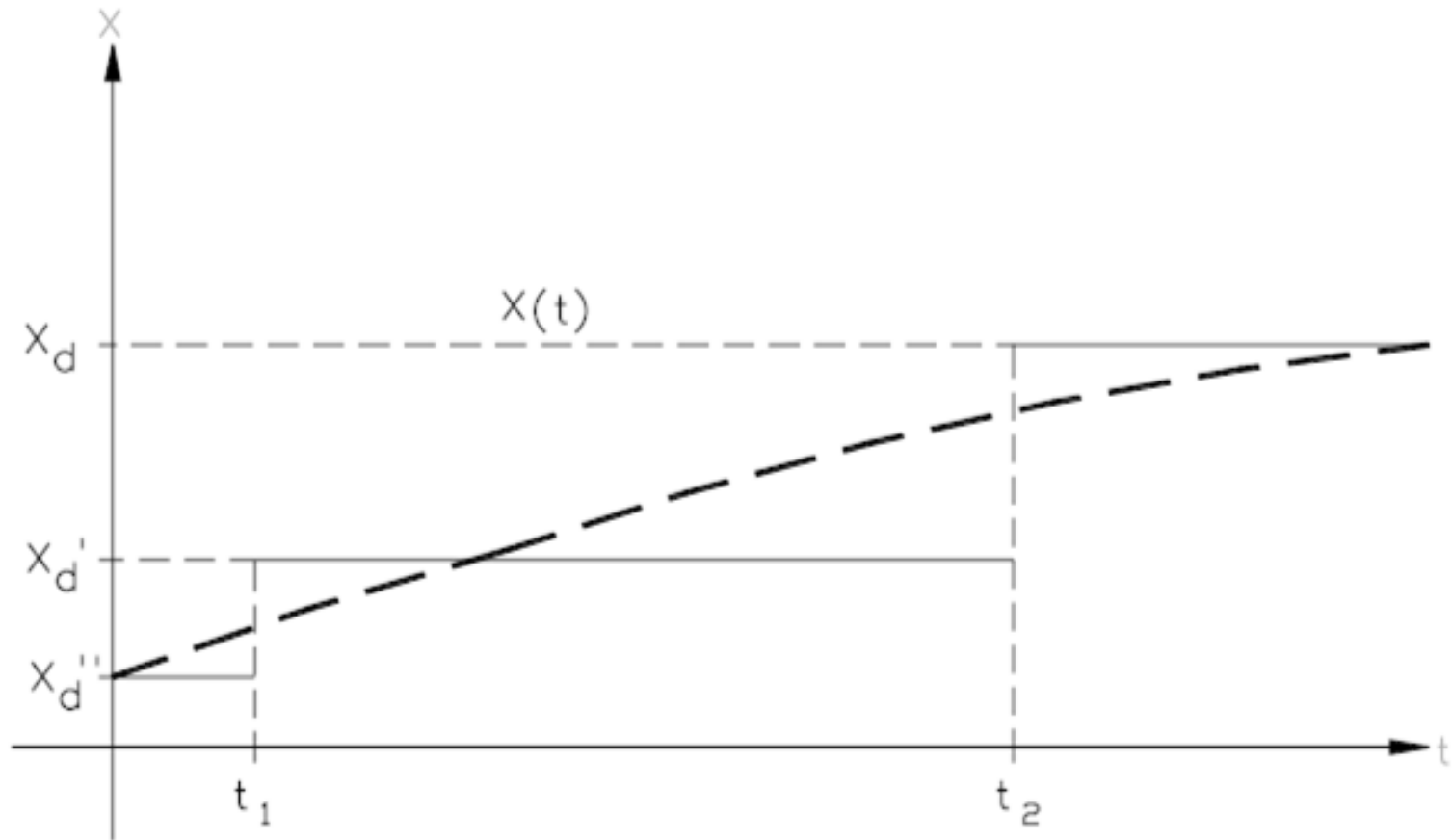
Corriente Asimétrica



Variación de la corriente en el tiempo durante la falla



Variación de la reactancia del generador durante la falla



Tiempo y magnitud de corrientes de falla

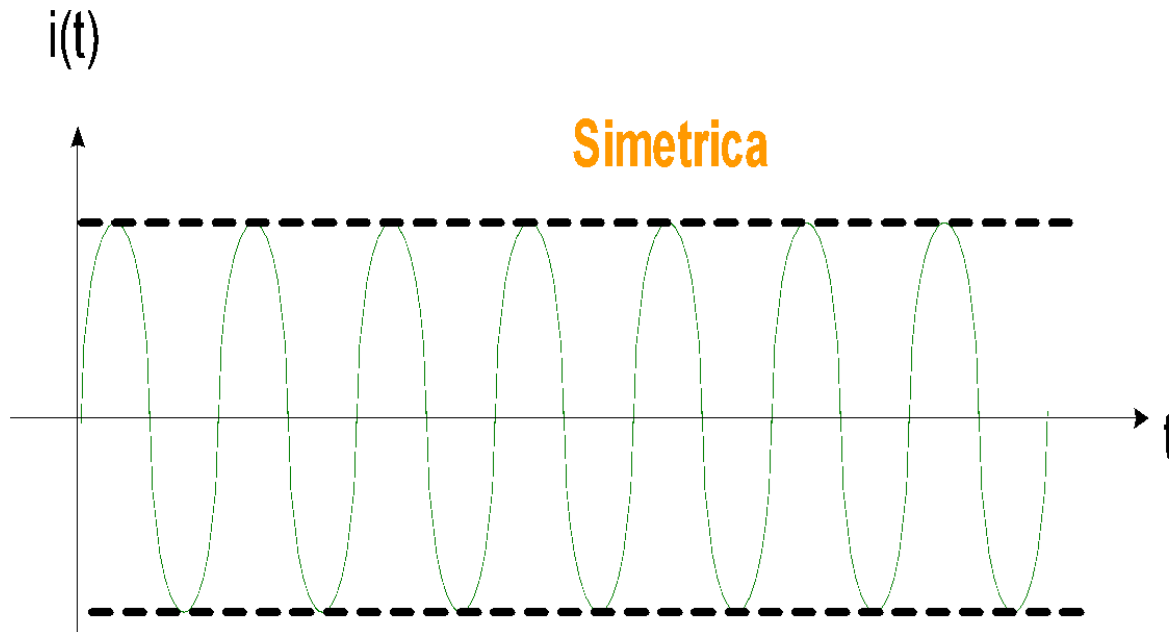
Corriente	Tiempo Aproximado	Magnitud (RMS)
Subtransitoria	0.01 – 0.1 seg	5-10 * Inom
Transitoria	0.15 – 1 seg	2-6 * Inom
Permanente	>1 seg	0.5 – 2 * Inom

Corriente Simétrica

El valor inicial de la corriente varía con ϕ y α :

1. Si $\alpha - \phi = 0$ no se presenta componente de DC.

$$i(t) = \frac{V_a}{Z} \cdot [\text{Sen}(wt + \alpha - \phi)] - \text{Sen}(\alpha - \phi) \cdot e^{-\left(\frac{R}{L}\right)t}$$

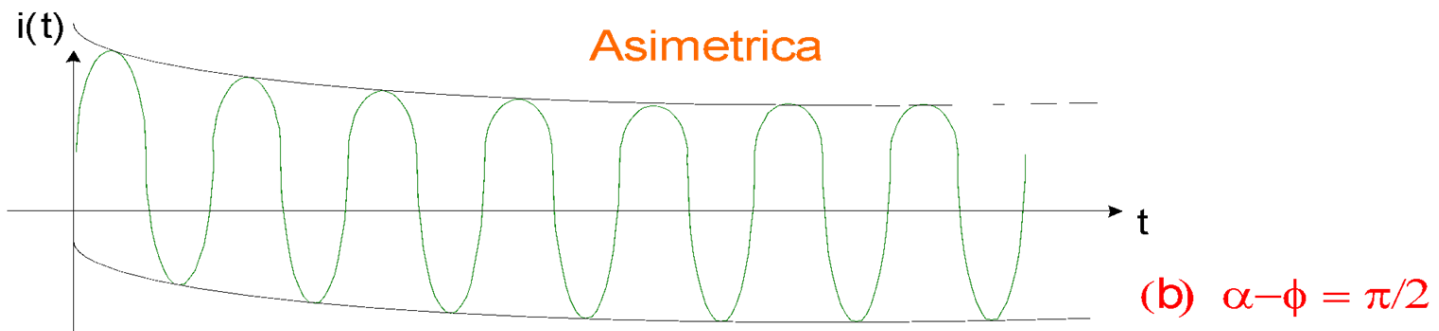


(a) $\alpha - \phi = 0$

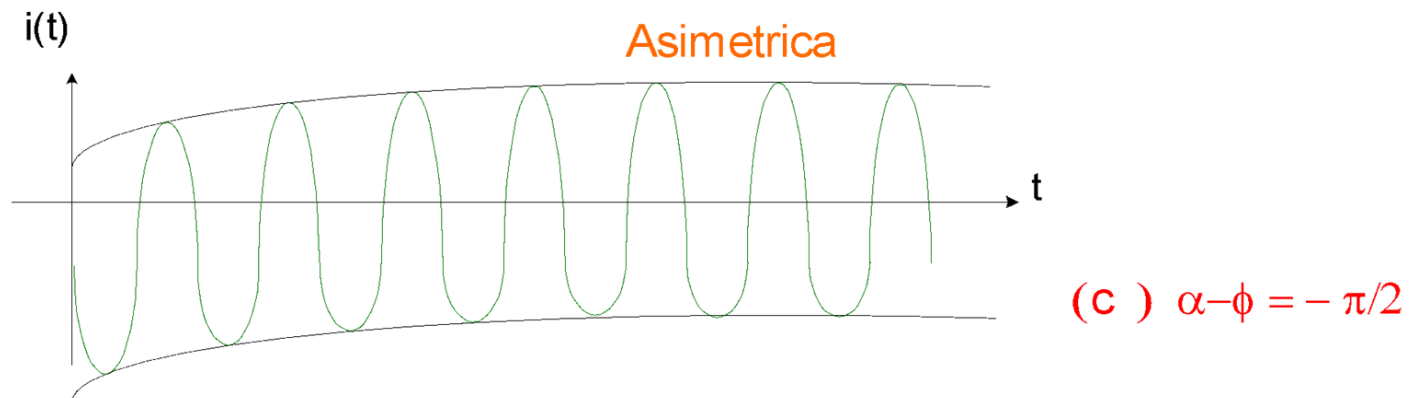
Corriente asimétrica

2. Si $\alpha - \phi = \pi/2$ se presenta componente de DC.

$$i(t) = \frac{Va}{z} \cdot [\text{Sen}(wt + \alpha - \phi)] - \text{Sen}(\alpha - \phi) \cdot e^{-\left(\frac{R}{L}\right)t}$$



3. Si $\alpha - \phi = -\pi/2$ se presenta componente de DC.



Modelo de elementos

Modelo de elementos

Para un estudio de cortocircuito se deben modelar los siguientes elementos

- Generadores
- Transformadores
- Líneas
- Compensadores
- Motores
- Redes de distribución
- Otros

Modelo del Generador

El generador se comporta en forma dinámica y cambia su impedancia y tensión interna en cada uno de los fenómenos presentados en el sistema de potencia. Los modelos representados para el generador son:

Subtransitorio (Muy Corto Tiempo) X_d''

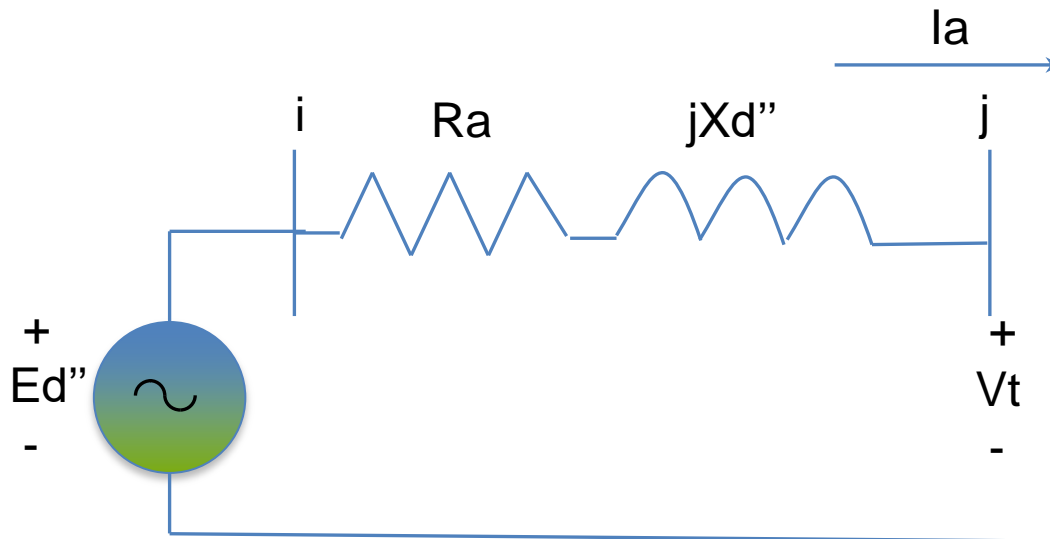
Transitorio (Corto Tiempo) X_d'

Permanente (Largo Tiempo) X_d

$$X_d > X_d' > X_d''$$

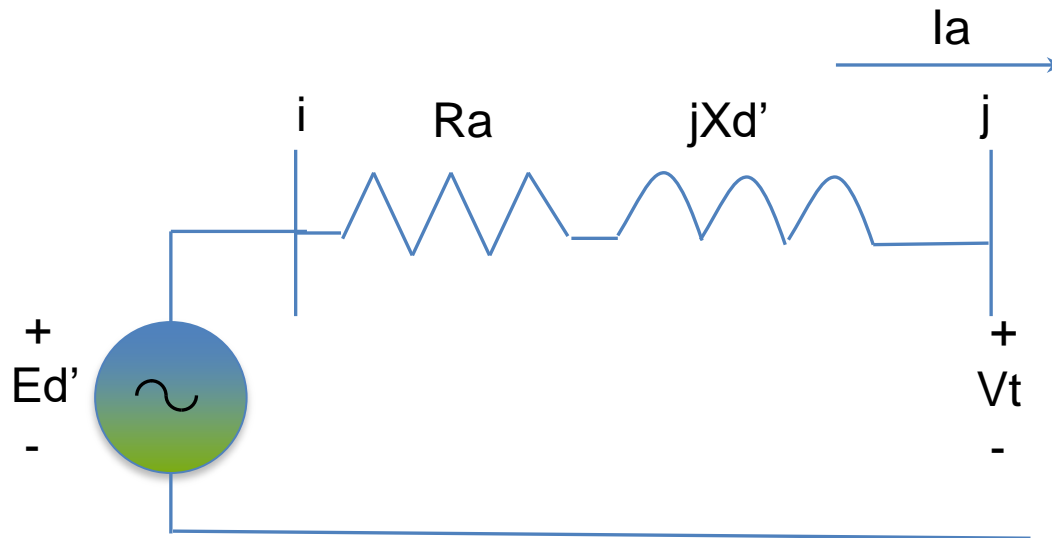
Modelo del Generador

- **Modelo subtransitorio:** compuesto de la reactancia subtransitoria X_d'' en serie con la resistencia y la tensión interna subtransitoria E_d''



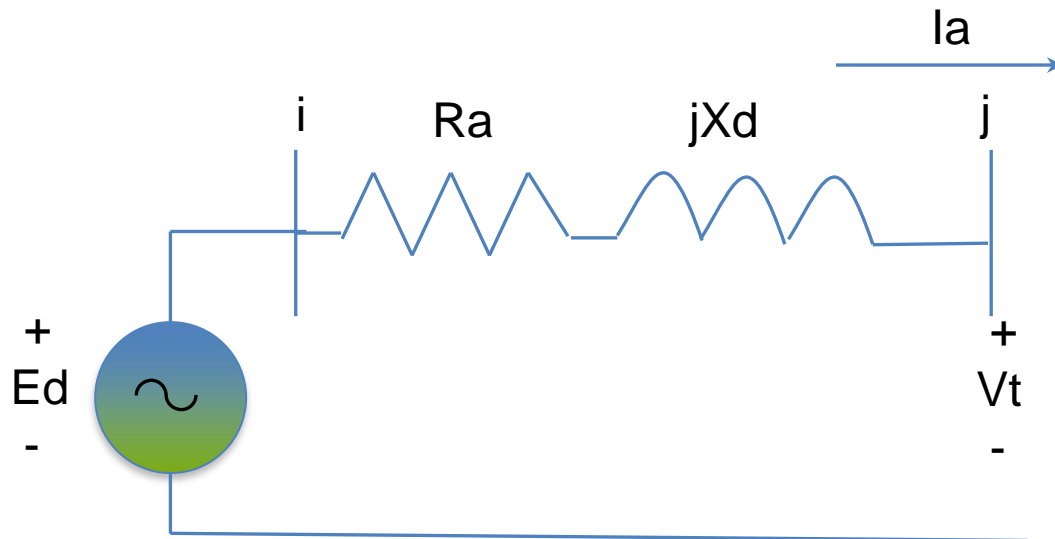
Modelo del Generador

- **Modelo transitorio:** compuesto de la reactancia transitoria X_d' en serie con la resistencia y la tensión interna transitoria E_d'



Modelo del Generador

- **Modelo permanente:** compuesto de la reactancia X_d en serie con la resistencia y la tensión interna permanente E_d

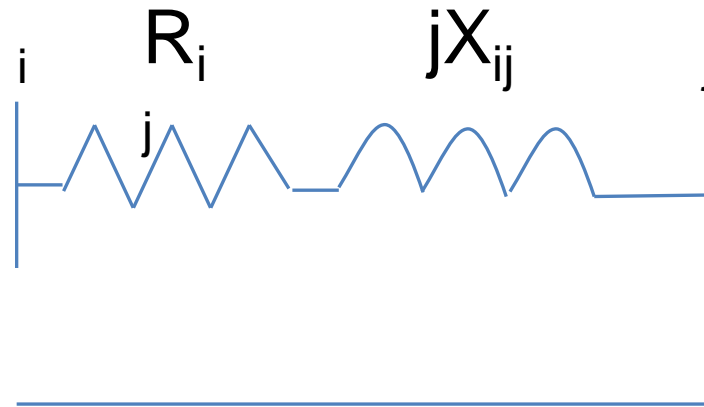


Modelo de elementos

Transformador

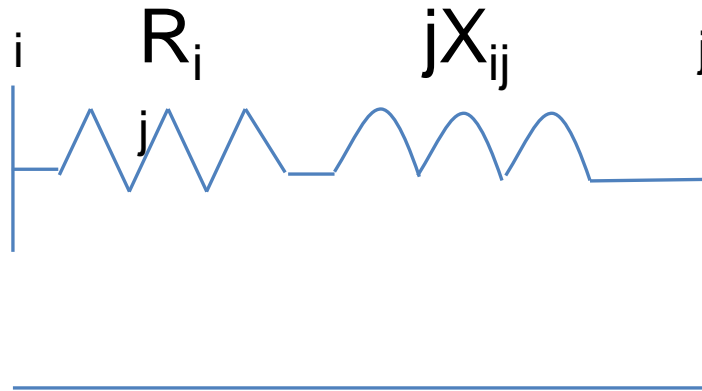
El transformador se puede modelar por su impedancia equivalente referida y reducida.

La reactancia y resistencia del circuito magnético puede ser despreciada



Modelo de Líneas

- Líneas de transmisión y distribución
 - Modelo de parámetros concentrados reducido; se asume que solo interviene la impedancia en serie.



Modelo del Motor Síncrono

El motor se comporta en forma dinámica y cambia su impedancia y tensión interna en cada uno de los fenómenos presentados en el sistema de potencia. La acción de la cantidad de corriente que inyecta el motor al sistema dependerá de la velocidad. Los modelos representados para el motor son:

Subtransitorio

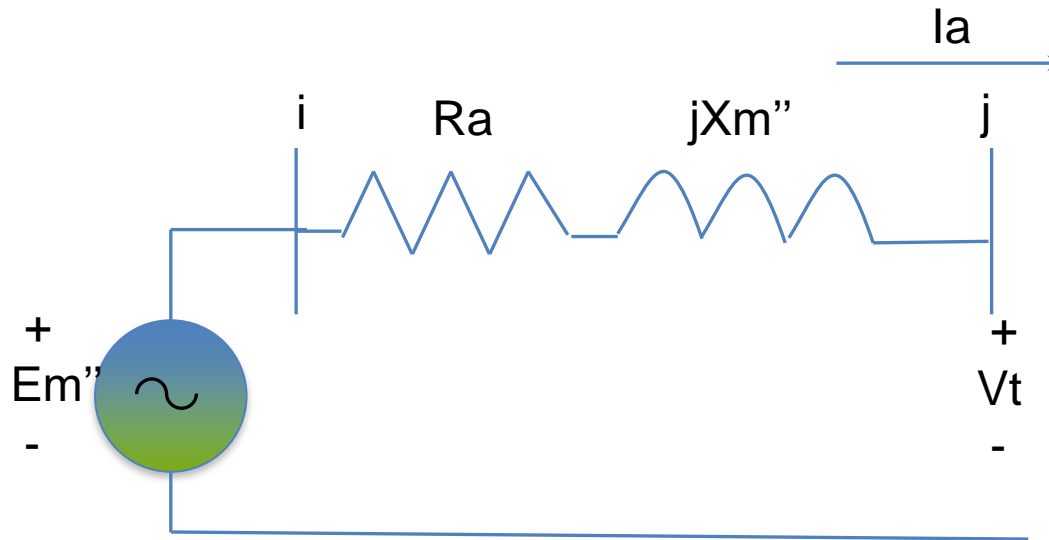
Transitorio

Permanente

$$X_d > X_d' > X_d''$$

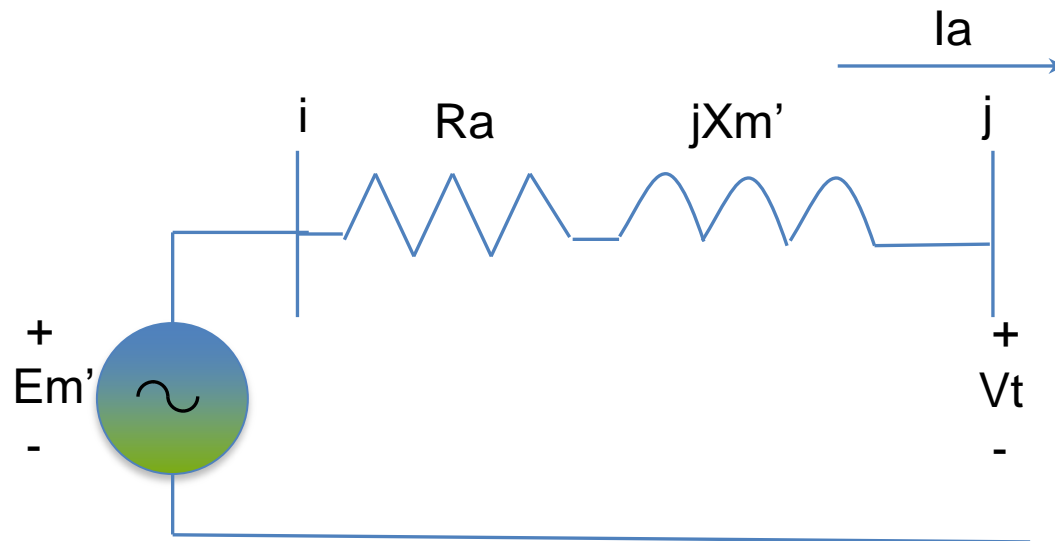
Modelo del Motor Síncrono

- **Modelo subtransitorio:** compuesto de la reactancia subtransitoria X_m'' en serie con la resistencia y la tensión interna subtransitoria E_m''



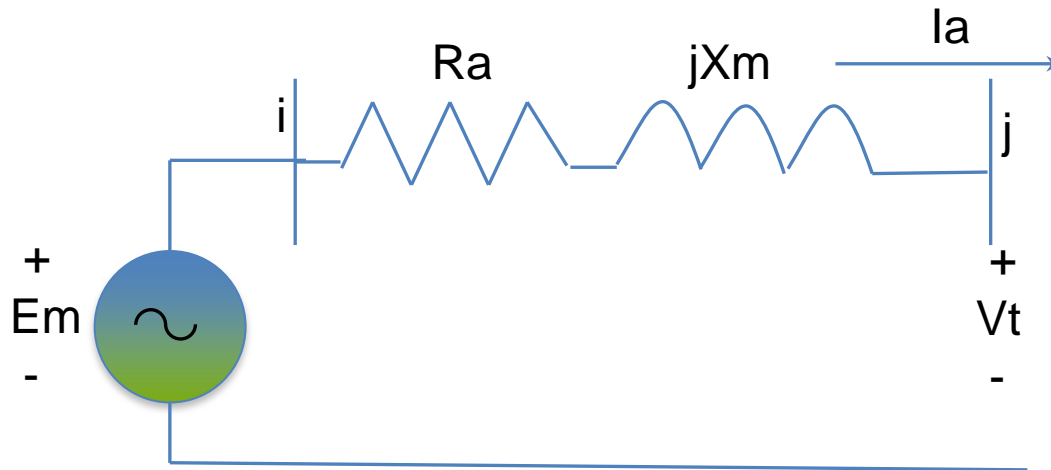
Modelo del Motor Sincrono

- **Modelo transitorio:** compuesto de la reactancia transitoria X_m' en serie con la resistencia y la tensión interna transitoria E_m'



Modelo del Motor Asíncrono

- Se puede asumir que un grupo de motores entrega una corriente alta al sistema durante el cortocircuito, por lo cual su modelo consta de



- La resistencia se puede despreciar por ser pequeña.

Modelo del Motor Asíncrono

- De acuerdo a la norma **IEC 60909**, el aporte de cortocircuito de los motores asíncronos conectados al barraje de falla puede despreciarse cuando cumplen que el aporte total de todos los motores I_m es:

$$I_m \leq 0.01 * I_{red}$$

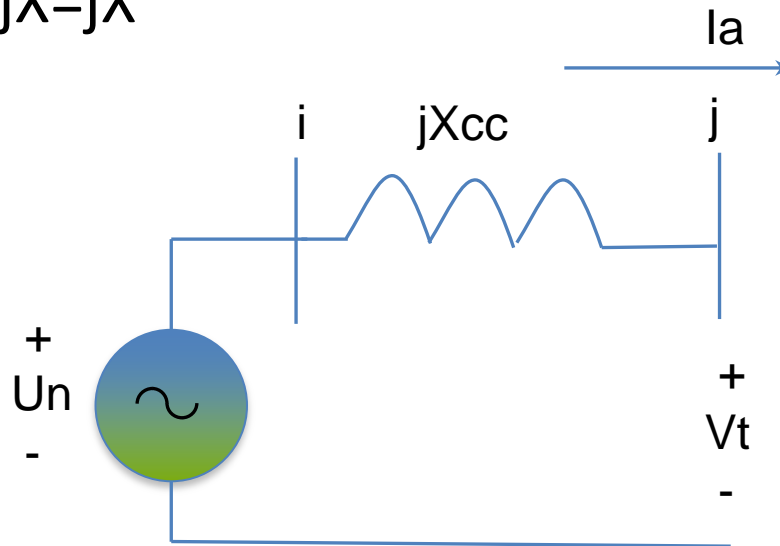
Modelo de Redes

Las empresas de distribución están autorizadas para el suministro de corrientes de cortocircuito y de impedancias en los puntos de conexión. Los datos que normalmente suministran son:

- Tensión de operación nominal U_n
- Corriente de cortocircuito simétrica en el punto de conexión I_{cc}''
- Potencia de cortocircuito simétrica inicial S_{cc}
- Magnitud de la Impedancia de cortocircuito Z_{cc}

Modelo de Redes

- Debido a que la resistencia se puede despreciar y $Z_{cc}=R+jX=jX$



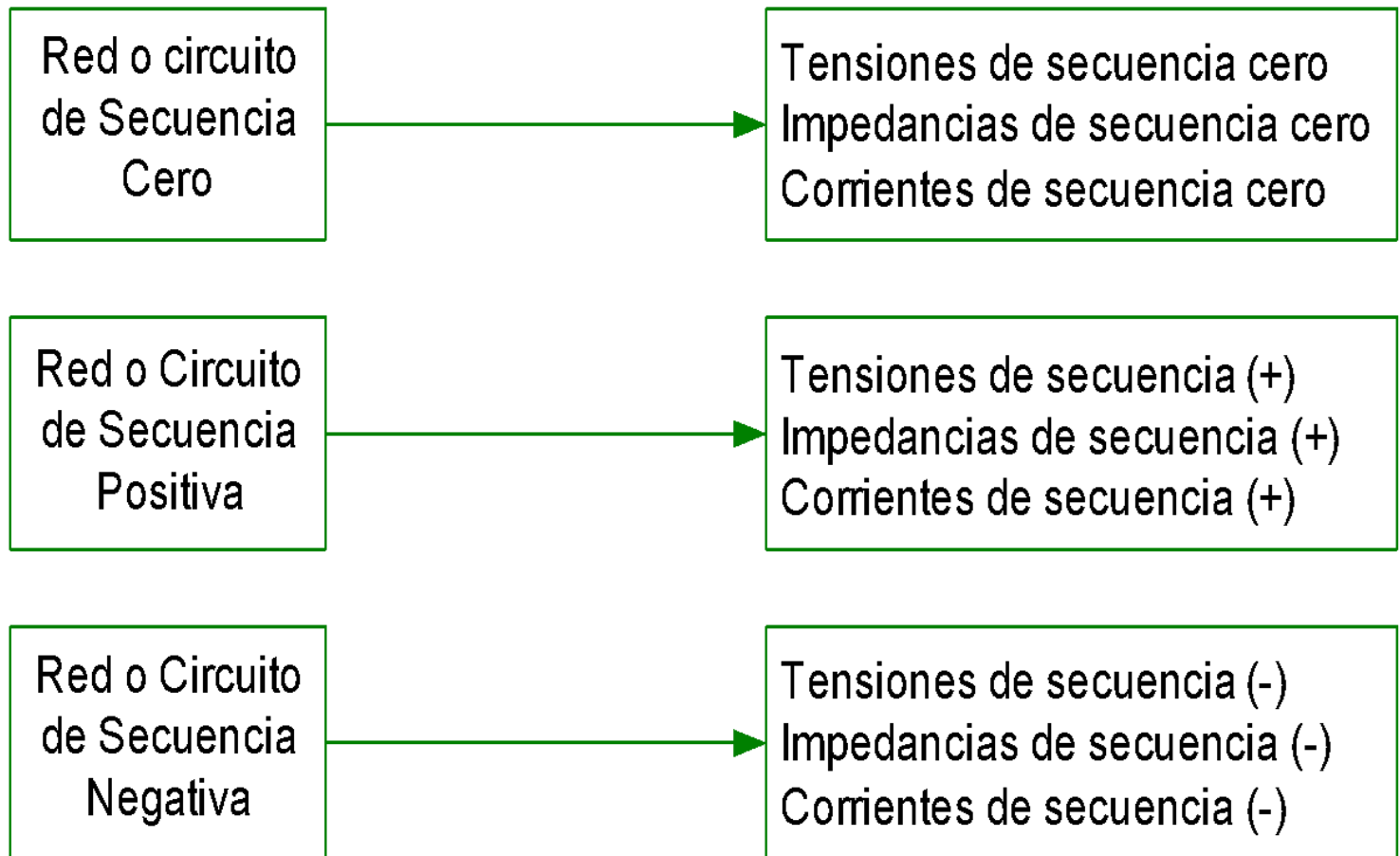
También se puede asumir que la resistencia es 0.1 veces la reactancia $R/X=0.1$ y la reactancia es $0.995 * Z_{cc}$

Análisis Prefalla

- Este tipo de estudio se lleva a cabo para determinar la tensión en un punto de la red antes de ocurrir la falla.

4. REDES DE SECUENCIA

Redes de Secuencia



Tensiones de fase y secuencia

- Conversión de tensiones de secuencias a tensiones de fases

$$\begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Va_0 \\ Va_1 \\ Va_2 \end{bmatrix}$$

- Conversión de tensiones de fases a tensiones de secuencias

$$\begin{bmatrix} Va_0 \\ Va_1 \\ Va_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix}$$

Corrientes de fase y secuencia

- Conversión de corrientes de secuencias a corrientes de fases

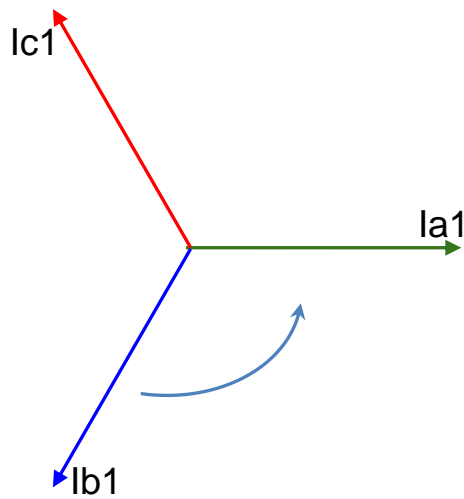
$$\begin{bmatrix} Ia \\ Ib \\ Ic \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Ia_0 \\ Ia_1 \\ Ia_2 \end{bmatrix}$$

- Conversión de corrientes de fases a corrientes de secuencias

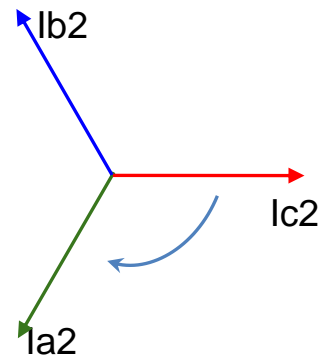
$$\begin{bmatrix} Ia_0 \\ Ia_1 \\ Ia_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Ia \\ Ib \\ Ic \end{bmatrix}$$

Corriente de secuencia

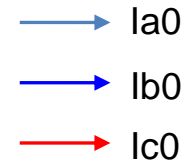
Secuencia positiva



Secuencia negativa



Secuencia cero



Modelos de redes de secuencia

Modelo de elementos

Para un estudio de cortocircuito por medio de redes de secuencia, se representa cada uno de los elementos del sistema

- Generadores
- Transformadores
- Líneas
- Motores

Modelo del Generador

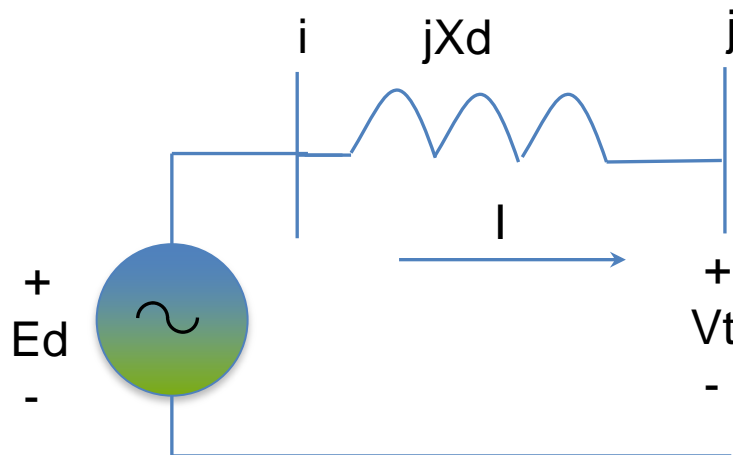
Los modelos mostrados para cada generador consistían en: Subtransitorio (Muy Corto Tiempo) X_d'' , Transitorio (Corto Tiempo) X_d' , Permanente (Largo Tiempo) X_d

Un sistema considera cada uno de estos elementos pero de acuerdo a las redes de secuencia

- Positiva
- Negativa
- Cero

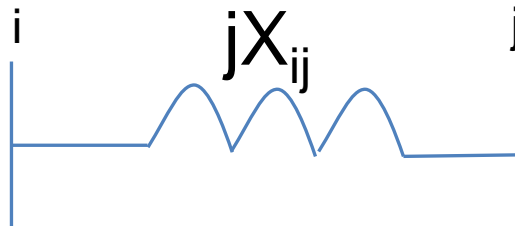
Modelo del Generador

- Secuencia positiva: corresponde al valor de la reactancia de acuerdo al estudio que se realice, transitorio, subtransitorio y permanente
- Secuencia negativa: en la mayoría de casos es igual al valor de secuencia positiva. Para máquinas de vapor o diesel este valor puede cambiar.
- Secuencia cero: los valores se representan de acuerdo al tipo de generador



Modelo de Líneas

- Secuencia positiva: corresponde al valor de la reactancia de acuerdo al estudio que se realice, transitorio, subtransitorio y permanente
- Secuencia negativa: es igual a la de secuencia positiva
- Secuencia cero: la impedancia de secuencia cero, es 2.5 la impedancia de secuencia positiva.



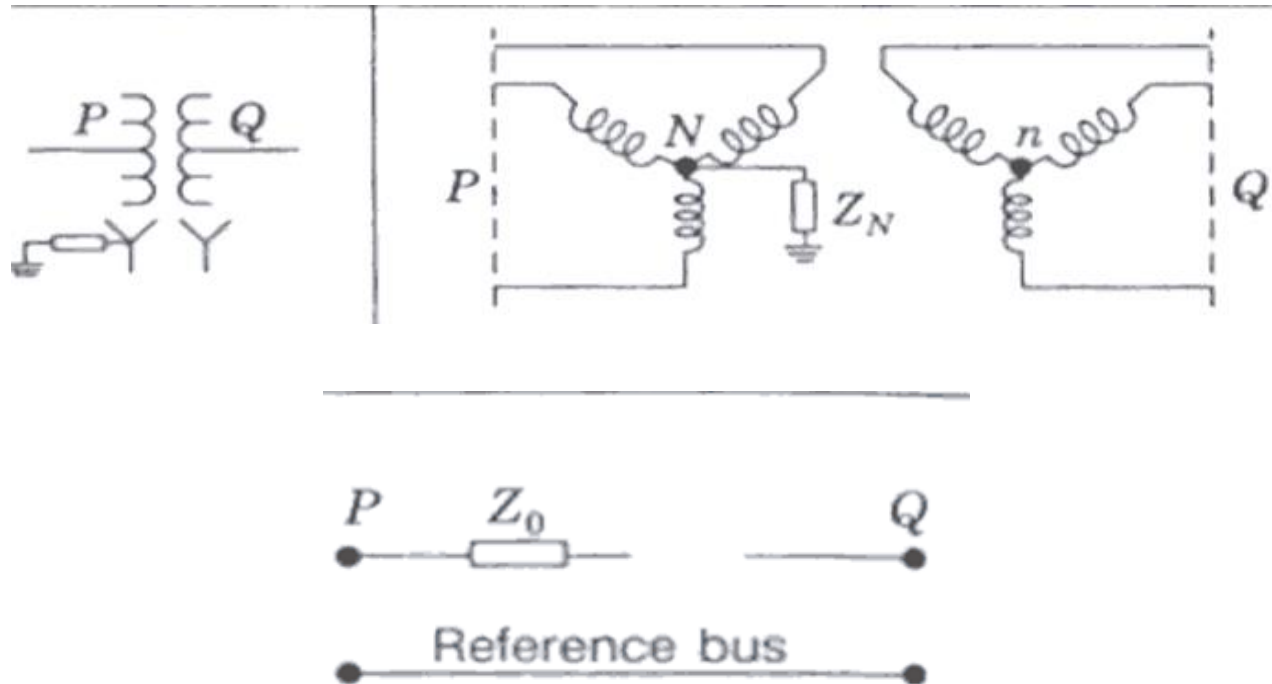
Modelo del transformador

Dependiendo del tipo de conexión del transformador, se tendrá una respuesta ante corrientes de cortocircuito

- Las configuraciones a modelar son:
- Estrella neutro-Estrella Y_n-Y
- Estrella-Delta $Y-\Delta$
- Estrella neutro-Delta $Y_n-\Delta$
- Delta-Delta $\Delta-\Delta$
- Estrella-Estrella $Y-Y$

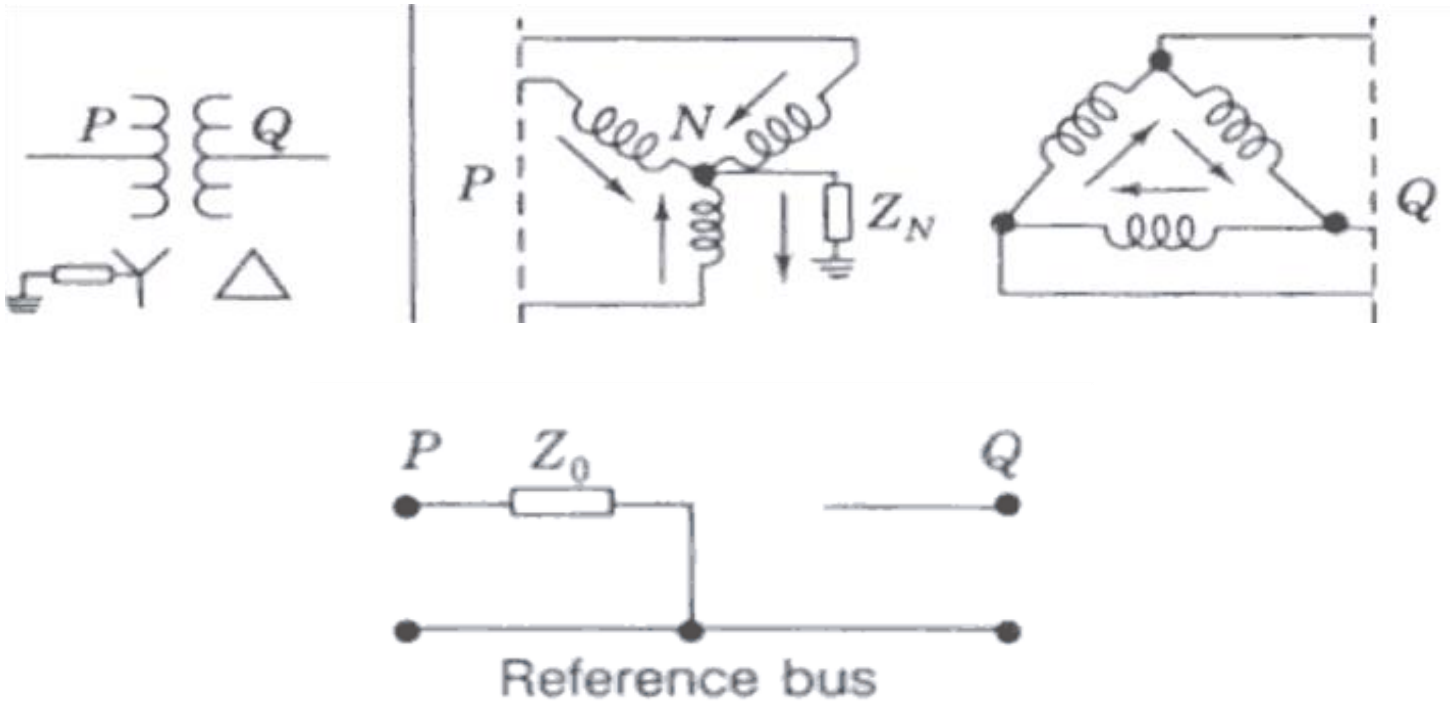
Modelo del transformador

- **Estrella neutro-Estrella**



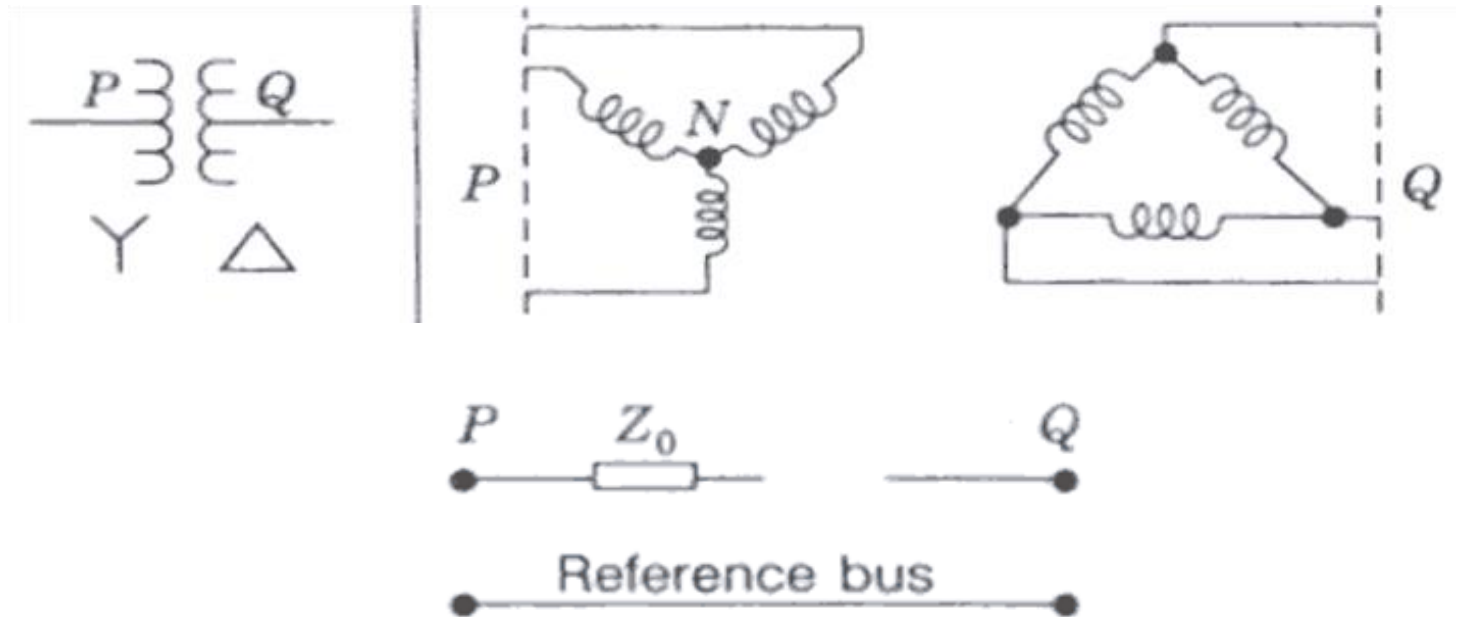
Modelo del transformador

- Estrella neutro-Delta $Y_n-\Delta$ o
- Delta – Estrella neutro $\Delta - Y_n$



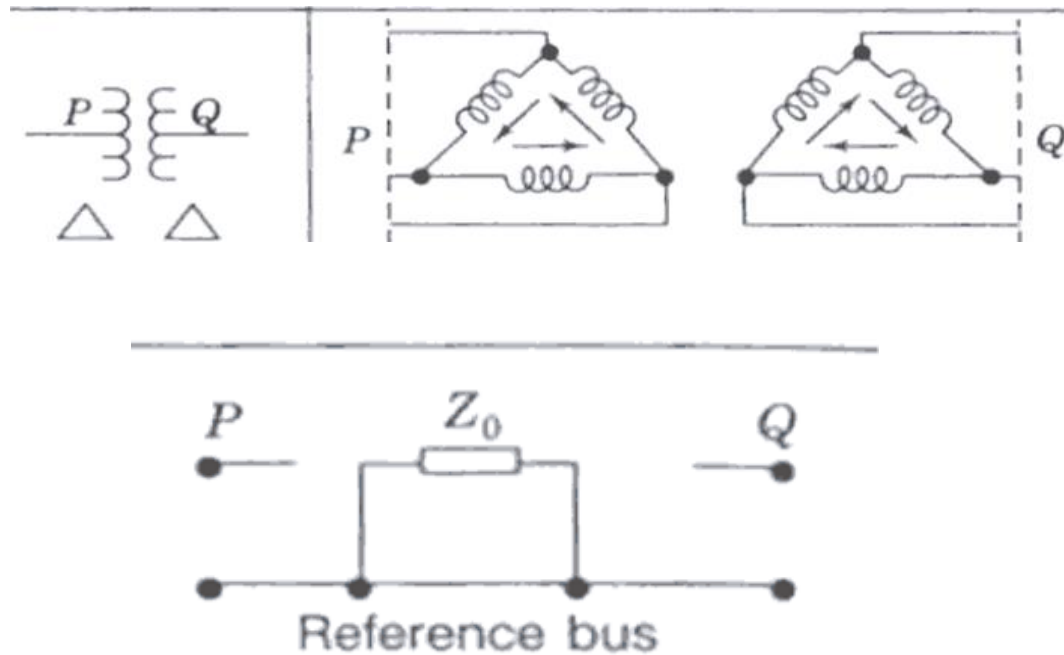
Modelo del transformador

- Delta-Estrella Δ -Y o
- Estrella Delta Y- Δ

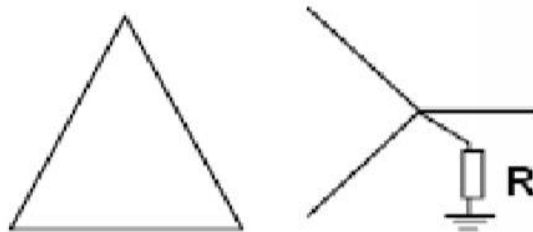


Modelo del transformador

- **Delta-Delta Δ - Δ**



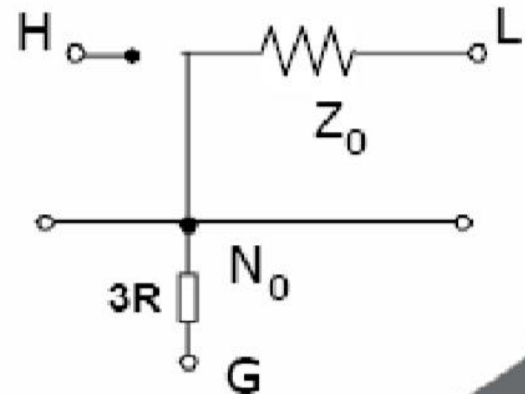
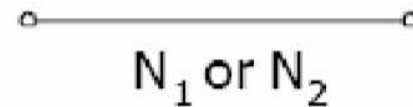
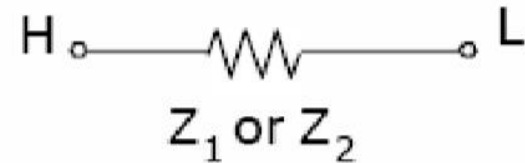
Representación del transformador en cortocircuito



**Delta-Grounded Wye
with Grounding Resistor**

$$I_n = (I_a + I_b + I_c)$$

$$I_n = 3I_0$$

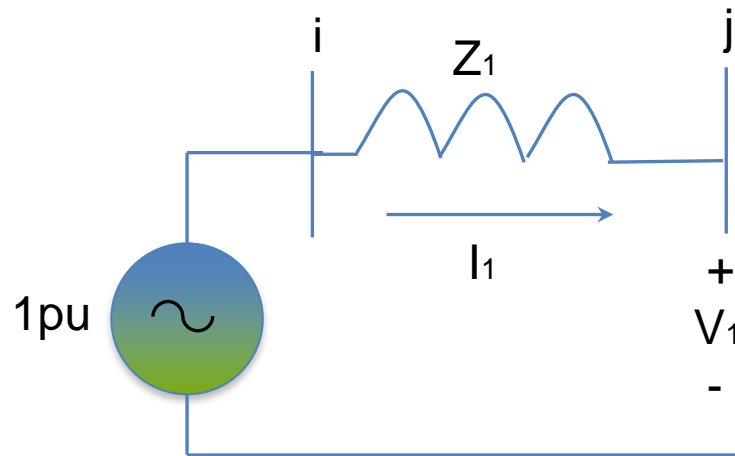


Resumen de la construcción de red de secuencia

Impedancia	Generador	Transformador	Líneas
$X_1 (+)$	Z_1	Z_1	Z_1
$X_2 (-)$	Z_1	Z_1	Z_1
$X_0 (0)$	$Z_1 / 4.7$ (Hidro) $Z_1 / 2.4$ (Vapor)	Z_1 ó ∞	$2.5 Z_1$

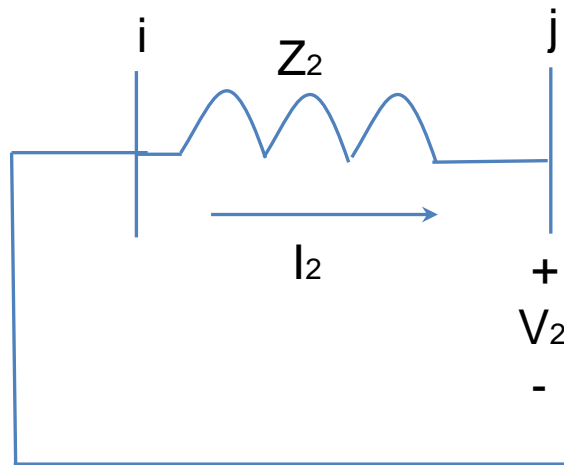
Secuencia Positiva

La red de secuencia positiva se representa por medio de una fuente en serie con la impedancia equivalente de secuencia positiva.



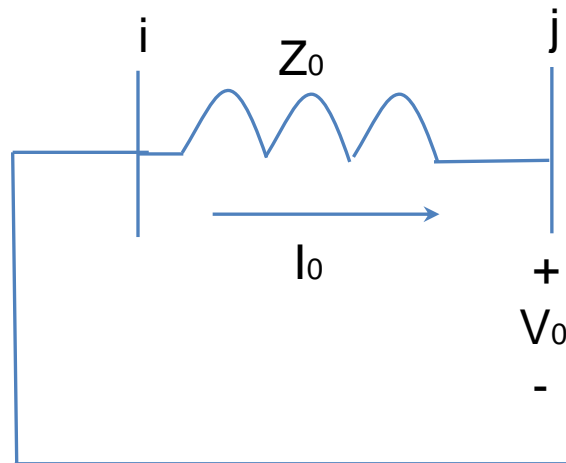
Secuencia Negativa

La red de secuencia negativa se representa por medio la impedancia equivalente de secuencia negativa y sin fuentes



Secuencia Cero

La red de secuencia cero se representa por medio la impedancia equivalente de secuencia cero y sin fuentes



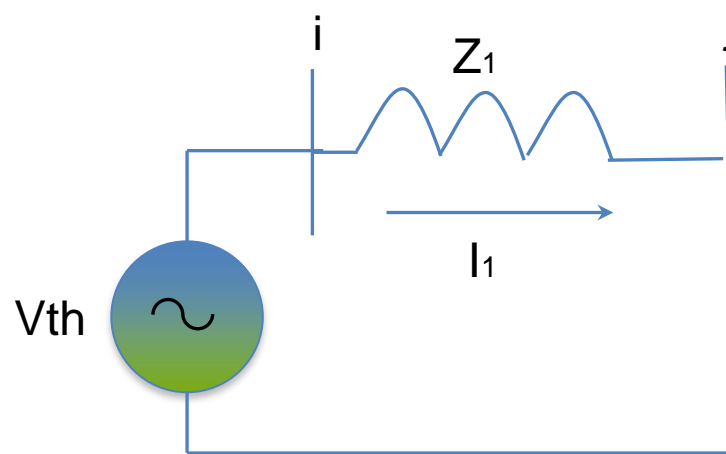
Representación de fallas por redes de secuencia

Con los diagramas de secuencia anteriores se puede realizar la representación de cada una de las fallas, en este curso se presentan las siguientes:

- Falla Trifásica
- Falla Monofásica
- Falla Bifásica
- Falla Bifásica a tierra

Representación de Falla Trifásica

Este tipo de falla se compone simplemente por el diagrama de secuencia positiva y la fuente en serie. Esto se da porque las corrientes de falla se supone se encuentran balanceadas y se eliminan en el punto de falla, lo cual no genera retorno por las otras fases.



Representación de falla monofásica

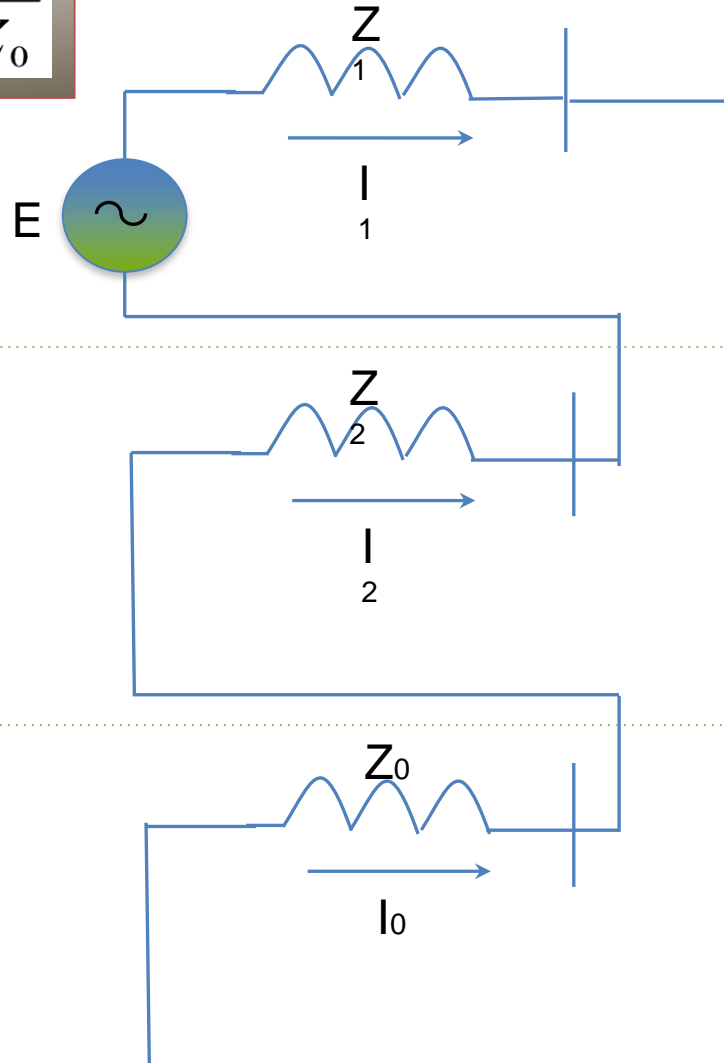
Línea a Tierra

$$I_1 = I_2 = I_0 = \frac{E}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

Secuencia
Positiva

Secuencia
Negativa

Secuencia Cero

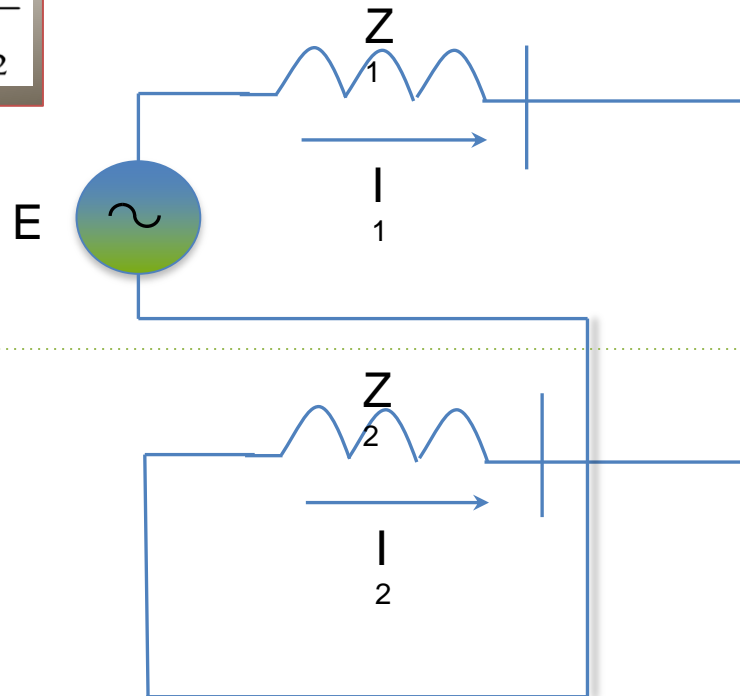


Representación de falla bifásica Línea a Línea

$$I_1 = -I_2 = \frac{E}{Z_1 + Z_2}$$

Secuencia
Positiva

Secuencia
Negativa



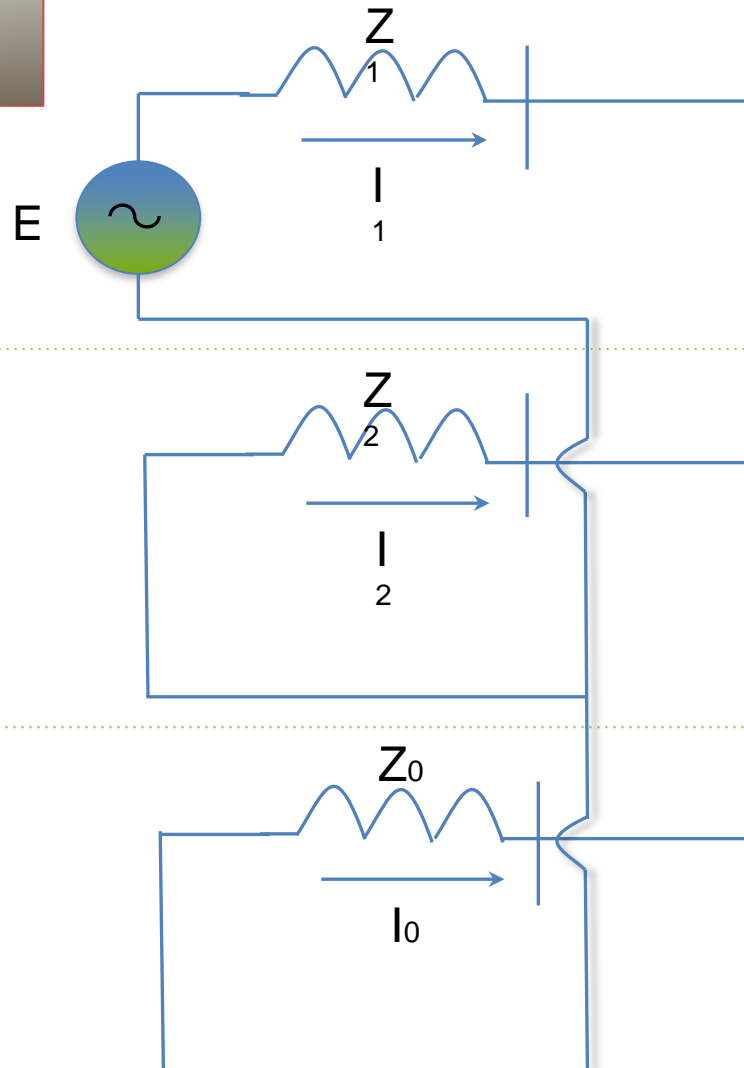
Representación de falla bifásica Línea-Línea-Tierra

$$I_1 = \frac{E}{Z_1 + Z_2 \parallel Z_0}$$

Secuencia
Positiva

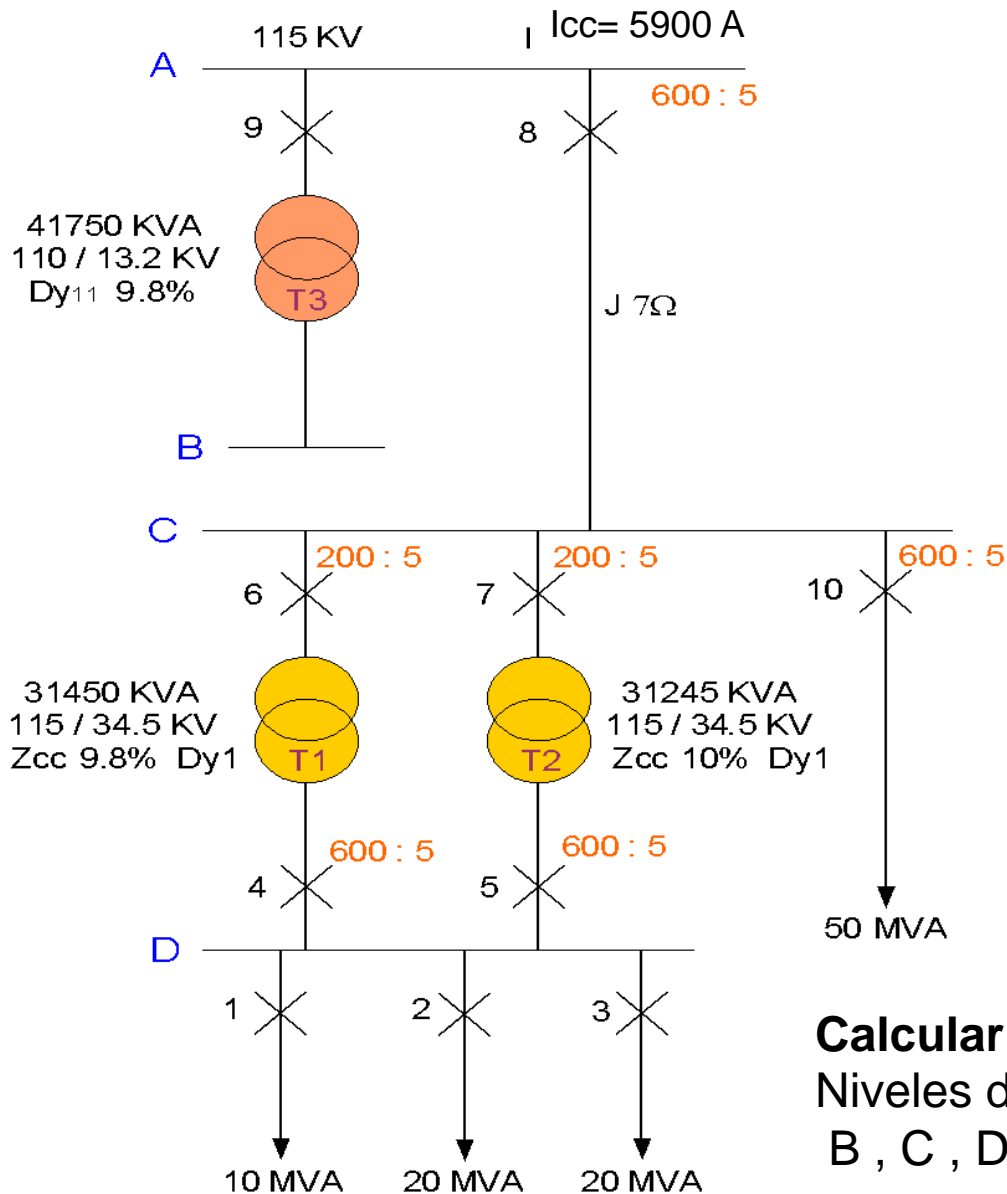
Secuencia
Negativa

Secuencia Cero



5. CALCULO DE CORTO CIRCUITO EN REDES RADIALES Y ENMALLADAS

Ejemplo 1: red radial



Calcular
Niveles de cortocircuito en
B , C , D

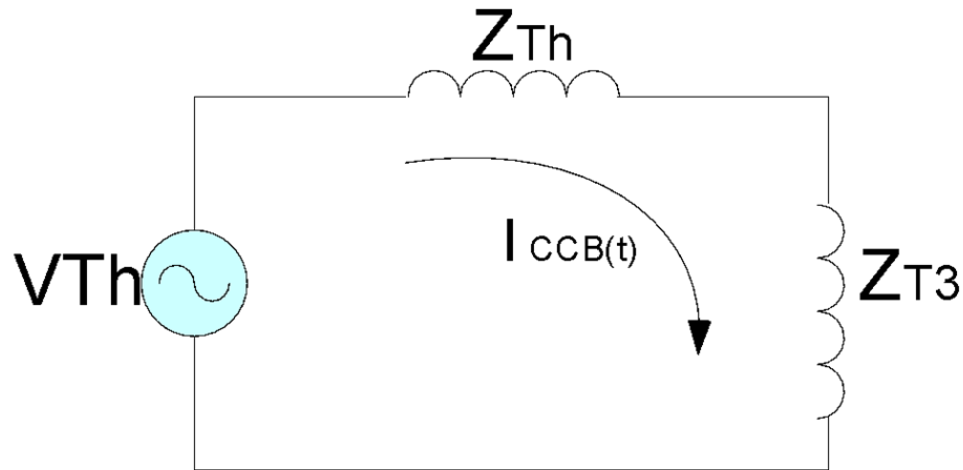
- **CÁLCULO DE LA IMPEDANCIA DE LA FUENTE ZTh:**

$$Z_{th} = \frac{115KV}{\sqrt{3} \cdot 5900A} = j11,25\Omega$$

- **CÁLCULO DE LA IMPEDANCIA DEL TRANSFORMADOR 3**

$$Z_{t3} = 0,098 \cdot \frac{(110KV)^2}{(41,75MVA)} = j28,40\Omega$$

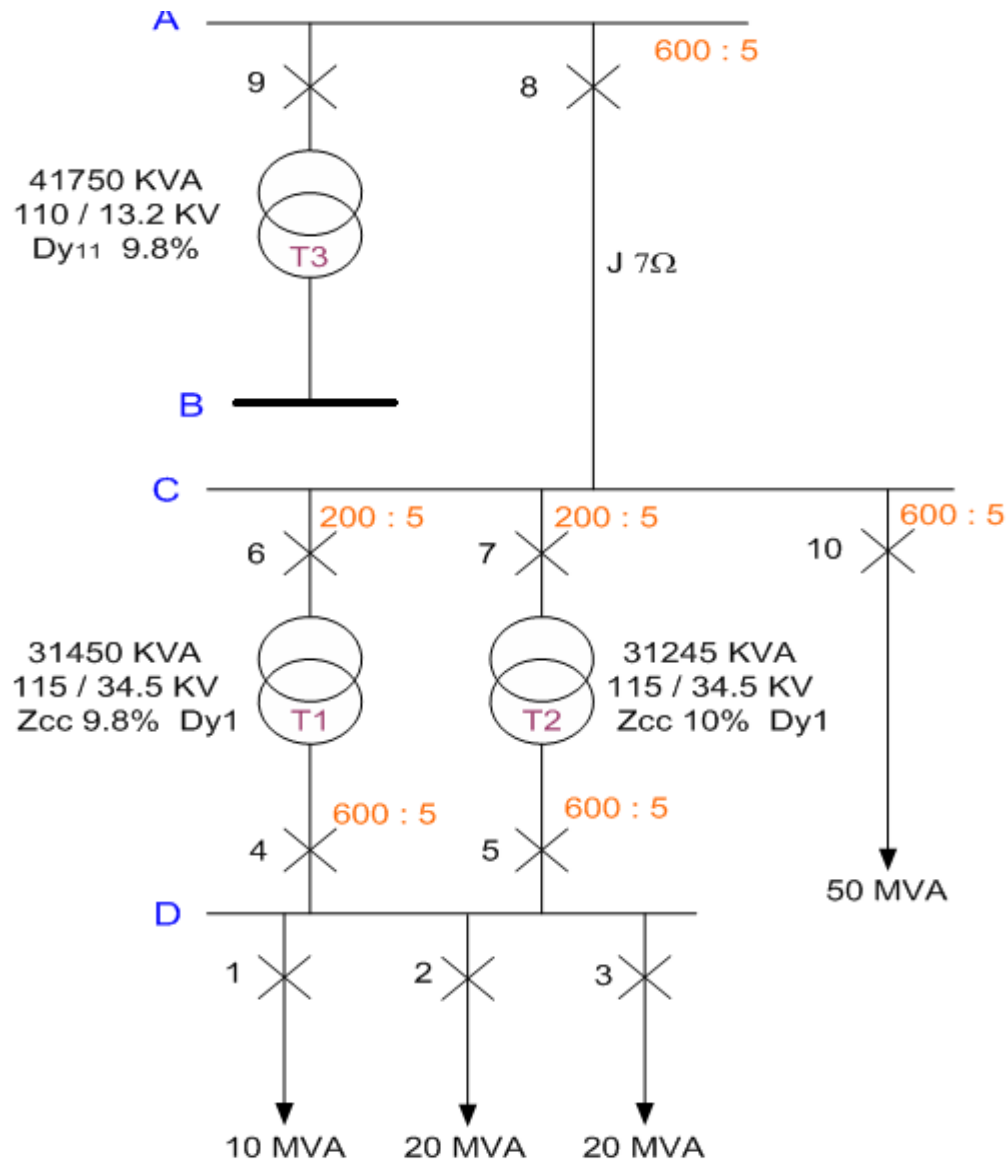
• CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO EN LA BARRA B:



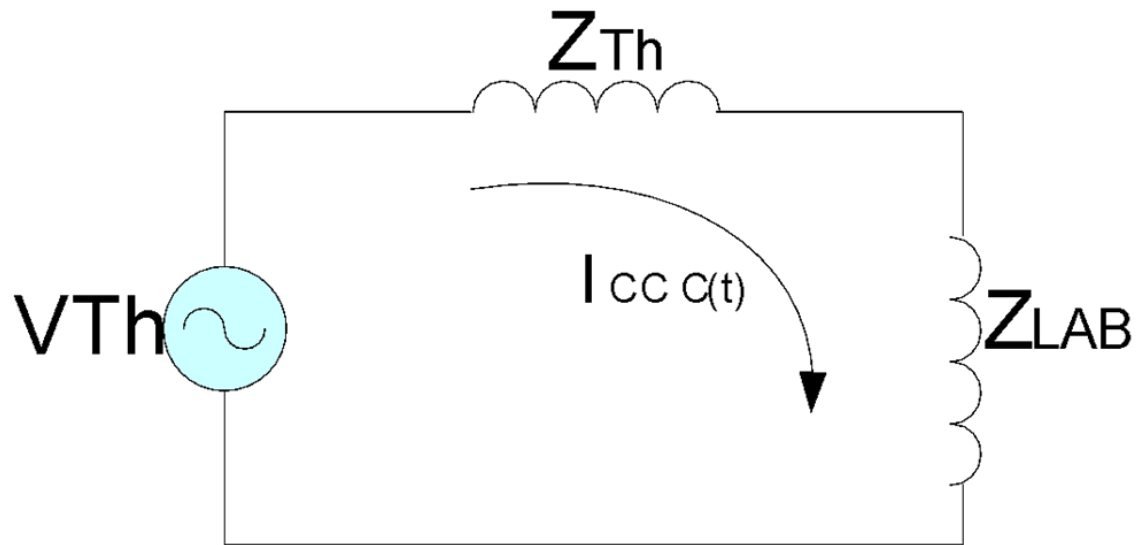
$$I_{cc_{B[115]}} = \frac{115000}{\sqrt{3} \cdot (j11,25 + j28,40)} = 1674 \angle -90^\circ A$$

$$I_{cc_{B[13.2]}} = 1674 \cdot \frac{110KV}{13,2KV} = 13954 \angle -90^\circ A$$

ESQUEMA EJEMPLO 1: FALLA TRIFASICA

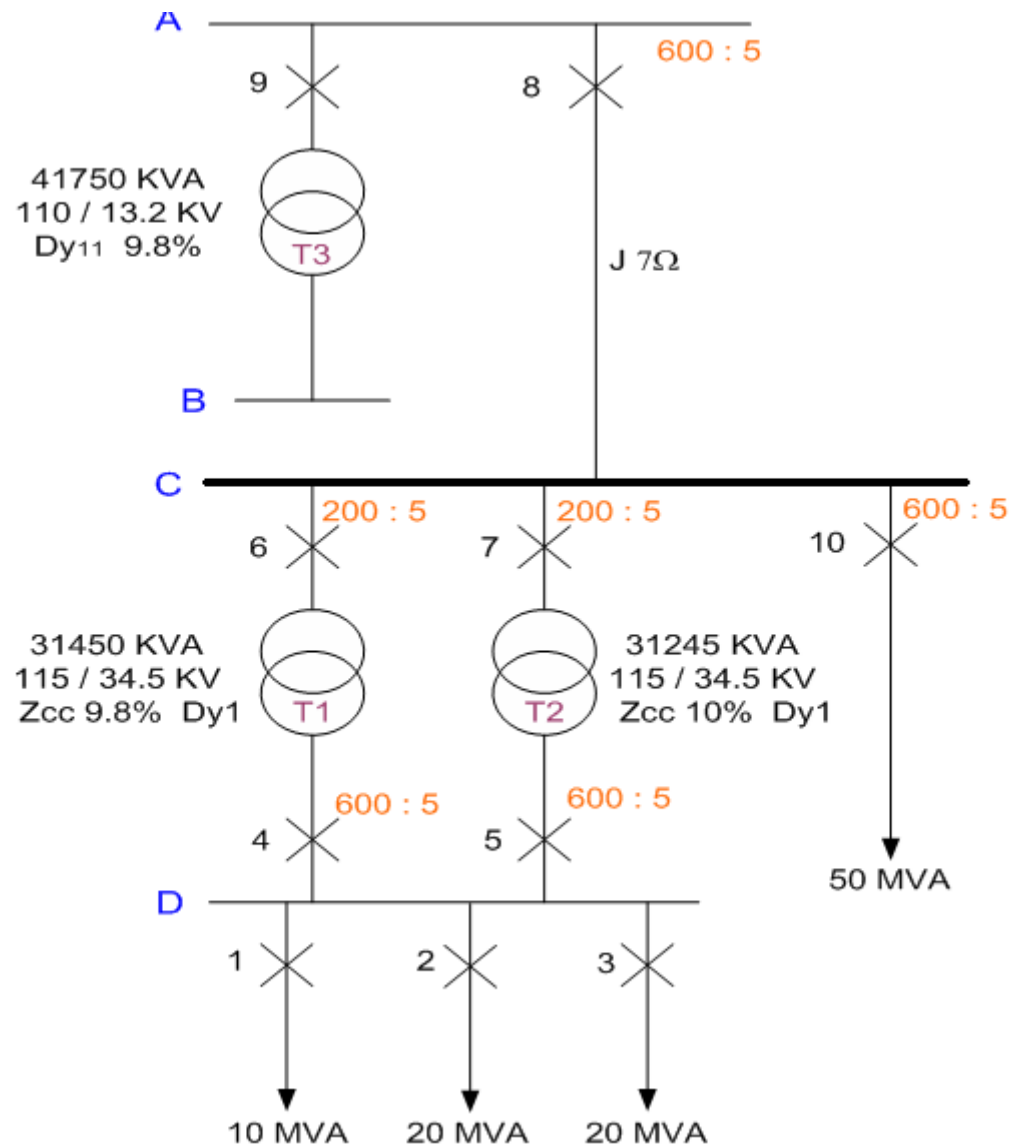


- CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO EN LA BARRA C:



$$I_{cc_{C[115]}} = \frac{115000}{\sqrt{3} \cdot (j11,25 + j7)} = 3638 \angle -90^\circ A$$

ESQUEMA EJEMPLO 1: FALLA TRIFASICA



• CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO EN LA BARRA D:

Cálculo de la impedancia del transformador 1

$$Z_{t1} = 0,098 \cdot \frac{115KV^2}{31,450MVA} = j41,2\Omega$$

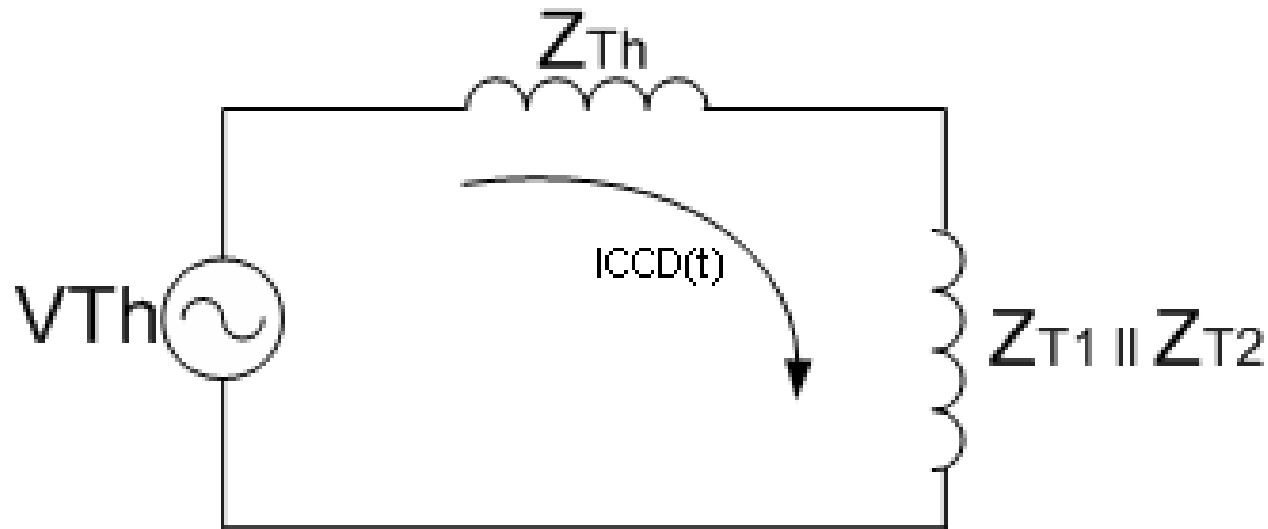
Cálculo de la impedancia del transformador 2

$$Z_{t2} = 0,10 \cdot \frac{115KV^2}{31,245MVA} = j42,32\Omega$$

Paralelo de los dos transformadores

$$Z_{t1} \parallel \parallel Z_{t2} = j20,88\Omega$$

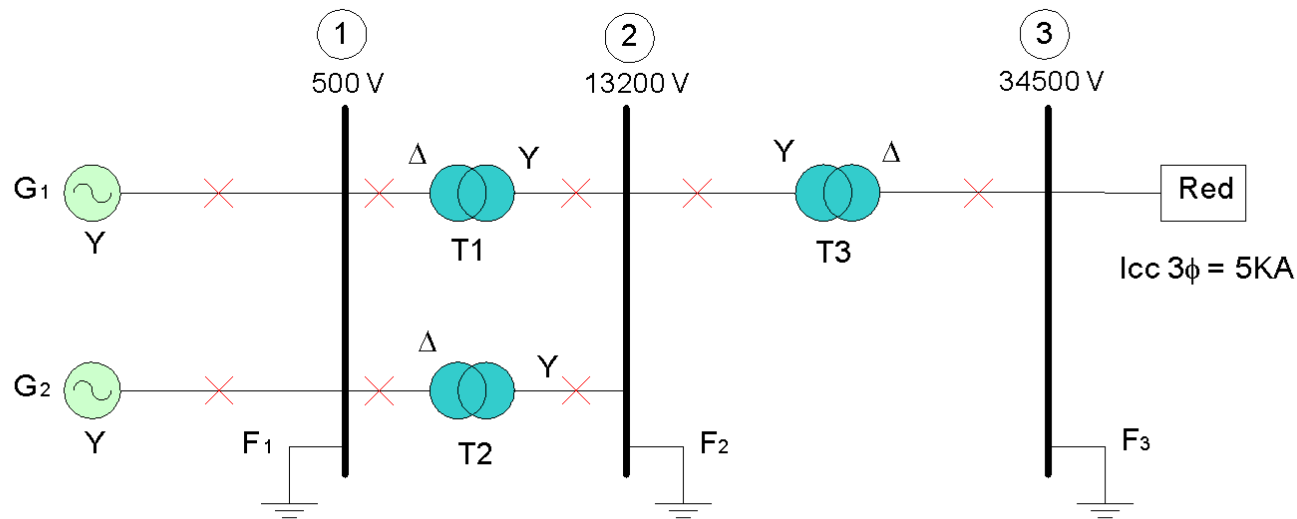
• CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO EN LA BARRA D:



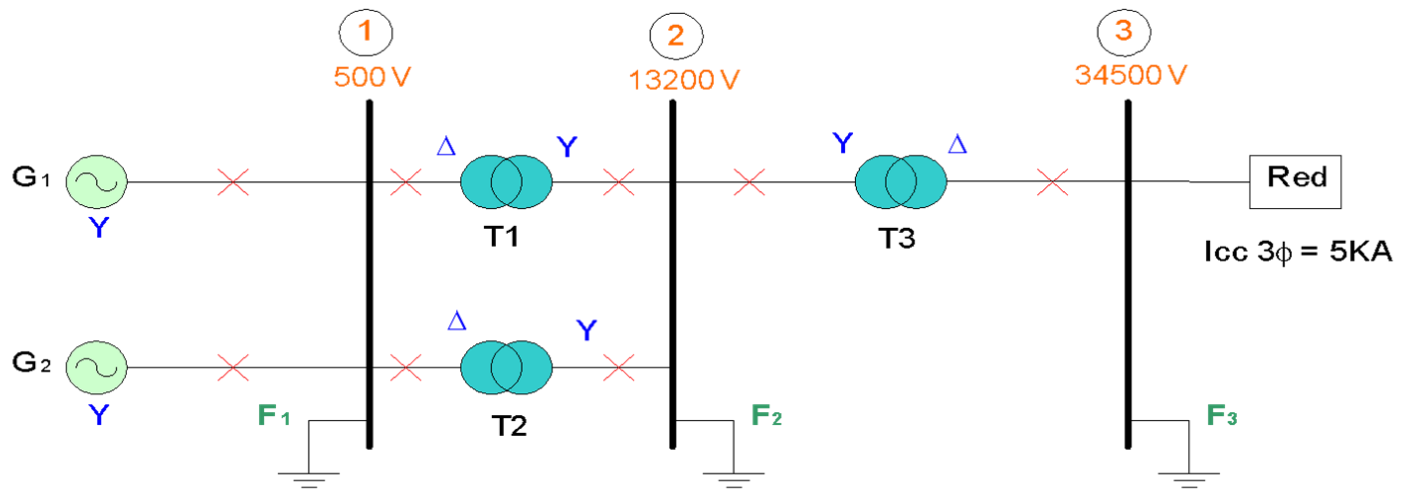
$$I_{cc_{D[115]}} = \frac{115000}{\sqrt{3} \cdot (j11,25 + j7 + j20,88)} = 1697,16 \angle -90^\circ A$$

$$I_{cc_{D[34.5]}} = 1697,16 \angle -90^\circ A \cdot \frac{115KV}{34,5KV} = 5657,8 \angle -90^\circ A$$

Ejemplo 2: red interconectada

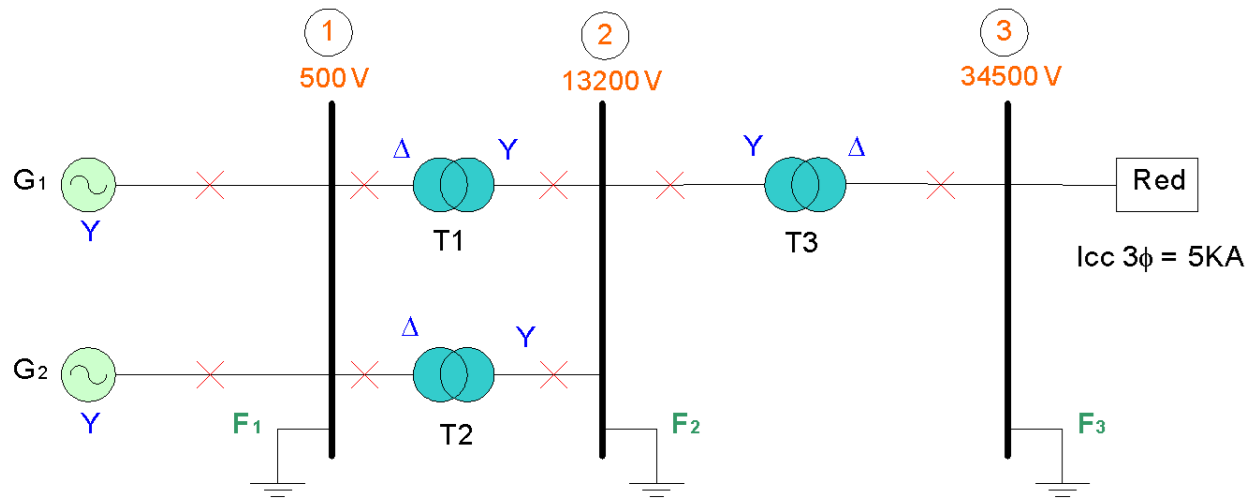


1. Malla de secuencia Positiva, Malla de secuencia Negativa, Malla de secuencia Cero.
2. Calcular la corriente de cortocircuito para una falla trifásica y monofásica en el punto F1.

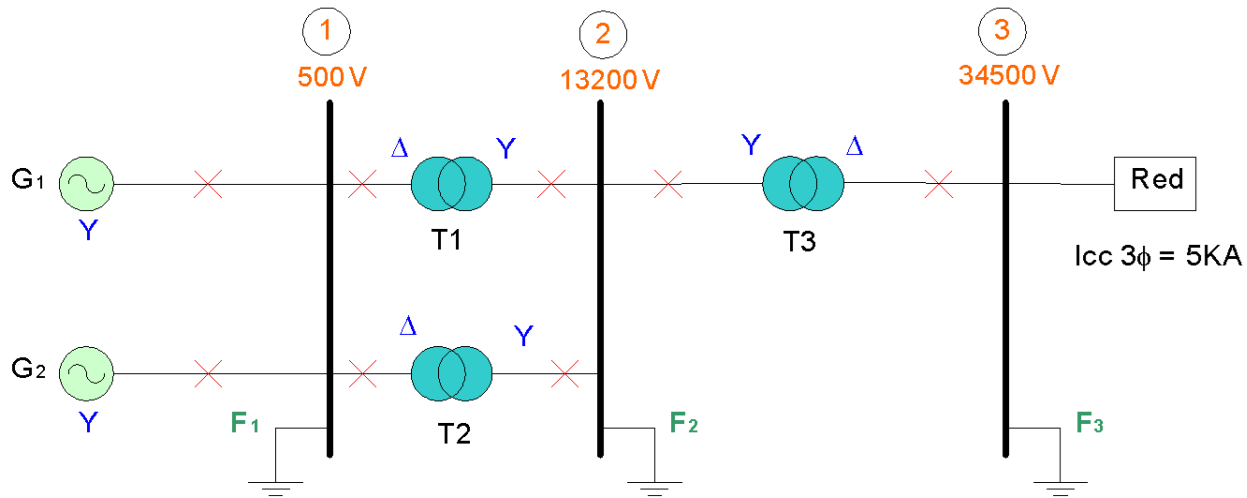


G₁ = G₂	T1	T2	T3
1.3 MVA	0.5 MVA	0.880 MVA	3750 KVA
500 V	500V Δ / 13800 VY	500V Δ / 13860V Y	13200V Y / 34500V Δ
X =1.3 pu	$Z_1=Z_2=Z_0=0.0455$ pu	$Z_1=Z_2=Z_0= 0.048$ pu	$Z_1=Z_2=Z_0=0.0629$ pu
X'=0.28 pu			
X''=0.18 pu			

1. Obtener la malla de secuencia positiva, negativa y cero.



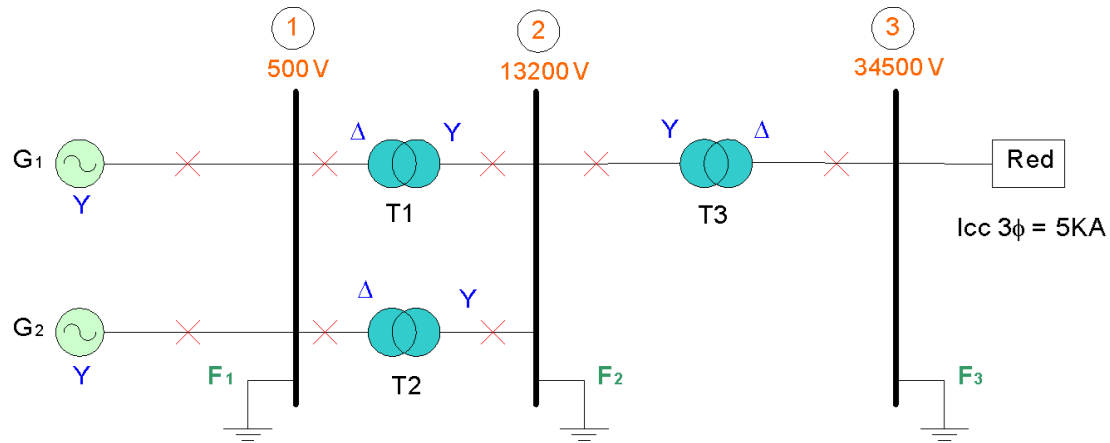
BARRA	$V_{BASE} \text{ (V)}$	$S_{BASE} \text{ (MVA)}$
1	500	1.3
2	$500 \cdot \frac{13860}{500} = 13860$	1.3
3	$13860 \cdot \frac{34500}{13200} = 36225$	1.3



$$Z_{BASE_3} = \frac{V^2}{S} = \frac{(36225V)^2}{1,3MVA} = 1009.42ohm$$

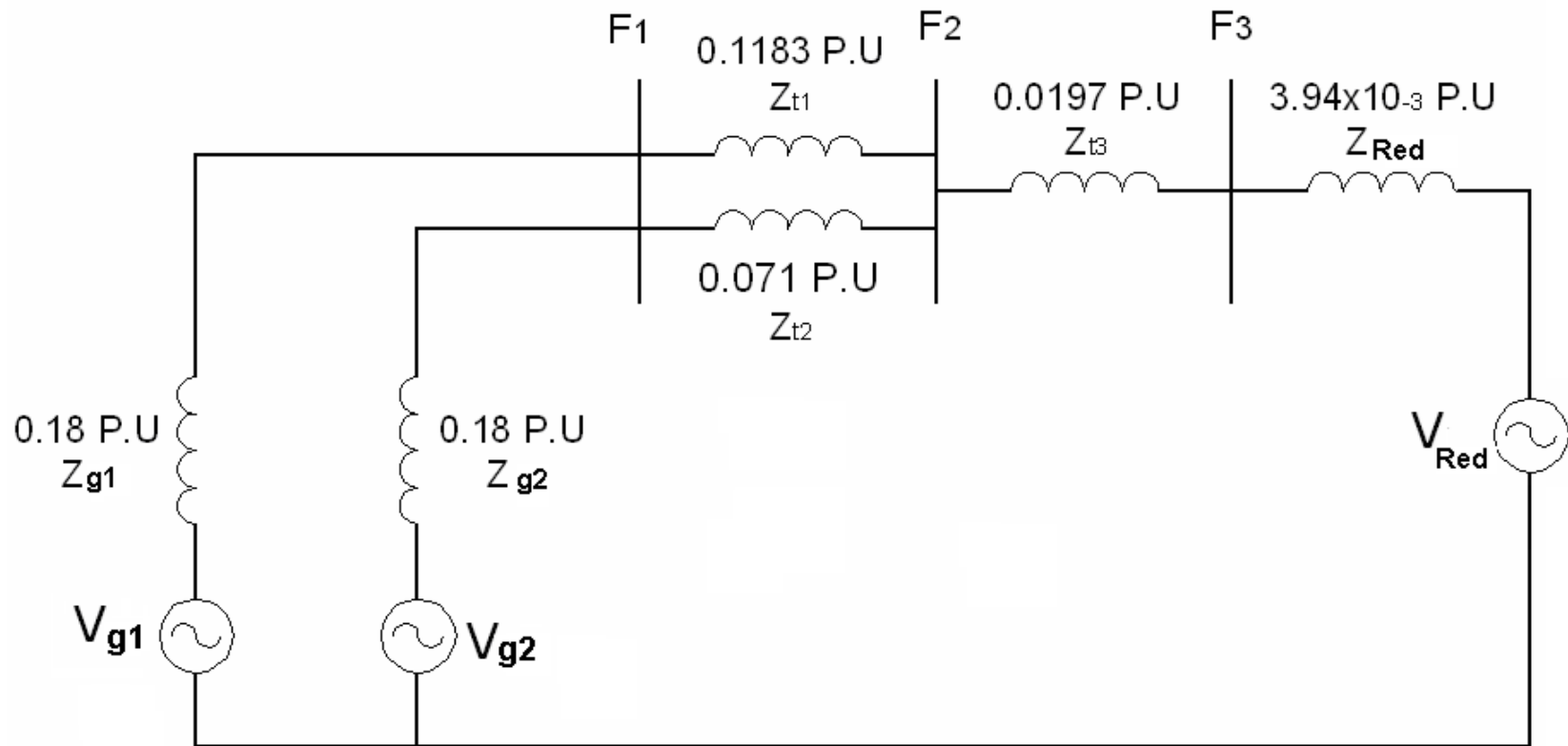
$$Z_{Base Nuevo} = Z_{Base Viejo} * \frac{V_{Viejo}^2}{V_{Nuevo}^2} * \frac{S_{Nuevo}}{S_{Viejo}}$$

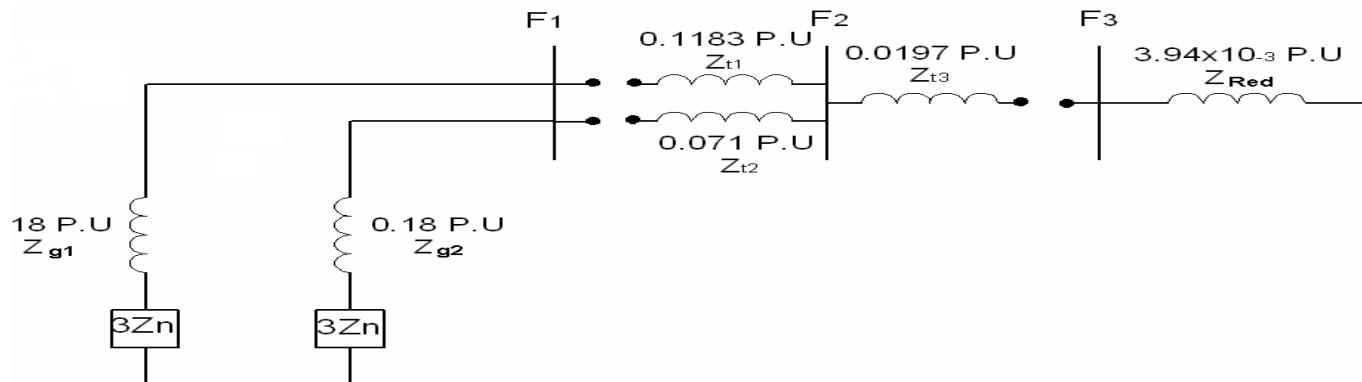
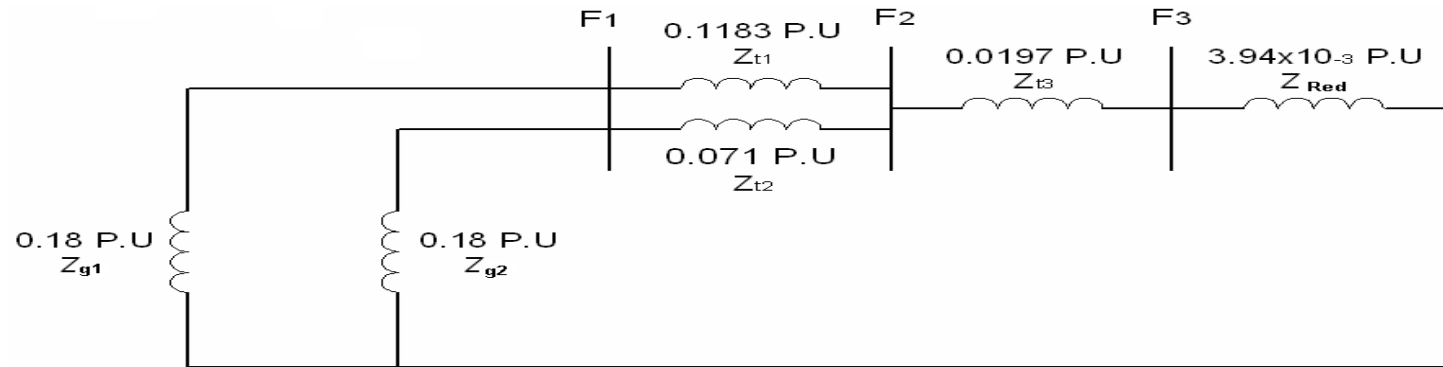
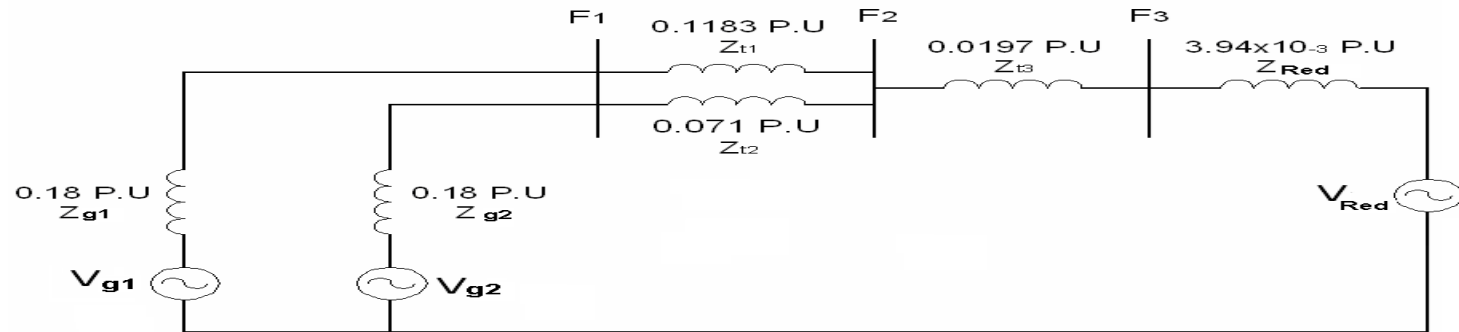
$$Z_{Red p.u} = \frac{Z_{Red}}{Z_{Base}} = \frac{\frac{V}{\sqrt{3} * I}}{1009.42} = \frac{\frac{34500}{\sqrt{3} * 5000}}{1009.42} = 3.94 \cdot 10^{-3}$$



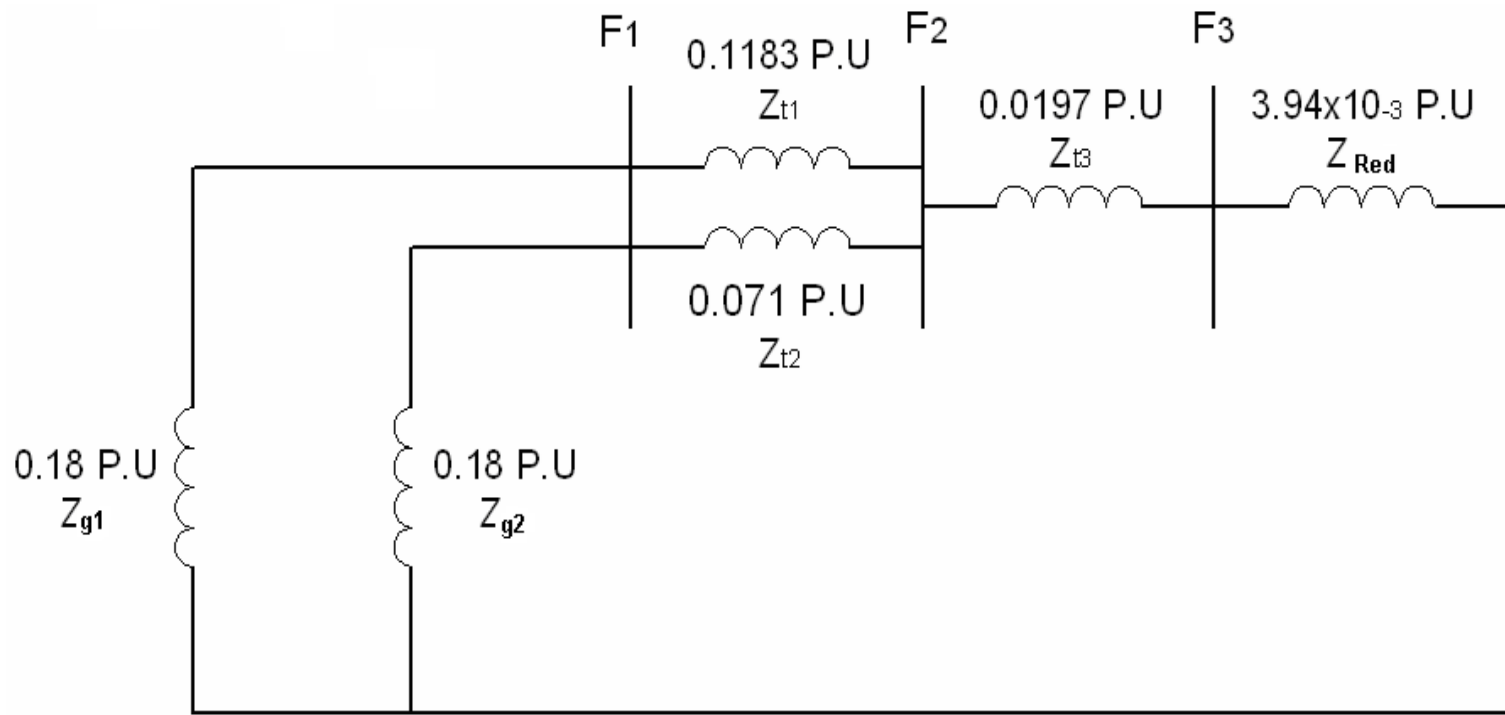
Elemento	Impedancia	Valor P.U.
Generador 1	Z_{q1}	$0,18j \cdot \left(\frac{500^2}{500^2}\right) \cdot \left(\frac{1,3MVA}{1,3MVA}\right) = 0,18j$
Generador 2	Z_{q2}	$0,18j * \left(\frac{500^2}{500^2}\right) * \left(\frac{1,3MVA}{1,3MVA}\right) = 0,18j$
Transformador 1	Z_{t1}	$0,0455 * \left(\frac{500^2}{500^2}\right) * \left(\frac{1,3MVA}{0,5MVA}\right) = 0,1183j$
Transformador 2	Z_{t2}	$0,048 * \left(\frac{500^2}{500^2}\right) * \left(\frac{1,3}{0,88}\right) = 0,071j$
Transformador 3	Z_{t3}	$0,0629j * \left(\frac{13200^2}{13860^2}\right) * \left(\frac{1,3}{3,75}\right) = 0.0197j$

• Red de Secuencia Positiva:

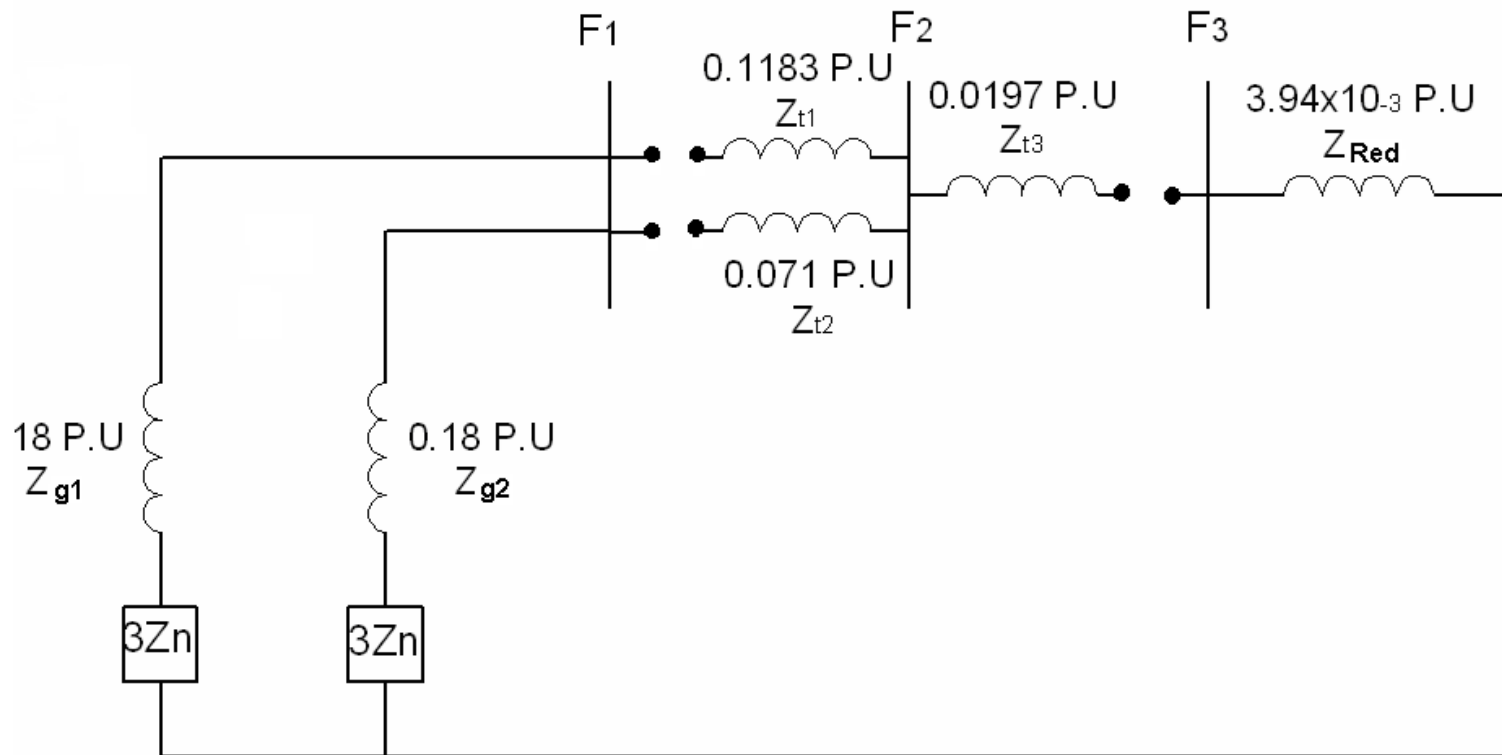




- Red de Secuencia Negativa:



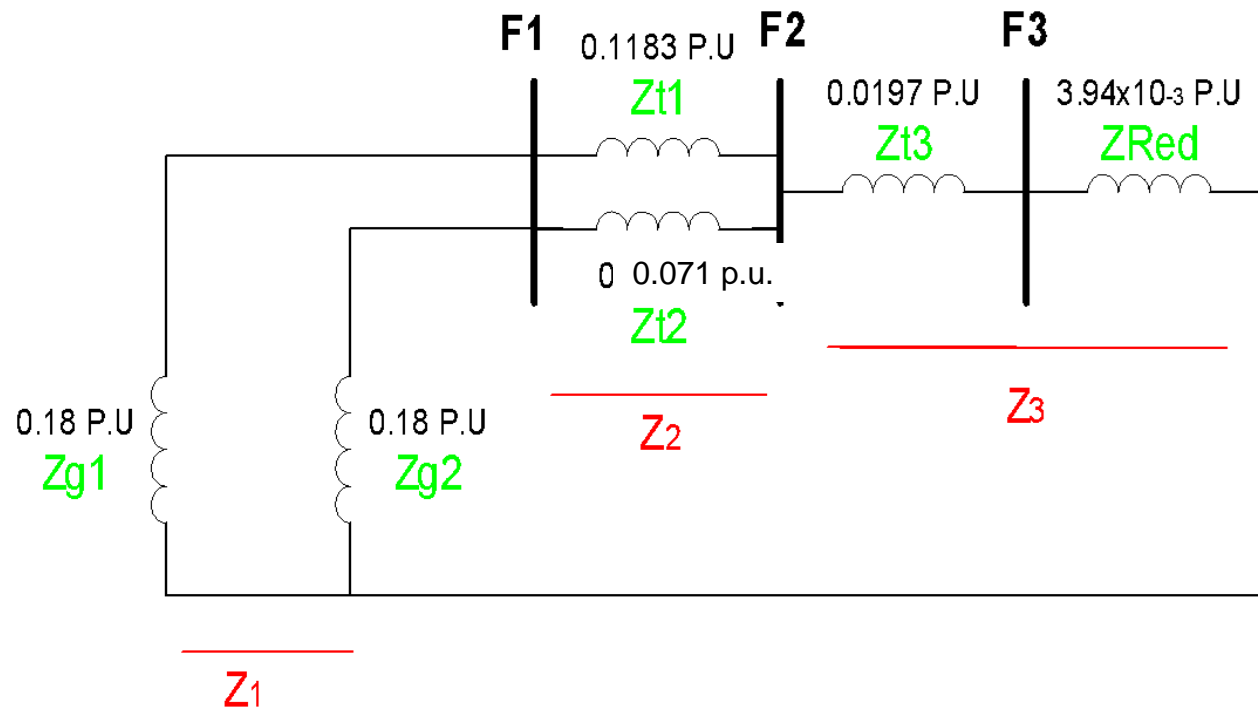
- Red de Secuencia Cero:



El generador se encuentra conectado en Y sin conexión a tierra, por lo tanto, la impedancia de secuencia cero, se encuentra abierta.

2. Calcular la corriente de cortocircuito de falla 3 ϕ

Para fallas trifásicas, se utiliza la malla de secuencia positiva y se obtiene el equivalente thevenin entre los puntos de falla, F1 y tierra



- **Calculo del ZTh (F₁-N):**

$$Z_{th_{f1-N}} = Z_1 \parallel Z_2 + Z_3$$

$$Z_1 = \frac{\boxed{Zg} \parallel \boxed{Zg}}{0,18j \parallel 0,18j} = 0.09j \text{ pu}$$

$$\underbrace{0,18j}_{Zg1} \parallel \underbrace{0,18j}_{Zg2}$$

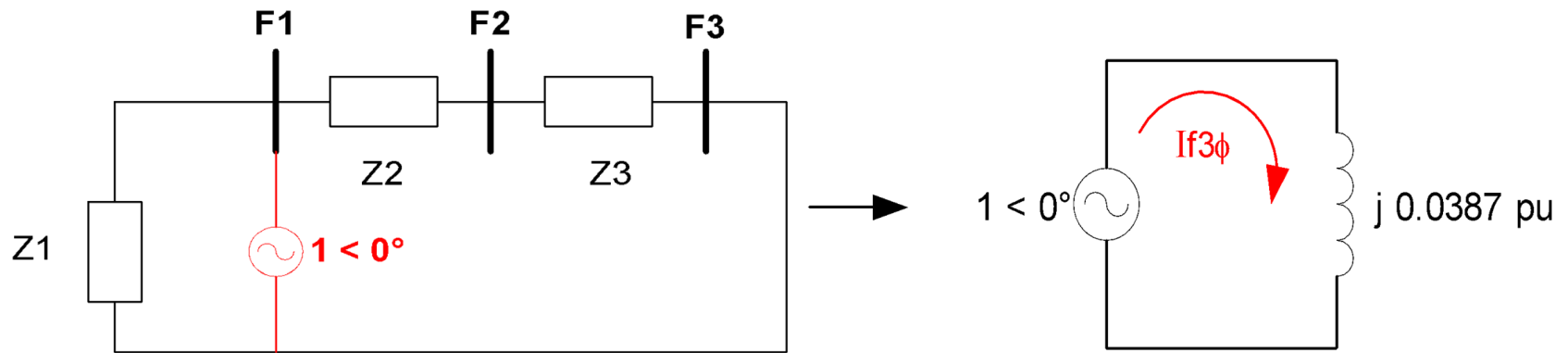
$$Z_2 = \frac{Z_{t1} * Z_{t2}}{Z_{t1} + Z_{t2}} = \frac{0,1183j * 0,071j}{0,1183j + 0,071j} = 0,443j \text{ pu}$$

$$Z_3 = Z_{t3} + Z_{Red} = 0,0197j + 3,94 \times 10^{-3}j = 0,02364j \text{ pu}$$

$$Z_2 + Z_3 = 0.06794 \text{ pu}$$

$$Z_{th_{f1-N}} = \frac{0,09j * 0.06754j}{0,09j + 0,06754j} = 0,03871j$$

- **Calculo de VTh (F₁-N)**

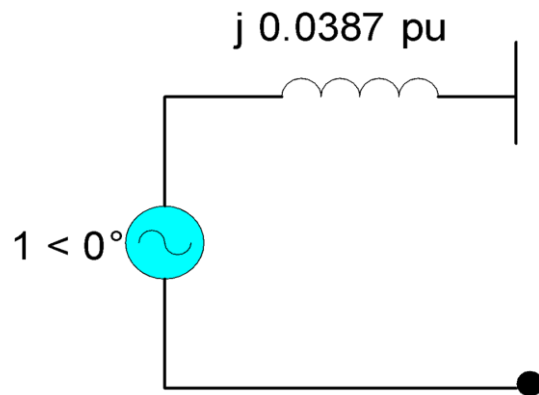


Luego la corriente de cortocircuito trifásico es:

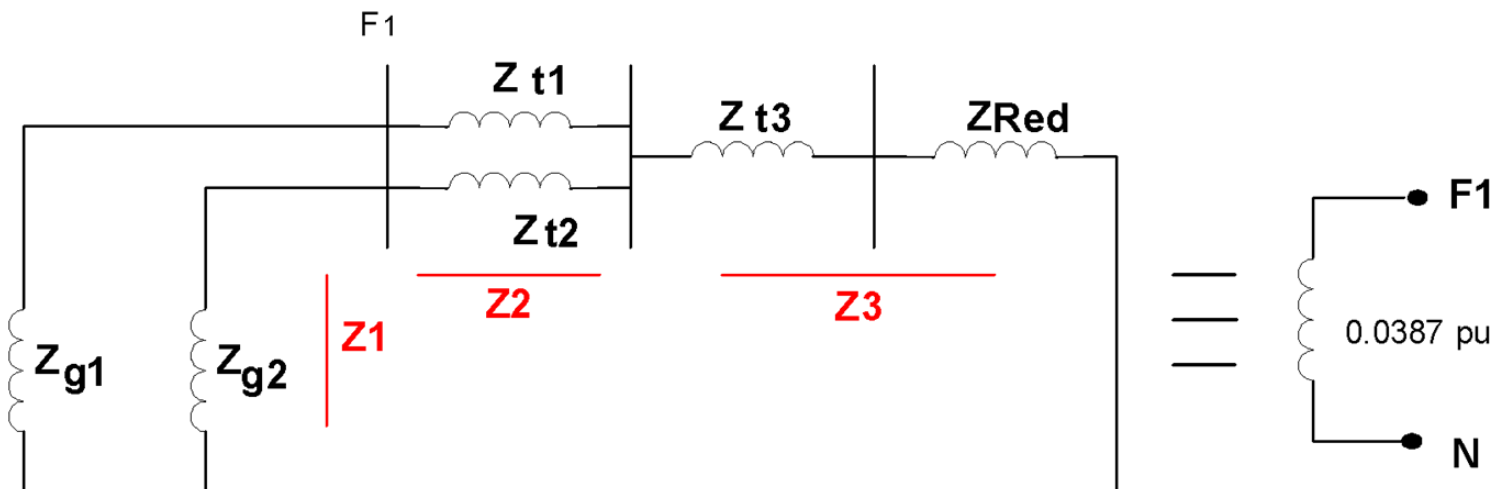
$$I_{fl_{3\phi}. p.u} = \frac{V}{Z} = \frac{1 < 0^\circ}{0.0387 < 90^\circ} = 25,82 < -90^\circ$$

$$I_{fl_{3\phi}} (A) = 25,82 * \frac{1,3 * 10^6}{\sqrt{3} * 500} = 38758,7 A$$

3. calcular la corriente de cortocircuito de falla 1φ en F1:

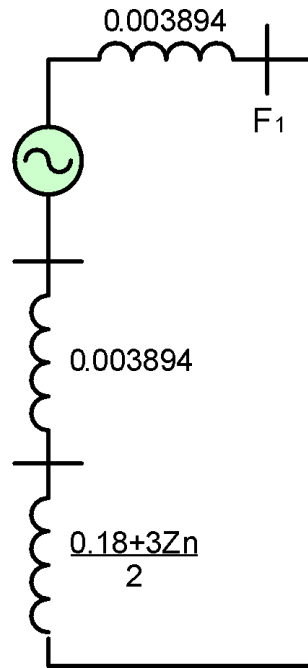


La red equivalente de secuencia negativa en el punto F1 es:



$$Z_{th_{f1-N}} = Z_1 \parallel Z_2 + Z_3 = 0,0387 pu$$

El diagrama de las tres redes de secuencia para la falla 1φ es:



$$I_{\phi F1} = \frac{1}{0.0768 + 0.09 + 1.5Z_n}$$