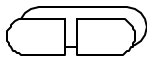


UNIVERSIDAD CATOLICA DE VALPARAISO

Escuela de Ingeniería Eléctrica

Componentes Simétricas

Raúl Saavedra Cossio



RSC

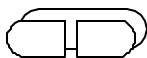
Línea de Transmisión y SEP

1



Componentes simétricas

- **Análisis Componentes Simétricas (CS's)**
- **Síntesis de fases asimétricas a partir de sus CS's**
- **Las CS'S a partir de fasores asimétricos**
- **El desfaseamiento de las CS's en un banco de transformadores D-Y**
- **Potencia en función de CS'S**



RSC

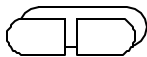
Línea de Transmisión y SEP

2



Componentes simétricas

- Impedancia serie asimétrica
- Impedancia y malla de secuencia
- Malla de secuencia de Generador en vacío
- Mallas de Secuencias
- Malla de secuencia cero



RSC

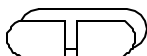
Línea de Transmisión y SEP

3

Componentes simétricas

Objetivo :

Las CS's son una valiosa herramienta para solucionar sistemas polifásicos desbalanceados o redes desequilibradas.



RSC

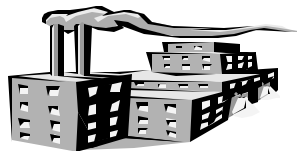
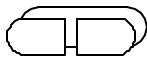
Línea de Transmisión y SEP

4

Fasores desbalanceados representados en CS's

Un sistema polifásico desbalanceado puede descomponerse en (n-1) sistemas n-fásicos balanceados de secuencias distintas y un sistema n-fásico homopolar o de secuencia cero

by C.L Fortescue, 1918



RSC

Línea de Transmisión y SEP

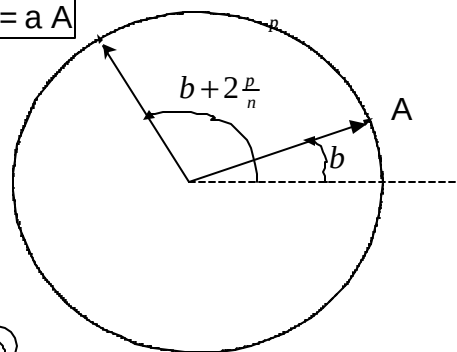


5

Definición del Operador de CS's

$$a = 1e^{j\frac{2p}{n}} = \cos(2p/n) + j \operatorname{sen}(2p/n)$$

$$A' = a A$$



RSC

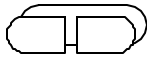
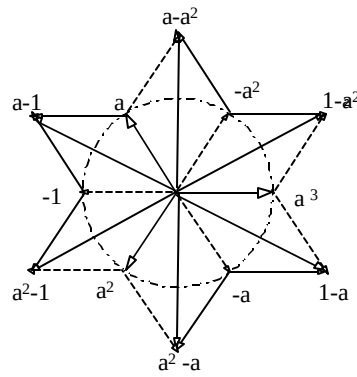
Línea de Transmisión y SEP



6

Operador de CS's para un sistema trifásico

$$n = 3 \Rightarrow a = 1e^{j\frac{2\pi}{3}} = -0,5 + j0,866$$



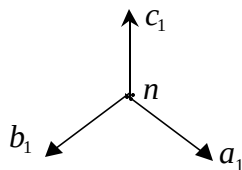
RSC

Línea de Transmisión y SEP

7

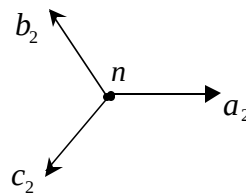
Síntesis de fasores desbalanceados mediante sus CS's

(1) Componentes de Sec(+)

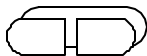


1. Para sec. positiva

(2) Componentes de Sec (-)



2. Para sec. Negativa



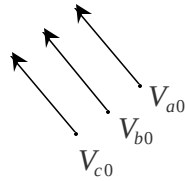
RSC

Línea de Transmisión y SEP

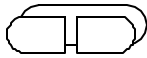
8

Síntesis de fasores desbalanceados mediante sus CS's

(3) Componentes de secuencia cero



0 para secuencia Homopolar o Cero

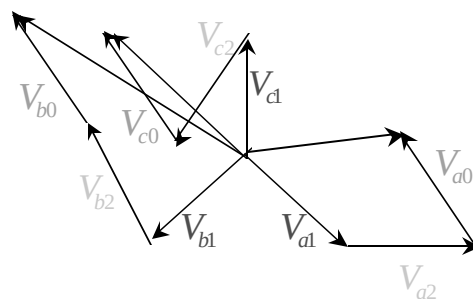


RSC

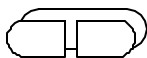
Línea de Transmisión y SEP

9

Síntesis de fasores desbalanceados mediante sus CS's



V_a	$=$	V_{a1}	$+$	V_{a2}	$+$	V_{a0}
V_b	$=$	V_{b1}	$+$	V_{b2}	$+$	V_{b0}
V_c	$=$	V_{c1}	$+$	V_{c2}	$+$	V_{c0}



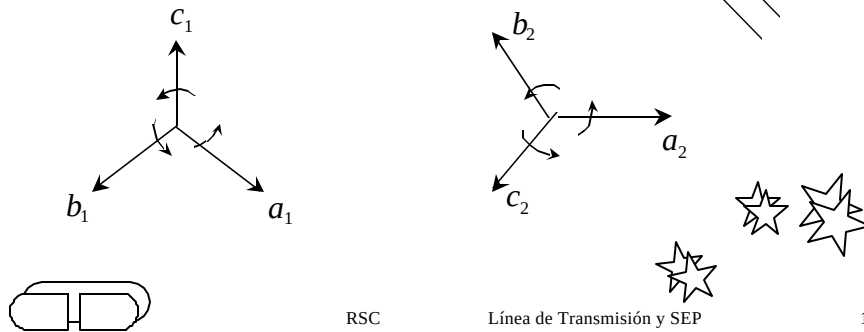
RSC

Línea de Transmisión y SEP

10

Síntesis de CS's mediante fasores desbalanceados

$$\begin{aligned} V_{b1} &= a^2 V_{a1}, & V_{c1} &= a V_{a1} \\ V_{b2} &= a V_{a2}, & V_{c2} &= a^2 V_{a2} \\ V_{b0} &= V_{a0}, & V_{c0} &= V_{a0} \end{aligned}$$



RSC

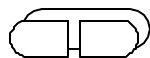
Línea de Transmisión y SEP

11

Matriz directa de CS's

$$\begin{aligned} V_a &= V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \\ V_b &= V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} = a^2 V_{a1} + a V_{a2} + V_{a0} \\ V_c &= V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} = a V_{a1} + a^2 V_{a2} + V_{a0} \end{aligned}$$

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



RSC

Línea de Transmisión y SEP

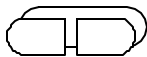
12

Matriz inversa de CS'S

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

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

* En un sistema trifásico balanceado, la suma fasorial de sus componentes de fases es cero, por consiguiente, solo las componentes de secuencia positiva están presente.



RSC

Línea de Transmisión y SEP

13

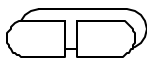
CS's de fasores asimétricos

i) CS's de fasores de tensiones L-L

$$\begin{bmatrix} V_{ab0} \\ V_{ab1} \\ V_{ab2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix}$$

ii) CS's de fasores de corrientes

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



RSC

Línea de Transmisión y SEP

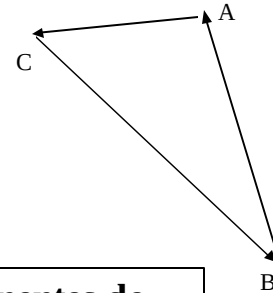
14

CS's de fasores asimétricos

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

$$V_{ab0} = \frac{1}{3}(V_{ab} + V_{bc} + V_{ca})$$

$$I_{a0} = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c)$$



Si la suma fasorial de las componentes de fases es cero, no estará presente la secuencia homopolar



RSC

Línea de Transmisión y SEP

15

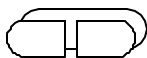
CS's de fasores asimétricos

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

$$\begin{cases} V_{a0} = 0 & \text{Cuando el sistema trifásico es balanceado} \\ V_{a0} \neq 0 & \text{Cuando } (V_a + V_b + V_c) \neq 0 \end{cases}$$

* Si el sistema trifásico es balanceado $V_{a0}=0$

* Un desbalance trifásico no garantiza que $V_{a0} \neq 0$.



RSC

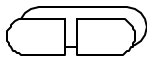
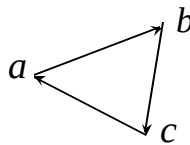
Línea de Transmisión y SEP

16

CS's de fasores asimétricos

$$V_{ab0} = \frac{1}{3} (V_{ab} + V_{bc} + V_{ca})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ab0} \text{ Es siempre cero, sea o no el sistema trifásico balanceado} \\ (V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}) \text{ siempre es cero en una malla cerrada} \end{array} \right.$$

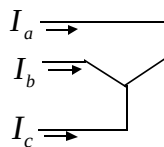


RSC

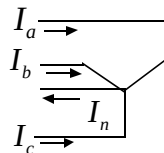
Línea de Transmisión y SEP

17

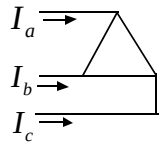
CS's de fasores asimétricos



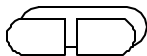
$$\left\{ \begin{array}{l} I_{a0} = \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c) = 0 \\ \text{(Y con neutro aislado)} \end{array} \right.$$



$$\left\{ \begin{array}{l} I_{a0} = \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c) \neq 0 \\ (I_a + I_b + I_c) = 3I_{a0} = I_n \\ \text{Y con neutro a tierra} \end{array} \right.$$



$$\left\{ \begin{array}{l} I_{a0} = \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c) = 0 \\ \text{Conexión } \Delta \end{array} \right.$$



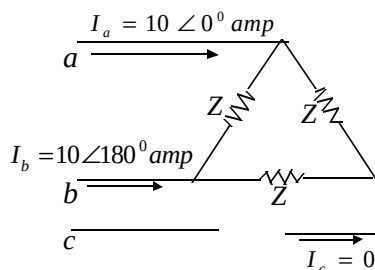
RSC

Línea de Transmisión y SEP

18

CS's de fasores asimétricos

Ejemplo : Determine las CS's de las corrientes de líneas

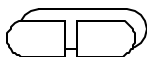


Los valores de las corrientes de fases son :

$$I_a = 10 \angle 0^\circ A$$

$$I_b = 10 \angle 180^\circ A$$

$$I_c = 0 A$$



RSC

Línea de Transmisión y SEP

19

CS's de fasores asimétricos

$$I_{a0} = \frac{1}{3}(10 \angle 0^\circ + 10 \angle 180^\circ + 0) = 0$$

$$I_{a1} = \frac{1}{3}(10 \angle 0^\circ + 10 \angle 180^\circ + 120^\circ + 0) = 5 - j2.89 = 5.78 \angle -30^\circ A$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3}(10 \angle 0^\circ + 10 \angle 180^\circ + 240^\circ + 0) = 5 + j2.89 = 5.78 \angle 30^\circ A$$

$$I_{b1} = 5.78 \angle -150^\circ A$$

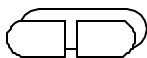
$$I_{c1} = 5.78 \angle 90^\circ A$$

$$I_{b2} = 5.78 \angle 150^\circ A$$

$$I_{c2} = 5.78 \angle -90^\circ A$$

$$I_{b0} = 0$$

$$I_{c0} = 0$$

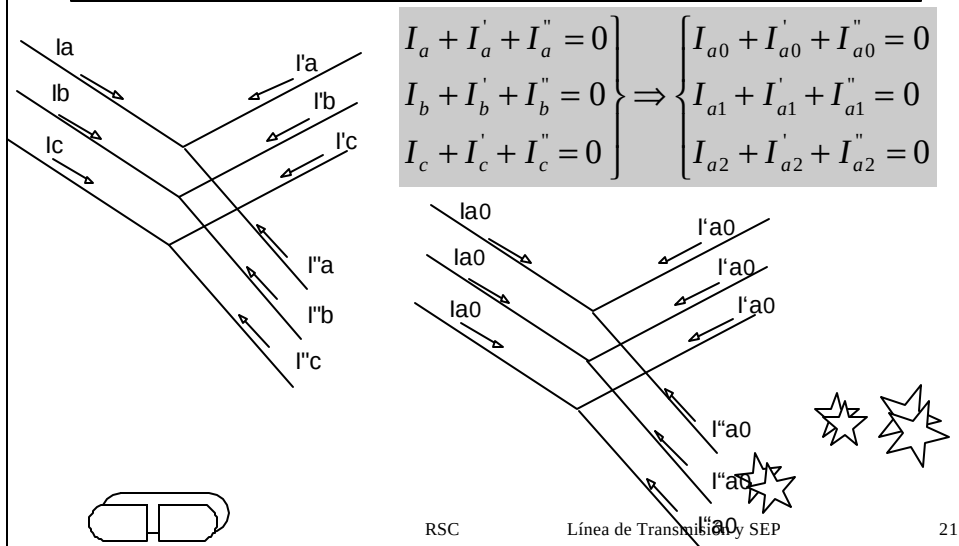


RSC

Línea de Transmisión y SEP

20

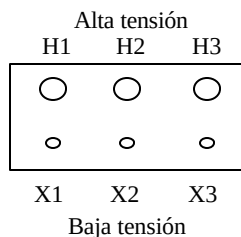
Leyes de Kirchhoff



21

Desfasamiento de las CS's en banco de transformadores Y-D

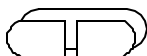
La norma ANSI/IEEE C57.12 DISTRIBUTION and POWER TRANSFORMERS, establece que el desfaseamiento entre los terminales de Alta Tensión (H) y el correspondiente a la misma fase en Baja Tensión (X) estén desfasados en 0° ó $+30^\circ$ para los grupos de conexión 1 y 2, respectivamente.



Para conexión:

$$\Delta\Delta \text{ o } YY \Rightarrow \angle_{X1}^{H1} = 0^\circ \quad \text{Grupo 1}$$

$$\Delta Y \text{ o } Y\Delta \Rightarrow \angle_{X1}^{H1} = 30^\circ \quad \text{Grupo 2}$$

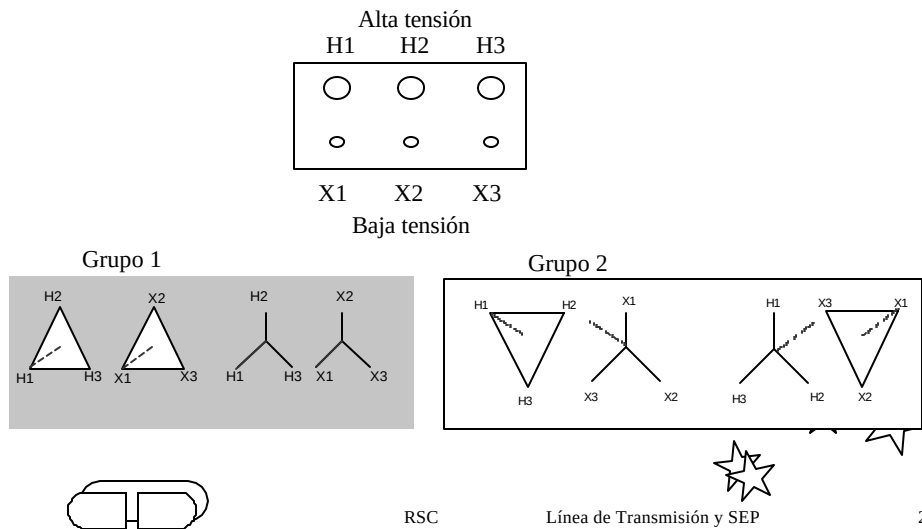


RSC

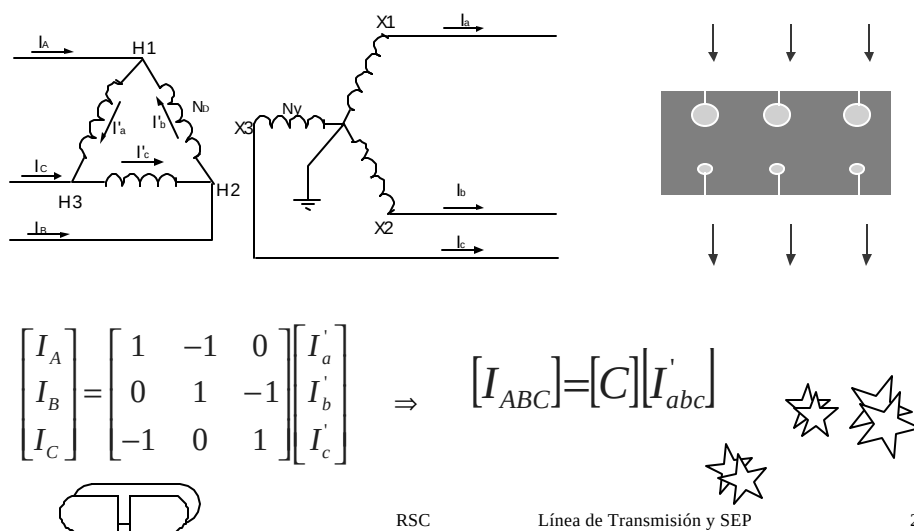
Línea de Transmisión y SEP

22

Desfasamiento de las CS's en banco de transformadores.



Desfasamiento de las CS's en banco de transformadores.



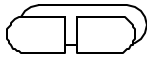
Desfasamiento de las CS's en banco de transformadores

$$[I_{ABC}] = [C][I'_{abc}] \Rightarrow [A][I_{A012}] = \frac{N_y}{N_D}[C][A][I_{a012}]$$

$$[I_{A012}] = \frac{N_y}{N_D}[A^{-1}][C][A][I_{a012}] \Rightarrow \begin{bmatrix} I_{A0} \\ I_{A1} \\ I_{A2} \end{bmatrix} = \frac{N_y}{N_D} \sqrt{3} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1\angle+30^\circ & 0 \\ 0 & 0 & 1\angle-30^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix}$$

$$\Delta \leftarrow Y \Rightarrow I_{A0} = 0; I_{A1} = \frac{\sqrt{3}N_y}{N_D} I_{a1} \cdot 1\angle+30^\circ; I_{A2} = \frac{\sqrt{3}N_y}{N_D} I_{a2} \cdot 1\angle-30^\circ$$

$$\Delta \rightarrow Y \Rightarrow I_{a0} = ?; I_{a1} = \frac{N_D}{\sqrt{3}N_y} I_{A1} \cdot 1\angle-30^\circ; I_{a2} = \frac{N_D}{\sqrt{3}N_y} I_{A2} \cdot 1\angle+30^\circ$$

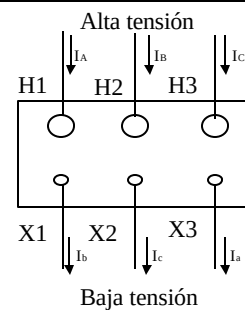
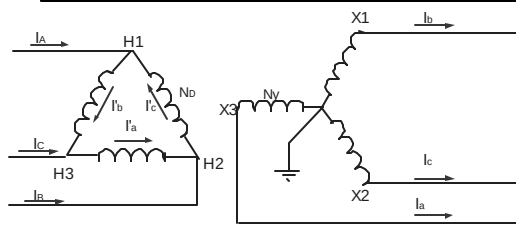


RSC

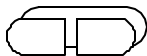
Línea de Transmisión y SEP

25

Desfasamiento de las CS's en banco de transformadores



$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I'_a \\ I'_b \\ I'_c \end{bmatrix} \Rightarrow [I_{ABC}] = [C][I'_{abc}]$$



RSC

Línea de Transmisión y SEP

26

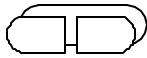
Desfasamiento de las CS's en banco de transformadores

$$[I_{ABC}] = [C][I'_{abc}] \Rightarrow [A][I_{A012}] = [C][A][I'_{a012}] = \frac{N_y}{N_D} [C][A][I_{a012}]$$

$$[I_{A012}] = \frac{N_y}{N_D} [A^{-1}][C][A][I_{a012}] \Rightarrow \begin{bmatrix} I_{A0} \\ I_{A1} \\ I_{A2} \end{bmatrix} = \frac{N_y}{N_D} \sqrt{3} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1\angle -90^\circ & 0 \\ 0 & 0 & 1\angle +90^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix}$$

$$\Delta \leftarrow Y \Rightarrow I_{A0} = 0; I_{A1} = -j \frac{\sqrt{3}N_y}{N_D} I_{a1}; I_{A2} = +j \frac{\sqrt{3}N_y}{N_D} I_{a2}$$

$$\Delta \rightarrow Y \Rightarrow I_{a0} = ?; I_{a1} = +j \frac{N_D}{\sqrt{3}N_y} I_{A1}; I_{a2} = -j \frac{N_D}{\sqrt{3}N_y} I_{A2}$$



RSC

Línea de Transmisión y SEP

27

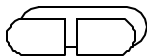
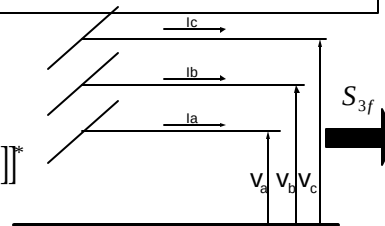
POTENCIA TRIFÁSICA EN CS's

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

$$S = [V_{abc}]^T \cdot [I_{abc}]^* = [[A][V_{a012}]]^T [[A][I_{a012}]]^*$$

$$S = [V_{a012}]^T [A]^T [A]^* [I_{a012}]^* = 3[V_{a012}]^T [U][I_{a012}]^*$$

$$S_{3f} = P_{3f} + jQ_{3f} = 3[V_{a012}]^T [I_{a012}]^* = 3V_{a0} I_{a0}^* + 3V_{a1} I_{a1}^* + 3V_{a2} I_{a2}^*$$

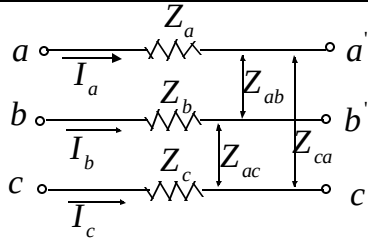


RSC

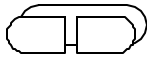
Línea de Transmisión y SEP

28

Impedancia Serie Asimétrica



$$\begin{bmatrix} V_{aa'} \\ V_{bb'} \\ V_{cc'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_a & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_b & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$



RSC

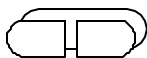
Línea de Transmisión y SEP

29

Impedancia Serie Asimétrica

$$A \begin{bmatrix} V_{aa'0} \\ V_{bb'1} \\ V_{cc'2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_a & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_b & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_c \end{bmatrix} A \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_{aa'0} \\ V_{bb'1} \\ V_{cc'2} \end{bmatrix} = A^{-1} \underbrace{\begin{bmatrix} Z_a & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_b & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_c \end{bmatrix}}_Z A \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix}$$



RSC

Línea de Transmisión y SEP

30

Impedancia Serie Asimétrica

$$Z_{012} = A^{-1}ZA$$

$$Z_{012} = \begin{bmatrix} (Z_{s0} + 2Z_{M0}) & (Z_{s2} - 2Z_{M2}) & (Z_{s1} - 2Z_{M1}) \\ (Z_{s1} - 2Z_{M1}) & (Z_{s0} - 2Z_{M0}) & (Z_{s2} + 2Z_{M2}) \\ (Z_{s2} - 2Z_{M2}) & (Z_{s1} + 2Z_{M1}) & (Z_{s0} - 2Z_{M0}) \end{bmatrix}$$

donde

$$\begin{aligned} Z_{s0} &= \frac{1}{3}(Z_a + Z_b + Z_c) & Z_{M0} &= \frac{1}{3}(Z_{bc} + Z_{ca} + Z_{ab}) \\ Z_{s1} &= \frac{1}{3}(Z_a + aZ_b + a^2Z_c) & Z_{M1} &= \frac{1}{3}(Z_{bc} + aZ_{ca} + a^2Z_{ab}) \\ Z_{s2} &= \frac{1}{3}(Z_a + a^2Z_b + aZ_c) & Z_{M2} &= \frac{1}{3}(Z_{bc} + a^2Z_{ca} + aZ_{ab}) \end{aligned}$$



RSC

Línea de Transmisión y SEP

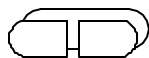
31

Impedancia Serie Asimétrica

$$V_{a0} = (Z_{s0} + 2Z_{M0})I_{a0} + (Z_{s2} - 2Z_{M2})I_{a1} + (Z_{s1} - 2Z_{M1})I_{a2}$$

$$V_{a1} = (Z_{s1} - 2Z_{M1})I_{a0} + (Z_{s0} - 2Z_{M0})I_{a1} + (Z_{s2} + 2Z_{M2})I_{a2}$$

$$V_{a2} = (Z_{s2} - 2Z_{M2})I_{a0} + (Z_{s1} + 2Z_{M1})I_{a1} + (Z_{s0} - 2Z_{M0})I_{a2}$$



RSC

Línea de Transmisión y SEP

32

Impedancia Serie Asimétrica

Caso 1. Sin acoplamiento, $Z_{ij(i \neq j)} = 0 \Rightarrow Z_{M0} = Z_{M1} = Z_{M2} = 0$

$$V_{aa'0} = Z_{s0} I_{a0} + Z_{s2} I_{a1} + Z_{s1} I_{a2}$$

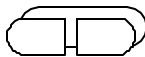
$$= \frac{1}{3} I_{a0} (Z_a + Z_b + Z_c) + \frac{1}{3} I_{a1} (Z_a + a^2 Z_b + a Z_c) + \frac{1}{3} I_{a2} (Z_a + a Z_b + a^2 Z_c)$$

$$V_{aa'1} = Z_{s1} I_{a0} + Z_{s0} I_{a1} + Z_{s2} I_{a2}$$

$$= \frac{1}{3} I_{a0} (Z_a + a Z_b + a^2 Z_c) + \frac{1}{3} I_{a1} (Z_a + Z_b + Z_c) + \frac{1}{3} I_{a2} (Z_a + a^2 Z_b + Z_c)$$

$$V_{aa'2} = Z_{s2} I_{a0} + Z_{s1} I_{a1} + Z_{s0} I_{a2}$$

$$= \frac{1}{3} I_{a0} (Z_a + a^2 Z_b + a Z_c) + \frac{1}{3} I_{a1} (Z_a + a Z_b + a^2 Z_c) + \frac{1}{3} I_{a2} (Z_a + Z_b + Z_c)$$



RSC

Línea de Transmisión y SEP

33

Impedancia Serie Asimétrica

Caso 2. Si 1. $Z_a = Z_b = Z_c$ Se supone la línea totalmente transpuesta

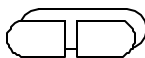
2. $Z_{ij(i \neq j)} = 0$

$$V_{aa'1} = I_{a1} Z_a \quad V_{aa'2} = I_{a2} Z_a \quad V_{aa'0} = I_{a0} Z_a$$

✓ Si las impedancias no son iguales, las caídas de tensión de cualquier secuencia es dependiente de las corrientes de las tres secuencias

✓ Las CS's de corrientes desbalanceadas que circulan hacia una carga equilibrada, o por impedancias series equilibradas, producen solamente caídas de tensión de la misma secuencia.

✓ Si hay acoplamiento mutuo asimétrico entre las impedancias de fases, los terminos Z_{M0} , Z_{M1} y Z_{M2} serían distinto de cero y existiría acoplamiento entre las (mallas) impedancias a secuencia.



RSC

Línea de Transmisión y SEP

34

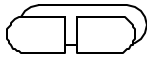
Impedancia Serie Asimétrica

Suponiendo:

1. Sin acoplamiento

2. $Z_a = Z_b = Z_c$

- ✓ Corrientes de secuencia positiva producen solo caídas de tensión de Secuencia positiva
- ✓ Corrientes de sec. Negativa solo producen caídas de tensión de sec. Negativa .
- ✓ Análogamente, corrientes de sec cero solo producen caídas de tensión de sec cero.



RSC

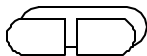
Línea de Transmisión y SEP

35



Impedancias y Mallas de Secuencia

- ✓ **Impedancia de Sec Positiva (Z_1):** es la impedancia de un circuito por el cual circula solamente corriente de Sec(+).
- ✓ **Impedancia de Sec Negativa (Z_2):** es la impedancia de un circuito por el cual circula solo corriente de Sec(-).
- ✓ **Impedancia de Sec Cero (Z_0):** es la impedancia de un circuito por el cual circula solamente corriente de Sec (0)



RSC

Línea de Transmisión y SEP

36



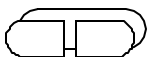
Impedancias y Mallas de Secuencia

✓El circuito monofásico equivalente compuesto de impedancias de solo una secuencia, se denomina mallas de secuencia

✓La mallas de secuencia positiva contiene solamente corrientes e impedancias de secuencia positiva.

✓La mallas de secuencia negativa solo contiene corrientes e impedancias de secuencia negativa.

✓Análogamente, una mallas de secuencia cero es aquella que solo contiene corrientes e impedancias de secuencia cero.



RSC

Línea de Transmisión y SEP

37

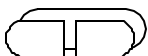
Impedancias y Mallas de Secuencia

Impedancia a Secuencia de Equipos de un SEP

	Positiva(+)	Negativa(-)	Homopolar(0)
Línea	Z1	Z2=Z1	Z0=Z1
Transformador	Z1	Z2=Z1	Nota 1
Máquina	Z1	Z1=Z2 Nota 2	Z0=Z1

Nota 1: Para transformadores con núcleo acorazado se cumple que $Z_0=Z_1$; y son diferentes para cualquier otro tipo de núcleo

Nota 2: Generalmente se suponen iguales

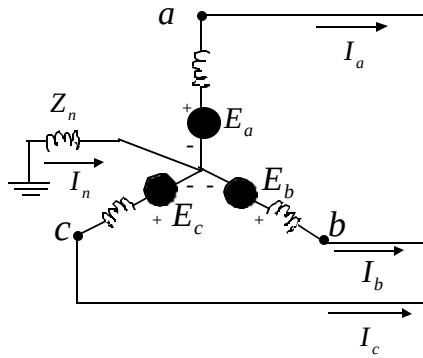


RSC

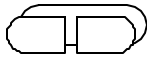
Línea de Transmisión y SEP

38

Malla de Secuencia de un Generador en vacío



Dado que un generador sólo induce tensiones balanceadas(E_a , E_b , E_c), por consiguiente habrá siempre presente solamente tensiones de secuencia positiva

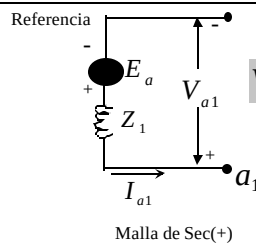
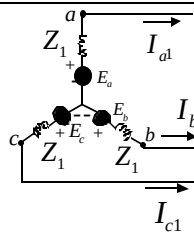


RSC

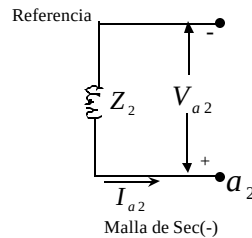
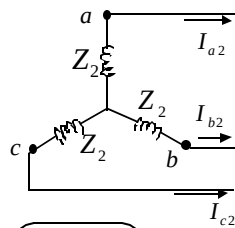
Línea de Transmisión y SEP

39

Malla de Secuencia de un Generador en vacío



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



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

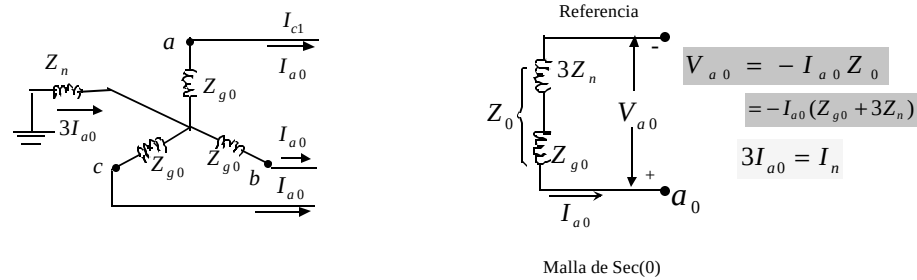


RSC

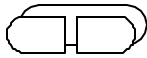
Línea de Transmisión y SEP

40

Malla de Secuencia de un Generador en vacío



Nótese que: Z_n solo está presente en la malla de Sec(0)



RSC

Línea de Transmisión y SEP

41

Mallas de Secuencia para un Generador en Vacío



Ejemplo 11.6: Un generador de polos salientes sin devanados de amortiguación, de 20 MVA, 13.8 KV con $x_d'' = 0.25 \text{ pu}$. Las reactancias negativa y cero son $x_2 = 0.35$ y $x_0 = 0.10 \text{ pu}$, respectivamente.

El neutro del generador está sólidamente conectado a tierra. Con el generador operando en vacío con una tensión de $E_{an} = 1.0 \angle 0^\circ \text{ pu}$ de fase a neutro, ocurre una falla monofásica a tierra en los terminales de la máquina. Las tensiones de fase a neutro en el punto de falla son las siguientes:

$$V_a = 0 \quad V_b = 1.013 \angle -102.25^\circ \text{ pu} \quad V_c = 1.013 \angle 102.25^\circ \text{ pu}$$

Determine la corriente subtransitoria en el generador y las tensiones de fase a fase para la condición subtransitoria debido a la falla.

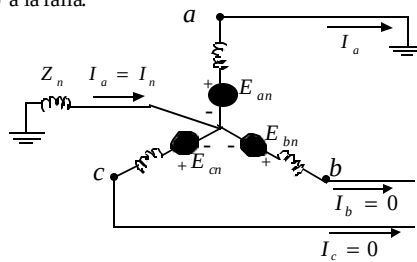
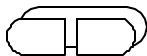


Figura 11.15



RSC

Línea de Transmisión y SEP

42

Mallas de Secuencia para un Generador en Vacío

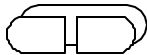
Figura 11.15 muestra la falla monofásica en la fase “a” de la máquina.

$$V_b = -0.215 - j0.990 \text{ pu}$$

$$V_c = -0.215 + j0.990 \text{ pu}$$

$$\begin{bmatrix} V_a^{(0)} \\ V_b^{(0)} \\ V_c^{(0)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -0.215 - j0.990 \\ -0.215 + j0.990 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.143 + j0 \\ 0.643 + j0 \\ -0.500 + j0 \end{bmatrix} \text{ pu}$$

$$I_a^{(0)} = -\frac{V_a^{(0)}}{Z_{go}} = \frac{(-0.143 + j0)}{j0.10} = -j1.43 \text{ pu}$$



RSC

Línea de Transmisión y SEP

43

Mallas de Secuencia para un Generador en Vacío

$$I_a^{(1)} = -\frac{E_{an} - V_a^{(1)}}{Z_1} = \frac{(1.0 + j0) - (0.643 + j0)}{j0.25} = -j1.43 \text{ pu}$$

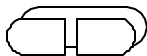
$$I_a^{(2)} = -\frac{V_a^{(2)}}{Z_2} = \frac{(-0.500 + j0)}{j0.35} = -j1.43 \text{ pu}$$

Por consiguiente, la corriente de la fase fallada a tierra es de:

$$I_a = I_a^{(0)} + I_a^{(1)} + I_a^{(2)} = 3I_a^{(0)} = -j4.29 \text{ pu}$$

La corriente base es de $\frac{1}{\sqrt{3}}$; de este modo la corriente subtransitoria será:

$$I_a = -j4.29 \times 837 = -j3,590 \text{ A}$$



RSC

Línea de Transmisión y SEP

44

Mallas de Secuencia para un Generador en Vacío

Las tensiones de fase a fase durante la falla valen:

$$V_{ab} = V_a - V_b = 0.215 + j0.990 = 1.01 \angle 77.7^\circ \text{ pu}$$

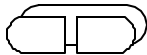
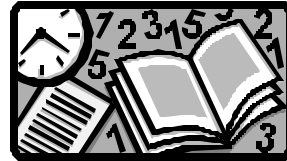
$$V_{bc} = V_b - V_c = 0 - j1.980 = 1.980 \angle 270^\circ \text{ pu}$$

$$V_{ca} = V_c - V_a = -0.215 + j0.990 = 1.01 \angle 77.7^\circ \text{ pu}$$

$$V_{ab} = 1.01 \times \frac{13.8}{\sqrt{3}} \angle 77.7^\circ = 8.05 \angle 77.7^\circ \text{ kV}$$

$$V_{bc} = 1.980 \times \frac{13.8}{\sqrt{3}} \angle 270^\circ = 15.78 \angle 270^\circ \text{ kV}$$

$$V_{ca} = 1.01 \times \frac{13.8}{\sqrt{3}} \angle 102.3^\circ = 8.05 \angle 102.3^\circ \text{ kV}$$



RSC

Línea de Transmisión y SEP

45

Mallas de Secuencia para un Generador en Vacío

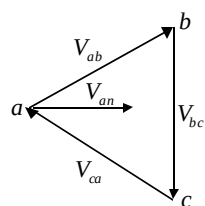
Antes de la falla las tensiones eran balanceadas de 13.8 kV. A modo de comparación, se muestran las tensiones durante la falla con la tensión de fase a neutro de la fase "a" como referencia.

$$V_{ab} = 13.8 \angle 30^\circ \text{ kV}$$

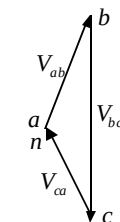
$$V_{bc} = 13.8 \angle 270^\circ \text{ kV}$$

$$V_{ca} = 13.8 \angle 150^\circ \text{ kV}$$

Figura 11.6 ilustra los diagramas fasoriales de las tensiones para antes y durante la falla:

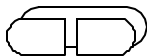


(a) Prefalla



(b) Durante la falla

Figura 11.6



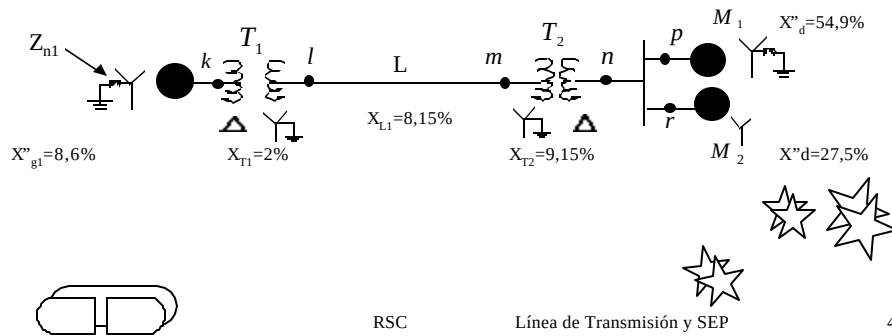
RSC

Línea de Transmisión y SEP

46

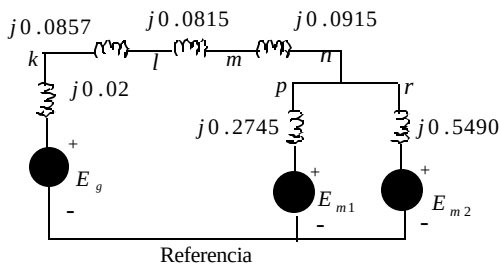
Ejemplo: Formación de las mallas de secuencias

Ejemplo: Dibuje las mallas de secuencias (+) y (-) para el sistema mostrado a continuación. Suponga que las impedancias a sec(+) y sec(-) son iguales a la reactancia subtransitoria. Desprecie las resistencias.

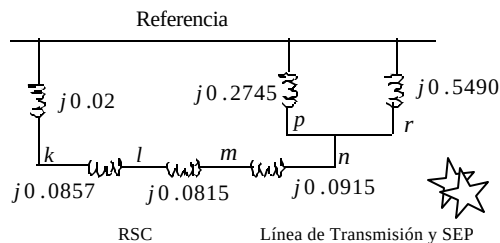


Ejemplo: Formación de las mallas de secuencias

Malla de Sec(+)

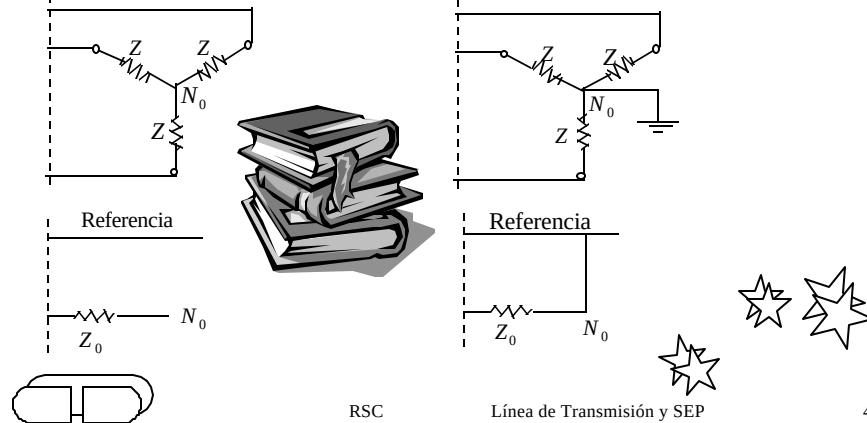


Malla de Sec(-)

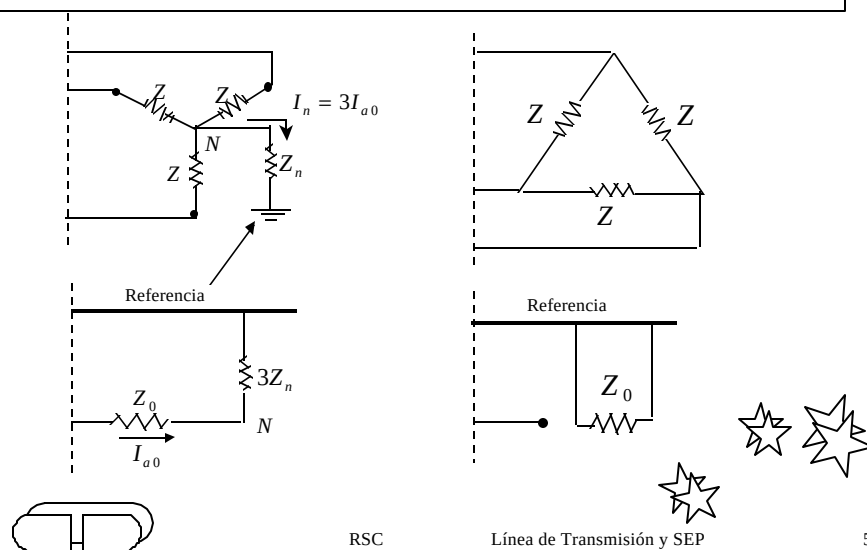


Mallas de Secuencia Cero

1. La Corriente de Sec(0) solo estará presente si existe un camino de retorno (neutro conectado a tierra)
- 2.- El Neútro de la malla de Sec (0) es el Neutro del circuito en el punto de su conexión a una tierra de referencia

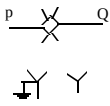
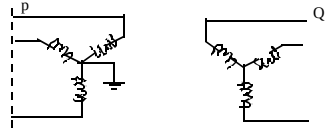
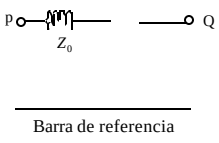
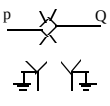
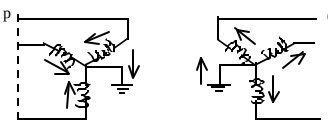
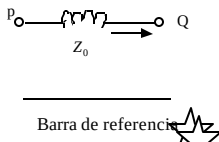


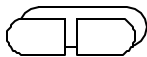
Mallas de Secuencia Cero



Mallas de Secuencia Cero

Mallas de Sec(0) de banco trifásico de transformadores

Símbolo	Diagrama de conexiones	Malla de Sec(0)
		 Barra de referencia
		 Barra de referencia

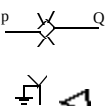
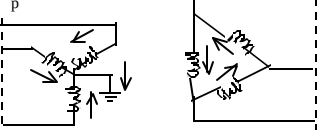
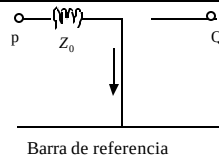
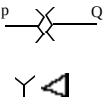
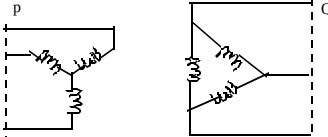
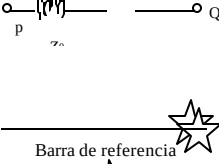


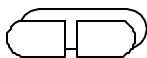
RSC

Línea de Transmisión y SEP

51

Mallas de Secuencia Cero

Símbolo	Diagrama de conexión	Malla de Sec(0)
		 Barra de referencia
		 Barra de referencia

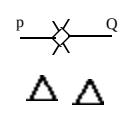
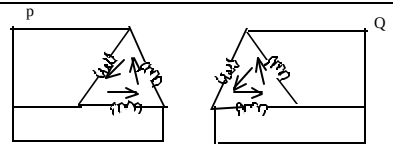
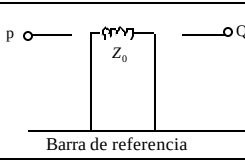


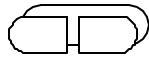
RSC

Línea de Transmisión y SEP

52

Mallas de Secuencia Cero

Símbolo	Diagrama de conexión	Malla de Sec(0)
		



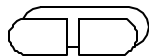
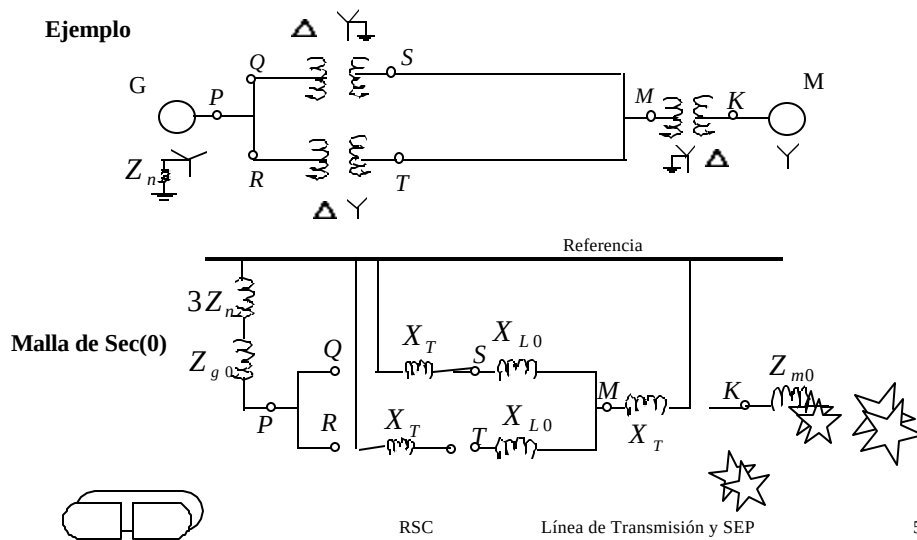
RSC

Línea de Transmisión y SEP

53

Mallas de Secuencia Cero

Ejemplo

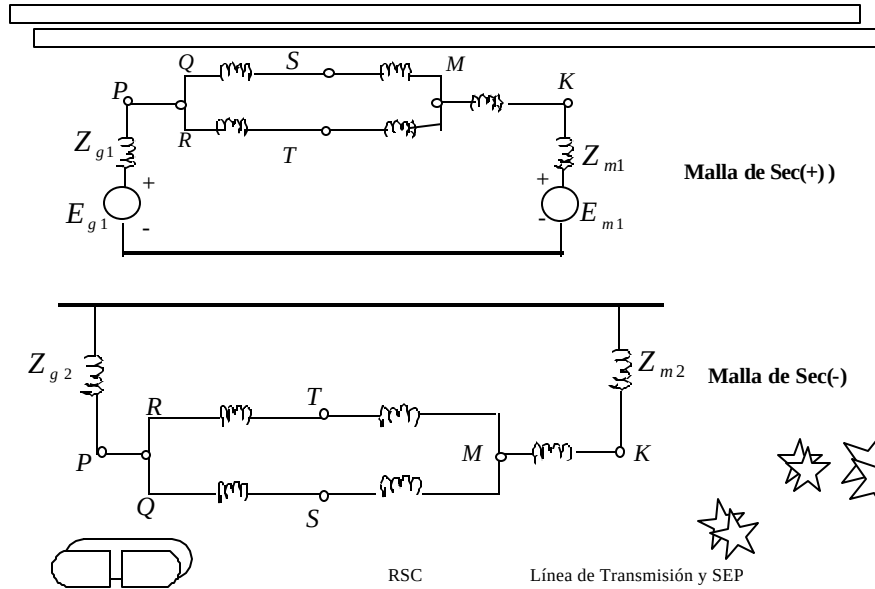


RSC

Línea de Transmisión y SEP

54

Mallas de Secuencia Cero



55

Mallas de Secuencia Cero



Ejemplo 11.9 (Stevenson: pág 436) Bosqueje la malla de secuencia cero del SEP mostrado en el ejercicio 6.1.

Suponga que la impedancia de sec(0) del motor y generador es de 5%. Un reactor limitador de corriente de 0,4 (Ω) se ha instalado en cada uno de los neutros del generador y del motor mayor. La reactancia a sec(0) de la línea es de 1,5 (Ω /Km).

Generador: $X_0 = 0.05 \%$

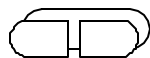
Motor 1: $X_0 = 0.05 \left(\frac{300}{200} \right) \left(\frac{13.2}{13.8} \right)^2 = 0.0686 \%$

Motor 2: $X_0 = 0.05 \left(\frac{300}{100} \right) \left(\frac{13.2}{13.8} \right)^2 = 0.1372 \%$

Base (20 kV) $Z = \frac{(20)^2}{300} = 1.333 \Omega$

Base (230 kV) $Z = \frac{(230)^2}{300} = 176.3 \Omega$

Base (13,8 kV) $Z = \frac{(13.8)^2}{300} = 0.635 \Omega$



RSC

Línea de Transmisión y SEP

56

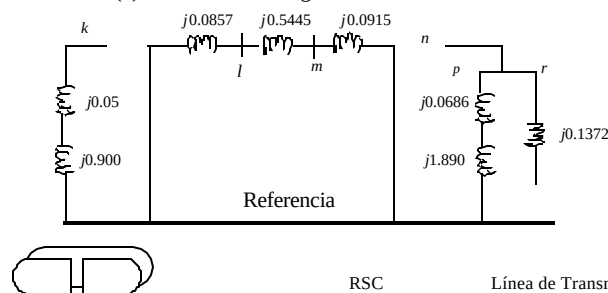
Mallas de Secuencia Cero

$$3Z_n = 3\left(\frac{0.4}{1.333}\right) = 0.900 \quad \%/ \quad \text{Para el generador}$$

$$3Z_n = 3\left(\frac{0.4}{0.635}\right) = 1.890 \quad \%/ \quad \text{Para el motor}$$

$$Z_0 = \frac{1.5 \times 64}{176.3} = 0.5445 \quad \%/ \quad \text{Para la línea de transmisión}$$

La red de sec(0) se muestra en la fig 11.28

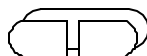


57

Mallas de Secuencia



- Solo la malla de Sec(+) de una máquina eléctrica rotatoria contiene una f.e.m de Sec(+) en serie con una impedancia de Sec(+).
- Las mallas de Sec(-) y Sec(0) no contienen fuentes de f.e.m internas. Pero incluyen las respectivas impedancias series a Sec(-) y Sec(0).



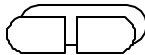
RSC

Línea de Transmisión y SEP

58

Mallas de Secuencia

	Secuencia (+)			Secuencia (-)	Secuencia(0)
	Subtransitoria	Transitoria	Estable		
Máquinas	x_d''	x_d'	x_d	x_2	x_0
Líneas	x_L	x_L	x_L	x_L	x_{L0}
Transformadores	x_{cc}	x_{cc}	x_{cc}	x_{cc}	x_{T0}



RSC

Línea de Transmisión y SEP

59

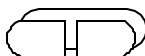
MALLAS DE SECUENCIA

►La barra de referencia de las mallas de sec(+) y de sec(-) es el neutro del generador aunque éste esté conectado a tierra.

►No circula corriente de sec(+) ni de sec(-) por el neutro a tierra.

►Como consecuencia de lo anterior, no se incluye la impedancia $3Z_n$ entre el neutro y tierra en las mallas de sec(+) y sec(-)

►La referencia en la malla de sec(0) es tierra y no necesariamente corresponde al neutro del generador, salvo si su neutro está sólidamente conectado a tierra.



RSC

Línea de Transmisión y SEP

60