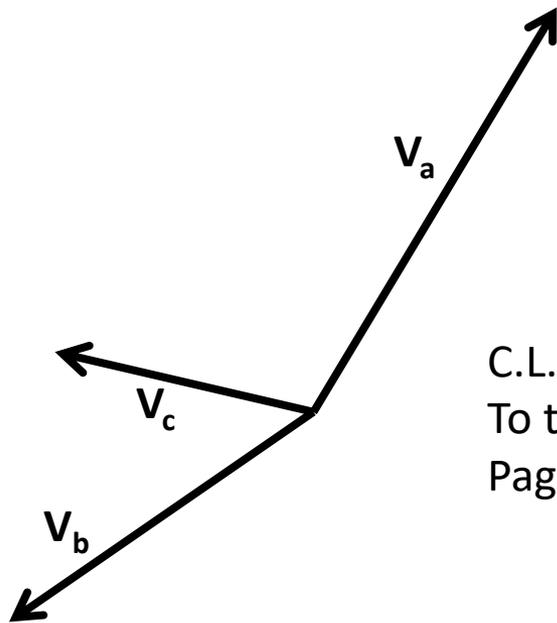


COMPONENTES SIMETRICOS

(C.L. FORTESCUE - 1918)



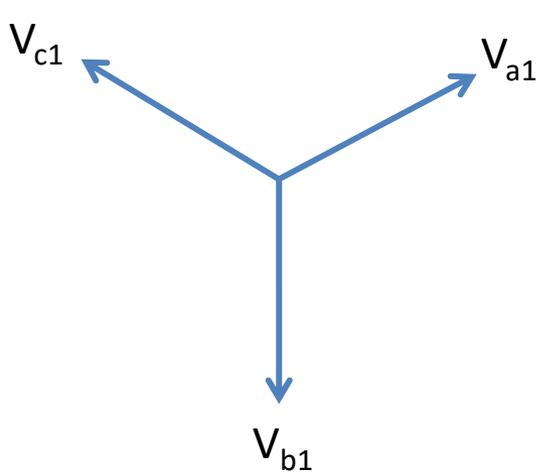
Sistema polifásico desequilibrado

C.L. Fortescue, Method of Symmetrical Coordinates Apped To the solution of polyphase Newoeks, Trans. AIEE, vol. 37, Pag. 1027-1140, 1918.

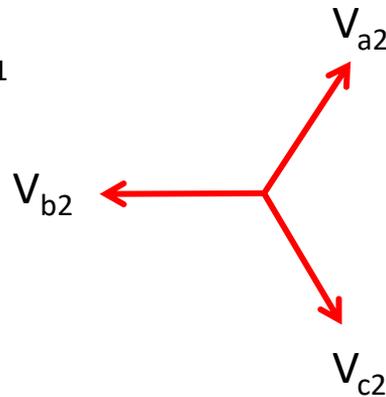
Un Sistema desequilibrado de n vectores relacionados entre si, puede descomponerse en n vectores equilibrados denominados *componentes simétricos* de los vectores originales.

COMPONENTES SIMETRICOS

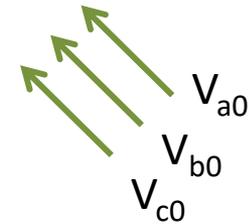
Tres vectores, de un sistema trifásico desequilibrados, pueden descomponerse en tres sistemas equilibrados de vectores.



**Componentes de
Secuencia positiva**



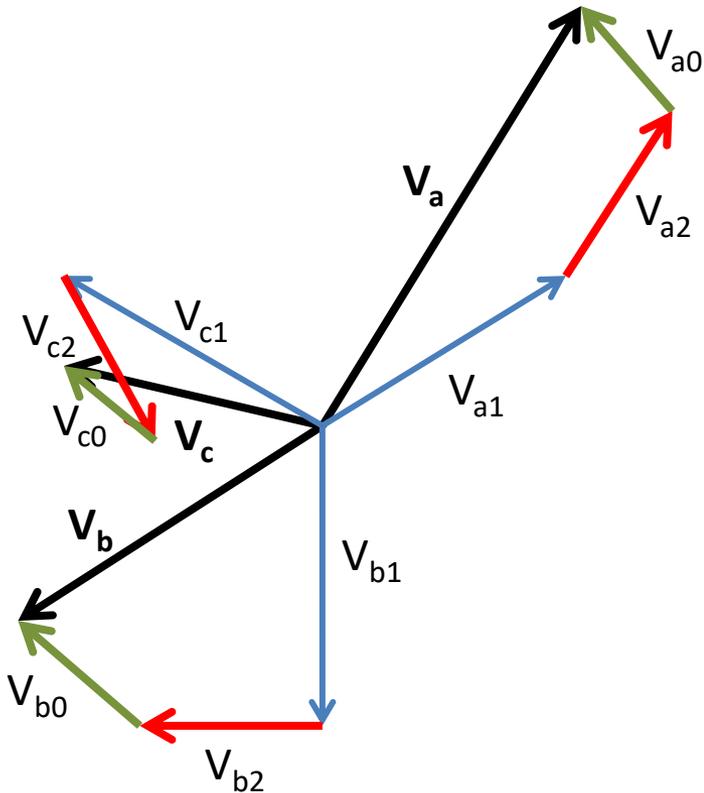
**Componentes de
Secuencia negativa**



**Componentes de
Secuencia cero**

COMPONENTES SIMETRICOS

Suma de los vectores equilibrados que determinan a los vectores desequilibrados.



$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} \quad (1)$$

$$V_b = V_{b0} + V_{b1} + V_{b2} \quad (2)$$

$$V_c = V_{c0} + V_{c1} + V_{c2} \quad (3)$$

Vectores originales **desequilibrados**, expresados por la suma de sus componentes.

COMPONENTES SIMETRICOS

(Operador “a” es un número complejo de módulo unidad y argumento 120°)

Tabla 12.1 Funciones del operador a.

$$a = 1/\underline{120^\circ} = -0.5 + j0.866$$

$$a^2 = 1/\underline{240^\circ} = -0.5 - j0.866$$

$$a^3 = 1/\underline{360^\circ} = 1 + j0$$

$$a^4 = 1/\underline{120^\circ} = -0.5 + j0.866 = a$$

$$1 + a = 1/\underline{60^\circ} = 0.5 + j0.866 = -a^2$$

$$1 - a = \sqrt{3}/\underline{-30^\circ} = 1.5 - j0.866$$

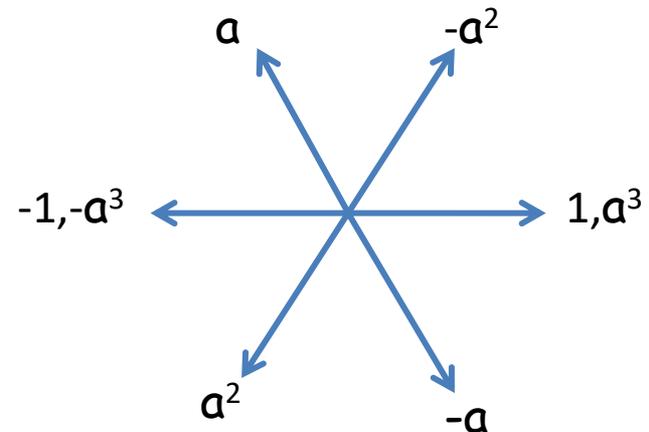
$$1 + a^2 = 1/\underline{-60^\circ} = 0.5 - j0.866 = -a$$

$$1 - a^2 = \sqrt{3}/\underline{30^\circ} = 1.5 + j0.866$$

$$a + a^2 = 1/\underline{180^\circ} = -1 - j0$$

$$a - a^2 = \sqrt{3}/\underline{90^\circ} = 0 + j1.732$$

$$1 + a + a^2 = 0 = 0 + j0$$

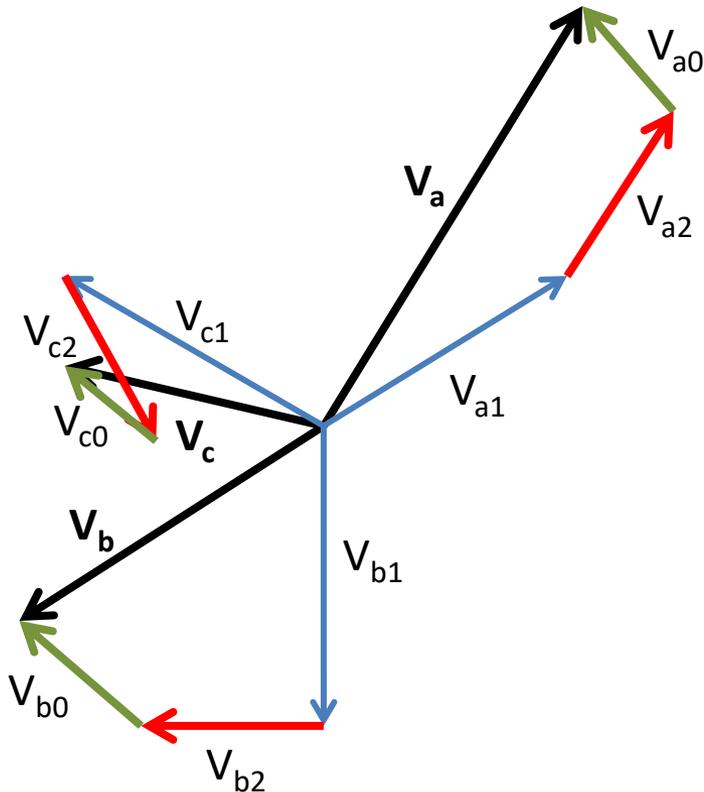


Bibliografía:

1. “Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia”. STEVENSON – 2da. Ed. McGRAM- Hill – 1992
2. “Circuitos en Ingeniería Eléctrica”. SKILLING H. Ed, CECSA- 1965

COMPONENTES SIMETRICOS

Suma de los vectores equilibrados que determinan a los vectores desequilibrados.



$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} \quad (1)$$

$$V_b = V_{b0} + V_{b1} + V_{b2} \quad (2)$$

$$V_c = V_{c0} + V_{c1} + V_{c2} \quad (3)$$

$$V_{b1} = a^2 V_{a1}$$

$$V_{c1} = a V_{a1}$$

$$V_{b2} = a V_{a2}$$

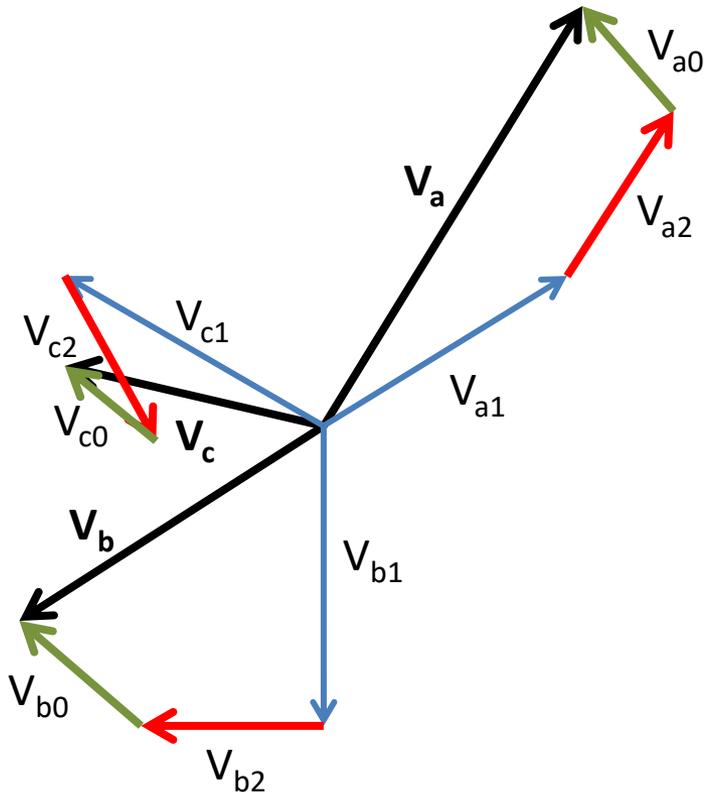
$$V_{c2} = a^2 V_{a2}$$

$$V_{b0} = V_{a0}$$

$$V_{c0} = V_{a0}$$

COMPONENTES SIMETRICOS

Suma de los vectores equilibrados que determinan a los vectores desequilibrados.



$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} \quad (1)$$

$$V_b = V_{b0} + V_{b1} + V_{b2} \quad (2)$$

$$V_c = V_{c0} + V_{c1} + V_{c2} \quad (3)$$

$$V_{b1} = a^2 V_{a1}$$

$$V_{c1} = a V_{a1}$$

$$V_{b2} = a V_{a2}$$

$$V_{c2} = a^2 V_{a2}$$

$$V_{b0} = V_{a0}$$

$$V_{c0} = V_{a0}$$

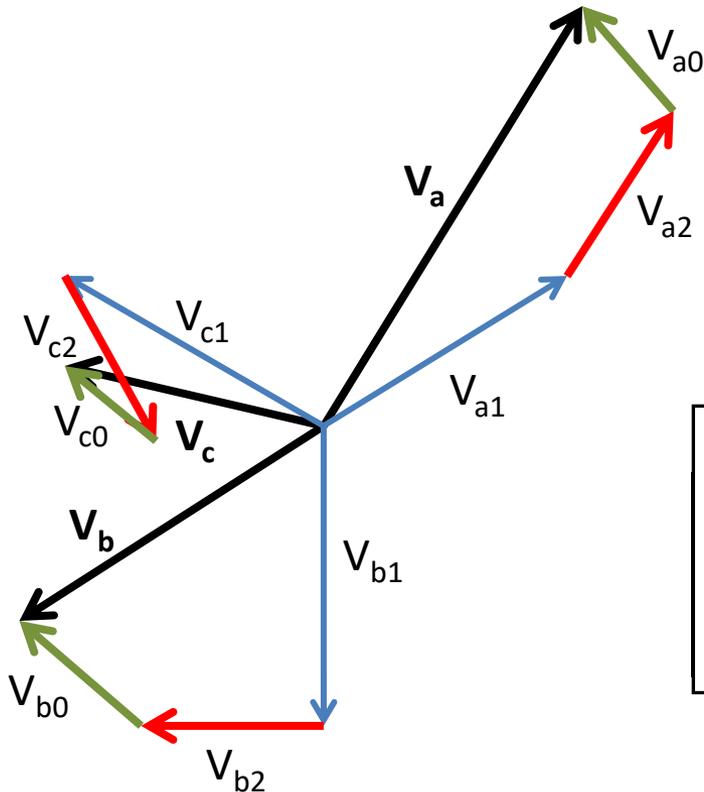
$$Va = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2}$$

$$Vb = V_{a0} + a^2 V_{a1} + a V_{a2}$$

$$Vc = V_{a0} + a V_{a1} + a^2 V_{a2}$$

COMPONENTES SIMETRICOS

Suma de los vectores equilibrados que determinan a los vectores desequilibrados.



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

$$Vb = V_{a0} + a^2 V_{a1} + a V_{a2}$$

$$Vc = V_{a0} + a V_{a1} + a^2 V_{a2}$$

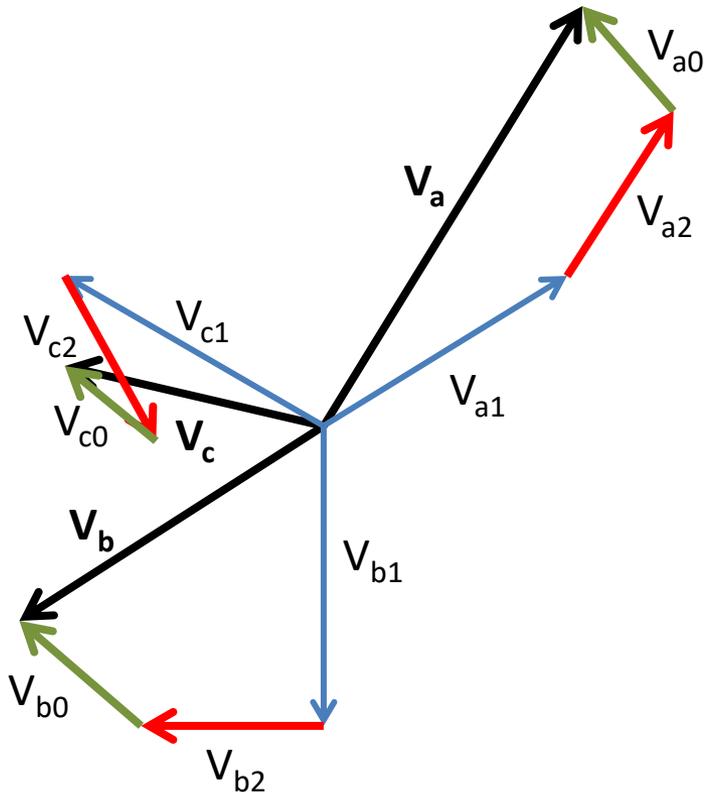
En forma **Matricial**

$$\begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix}$$

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

COMPONENTES SIMETRICOS

Suma de los vectores equilibrados que determinan a los vectores desequilibrados.



$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix}$$

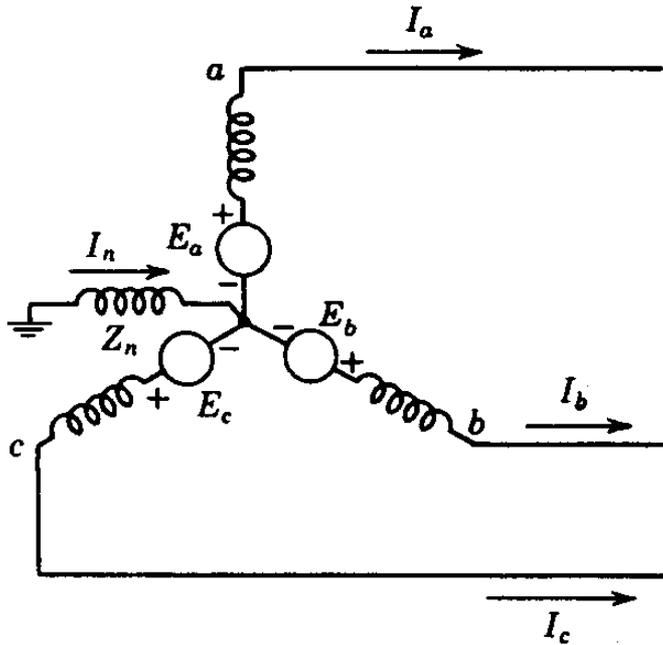
$$V_{a0} = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c)$$

$$V_{a1} = \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c)$$

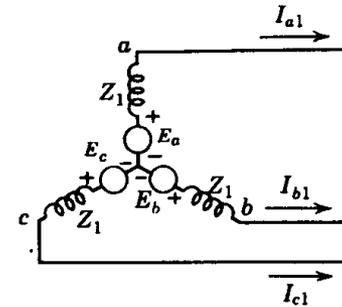
$$V_{a2} = \frac{1}{3}(V_a + a^2V_b + aV_c)$$

COMPONENTES SIMETRICOS

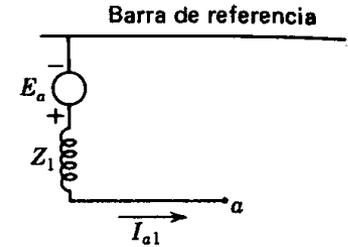
(Impedancias y redes de secuencias)



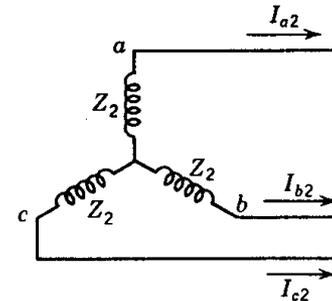
Esquema de un circuito de un generador en vacío puesto a tierra por una reactancia Z_n . Las f.e.m. de cada fase son: E_a, E_b, E_c .



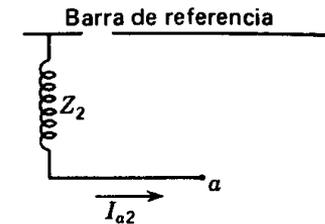
(a) Sentido de las corrientes de secuencia positiva



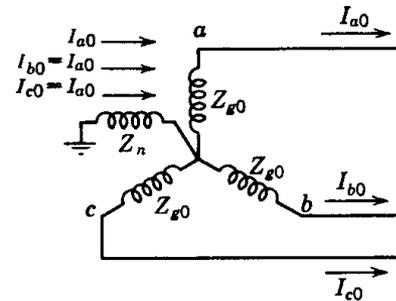
(b) Red de secuencia positiva



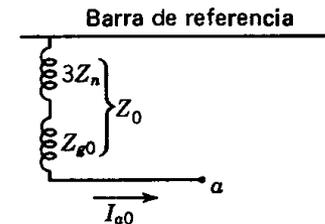
(c) Sentidos de las corrientes de secuencia negativa



(d) Red de secuencia negativa



(e) Sentidos de las corrientes de secuencia cero



(f) Red de secuencia cero

Figura 12

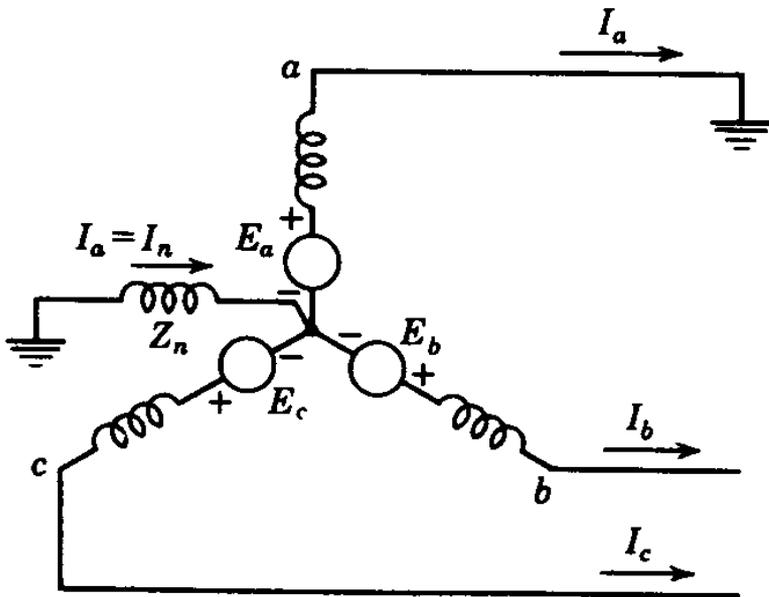
COMPONENTES SIMETRICOS

(Impedancias y redes de secuencias)

- La **impedancia** de un circuito por el cual circulan *solamente corrientes de secuencia positiva* se llama **impedancia a la corriente de secuencia positiva**. (lo mismo ocurre para las otras secuencias). También suelen denominarse como: **Impedancia de secuencia positiva, negativa o cero respectivamente**.
- El circuito equivalente monofásico formado por las impedancias a las corrientes de cualquier secuencia exclusivamente, se denomina **red de secuencia** para esa secuencia en particular. Las redes de secuencia incluyen las f.e.m. generadas de igual secuencias.
- Las tensiones generadas **son solo de secuencia positiva**, ya que el generador está proyectado para suministrar tensiones trifásicas equilibradas.
- Las redes de secuencias representadas en la Figura 12, son los **circuitos monofásicos equivalentes** de los *circuitos trifásicos equilibrados* a través de los cuales se considera que circulan las componentes simétricas de las *corrientes desequilibradas*.
- La barra de referencia para las redes de secuencias positiva y negativa es el **neutro** del generador. Por lo que respecta a las componentes de secuencia positiva y negativa, el neutro del generador está al potencial de tierra. La barra de referencia para la **red de secuencia cero es la tierra del generador**.
- La corriente que pasa por Z_n entre el neutro y la tierra es $3 I_{a0}$, por lo que desde la punta hasta tierra la caída de tensión es $(-3 I_{a0} Z_n - I_{a0} Z_{g0})$ en la que es la impedancia de secuencia cero por fase del generador. Luego $(-3 I_{a0} Z_n - I_{a0} Z_{g0}) = -I_{a0} (3 Z_n + Z_{g0})$ y $Z_0 = 3 Z_n + Z_{g0}$

COMPONENTES SIMETRICOS

FALLO SIMPLE DE LINEA A TIERRA DE UN GENERADOR EN VACÍO
(Con su neutro a tierra)



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

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

$$I_a \neq 0$$

$$I_b = 0$$

$$I_c = 0$$

$$V_a = 0$$

$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} \quad (1)$$

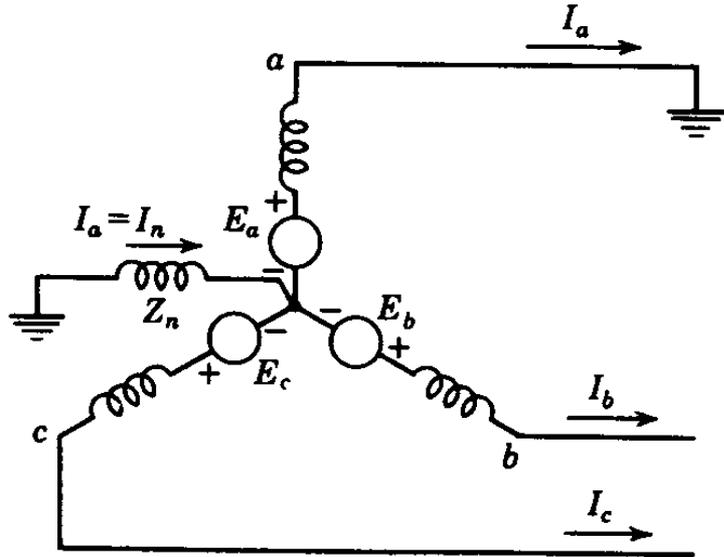
$$V_b = V_{b0} + V_{b1} + V_{b2} \quad (2)$$

$$V_c = V_{c0} + V_{c1} + V_{c2} \quad (3)$$

$$V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = 0 \rightarrow V_a = 0$$

COMPONENTES SIMETRICOS

FALLO SIMPLE DE LINEA A TIERRA DE UN GENERADOR EN VACÍO
(Con su neutro a tierra)



$$V_{a1} = E_a - I_{a1} Z_1$$

$$V_{a2} = 0 - I_{a1} Z_2$$

$$V_{a0} = 0 - I_{a1} Z_0$$

$$V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = 0$$

$$E_a - I_{a1} (Z_1 + Z_2 + Z_0) = 0$$

$$I_a \neq 0$$

$$I_b = 0$$

$$I_c = 0$$

$$V_a = 0$$

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

$$I_f = I_a = 3I_{a1}$$

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

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

$$V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = 0$$

Ejemplo: Generador 800 kVA – 10 kV con neutro a tierra a través de impedancia $Z_n=j0,05 \Omega$.

Impedancia de secuencia **positiva**: $Z_1=0,25 \Omega$.

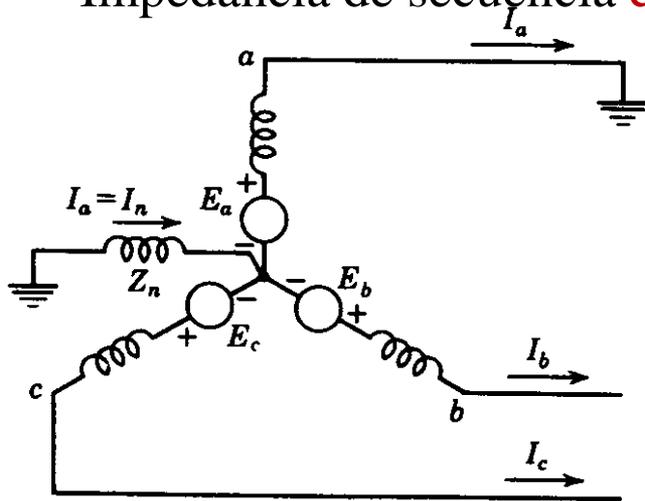
Impedancia de secuencia **negativa**: $Z_2=0,4 \Omega$.

Impedancia de secuencia **cero**: $Z_{g0}=0,1 \Omega$.

$$Z_0 = 3Z_n + Z_{g0}$$

$$= j((3 \times 0,05 + 0,1))$$

$$Z_0 = j0,25 \Omega$$



$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_0} = \frac{10/\sqrt{3}}{j0,9} = -j6,41 \text{ kA}$$

$$I_f = I_a = 3I_{a1}$$

$$I_f = I_a = -j19,23 \text{ kA}$$

$$V_{a1} = E_a - I_{a1}Z_1 = 5,77 - (-j6,41 \times j0,25 \Omega) = 4,17 \text{ kV}$$

$$V_{a2} = 0 - I_{a1}Z_2 = -(-j6,41 \times j0,4 \Omega) = -2,56 \text{ kV}$$

$$V_{a0} = 0 - I_{a1}Z_0 = -(-j6,41 \times j0,25 \Omega) = -1,6 \text{ kV}$$

$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = 0$$

$$I_a \neq 0$$

$$I_b = 0$$

$$I_c = 0$$

$$V_a = 0$$

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

$$V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = (4,17 - 2,56 - 1,6) \text{ kV} = 0$$

Ejemplo: Generador 800 kVA – 10 kV con neutro a tierra a través de impedancia $Z_n=j0,05 \Omega$.

Impedancia de secuencia **positiva**: $Z_1=0,25 \Omega$.

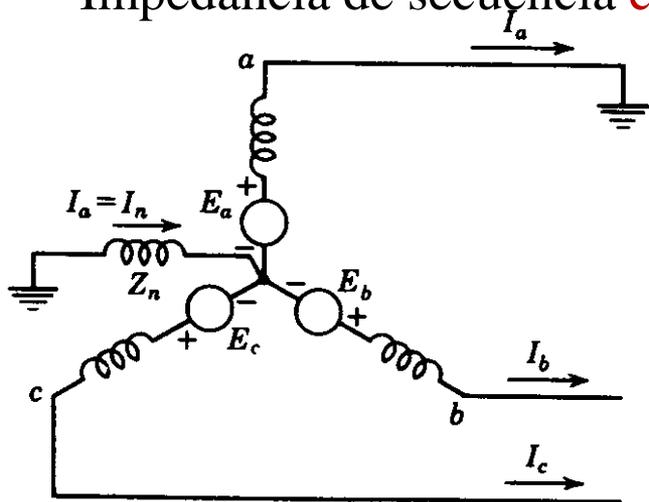
Impedancia de secuencia **negativa**: $Z_2=0,4 \Omega$.

Impedancia de secuencia **cero**: $Z_{g0}=0,1 \Omega$.

$$Z_0 = 3Z_n + Z_{g0}$$

$$= j((3 \times 0,05 + 0,1))$$

$$Z_0 = j0,25 \Omega$$



$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix}$$

$$V_a = 0$$

$$V_b = V_{a0} + a^2 V_{a1} + a V_{a2} = -1,6 + (-0,5 - j0,866)4,17 + (-0,5 + j0,866)(-2,56)$$

$$V_b = -2,4 - j5,83 = 6,3 \angle -112,37^\circ \text{ kV}$$

$$V_c = V_{a0} + a V_{a1} + a^2 V_{a2} = -1,6 + (-0,5 + j0,866)4,17 + (-0,5 - j0,866)(-2,56)$$

$$V_c = -2,4 + j5,83 = 6,3 \angle 112,37^\circ \text{ kV}$$

Ejemplo: Generador 800 kVA – 10 kV con neutro a tierra a través de impedancia $Z_n=j0,05 \Omega$.

Impedancia de secuencia **positiva**: $Z_1=0,25 \Omega$.

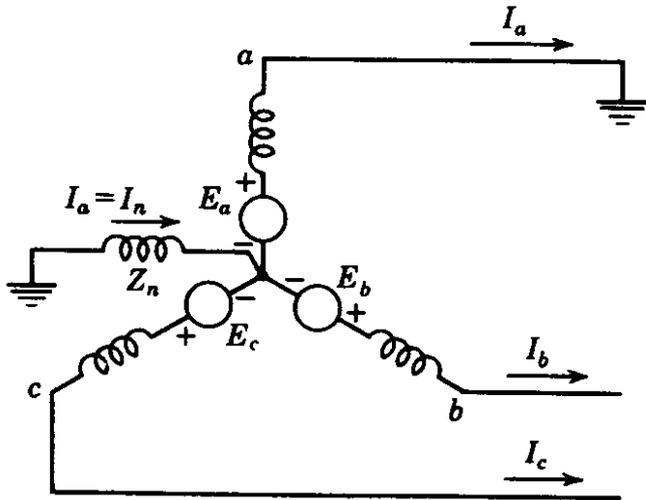
Impedancia de secuencia **negativa**: $Z_2=0,4 \Omega$.

Impedancia de secuencia **cero**: $Z_{g0}=0,1 \Omega$.

$$Z_0 = 3Z_n + Z_{g0}$$

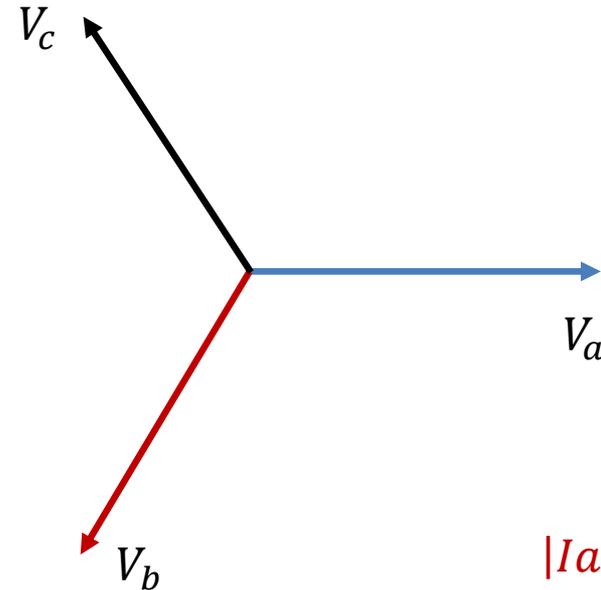
$$= j((3 \times 0,05 + 0,1))$$

$$Z_0 = j0,25 \Omega$$



Para las tensiones de fase

Antes del fallo



$$|V_a| = |V_b| = |V_c| = 5,77 \text{ kV}$$

$$|I_a| = 0$$

$$|I_b| = 0$$

$$|I_c| = 0$$

Ejemplo: Generador 800 kVA – 10 kV con neutro a tierra a través de impedancia $Z_n=j0,05 \Omega$.

Impedancia de secuencia **positiva**: $Z_1=0,25 \Omega$.

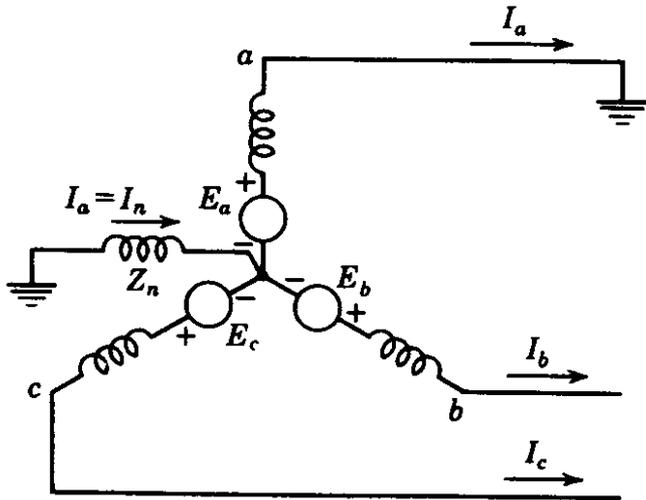
Impedancia de secuencia **negativa**: $Z_2=0,4 \Omega$.

Impedancia de secuencia **cero**: $Z_{g0}=0,1 \Omega$.

$$Z_0 = 3Z_n + Z_{g0}$$

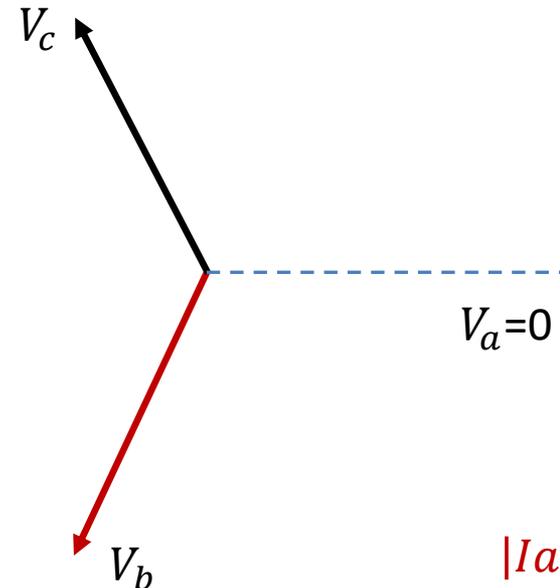
$$= j((3 \times 0,05 + 0,1))$$

$$Z_0 = j0,25 \Omega$$



Para las tensiones de fase

Después del fallo



$$|V_b| = |V_c| = 6,3 \text{ kV}$$

$$|I_a| = 19,23$$

$$|I_b| = 0$$

$$|I_c| = 0$$

Ejemplo: Generador 800 kVA – 10 kV con neutro a tierra a través de impedancia $Z_n=j0,05 \Omega$.

Impedancia de secuencia **positiva**: $Z_1=0,25 \Omega$.

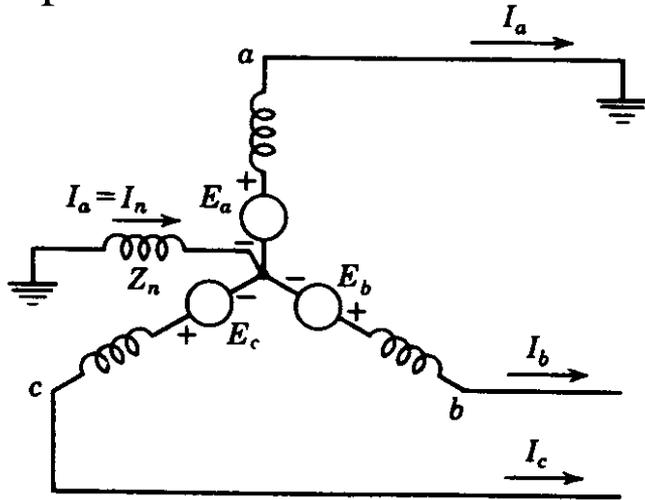
Impedancia de secuencia **negativa**: $Z_2=0,4 \Omega$.

Impedancia de secuencia **cero**: $Z_{g0}=0,1 \Omega$.

$$Z_0 = 3Z_n + Z_{g0}$$

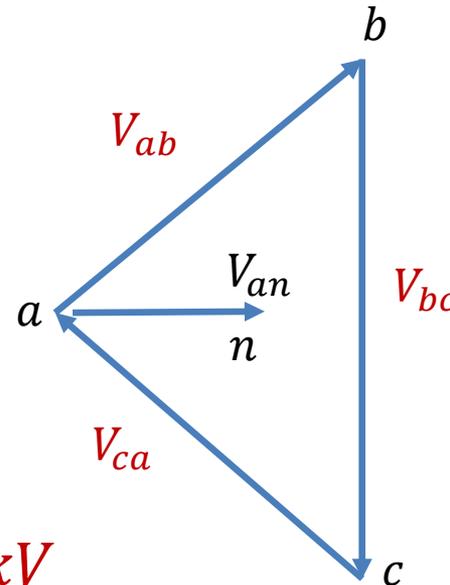
$$= j((3 \times 0,05 + 0,1))$$

$$Z_0 = j0,25 \Omega$$



Para las tensiones de línea

Antes del fallo



$$|V_{ab}| = |V_{bc}| = |V_{ca}| = 10 \text{ kV}$$

Ejemplo: Generador 800 kVA – 10 kV con neutro a tierra a través de impedancia $Z_n=j0,05 \Omega$.

Impedancia de secuencia **positiva**: $Z_1=0,25 \Omega$.

Impedancia de secuencia **negativa**: $Z_2=0,4 \Omega$.

Impedancia de secuencia **cero**: $Z_{g0}=0,1 \Omega$.

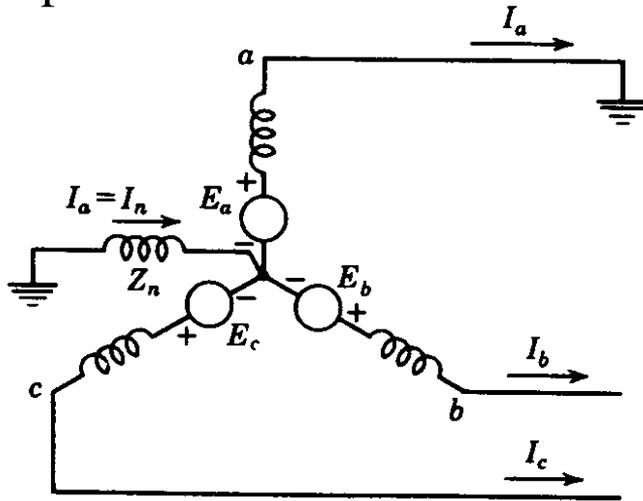
$$Z_0 = 3Z_n + Z_{g0}$$

$$= j((3 \times 0,05 + 0,1))$$

$$Z_0 = j0,25 \Omega$$

Para las tensiones de línea

Después del fallo



$$V_{ab} = V_a - V_b = 0 - (-2,4 - j5,83) = 2,4 + j5,83$$

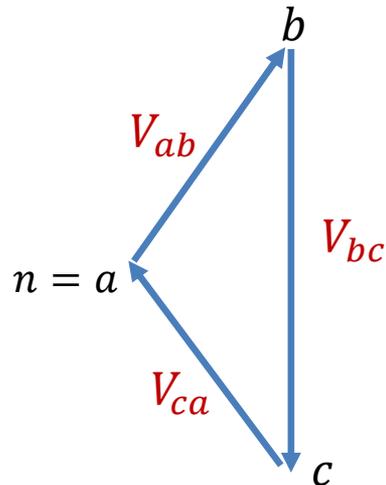
$$= 6,3 \angle 67,6^\circ \text{ kV}$$

$$V_{bc} = V_b - V_c = -2,4 - j5,83 - (-2,4 + j5,83)$$

$$= -j11,66 = 11,66 \angle -90^\circ \text{ kV}$$

$$V_{ca} = V_c - V_a = -2,4 + j5,83 - 0$$

$$= 6,3 \angle 112,37^\circ \text{ kV}$$

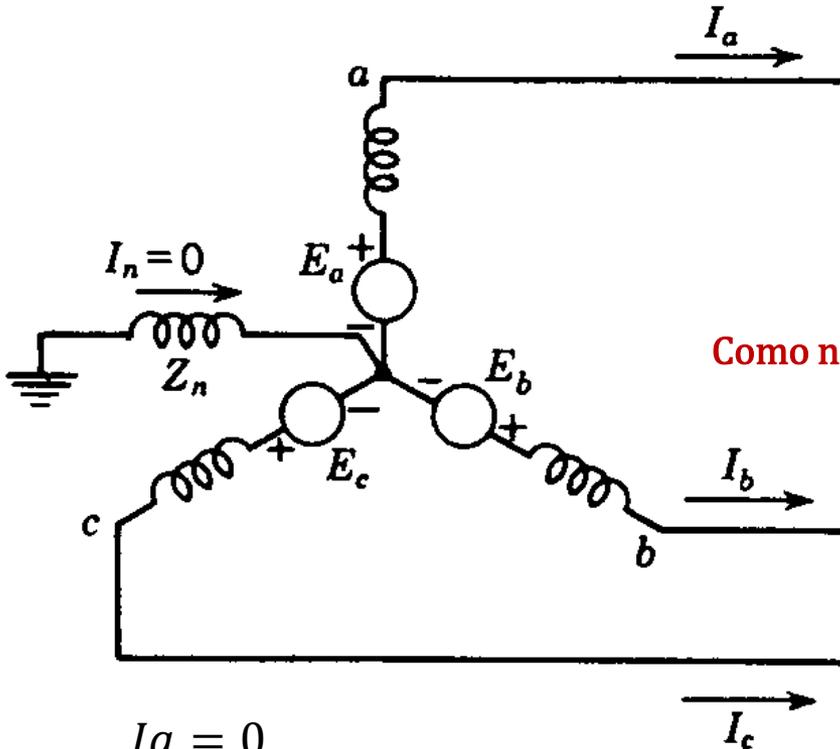


$$|V_{ab}| = |V_{ca}| = 6,3 \text{ kV}$$

$$|V_{bc}| = 11,66 \text{ kV}$$

COMPONENTES SIMETRICOS

FALLO LINEA A LINEA DE UN GENERADOR EN VACÍO
(Con su neutro a tierra)



$$\begin{aligned} I_a &= 0 \\ I_b &= -I_c \\ V_b &= V_c \end{aligned}$$

Ecuaciones del fallo

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

$$V_{a1} = V_{a2}$$

Como no hay cortocircuito a tierra $I_n = 0 \rightarrow I_{a0} = 0 \quad V_{a0} = 0$

$$I_a = 0 = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} \rightarrow I_{a2} = -I_{a1}$$

$$V_{a1} = E_a - I_{a1}Z_1$$

$$V_{a2} = V_{a1} = -I_{a2}Z_2 = I_{a1}Z_2$$

$$E_a - I_{a1}Z_1 = I_{a1}Z_2$$

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2}$$

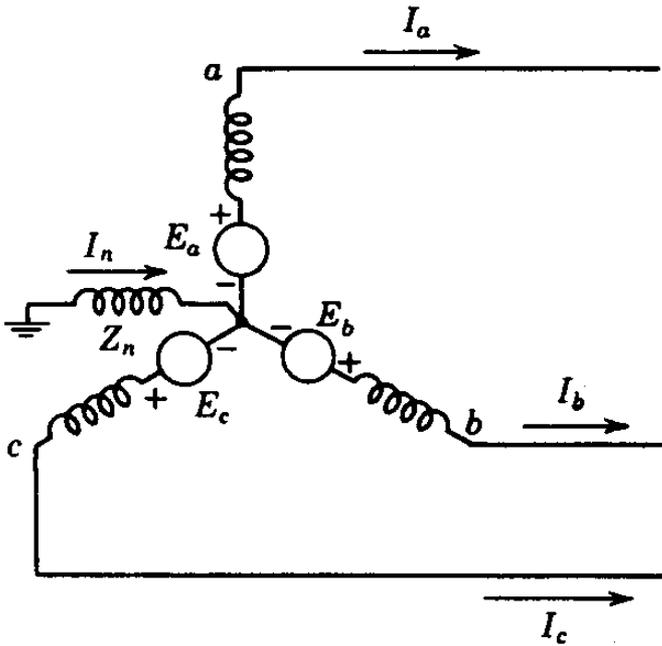
Ejemplo: Generador 800 kVA – 10 kV con neutro a tierra a través de impedancia $Z_n=j0,05 \Omega$.

Impedancia de secuencia **positiva**: $Z_1=0,25 \Omega$.

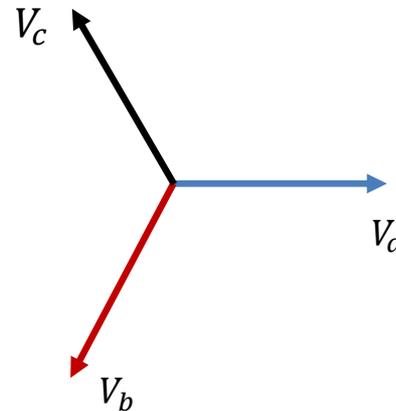
Impedancia de secuencia **negativa**: $Z_2=0,4 \Omega$.

Impedancia de secuencia **cero**: $Z_0=0,1 \Omega$.

Antes del fallo

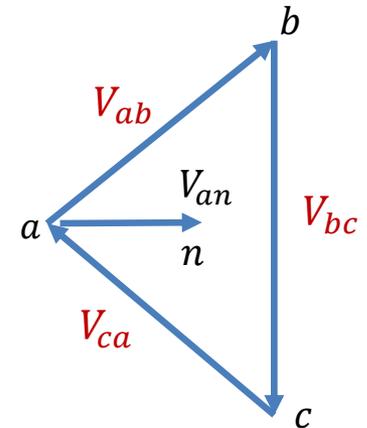


Para las tensiones de fase



$$|V_a| = |V_b| = |V_c| = 5,77 \text{ kV}$$

Para las tensiones de línea



$$|V_{ab}| = |V_{bc}| = |V_{ca}| = 10 \text{ kV}$$

$$|I_a| = 0$$

$$|I_b| = 0$$

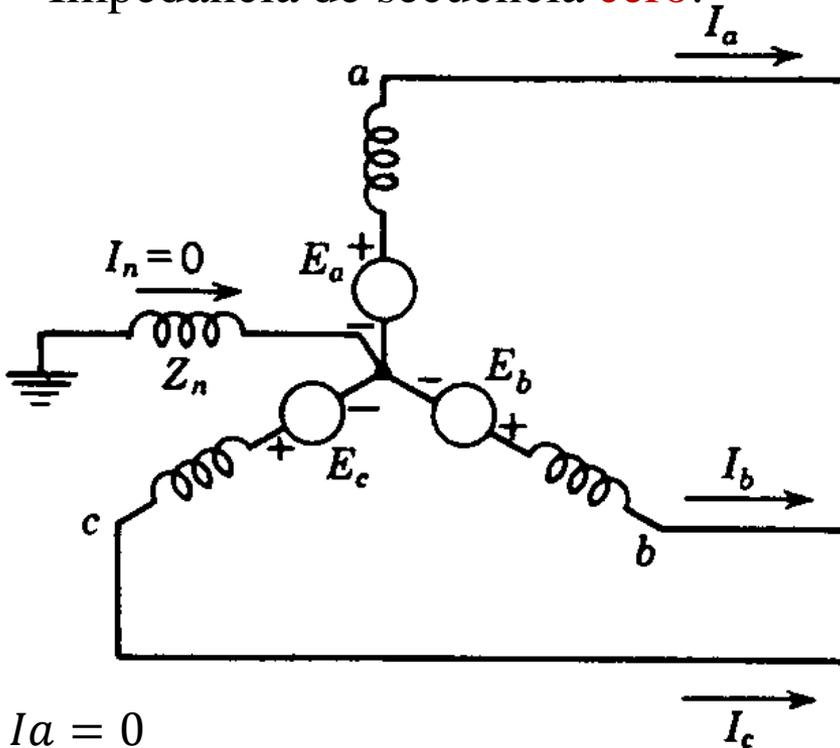
$$|I_c| = 0$$

Ejemplo: Generador 800 kVA – 10 kV con neutro a tierra a través de impedancia $Z_n=j0,05 \Omega$.

Impedancia de secuencia **positiva**: $Z_1=0,25 \Omega$.

Impedancia de secuencia **negativa**: $Z_2=0,4 \Omega$.

Impedancia de secuencia **cero**: $Z_{g0}=0,1 \Omega$.



$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1+Z_2} = \frac{5,77}{j0,65} = -j 8,88 \text{ kA}$$

$$I_{a2} = j 8,88 \text{ kA}$$

$$I_a = 0 = 0 - j8,88 + j8,88 = 0 \text{ ok!}$$

$$I_a = 0$$

$$I_b = -I_c$$

$$V_b = V_c$$

$$I_b = a^2 I_{a1} + a I_{a2} + I_{a0} = -j8,88(-0,5 - j0,866) + j8,88(-0,5 + j0,866) + 0$$

$$I_b = -15,38 \text{ kA}$$

$$I_c = 15,38 \text{ kA}$$

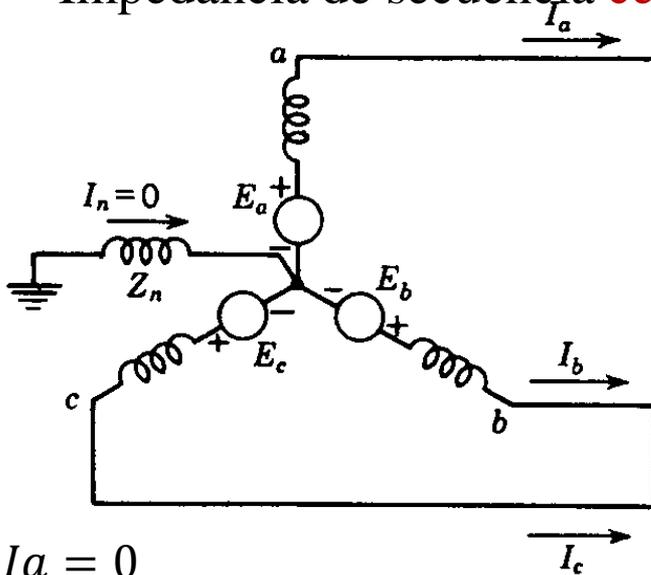


Ejemplo: Generador 800 kVA – 10 kV con neutro a tierra a través de impedancia $Z_n=j0,05 \Omega$.

Impedancia de secuencia **positiva**: $Z_1=0,25 \Omega$.

Impedancia de secuencia **negativa**: $Z_2=0,4 \Omega$.

Impedancia de secuencia **cero**: $Z_{g0}=0,1 \Omega$.



$$V_{a1} = E_a - I_{a1}Z_1 = 5,77 - (-j8,88 \times j0,25)$$

$$V_{a1} = V_{a2} = 3,55 \text{ kV}$$

$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = (0 + 3,55 + 3,55)$$

$$V_a = 7,10 \text{ kV}$$

$$I_a = 0$$

$$I_b = -I_c$$

$$V_b = V_c$$

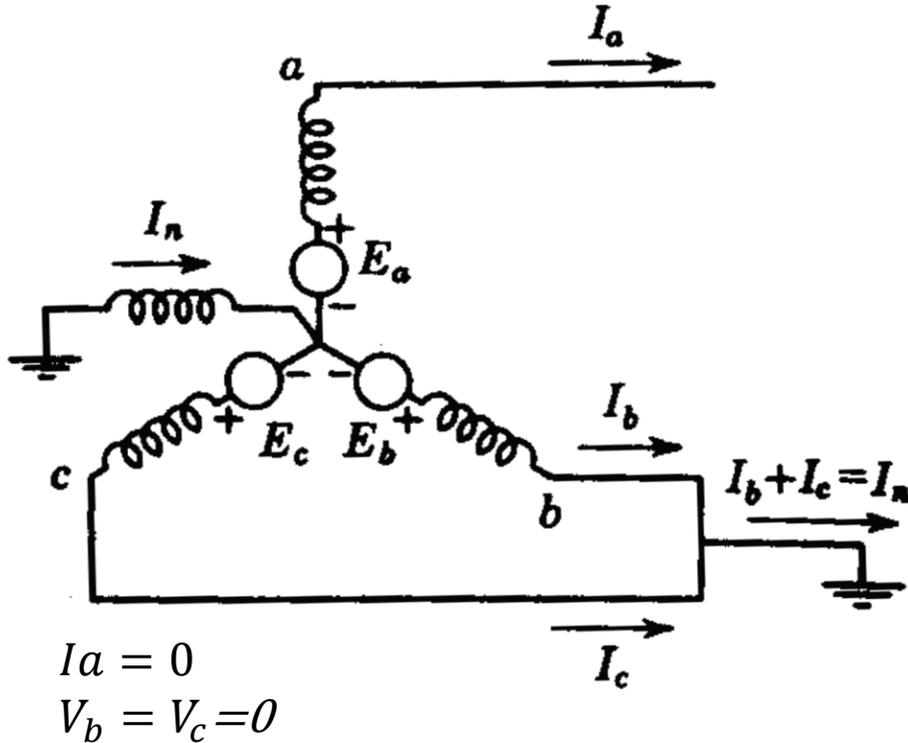
$$V_b = V_{a0} + a^2V_{a1} + aV_{a2} = 3,55(-0,5 - j0,866) + 3,55(-0,5 + j0,866)$$

$$V_b = V_c = -3,55 \text{ kV}$$



COMPONENTES SIMETRICOS

FALLO DOBLE LINEA A TIERRA DE UN GENERADOR EN VACÍO
(Con su neutro a tierra)



$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

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

Como $I_a = 0$

$$I_{a1} = -(I_{a2} + I_{a0})$$

$$V_{a1} = E_a - I_{a1}Z_1$$

$$V_{a2} = 0 - I_{a2}Z_2$$

$$V_{a0} = 0 - I_{a0}Z_0$$

$$E_a - I_{a1}Z_1 = E_a - I_{a1}Z_1$$

$$E_a - I_{a1}Z_1 = 0 - I_{a2}Z_2$$

$$E_a - I_{a1}Z_1 = 0 - I_{a0}Z_0$$

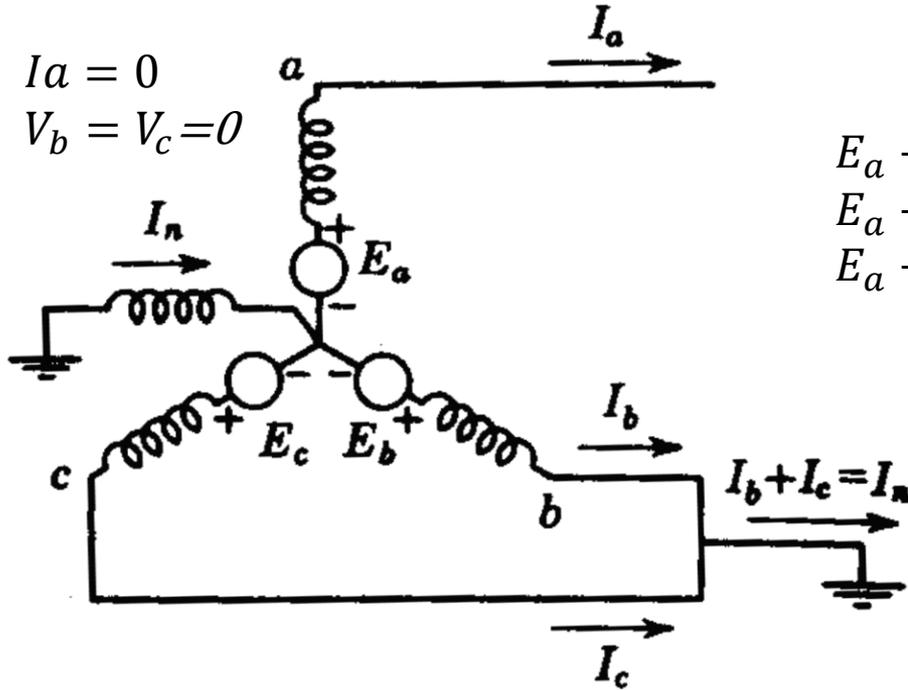
Divido por Z_1

Divido por Z_2

Divido por Z_0

COMPONENTES SIMETRICOS

FALLO DOBLE LINEA A TIERRA DE UN GENERADOR EN VACÍO
(Con su neutro a tierra)



$$I_a = 0$$

$$V_b = V_c = 0$$

$$E_a - I_{a1}Z_1 = E_a - I_{a1}Z_1$$

$$E_a - I_{a1}Z_1 = 0 - I_{a2}Z_2$$

$$E_a - I_{a1}Z_1 = 0 - I_{a0}Z_0$$

Divido por Z_1
Divido por Z_2
Divido por Z_0

$$\frac{E_a}{Z_1} - I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1} - I_{a1}$$

$$\frac{E_a}{Z_2} - I_{a1} \frac{Z_1}{Z_2} = 0 - I_{a2}$$

$$\frac{E_a}{Z_0} - I_{a1} \frac{Z_1}{Z_0} = 0 - I_{a0}$$

sumando

$$\frac{E_a}{Z_1} - I_{a1} + \frac{E_a}{Z_2} - I_{a1} \frac{Z_1}{Z_2} + \frac{E_a}{Z_0} - I_{a1} \frac{Z_1}{Z_0} = \frac{E_a}{Z_1} - \cancel{(I_{a1} + I_{a2} + I_{a0})}$$

$I_a = 0$

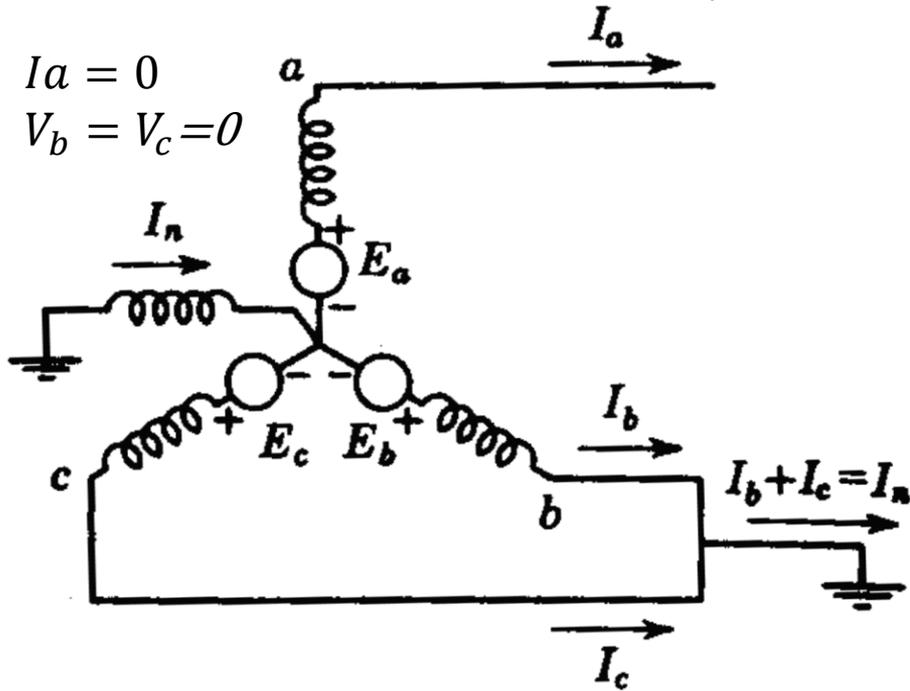
$$\frac{E_a}{Z_2} + \frac{E_a}{Z_0} = I_{a1} \left(1 + \frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_1}{Z_0} \right)$$

$$\frac{E_a(Z_0 + Z_2)}{Z_2Z_0} = I_{a1} \left(\frac{Z_2Z_0 + Z_1Z_0 + Z_1Z_2}{Z_2Z_0} \right)$$

COMPONENTES SIMETRICOS

FALLO DOBLE LINEA A TIERRA DE UN GENERADOR EN VACÍO

(Con su neutro a tierra)



$$I_a = 0$$

$$V_b = V_c = 0$$

$$\frac{E_a(Z_0 + Z_2)}{Z_2 Z_0} = I_{a1} \left(\frac{Z_2 Z_0 + Z_1 Z_0 + Z_1 Z_2}{Z_2 Z_0} \right)$$

$$I_{a1} = \frac{E_a(Z_0 + Z_2)}{Z_2 Z_0 + Z_1 Z_0 + Z_1 Z_2}$$

$$I_{a1} = \frac{E_a}{\frac{Z_2 Z_0}{(Z_0 + Z_2)} + Z_1 \left(\frac{Z_0 + Z_2}{Z_0 + Z_2} \right)}$$

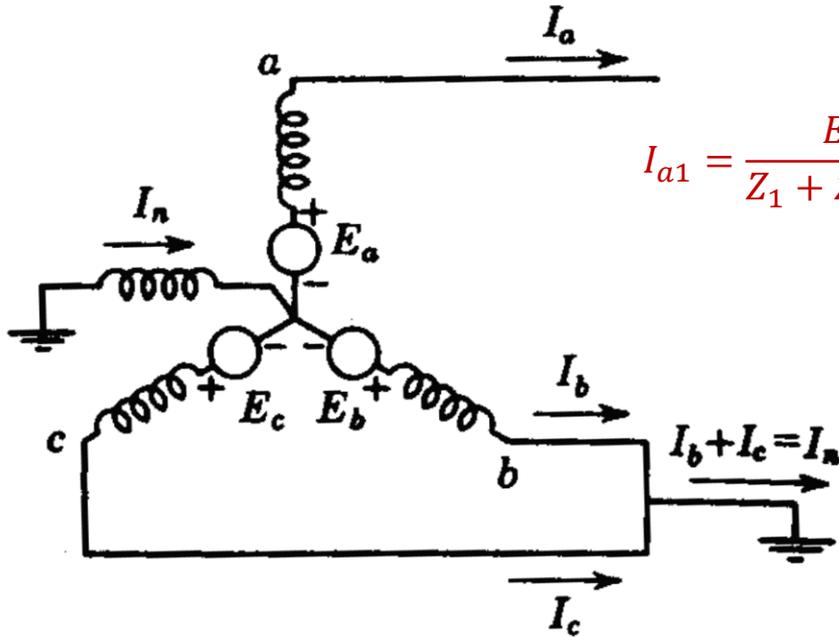
$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 || Z_0}$$

Ejemplo: Generador 800 kVA – 10 kV con neutro a tierra a través de impedancia $Z_n=j0,05 \Omega$.

Impedancia de secuencia **positiva**: $Z_1=0,25 \Omega$.

Impedancia de secuencia **negativa**: $Z_2=0,4 \Omega$.

Impedancia de secuencia **cero**: $Z_{g0}=0,1 \Omega$.



$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 \parallel Z_0}$$

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$V_{a0} = V_{a1} = V_{a2} = \frac{1}{3} V_a$$

$$I_{a1} = \frac{5,77}{j0,25 + j0,154} = -j14,28 \text{ kA}$$

$$V_{a1} = E_a - I_{a1}Z_1 = 5,77 - (-j14,28 \times j0,25) = 5,77 - 3,57 = 2,2 \text{ kV}$$

$$V_{a1} = \frac{1}{3} V_a \rightarrow V_a = 6,6 \text{ kV}$$

$$V_b = 0$$

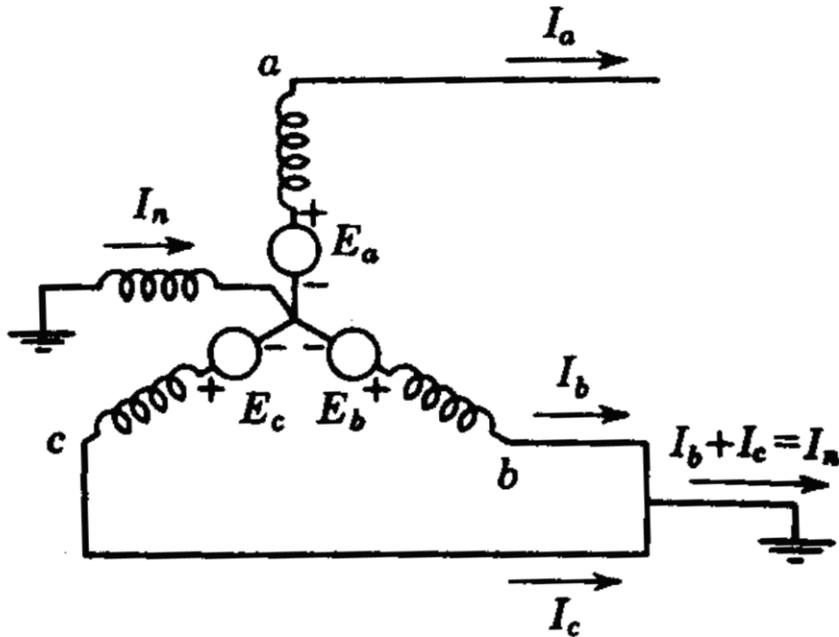
$$V_c = 0$$

Ejemplo: Generador 800 kVA – 10 kV con neutro a tierra a través de impedancia $Z_n=j0,05 \Omega$.

Impedancia de secuencia **positiva**: $Z_1=0,25 \Omega$.

Impedancia de secuencia **negativa**: $Z_2=0,4 \Omega$.

Impedancia de secuencia **cero**: $Z_{g0}=0,1 \Omega$.



$$V_{a2} = -I_{a2}Z_2 \rightarrow I_{a2} = -\frac{V_{a2}}{Z_2} = -\frac{2,2}{j0,4} = j5,5 \text{ kA}$$

$$I_{a0} = -\frac{V_{a0}}{Z_0} = -\frac{2,2}{j0,25} = j8,8 \text{ kA}$$

$$I_a = 0 = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = j8,8 + j5,5 - j14,3 = 0 \text{ ok!}$$

$$I_b = a^2 I_{a1} + a I_{a2} + I_{a0} = -j14,28(-0,5 - j0,866) + j5,5(-0,5 + j0,866) + j8,8$$

$$I_b = -17,13 + j13,19 = 21,62 \angle 142,40^\circ \text{ kV}$$

$$I_c = a I_{a1} + a^2 I_{a2} + I_{a0} = -j14,28(-0,5 + j0,866) + j5,5(-0,5 - j0,866) + j8,8$$

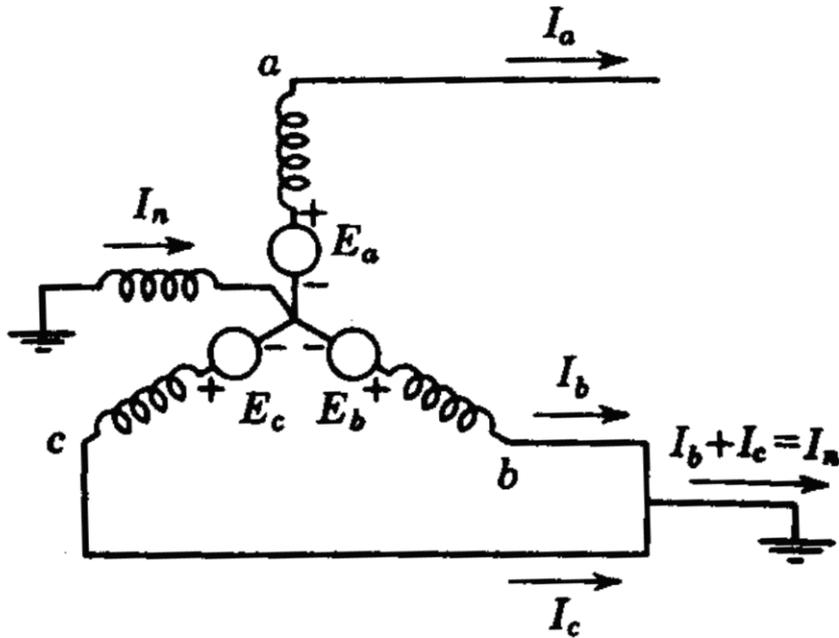
$$I_c = 13,19 + j17,13 = 21,62 \angle 37,6^\circ \text{ kV}$$

Ejemplo: Generador 800 kVA – 10 kV con neutro a tierra a través de impedancia $Z_n = j0,05 \Omega$.

Impedancia de secuencia **positiva**: $Z_1 = 0,25 \Omega$.

Impedancia de secuencia **negativa**: $Z_2 = 0,4 \Omega$.

Impedancia de secuencia **cero**: $Z_{g0} = 0,1 \Omega$.

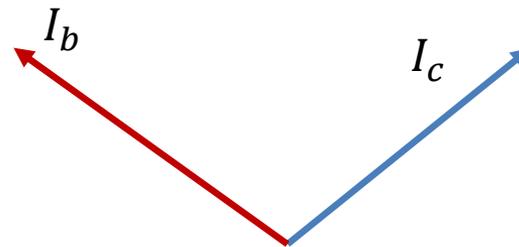


$$I_n = 3I_{a0} = 3(j8,8) = j26,4 \text{ kA}$$

$$I_b = -17,13 + j13,19$$

$$I_c = 17,13 + j13,19$$

$$I_b + I_c = j26,4 \text{ kA} \text{ ok!}$$



$$|I_a| = 0$$

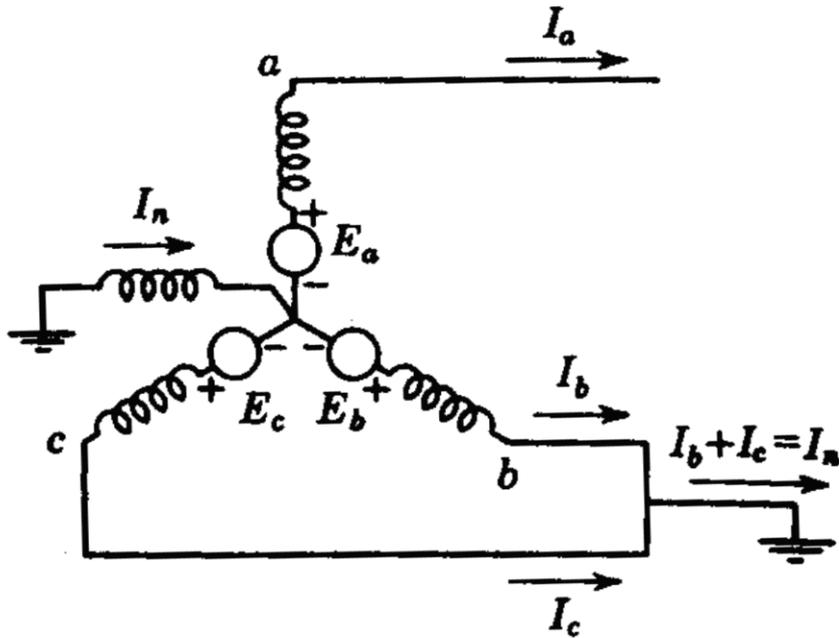
$$|I_b| = |I_c| = 21,62 \text{ kA}$$

Ejemplo: Generador 800 kVA – 10 kV con neutro a tierra a través de impedancia $Z_n=j0,05 \Omega$.

Impedancia de secuencia **positiva**: $Z_1=0,25 \Omega$.

Impedancia de secuencia **negativa**: $Z_2=0,4 \Omega$.

Impedancia de secuencia **cero**: $Z_0=0,1 \Omega$.



$$V_{ab} = V_a - V_b = V_a = 6,6 \text{ kV}$$

$$V_{bc} = V_b - V_c = 0 \text{ kV}$$

$$V_{ca} = V_c - V_a = -V_a = -6,6 \text{ kV}$$



$$|V_{ab}| = |V_{ca}| = 6,6 \text{ kV}$$

$$|V_{bc}| = 0 \text{ kV}$$

COMPONENTES SIMETRICOS

EJEMPLOS DE ANÁLISIS DE UN GENERADOR EN VACÍO QUE TIENE SU NEUTRO CONECTADO A TIERRA A TRAVÉS DE UN REACTOR DE NEUTRO.

EL EJEMPLO NUMÉRICO SE DESARROLLARÁ PARA EL MISMO GENERADOR EL CUAL ESTA SOMETIDO A LOS SIGUIENTES FALLOS:

- FALLO SIMPLE DE LINEA A TIERRA
- FALLO LINEA A LINEA
- FALLO DOBLE LINEA A TIERRA

Ejemplo:

Un generador que tiene su Neutro a Tierra a través de un reactor de neutro de impedancia $j 0.05\Omega$ (Z_n). El alternador es de 8 KVA, 10 Kv y sus impedancias de secuencia + , - y Z_{g0} son $j0.25\Omega$, $j0.4\Omega$, $j0.1\Omega$ respectivamente.

$$S=8 \text{ KVA}$$

$$V= 10 \text{ Kv}$$

$$Z_n= j 0.05 \Omega$$

$$Z_{g0} = j 0.1 \Omega$$

$$Z_1 = j 0.25 \Omega$$

$$Z_2 = j 0.4 \Omega$$

$$Z_0 = 3 Z_n + Z_{g0}$$