

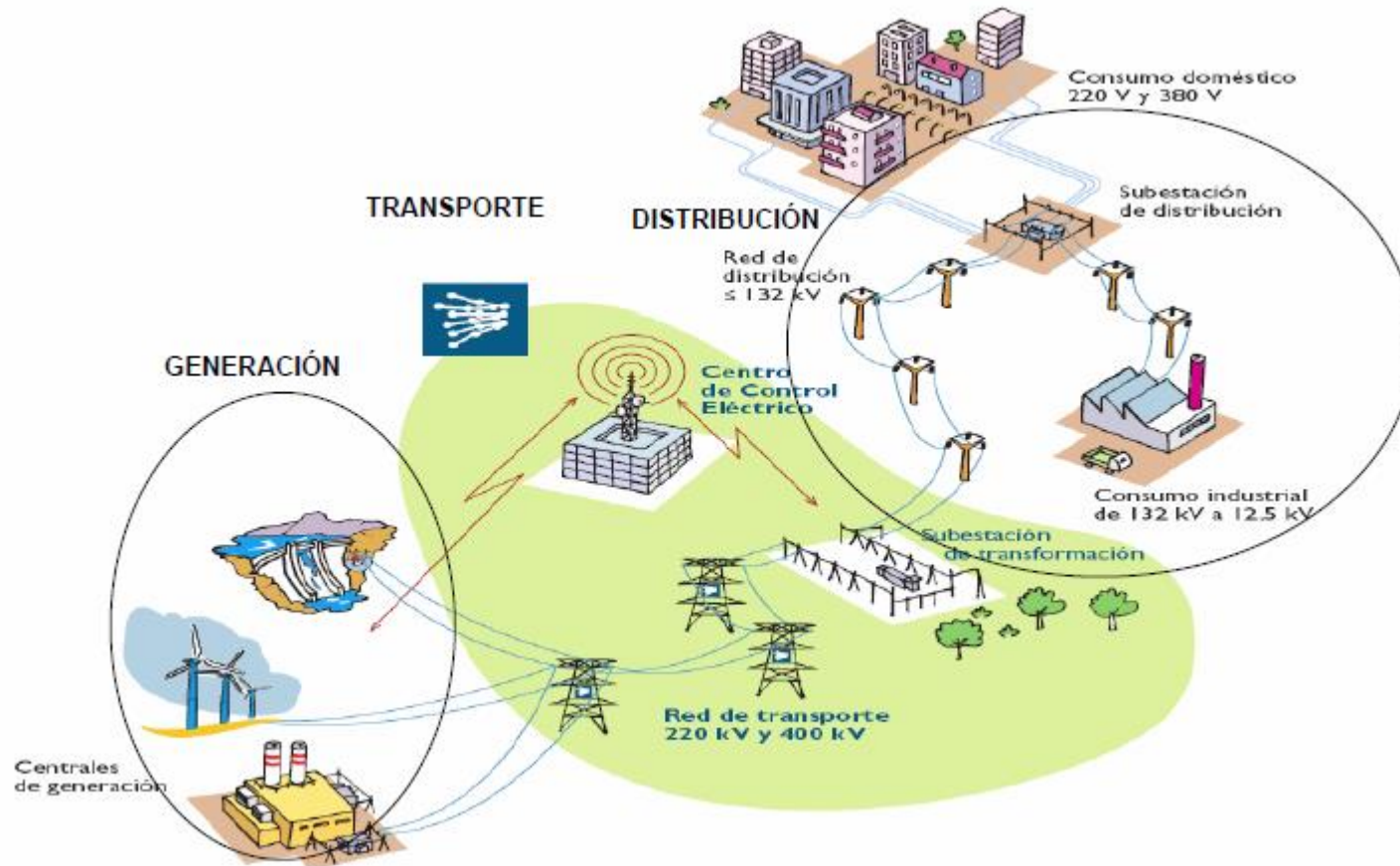
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA - AVANZADO

MODULO II

ANÁLISIS DE
CORTOCIRCUITO



INTRODUCCIÓN



<http://www.energiaysociedad.es/manenergia/1-1-aspectos-basicos-de-la-electricidad/>



CÁLCULO DE CORTOCIRCUITO

Un cortocircuito produce grandes corrientes, puede ocasionar:

- ☐ Daño en las instalaciones.
- ☐ Interrupción de grandes áreas.
- ☐ Pone personal en riesgo.
- ☐ Arco eléctrico (Arc Flash)
- ☐ Otros (huecos de tensión).



APLICACIONES EN EL PLANEAMIENTO

- ❑ Capacidad del equipamiento de las subestaciones
- ❑ Coordinación de los equipos de protección.
- ❑ Dimensionamiento de sistemas de puesta a tierra.
- ❑ Verificación de suficiente nivel de potencia de cortocircuito.
- ❑ Verificación de límites térmicos en cables y líneas de transmisión.

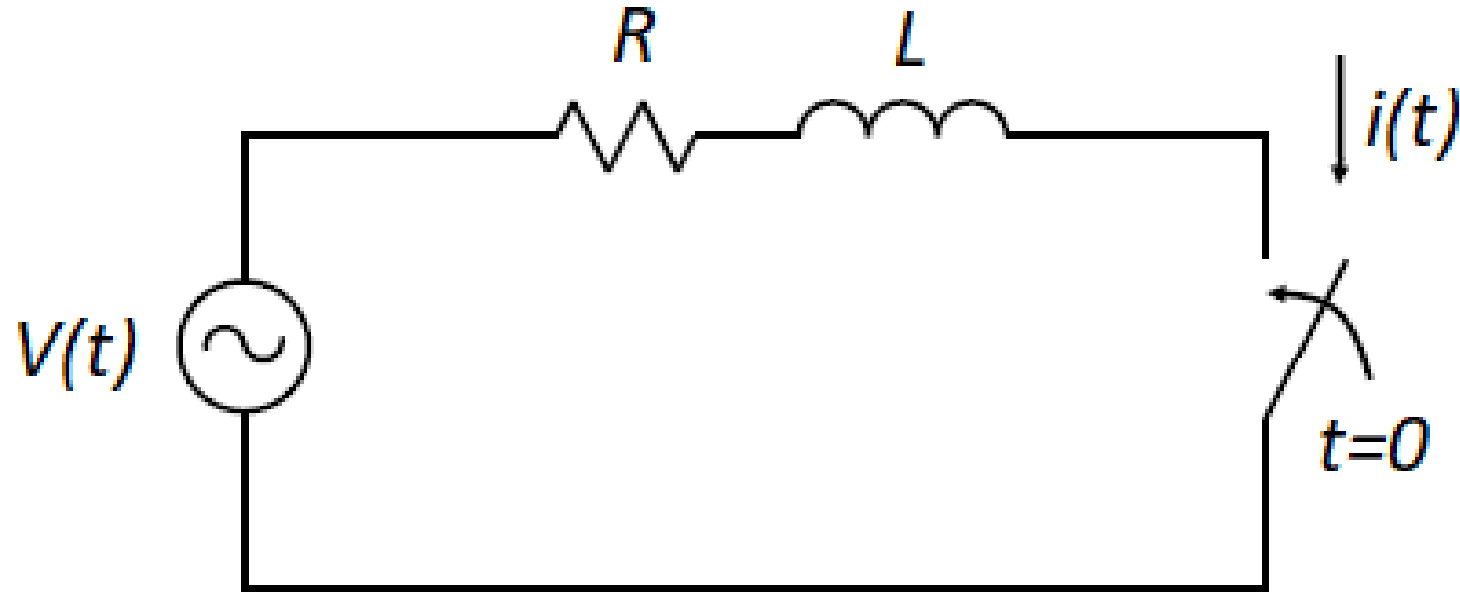


APLICACIONES EN LA OPREACIÓN

- ❑ Verificación de los CC en reconfiguraciones del sistema.
- ❑ Determinación de los ajustes de los relés.
- ❑ Localización de fallas.
- ❑ Análisis de fallas en los sistemas de potencia.
- ❑ Análisis de posibles interferencias de acoplamiento mutuo en líneas.



ANÁLISIS TRANSITORIO DE LA CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO



$$V(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (1)$$



ANÁLISIS TRANSITORIO DE LA CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO

La fuente es sinusoidal:

$$V(t) = V_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (2)$$

Entonces la solución de (1) es:

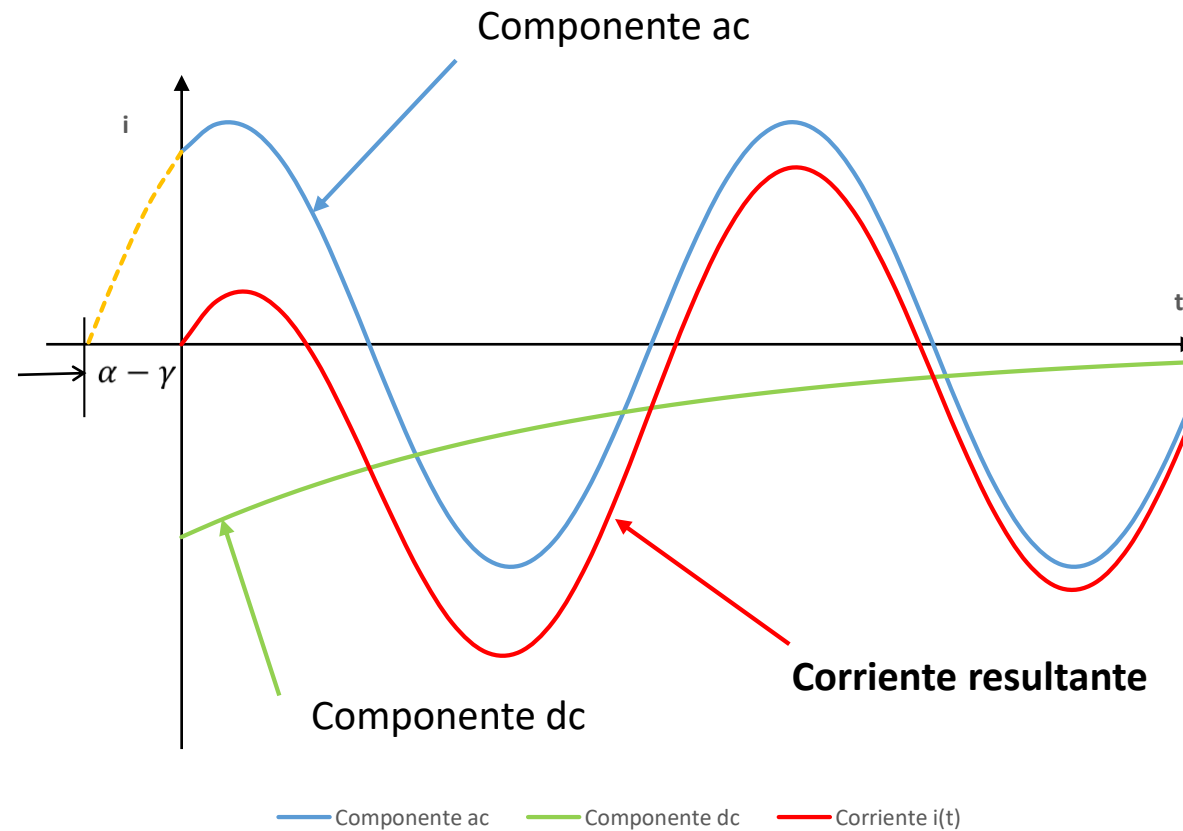
$$i(t) = I \sin(\omega t + \alpha - \gamma) - I e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\alpha - \gamma) \quad (3)$$

Donde:

$$I = V_m/Z, \tau = L/R, \gamma = \tan^{-1} \omega L/R \text{ y } Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

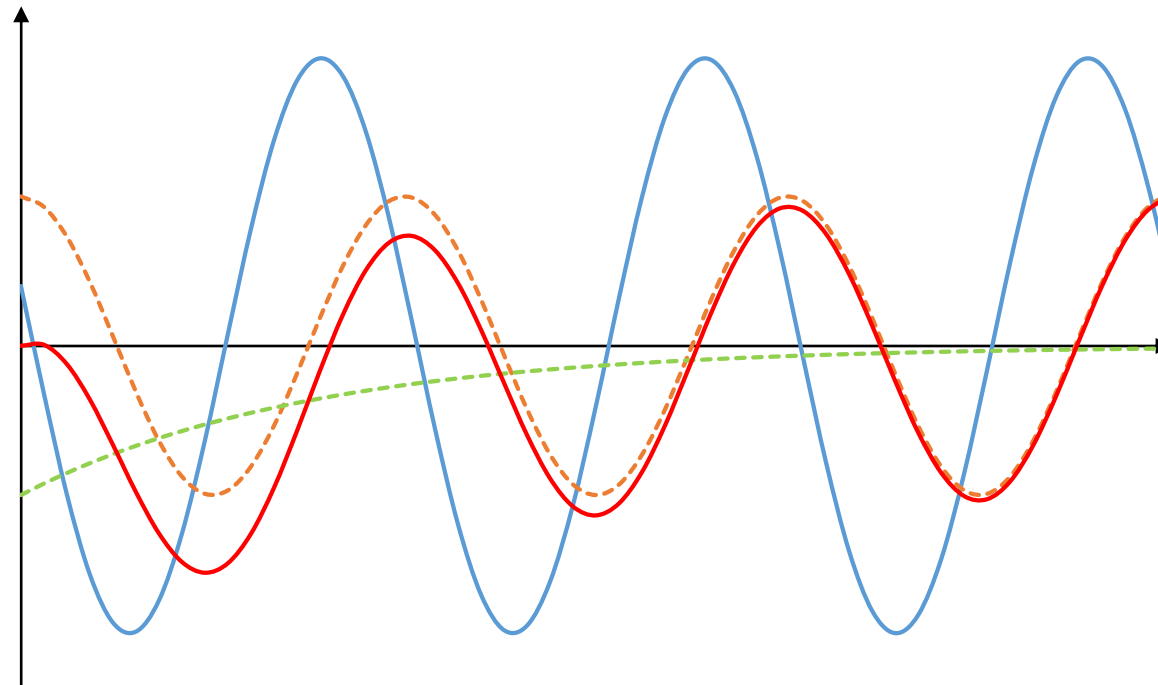


ANÁLISIS TRANSITORIO DE LA CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO



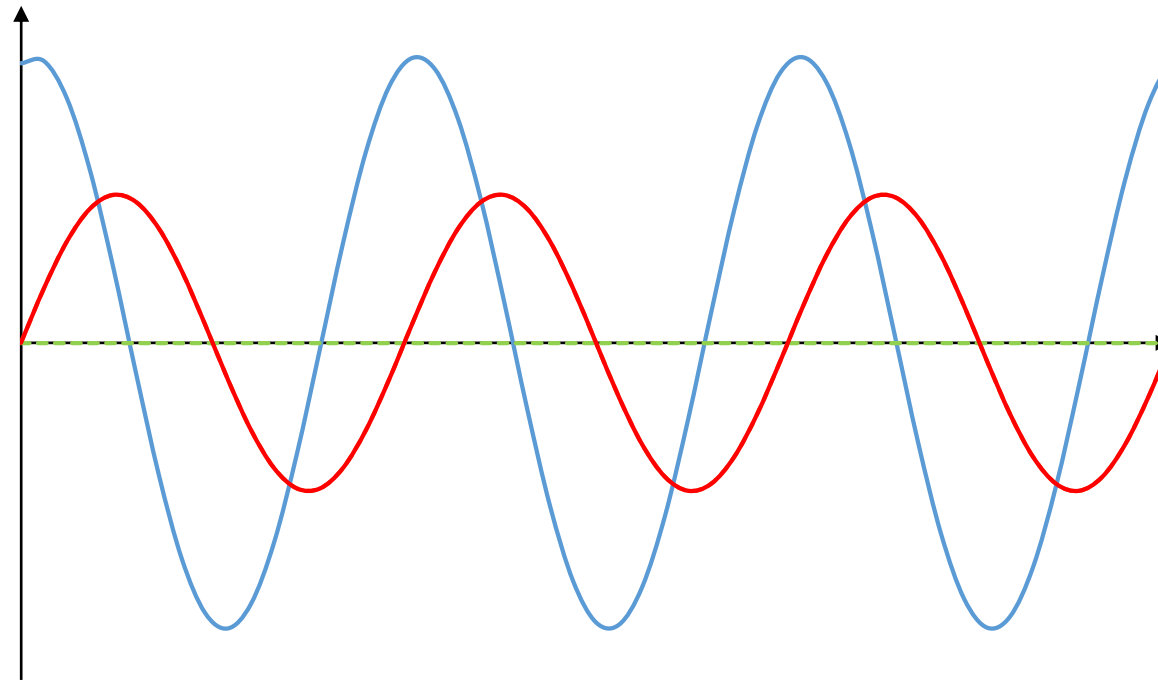
ANÁLISIS TRANSITORIO DE LA CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO

Componente dc máxima: $(\alpha - \gamma) = \pi/2$



ANÁLISIS TRANSITORIO DE LA CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO

Componente dc nula: $\alpha = \gamma$



ANÁLISIS TRANSITORIO DE LA CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO

Como en los SEP $\omega L \gg R$, entonces $\gamma \simeq \pi/2$:

- ❑ Si se cierra el interruptor a la tensión máxima:

No hay componente continua

- ❑ Si se cierra el interruptor cuando la tensión es cero:

Se produce la máxima corriente dc



CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO EN LOS TERMINALES DE UN GENERADOR

Del cálculo de la corriente de cortocircuito obtenemos:

$$i(t)$$

$$= E\sqrt{2} \left[\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{-\frac{t}{T_d''}} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} + \frac{1}{X_d} \right] \cos(\omega t + \alpha)$$

$$- \frac{E\sqrt{2}}{X_d''} e^{-\frac{t}{T_d}} \cos \alpha \quad (4)$$

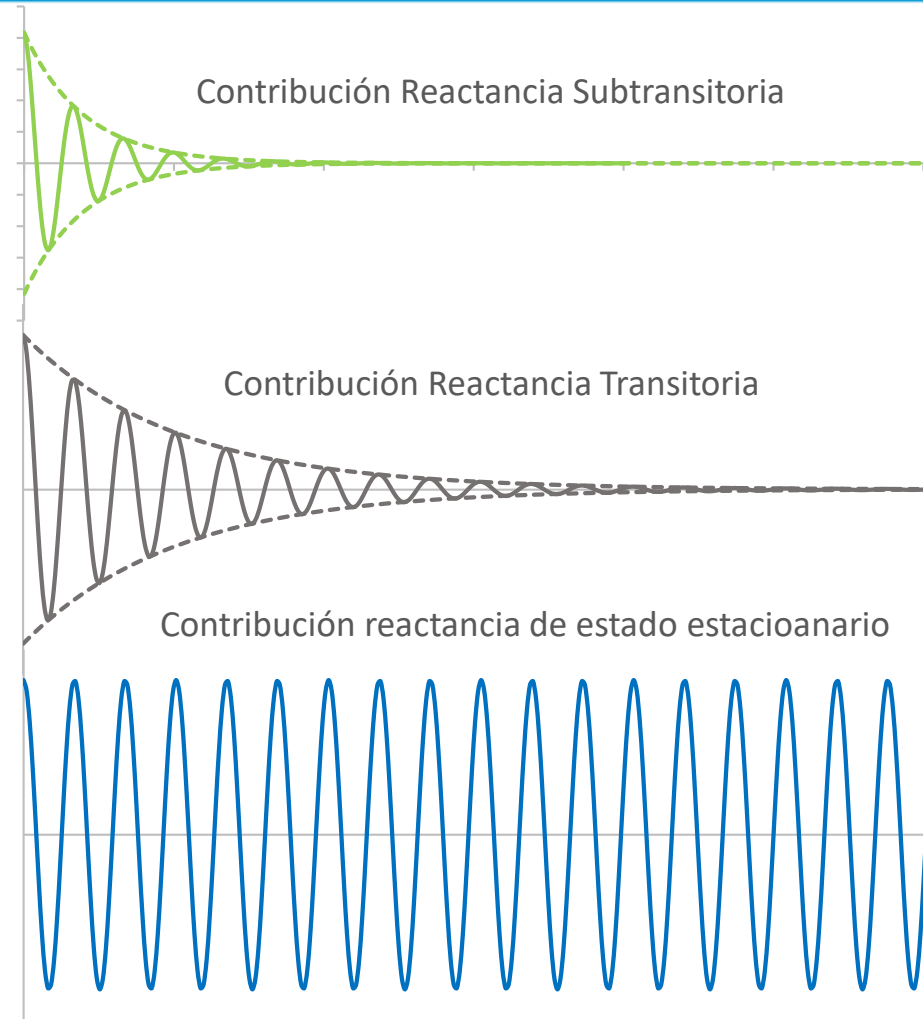


CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO EN LOS TERMINALES DE UN GENERADOR

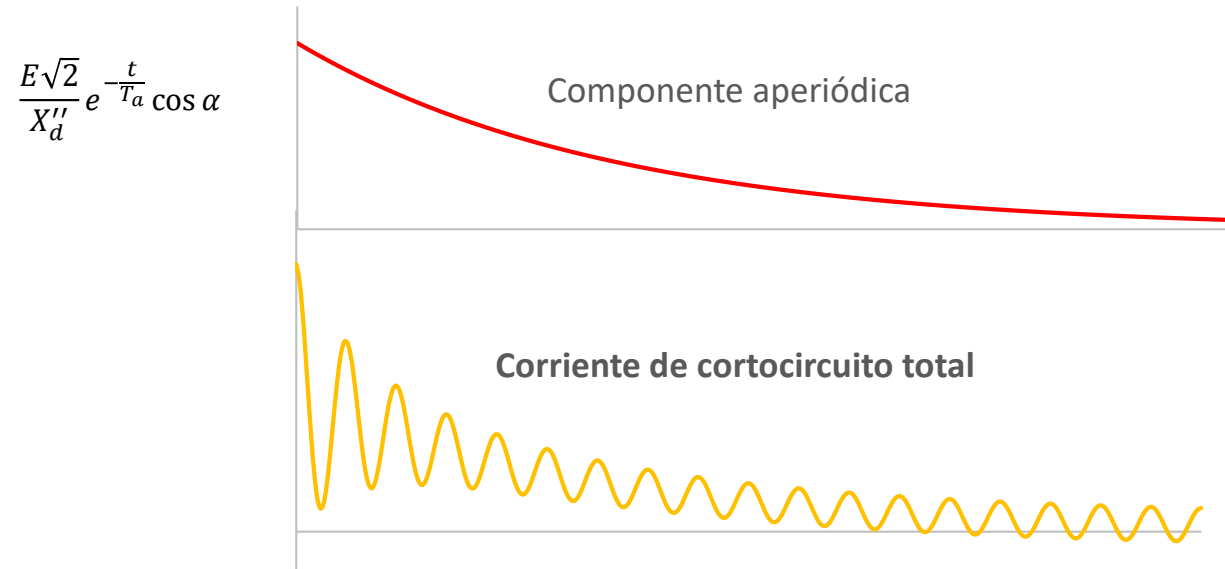
$$E\sqrt{2}\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'}\right)e^{-\frac{t}{T_d''}}\cos(\omega t + \alpha)$$

$$E\sqrt{2}\left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d}\right)e^{-\frac{t}{T_d'}}\cos(\omega t + \alpha)$$

$$E\sqrt{2}\frac{1}{X_d}\cos(\omega t + \alpha)$$

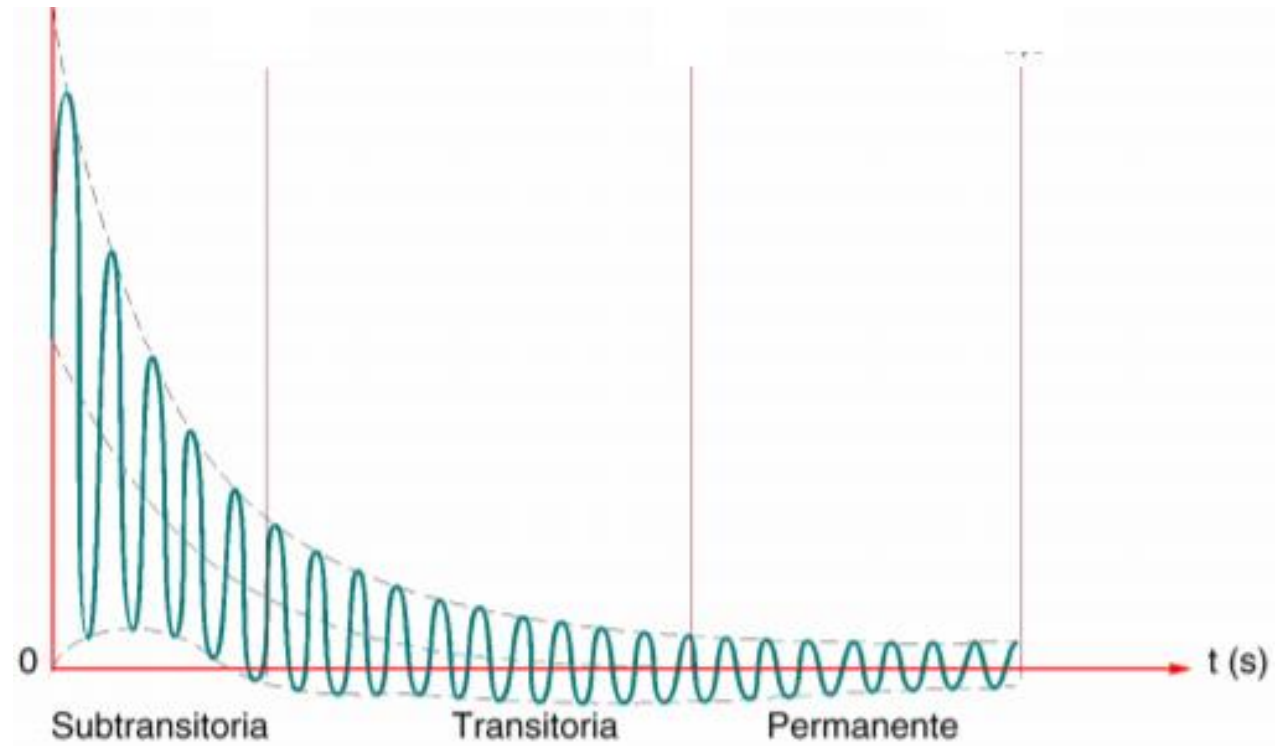


CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO EN LOS TERMINALES DE UN GENERADOR



CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO EN LOS TERMINALES DE UN GENERADOR

- Estado Subtransitorio: 10-20 ms
- Estado Transitorio: hasta 500 ms
- Estado Permanente: después de transitorio



Fuente: Calculation of Short-circuit currents, Schneider Electric



¿CUANDO LA FALLA NO ES BALANCEADA?



COMPONENTES SIMÉTRICAS

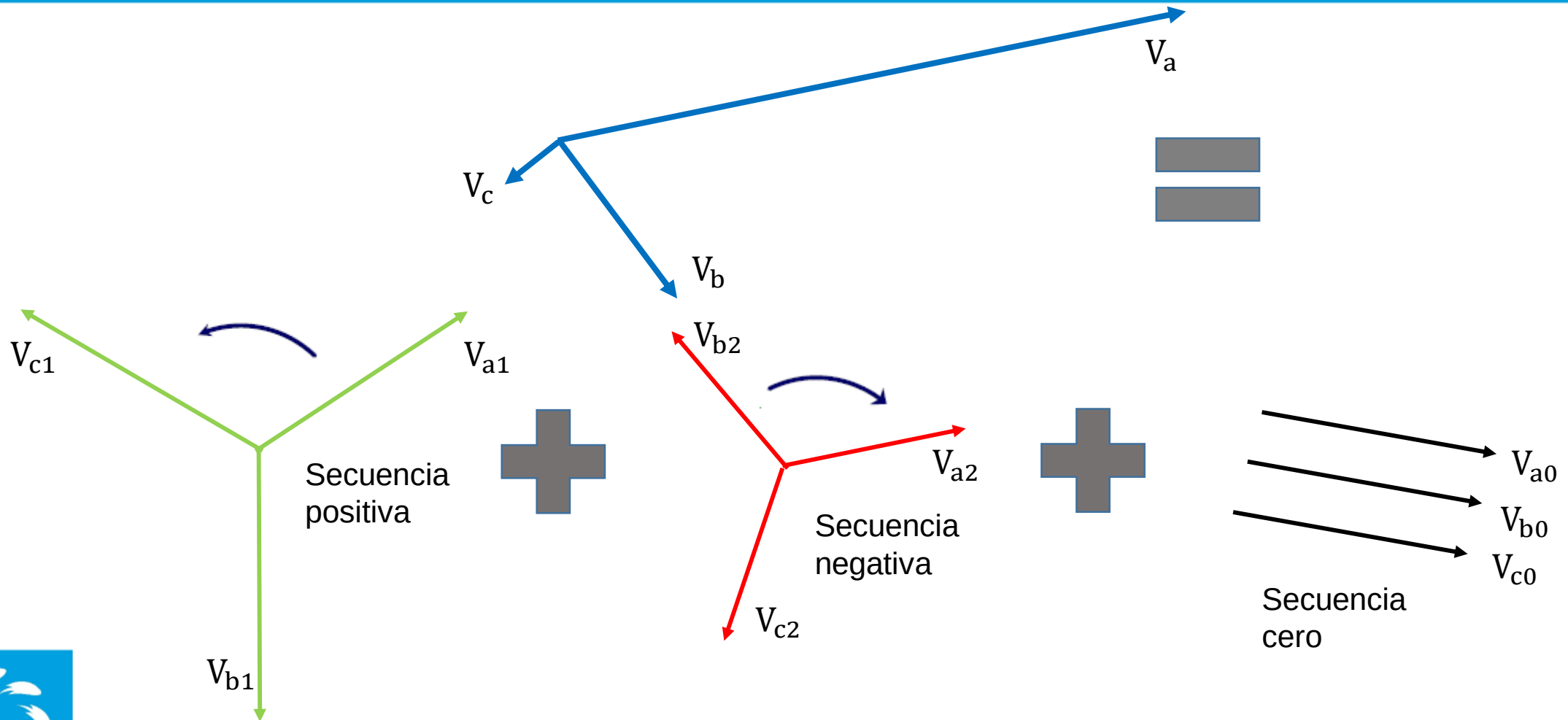
El concepto general de las componentes simétricas fue primero desarrollado por C.L. Fortescue en 1918.

En un sistema trifásico, un conjunto de tres fasores desbalanceados pueden ser resueltos en tres sistemas de fasores como sigue:

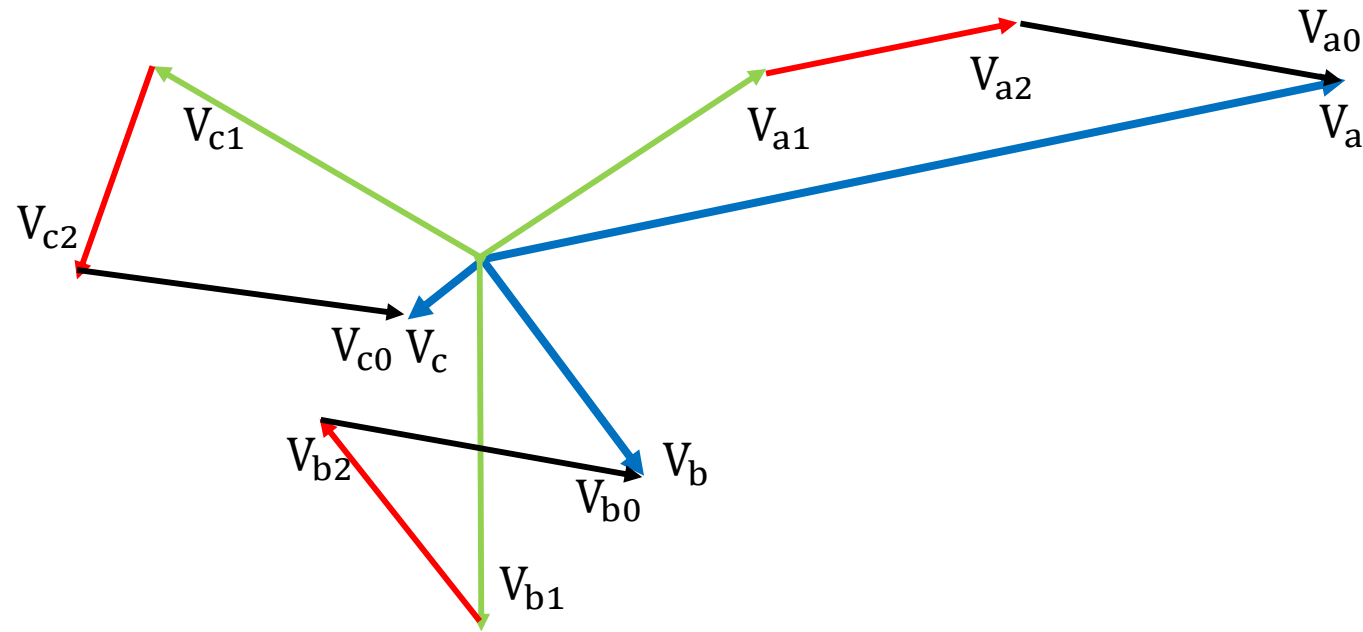
- (a) **Secuencia positiva:** tres fasores con la misma secuencia de fase
- (b) **Secuencia negativa:** tres fasores con la secuencia de fase opuesta.
- (c) **Componentes de secuencia cero:** tres fasores de igual magnitud y fase.



COMPONENTES SIMÉTRICAS



COMPONENTES SIMÉTRICAS



Se define el operador:

$$a = 1 \angle 120^\circ \Rightarrow a^2 = 1 \angle -120^\circ$$



COMPONENTES SIMÉTRICAS

Las tensiones:

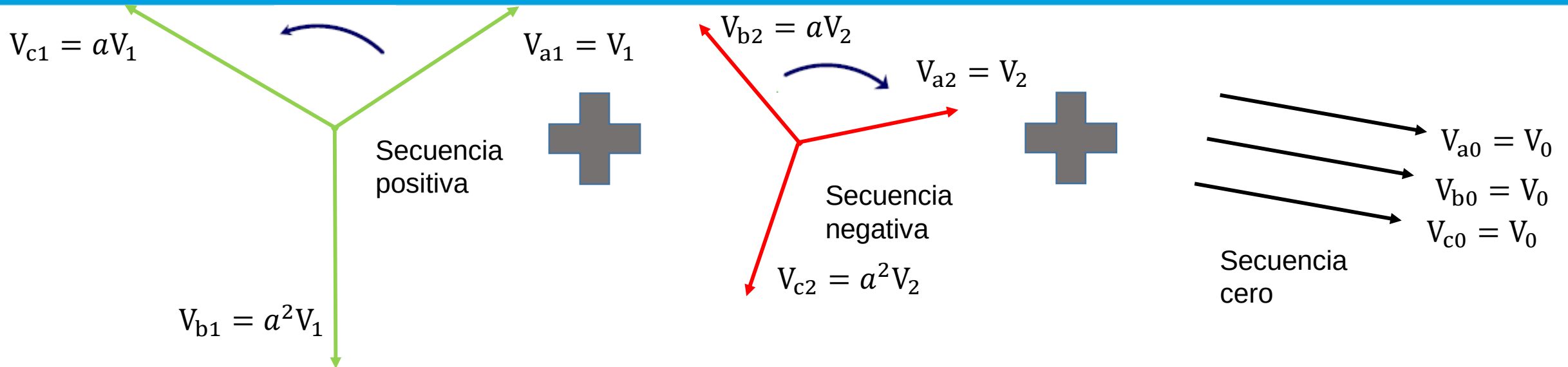
$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2}$$

$$V_b = V_{b0} + V_{b1} + V_{b2}$$

$$V_c = V_{c0} + V_{c1} + V_{c2}$$



COMPONENTES SIMÉTRICAS



$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = V_0 + V_1 + V_2$$

$$V_b = V_{b0} + V_{b1} + V_{b2} = V_0 + a^2 V_1 + a V_2$$

$$V_c = V_{c0} + V_{c1} + V_{c2} = V_0 + a V_1 + a^2 V_2$$



COMPONENTES SIMÉTRICAS

Tenemos en forma matricial:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad [A] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$



COMPONENTES SIMÉTRICAS

Podemos calcular la inversa:

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = [A^{-1}] \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad [A^{-1}] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$



COMPONENTES SIMÉTRICAS

$$3V_0 = V_a + V_b + V_c$$

$$3V_1 = V_a + aV_b + a^2V_c$$

$$3V_2 = V_a + a^2V_b + aV_c$$

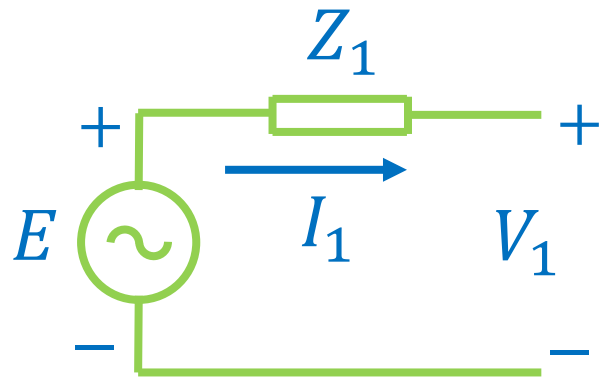
Para corrientes es análogo:

$$3I_0 = I_a + I_b + I_c$$



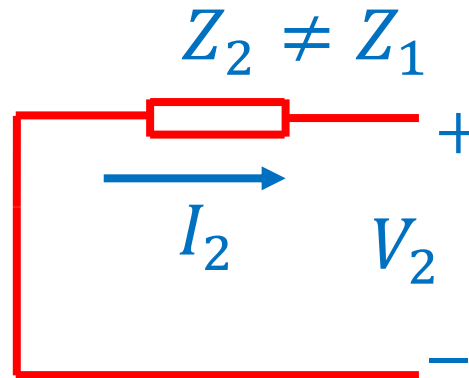
REDES DE SECUENCIA DE UN GENERADOR

Positiva



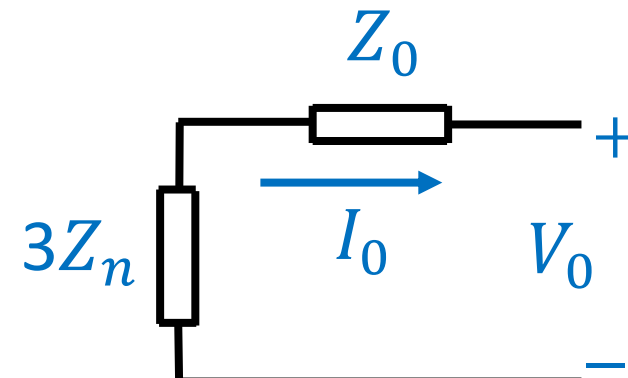
$$\bar{E} = \bar{Z}_1 \bar{I}_1 + \bar{V}_1$$

Negativa



$$0 = \bar{Z}_2 \bar{I}_2 + \bar{V}_2$$

Cero

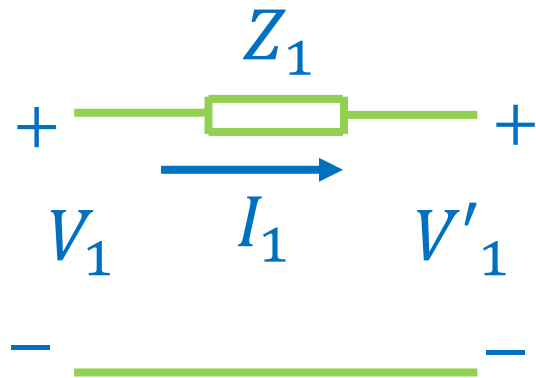


$$0 = (\bar{Z}_0 + 3\bar{Z}_n) \bar{I}_0 + \bar{V}_0$$



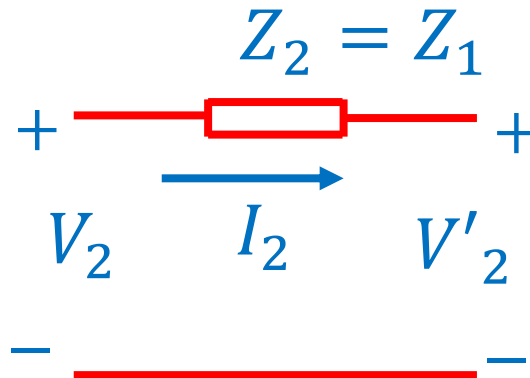
REDES DE SECUENCIA DE LÍNEA DE TRANSMISIÓN

Positiva



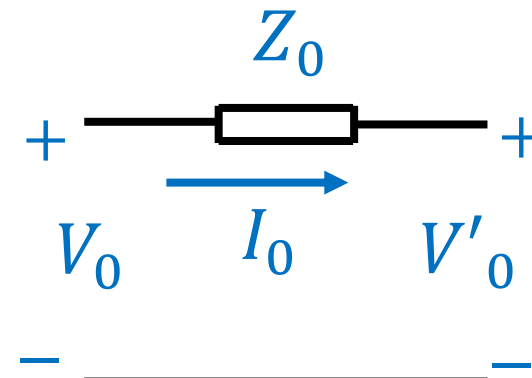
$$\bar{V}_1 = \bar{Z}_1 \bar{I}_1 + \bar{V}'_1$$

Negativa



$$\bar{V}_2 = \bar{Z}_2 \bar{I}_2 + \bar{V}'_2$$

Cero

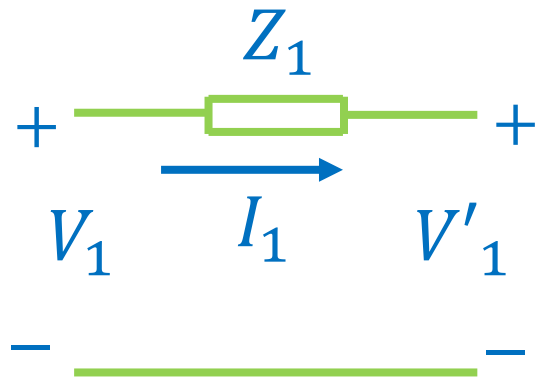


$$\bar{V}_0 = \bar{Z}_0 \bar{I}_0 + \bar{V}'_0$$



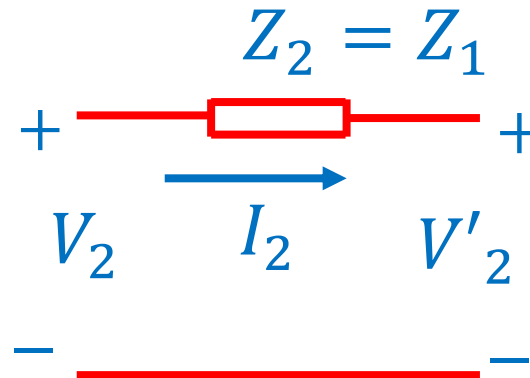
REDES DE SECUENCIA DE TRANSFORMADOR CON GRUPO DE CONEXIÓN $Y_N Y_N$

Positiva



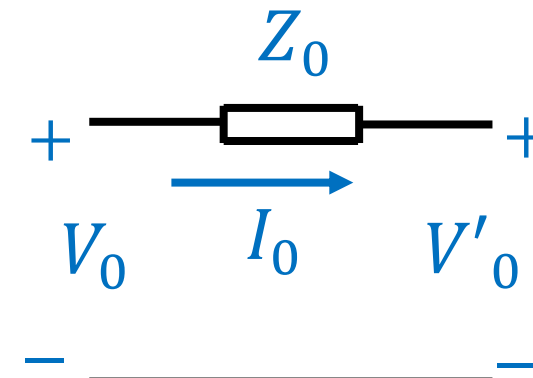
$$\bar{V}_1 = \bar{Z}_1 \bar{I}_1 + \bar{V}'_1$$

Negativa



$$\bar{V}_2 = \bar{Z}_2 \bar{I}_2 + \bar{V}'_2$$

Cero

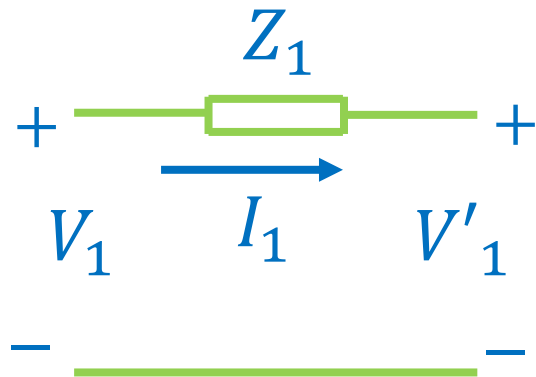


$$\bar{V}_0 = \bar{Z}_0 \bar{I}_0 + \bar{V}'_0$$



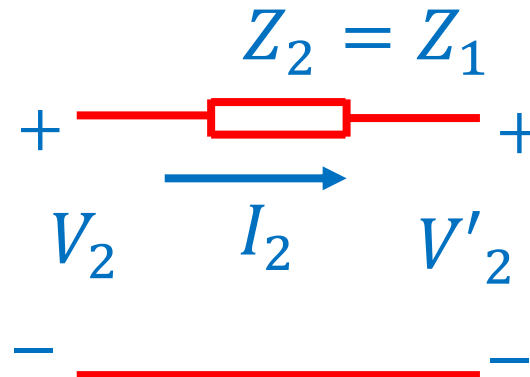
REDES DE SECUENCIA DE TRANSFORMADOR CON GRUPO DE CONEXIÓN Δ -Y_N

Positiva



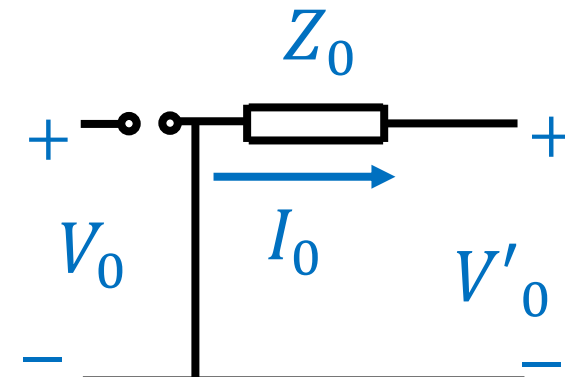
$$\bar{V}_1 = \bar{Z}_1 \bar{I}_1 + \bar{V}'_1 e^{-j30^\circ}$$

Negativa



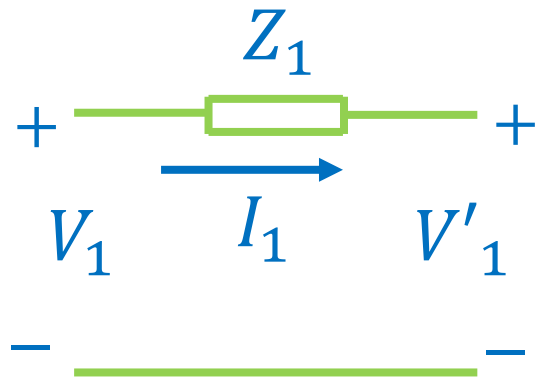
$$\bar{V}_2 = \bar{Z}_2 \bar{I}_2 + \bar{V}'_2 e^{j30^\circ}$$

Cero



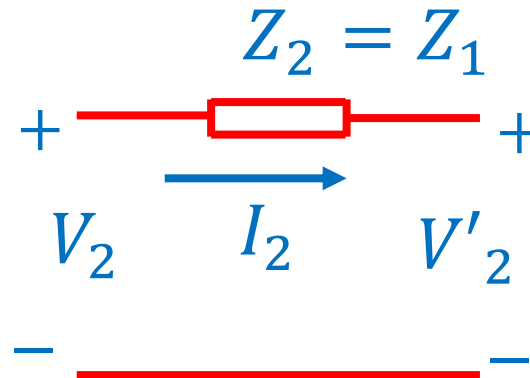
REDES DE SECUENCIA DE TRANSFORMADOR CON GRUPO DE CONEXIÓN $Y_N-\Delta$

Positiva



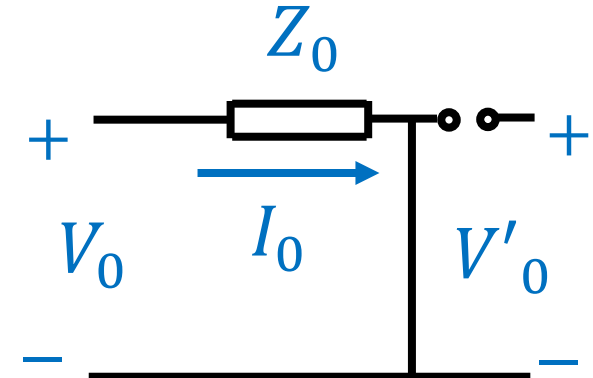
$$\bar{V}_1 = \bar{Z}_1 \bar{I}_1 + \bar{V}'_1 e^{j30^\circ}$$

Negativa

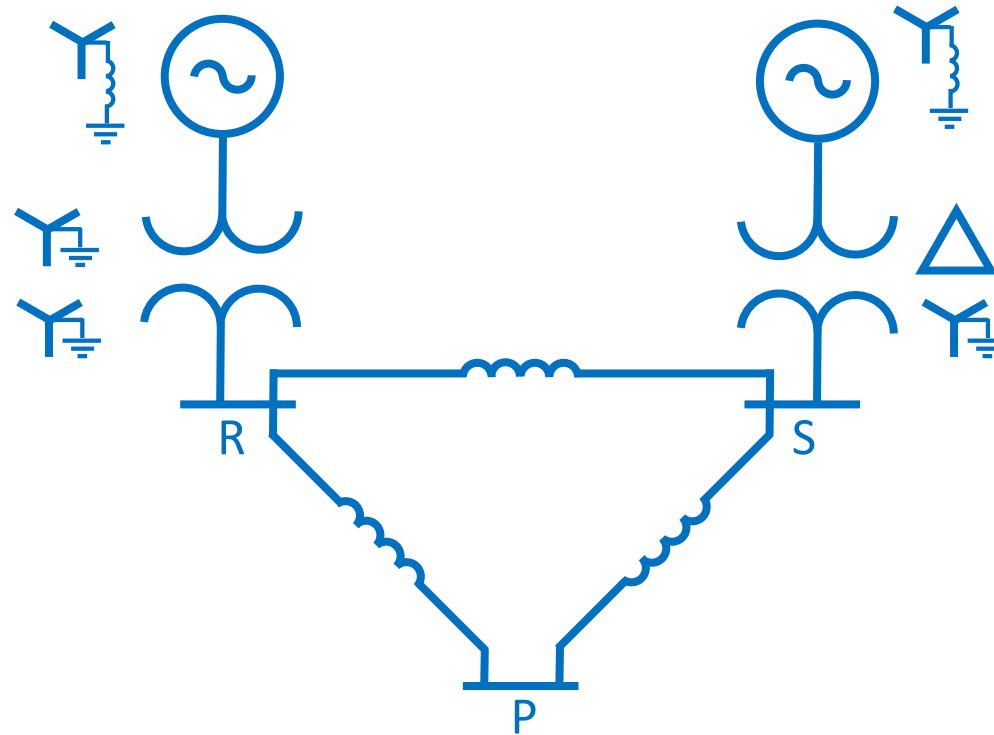


$$\bar{V}_2 = \bar{Z}_2 \bar{I}_2 + \bar{V}'_2 e^{-j30^\circ}$$

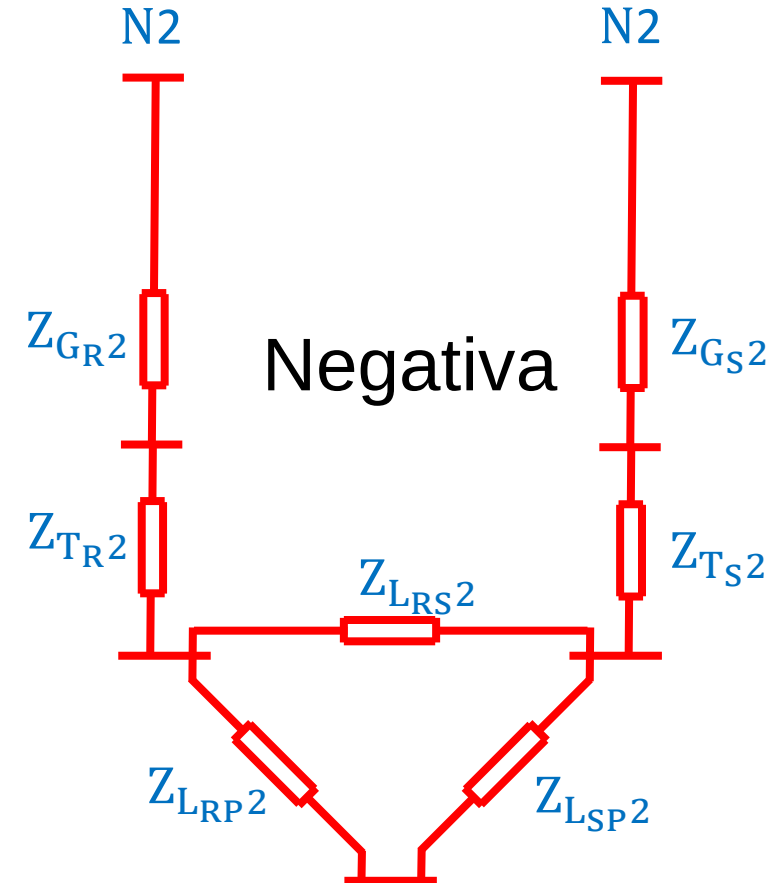
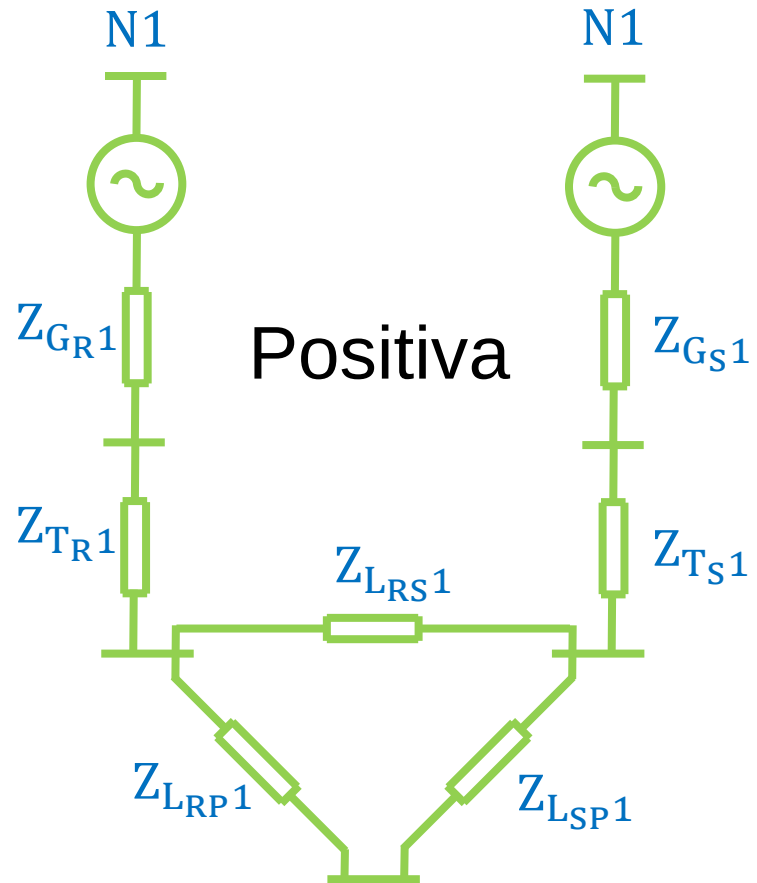
Cero



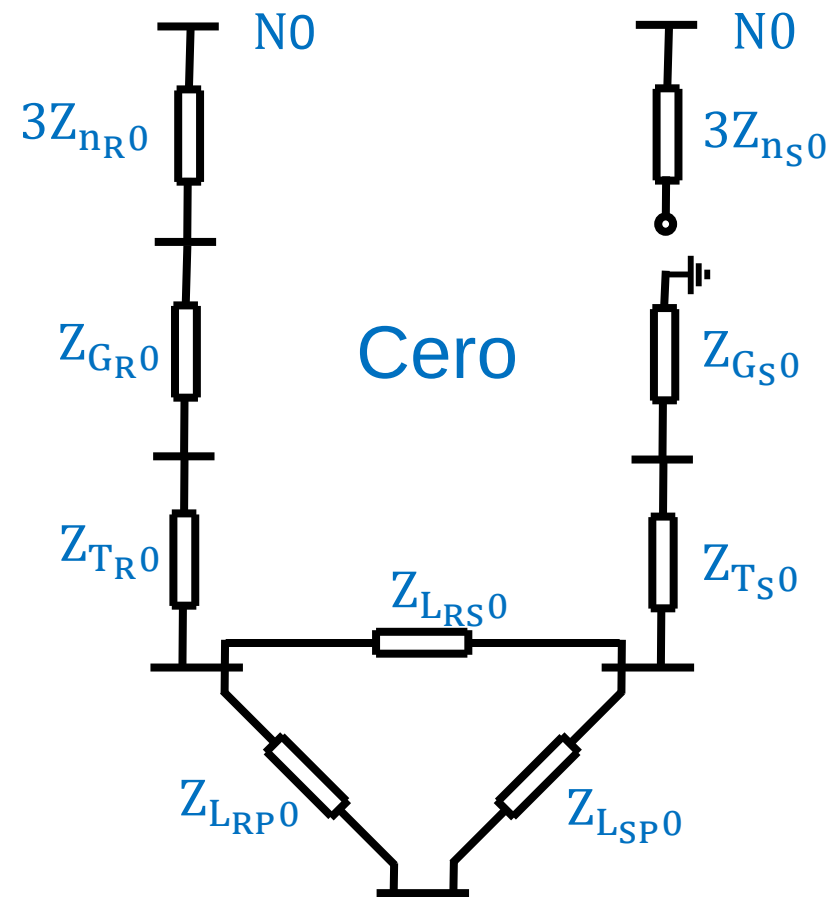
EJEMPLO: DESARROLLAR LAS REDES DE SECUENCIA DEL SIGUIENTE SISTEMA



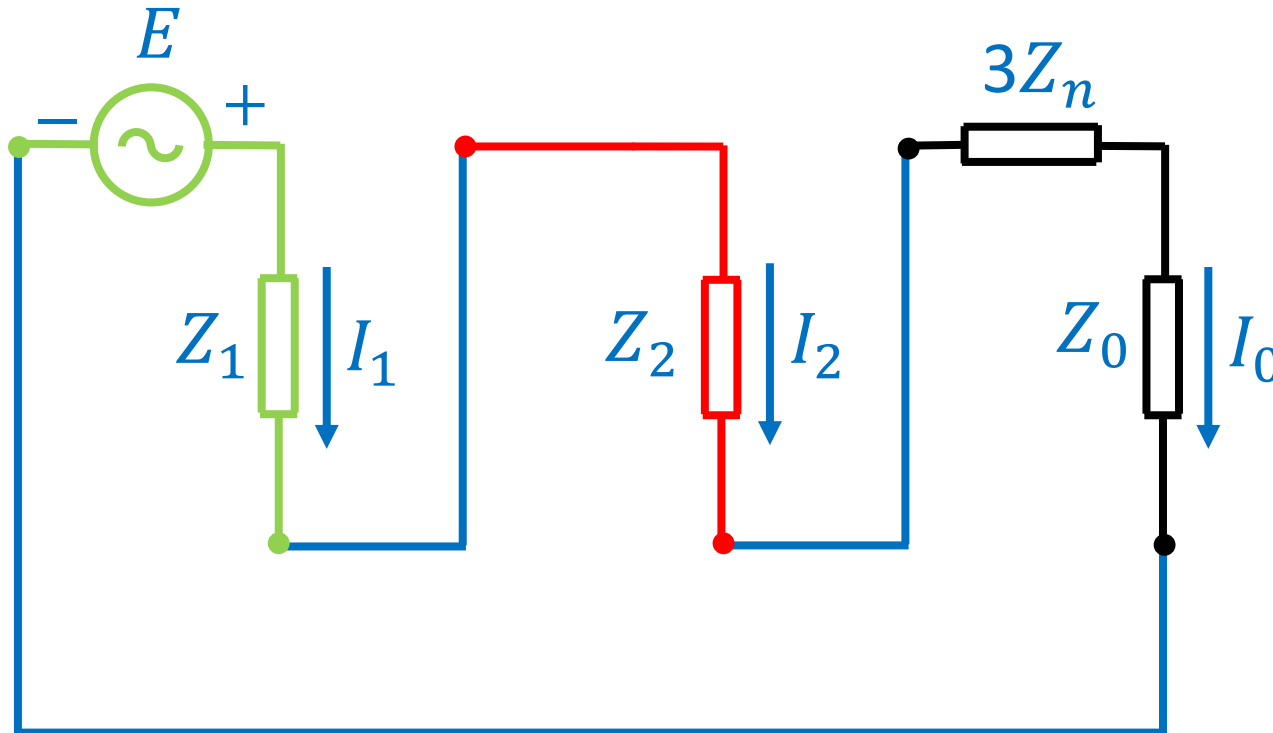
SOLUCIÓN:



SOLUCIÓN:



REDES DE SECUENCIA: FALLA MONOFÁSICA A TIERRA



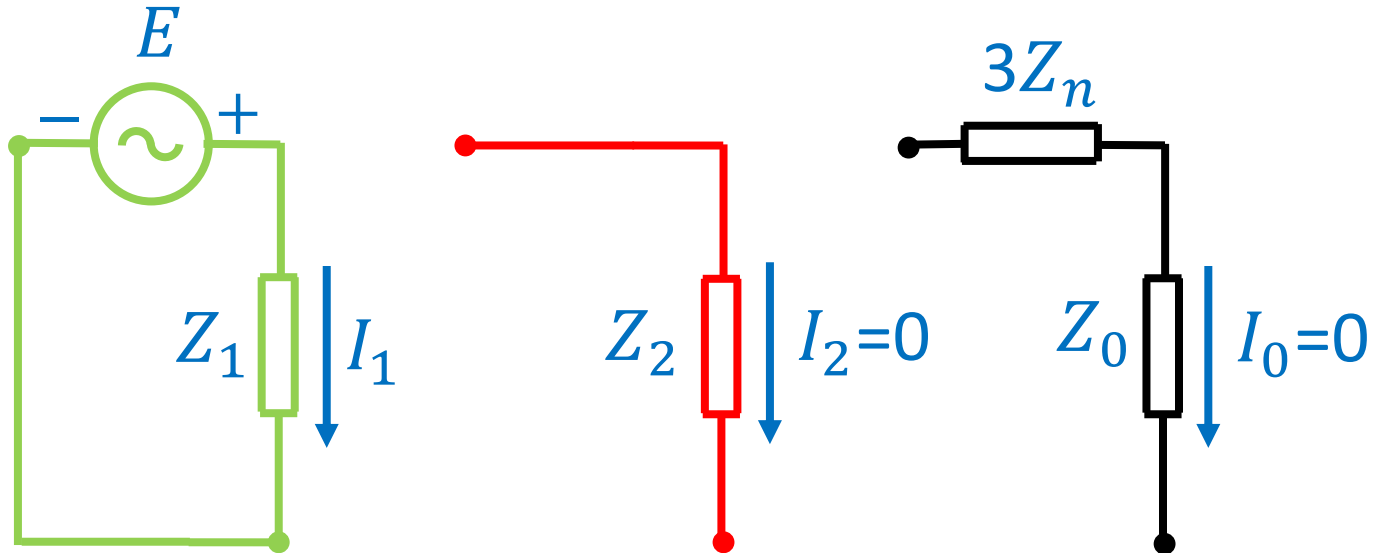
Corriente de falla

$$\frac{\bar{I}_a}{3} = \bar{I}_0 = \bar{I}_1 = \bar{I}_2$$

$$\frac{\bar{I}_a}{3} = \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_0 + \bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + 3\bar{Z}_n}$$



REDES DE SECUENCIA: FALLA TRIFÁSICA



Corriente de falla

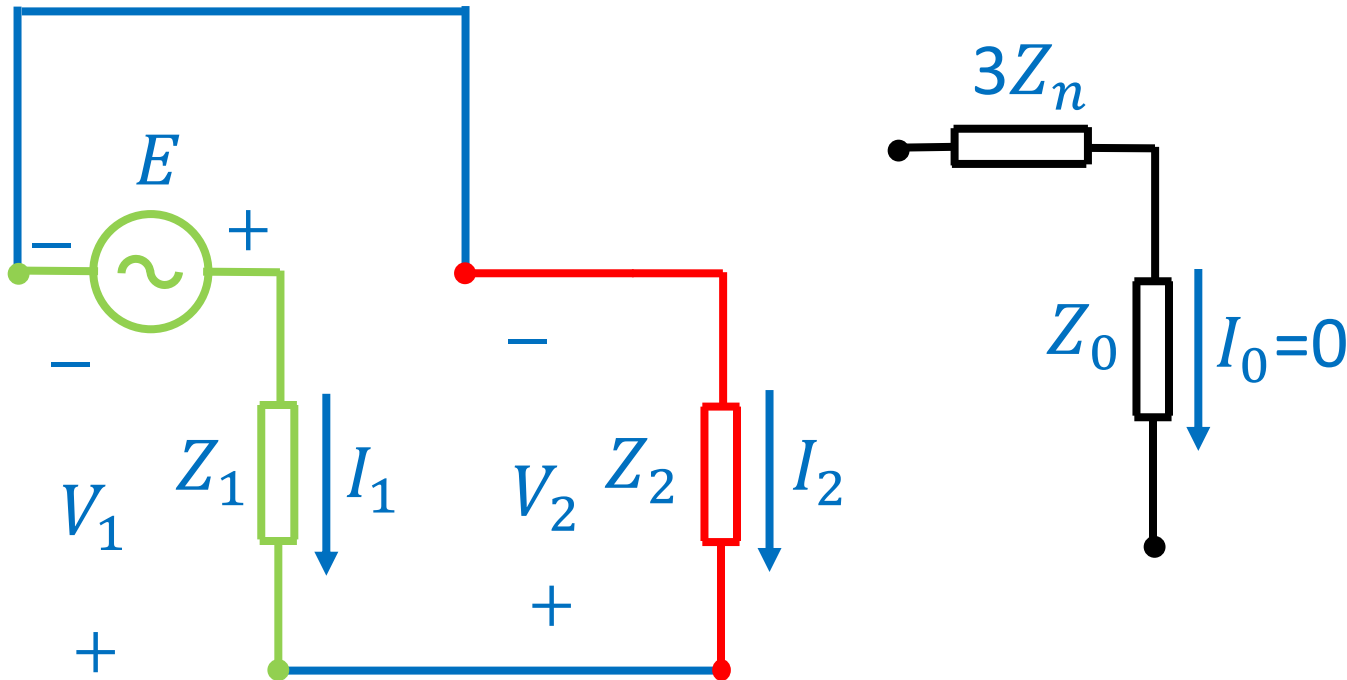
$$\bar{I}_a = \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_1}$$

$$\bar{I}_b = a^2 \bar{I}_a$$

$$\bar{I}_c = a \bar{I}_a$$



REDES DE SECUENCIA: FALLA BIFÁSICA



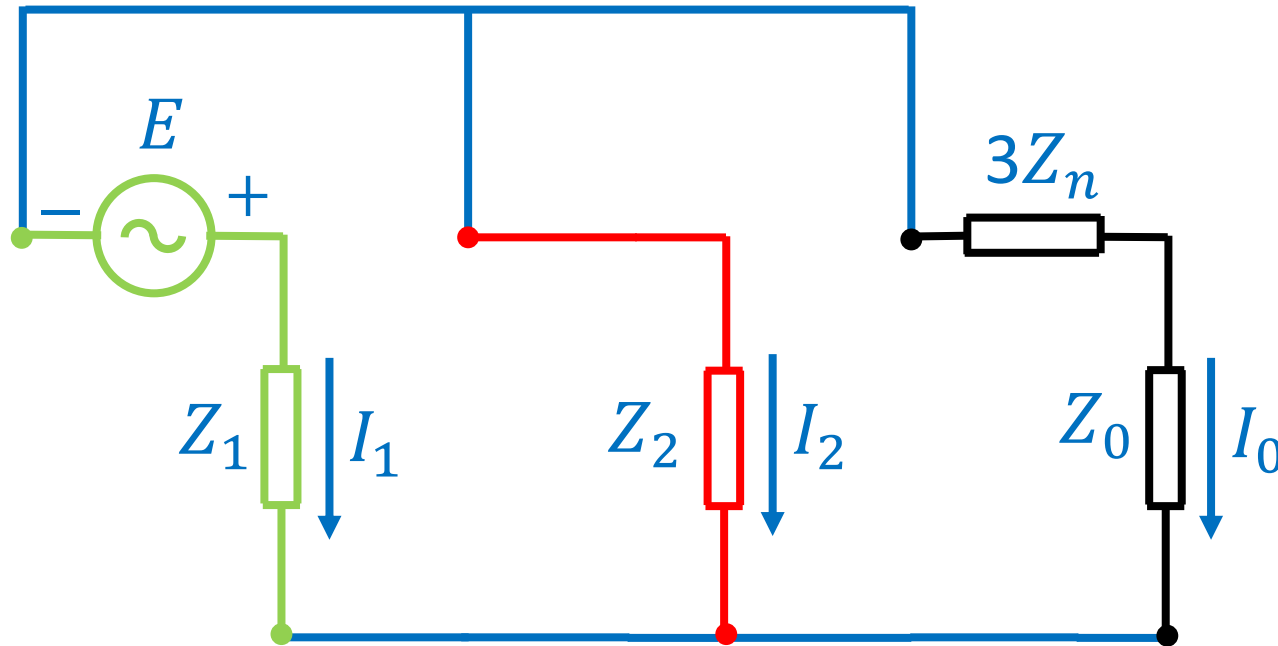
Corriente de falla

$$\bar{I}_b = -\bar{I}_c = (a^2 - a)\bar{I}_1$$

$$\bar{I}_b = \frac{-j\sqrt{3}\bar{E}}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2}$$



REDES DE SECUENCIA: FALLA BIFÁSICA A TIERRA



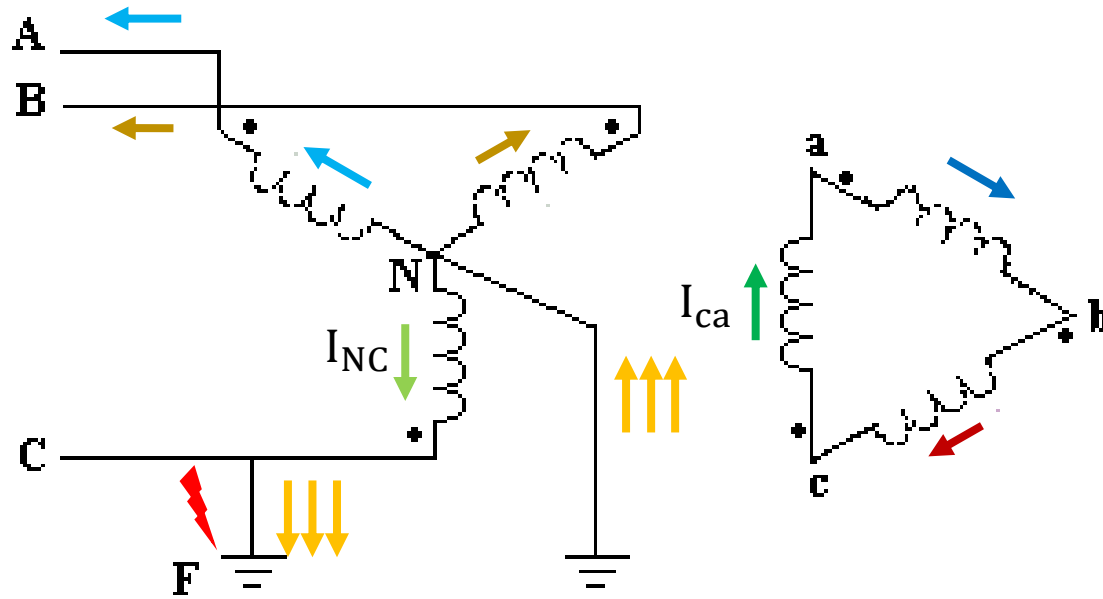
Corriente de falla

$$\frac{\bar{V}_a}{3} = \bar{V}_0 = \bar{V}_1 = \bar{V}_2$$

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 \parallel \bar{Z}_0}$$



DEVANADO Δ : FUENTE DE SECUENCIA 0



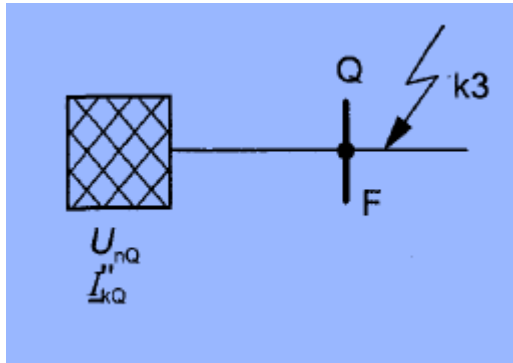
http://patricioconcha.ubb.cl/transformadores/trafo_trifasico.htm

- Se presenta una falla en C.
- La corriente retorna a través del neutro.
- Parte de esta corriente circula a través del primario del transformador I_{NC} .
- También hay una corriente I_{ca} en el secundario.
- Esta corriente circulará por los otros devanados.
- Por lo tanto en los primarios también circularán corrientes, de igual intensidad.



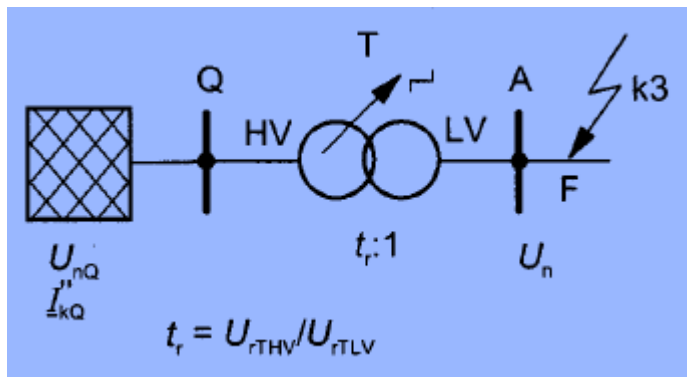
MODELO DE ELEMENTOS PARA CORTOCIRCUITO

❑ Red externa:



$$\triangleright Z_{N1} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}I_k''}$$

$$\triangleright Z_{N2} = Z_{N1}$$



Source: IEC 60909 - 0



MODELO DE ELEMENTOS PARA CORTOCIRCUITO

❑ Red externa:

¿Qué pasa si solo tenemos como datos $I_{cc3\phi}$ y $I_{cc1\phi}$?

$$\triangleright X_1 = \frac{V_L}{\sqrt{3}I_{cc3\phi}}$$

$$\triangleright X_0 = \frac{\sqrt{3}V_L}{I_{cc1\phi}} - \frac{2V_L}{\sqrt{3}I_{cc3\phi}}$$



MODELO DE ELEMENTOS PARA CORTOCIRCUITO

□ Líneas y cables

- R_{L1}, X_{L1} de acuerdo a la geometría del conductor o datos de fabricantes.
- $Z_{L2} = Z_{L1}$
- R_{L0}, X_{L0} , de acuerdo a la geometría de conductores y características del terreno.



MODELO DE ELEMENTOS PARA CORTOCIRCUITO

□ Transformador de 2 devanados

$$\blacktriangleright Z_{HV1} = Z_{cc\%} \frac{U_{HV}^2}{S}$$

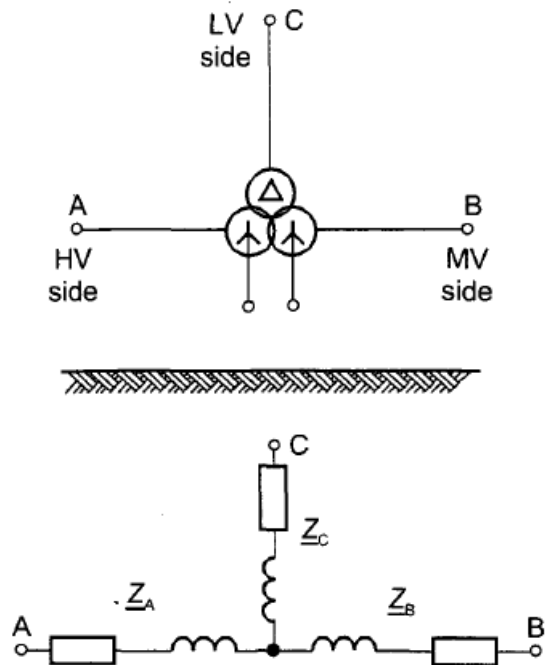
$$\blacktriangleright Z_{HV2} = Z_{HV1}$$

La secuencia cero depende del grupo de conexión.



MODELO DE ELEMENTOS PARA CORTOCIRCUITO

❑ Transformador de 3 devanados



01

Source: IEC 60909 - 0

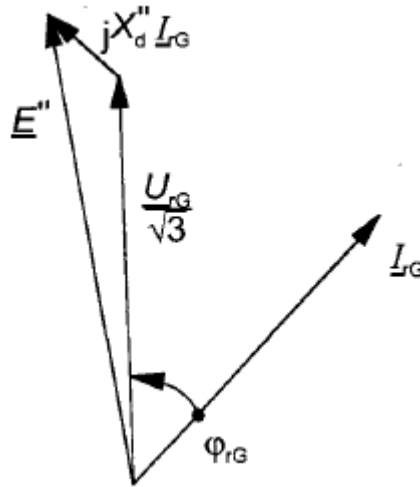
- $Z_{HV11} = \frac{1}{2}(Z_{\Sigma 12,1} - Z_{\Sigma 23,1} + Z_{\Sigma 31,1})$
- $Z_{HV21} = \frac{1}{2}(Z_{\Sigma 12,1} + Z_{\Sigma 23,1} - Z_{\Sigma 12,1})$
- $Z_{HV31} = \frac{1}{2}(-Z_{\Sigma 12,1} + Z_{\Sigma 23,1} + Z_{\Sigma 12,1})$
- $Z_{HVi2} = Z_{HVi1}$

La secuencia cero depende del grupo de conexión.



MODELO DE ELEMENTOS PARA CORTOCIRCUITO

□ Generador síncrono:



Source: IEC 60909 - 0

- $Z_{S1} = R_S + jX_d''$
- $Z_{S1} = R_S + jX_2'' = R_S + jX_2$
- Normalmente $X_2 = X_d''$

Si $X_d'' \neq X_q''$:

$$X_2'' = \frac{1}{2} (X_d'' + X_q'')$$



MODELO DE ELEMENTOS PARA CORTOCIRCUITO

❑ Generador síncrono:

R_S/X_d''	U_{rG}	S_{rG}
0.15	≤ 1 kV	any
0.07	> 1 kV	< 100 MVA
0.05	> 1 kV	≥ 100 MVA

Source: IEC 60909 - 0



MODELO DE ELEMENTOS PARA CORTOCIRCUITO

❑ Máquina asíncrona:

$$\triangleright Z_{Ak} = \frac{1}{\left(\frac{I_{LR}}{I_{rM}}\right)} \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}}$$

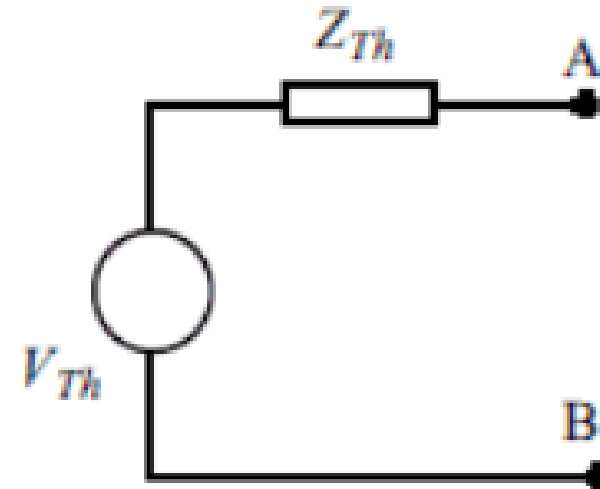
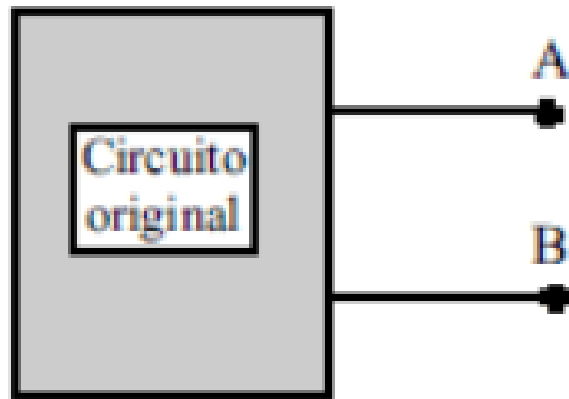
R_M/X_M	U_{rM}	P_{rM}
0.1	> 1 kV	≥ 1 MW
0.15	> 1 kV	< 1 MW
0.05	≤ 1 kV	any

Source: IEC 60909 - 0



MÉTODO DE THEVENIN

- Consta de una fuente ideal de tensión, en serie con una impedancia Z_{th} .

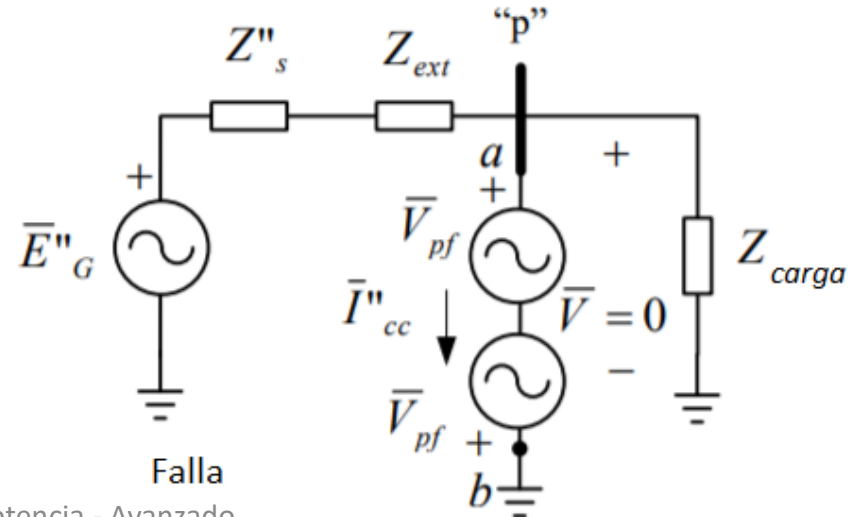
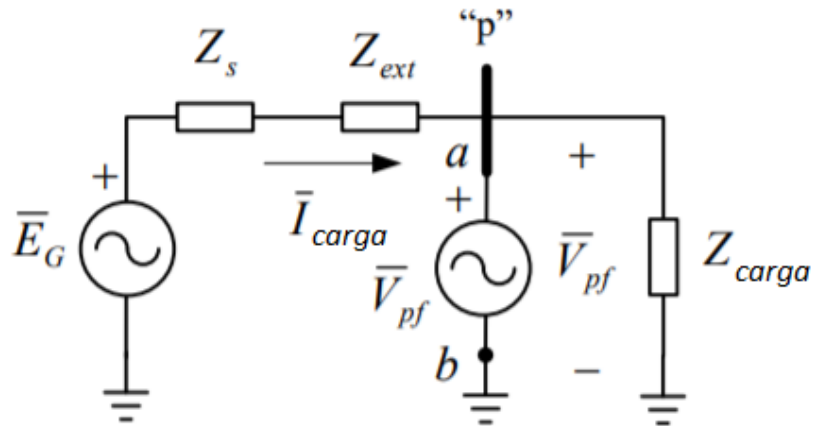
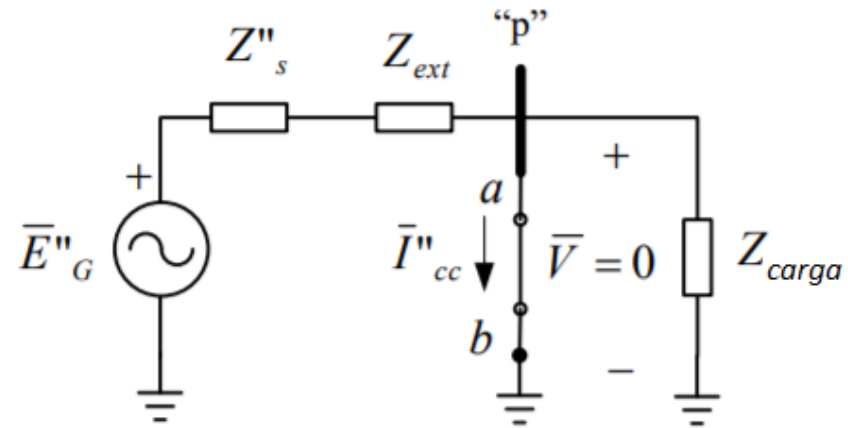
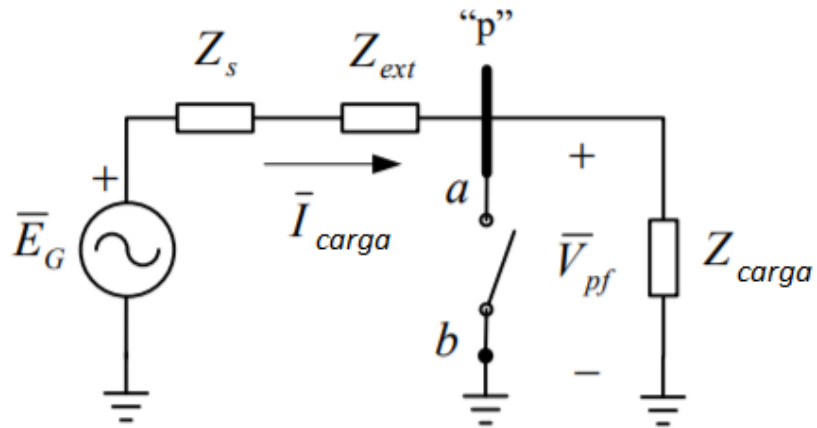


MÉTODO DE THEVENIN

- Supongamos que existe un generador síncrono, el cual alimenta a una carga Z_{carga} , a través de impedancia externa, y se produce un cortocircuito en los terminales de la carga.



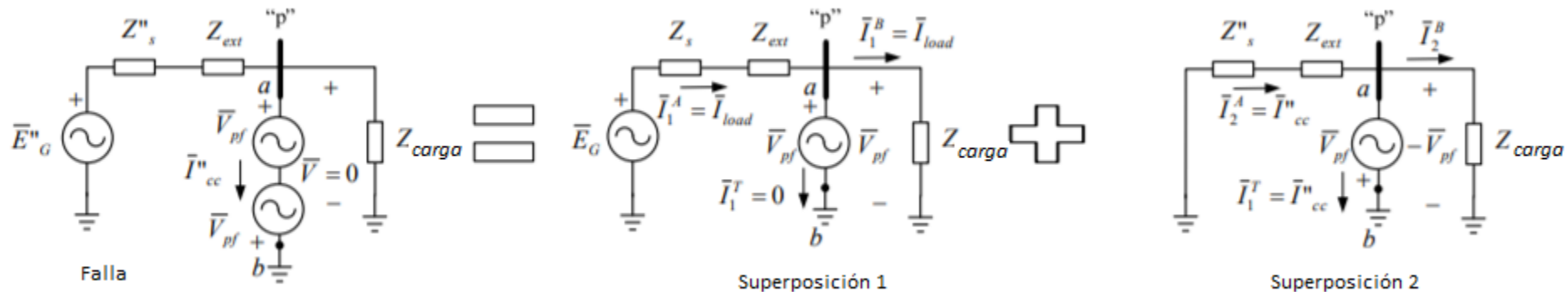
MÉTODO DE THEVENIN



MÉTODO DE THEVENIN

Es equivalente a dos superposiciones.

1. Se deja operando la fuente V_{pf} y la tensión interna del generador E_G'' .
2. Se procede a cortocircuitar las fuentes E_G'' y V_{pf} , solo queda $-V_{pf}$.



$$\bar{I}_{CC}'' = \frac{\bar{V}_{pf}(Z_{carga} + Z_s'' + Z_{ext})}{Z_{carga}(Z_s'' + Z_{ext})} = \frac{E_G'' Z_{carga}}{Z_{carga}(Z_s'' + Z_{ext})}$$



FACTORES DE CORRECCIÓN

Tensión Nominal	Máxima corriente de cortocircuito (c_{max})	Mínima corriente de cortocircuito (c_{min})
Baja tensión $U_n \leq 1 \text{ kV}$	1.05 (con $U_{max} \leq 1.06 U_n$) 1.10 (con $U_{max} \leq 1.10 U_n$)	0.95
Media tensión $1 \text{ kV} < U_n \leq 35 \text{ kV}$	1.10	1.00
Alta tensión $35 \text{ kV} < U_n$	1.10 Si U_n no está definido: $c_{max} U_n \rightarrow U_{max}$	1.00 Si U_n no está definido: $c_{min} U_n \rightarrow 0.9 U_{max}$

Source: IEC 60909 - 0

