



Cálculo de Cortocircuitos Asimétricos

Pablo Medina Cofré

Motivación

- Frecuencia de cortocircuitos por tipo:
 - **Monofásicos: 70 a 80%**
 - **Bifásicos: 10 %**
 - Trifásicos: 8 a 10%
- En condiciones de falla y post falla, es frecuente que el sistema opere de manera desbalanceada

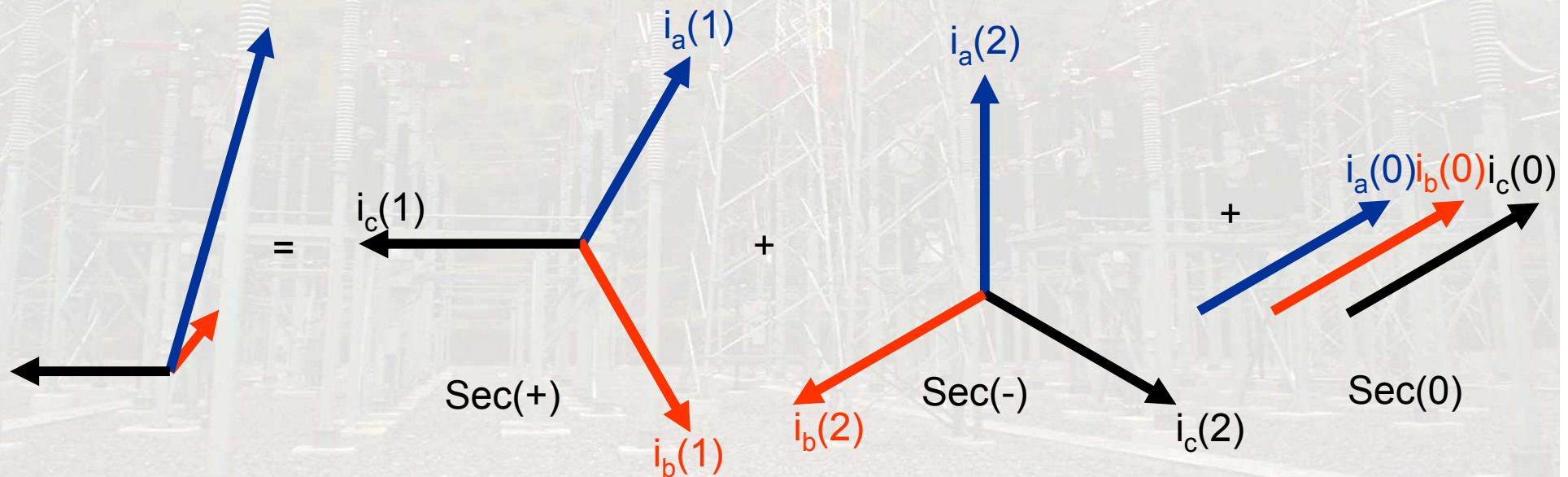
Fuente: R. Palma

Objetivos

- Utilizar la transformada de Fortescue para la resolución de circuitos trifásicos desbalanceados
- Calcular variables eléctricas en presencia de fallas asimétricas

Transformada de Fortescue

- Tres vectores “desbalanceados” se pueden escribir como suma de vectores balanceados de:
 - Secuencia positiva
 - Secuencia negativa
 - Secuencia cero



Transformada de Fortescue(II)

- Definiendo:

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

Sec. positiva :

$$i_b^{(1)} = a^2 \cdot i_a^{(1)}, i_c^{(1)} = a \cdot i_a^{(1)}$$



$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a^{(1)} \\ i_a^{(2)} \\ i_a^{(0)} \end{bmatrix}$$

Sec. negativa :

$$i_b^{(2)} = a \cdot i_a^{(2)}, i_c^{(2)} = a^2 \cdot i_a^{(2)}$$

$$i_{\text{fisico}} = A \cdot i_{\text{secuencia}}$$

Sec. cero :

$$i_a^{(0)} = i_b^{(0)} = i_c^{(0)}$$

Algunas propiedades

- La matriz A , es invertible. Luego, existe una única relación entre vectores de secuencias y vectores “físicos”

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

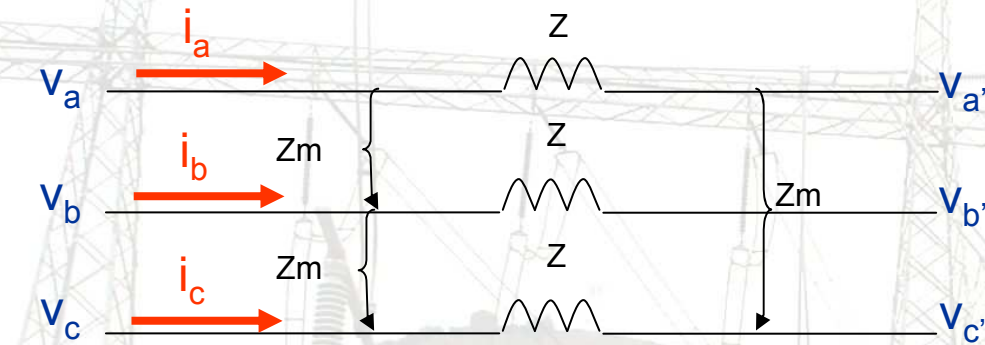
- Invariancia de la potencia trifásica

$$\begin{aligned} S &= V_a I_a^* + V_b I_b^* + V_c I_c^* \\ &= \left(A V_{\text{secuencia}} \right)^T \left(A I_{\text{secuencia}} \right)^* = V_{\text{secuencia}}^T A^T A^* I_{\text{secuencia}}^* \\ &= 3 V_{\text{secuencia}}^T I_{\text{secuencia}}^* = 3 V_a^{(1)} I_a^{(1)} + 3 V_a^{(2)} I_a^{(2)} + 3 V_a^{(0)} I_a^{(0)} \end{aligned}$$

Impedancias de secuencia

- Es la impedancia ofrecida por un elemento a la corriente de una determinada secuencia
 - Impedancias de secuencia positiva
 - Impedancias de secuencia negativa
 - Impedancia de secuencia cero

Líneas de transmisión



Tensiones respecto a tierra

$$i_n = i_a + i_b + i_c$$

$$\begin{bmatrix} \Delta V_a \\ \Delta V_b \\ \Delta V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

$$A \begin{bmatrix} \Delta V_a^{(1)} \\ \Delta V_a^{(2)} \\ \Delta V_a^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z \end{bmatrix} A \begin{bmatrix} I_a^{(1)} \\ I_a^{(2)} \\ I_a^{(0)} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta V_a^{(1)} \\ \Delta V_a^{(2)} \\ \Delta V_a^{(0)} \end{bmatrix} = A^{-1} \underbrace{\begin{bmatrix} Z & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z \end{bmatrix}}_{\text{Matrix}} A \begin{bmatrix} I_a^{(1)} \\ I_a^{(2)} \\ I_a^{(0)} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Z - Z_m & & \\ & Z - Z_m & \\ & & Z - 2Z_m \end{bmatrix}$$

Máquinas síncronas

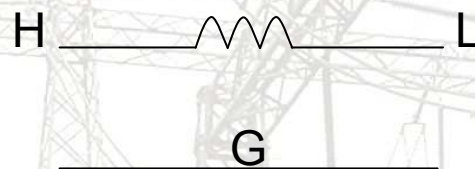
- Secuencia positiva
 - Las reactancias son X_d'' , X_d' o X_d
- Secuencia negativa
 - Si se aplica tensión de sec (-) en bornes, el flujo en el entrehierro gira en sentido contrario al rotor. Enrollado de campo asociado sólo a sec(+), luego no altera el comportamiento en sec(-)
 - Usualmente, $X^{(2)} \approx X_d$
- Secuencia cero
 - Corrientes sinusoidales iguales por enrollados separados a 120° producen flujo magnético igual a cero.
 - La reactancia de secuencia cero se aproxima a la reactancia de fuga, que es un valor pequeño. $X^{(0)} \approx X_l$

Transformadores

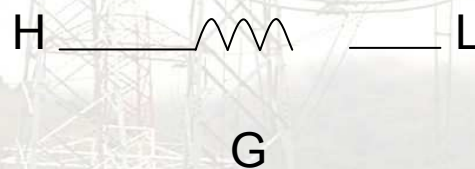
- Despreciando la corriente por la rama de magnetización, existe circulación de corriente en el secundario sólo si hay circulación de corriente en el primario
- No hay diferencia en el comportamiento inductivo si se le aplica tensión de corriente positiva o negativa.
 - $Z=Z^{(1)}=Z^{(2)}$
- En secuencia cero, se debe considerar dos aspectos:
 - a) Corriente de sec(0) sólo podría circular por una estrella si existe conexión del neutro a tierra
 - b) Corriente de sec(0) puede circular por una delta, pero no existe circulación por las líneas a las cuales está conectada

Transformadores (II)

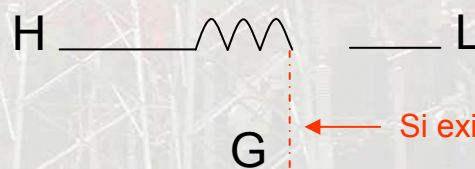
- Y-y con neutro



- Y-y sin neutro

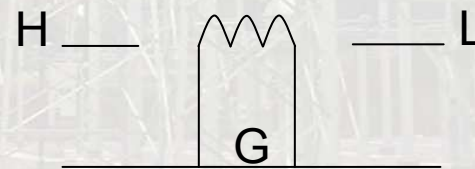


- Y-d



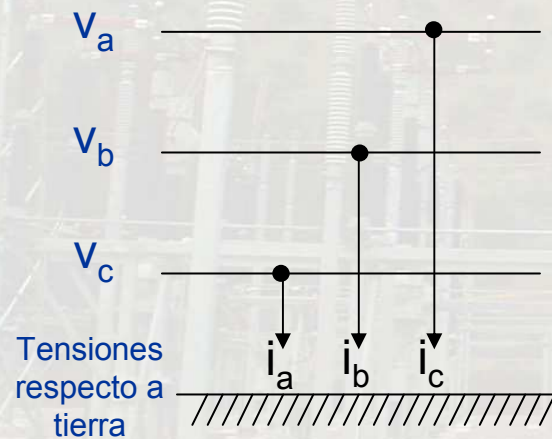
Si existe conexión del neutro a tierra

- D-d

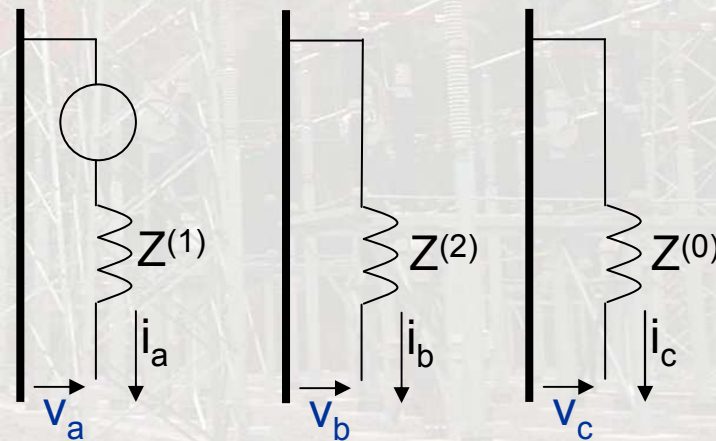


Metodología para el cálculo de fallas

- Supuestos:
 - Sistema operando sin carga
 - Voltajes pre-falla iguales en las barras de las máquinas sincrónicas
 - Acomplamientos entre circuitos son despreciables
- Sólo existen fems de sec(+)

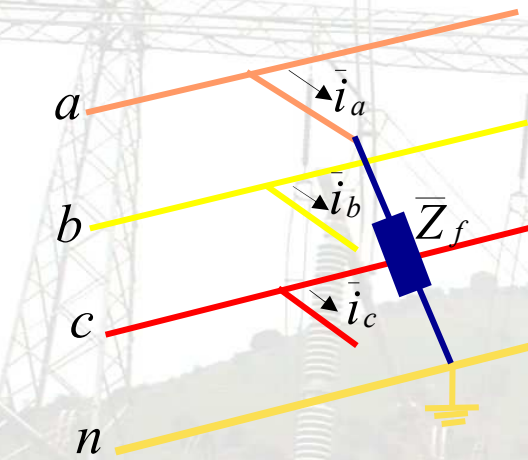


Reducción del sistema en el punto de falla



¡Imponer datos de variables físicas de acuerdo al tipo de falla!

Falla monofásica a tierra



R. Palma

- Datos de variables físicas:

- $i_b = i_c = 0$
- $v_a = 0$

- Incógnitas

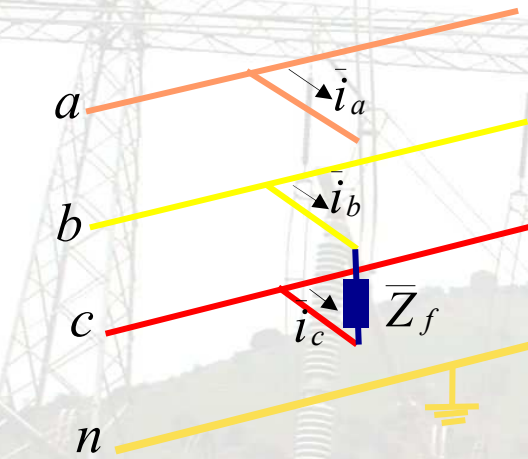
- v_b, v_c, i_a



- $v_a^{(1)} + v_a^{(2)} + v_a^{(0)} = \bar{Z}_f i_a$
- $i_a^{(1)} = i_a^{(2)} = i_a^{(0)} = 3i_a$

Mallas de secuencia se conectan en serie

Falla bifásica



R. Palma

- Datos de variables físicas:

- $i_b = -i_c, i_a = 0$
- $v_a = 0$

- Incógnitas

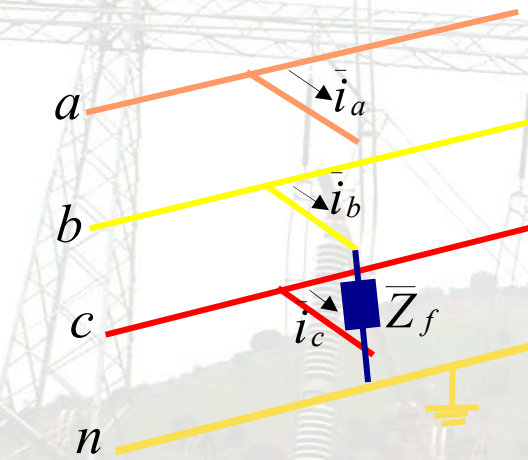
- v_a, v_b, v_c, i_a, i_c



- $v_a^{(1)} = v_a^{(2)} + Z_f i_a^{(1)}$
- $i_a^{(1)} = i_a^{(2)} = i_a^{(0)}, i_a^{(0)} = 0$

Mallas de sec(+) y sec(-) se conectan en paralelo separadas por Z_f

Falla bifásica a tierra



R. Palma

- Datos de variables físicas:

- $i_a = 0$

- Incógnitas

- $V_a, V_b, V_c, i_a, i_b, i_c$



- $V_a^{(1)} = V_a^{(2)} + Z_f i_a^{(1)}$
- $i_a^{(1)} = i_a^{(2)} = i_a^{(0)}, i_a^{(0)} = 0$

Mallas de sec(+), sec(-) y "sec(0) en serie con $3Z_f$ se conectan en paralelo