Cálculo de Cortocircuitos Asimétricos

Pablo Medina Cofré

Motivación

- Frecuencia de cortocircuitos por tipo:
  - **Monofásicos: 70 a 80%**
  - **Bifásicos: 10 %**
  - Trifásicos: 8 a 10%

Fuente: R. Palma

- En condiciones de falla y post falla, es frecuente que el sistema opere de manera desbalanceada.

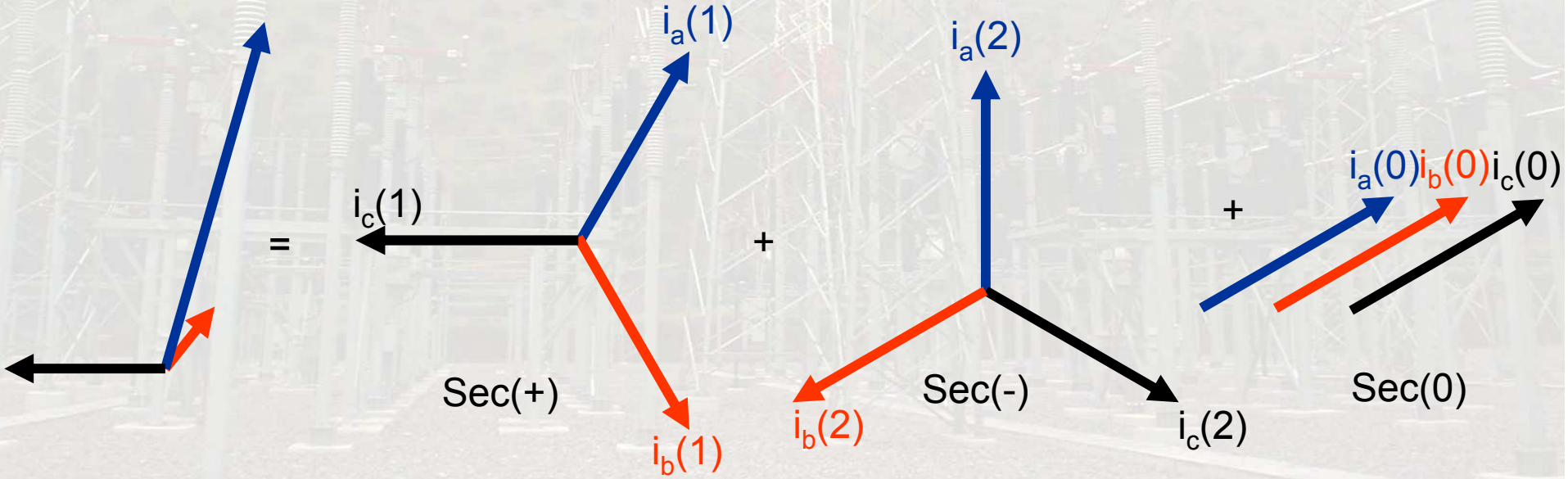
Objetivos

- 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:

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

$$Sec.\ positiva:$$

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

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

$$Sec.\ negativa:$$

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

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

$$Sec.\ cero:$$

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

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

$$S = V_a I_a^* + V_b I_b^* + V_c I_c^*$$

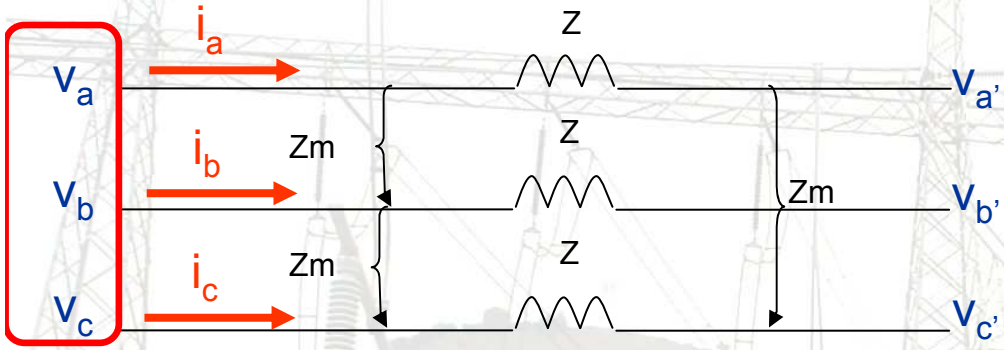
$$= \left(AV_{secuencia}\right)^T \left(AI_{secuencia}\right)^* = V_{secuencia} A^T A^* I^*_{secuencia}$$

$$= 3V^T_{secuencia} I^*_{secuencia} = 3V_a^{(1)} I_a^{(1)} + 3V_a^{(2)} I_a^{(2)} + 3V_a^{(0)} I_a^{(0)}$$

Impedancias de secuencia

- Es la “resistencia” 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



$$i_n = i_a + i_b + i_c$$

Tensiones respecto a tierra

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

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

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

$$\begin{bmatrix} Z - Z_m & 0 & 0 \\ 0 & Z - Z_m & 0 \\ 0 & 0 & Z + 2Z_m \end{bmatrix}$$

Máquinas sincrónicas

- Secuencia positiva
  - Las reactancias son Xd”, Xd’ o Xd
- 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, $X^{(2)} \approx X_d''$ o $(X_d''+X_q'')/2$
- Secuencia cero
  - Corrientes sinusoidales iguales por enrollados

Transformadores

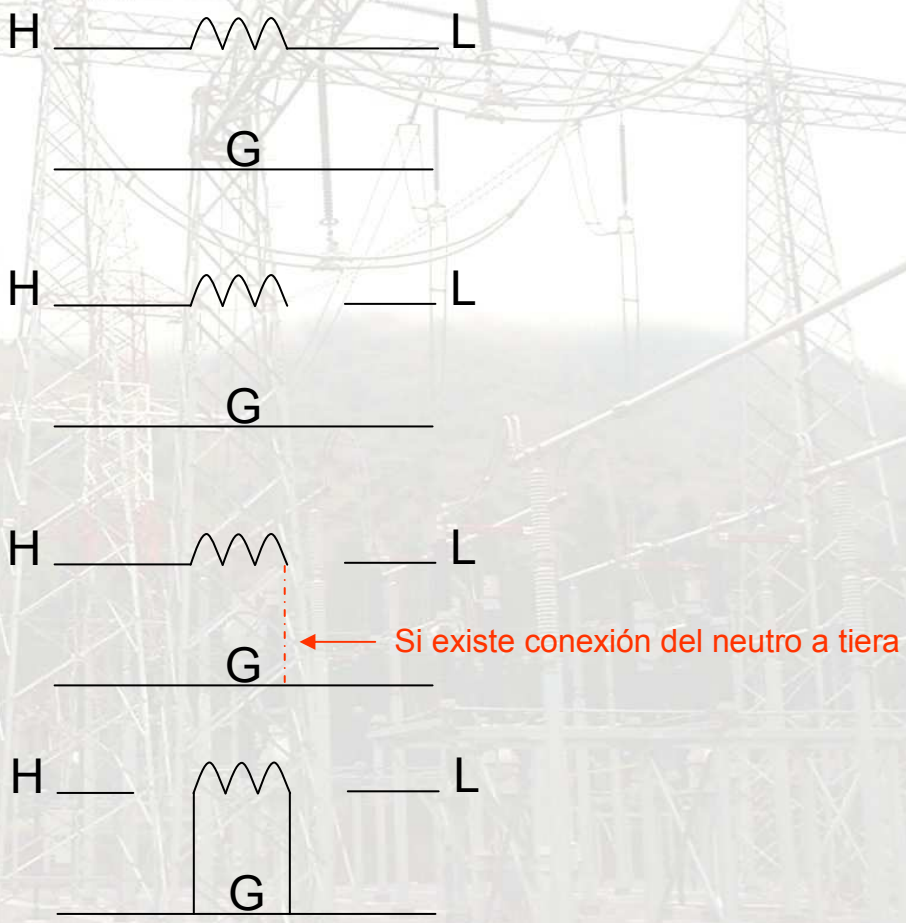
- Despreciando la corriente por la rama de magnetización, existe circulación de corriente en el secundario sólo si hay circulación de corriente en el primario.
- No hay diferencia en el comportamiento inductivo si se le aplica tensión de secuencia positiva o negativa.
  - $Z=Z^{(1)}=Z^{(2)}$
- En secuencia cero, se deben 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.

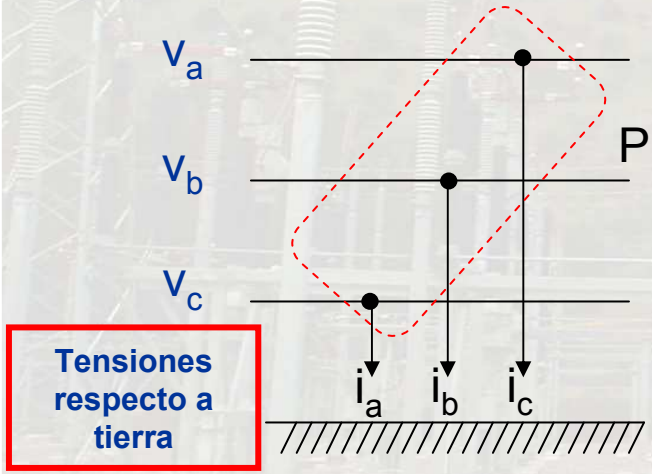
Transformadores (II)

- Y-y con neutro
- Y-y sin neutro
- Y-d
- D-d

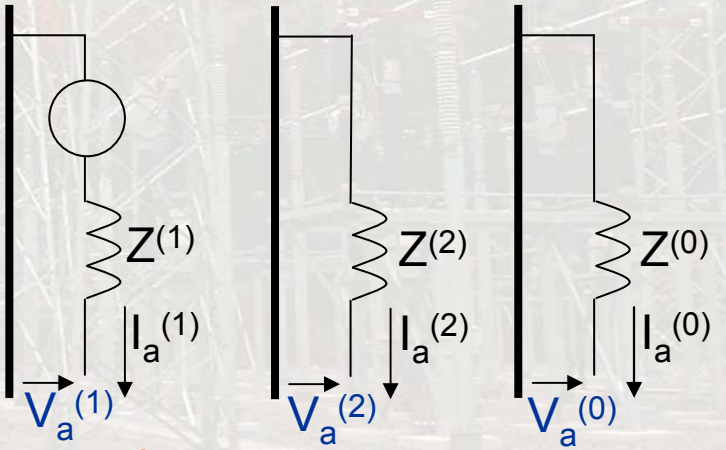


Metodología para el cálculo de fallas

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

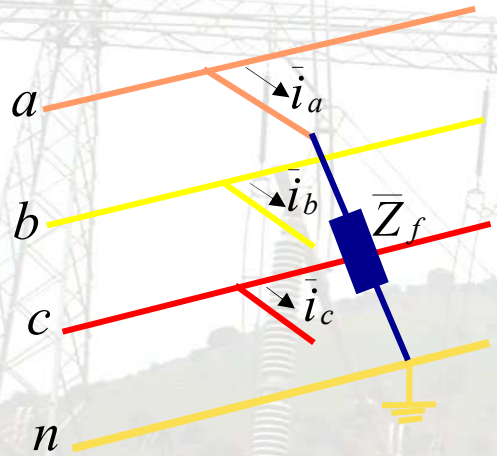


Reducción del sistema en el punto de falla



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

Falla monofásica a tierra

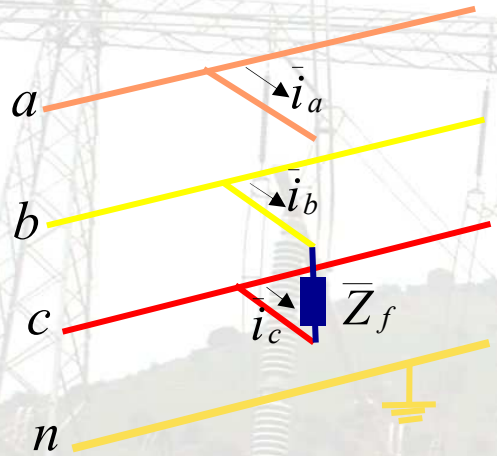


R. Palma

- Datos de variables físicas:
  - $i_b=i_c=0$
  - $v_a=Z_f I_a$
- Incógnitas
  - $va^{(1)}+va^{(2)}+va^{(0)}=Z_f ia$
  - $ia^{(1)}=ia^{(2)}=ia^{(0)}=ia/3$
  - v_a, v_b, v_c, i_a

Mallas de secuencia se conectan en serie

Falla bifásica



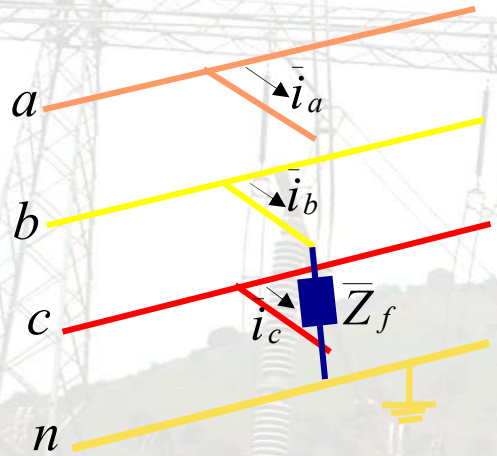
R. Palma

- Datos de variables físicas:
  - $i_b=-i_c$, $i_a=0$
- Incógnitas
  - v_a, v_b, v_c, i_b, i_c

- $va^{(1)}=va^{(2)}+Z_f ia^{(1)}$
- $ia^{(1)}+ia^{(2)}=0, ia^{(0)}=0$

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

Falla bifásica a tierra



- Datos de variables físicas:
  - $i_a=0$
- Incógnitas
  - $v_a, v_b, v_c, i_a, i_b, i_c$

- $va^{(1)}=va^{(2)}=va^{(2)}-3Z_f ia^{(0)}$
- $ia^{(1)}+ia^{(2)}+ia^{(0)}=0$

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