

PROTECCIONES – HERRAMIENTAS PARA ANÁLISIS DE PROTECCIONES



PROTECCIONES ELÉCTRICAS - UIS

Jorge Antonio Jaimes Báez - MPE Ingeniero Eléctricista

BIBLIOGRAFÍA

- **Protección de Sistemas Eléctricos de Potencia** – Héctor Jorge Altuve Ferrer- Universidad Autónoma de Nuevo León- México
- **GUÍAS PARA EL BUEN AJUSTE Y LA COORDINACIÓN DE PROTECCIONES DEL STN.** Ingeniería Especializada Blandon – IEB – Julio 2000
- **Curso Protecciones Eléctricas** – Ingeniería Especializada Blandon – 2011
- **Protective relaying – Principles and applications.** J Lewis Blackburn Marcel Dekker, Inc. – 1987
- **IEEE BUFF BOOK - Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Comercial Power Systems** IEEE Industrial and Commercial Power Systems Committee. 1990
- **Protective Relaying – Theory and Aplications.** Walter A. Elmore ABB power T&D Company , Inc.- Relay division – 1994
- **Manual de Protecciones para Sistemas Eléctricos de Potencia.** Orlando Ortiz, César Rozo, Sandra Mendoza, William Chaparro. U. Nacional – ISA -2000
- **Protecciones Eléctricas – Notas de Clase.** Gilberto Carrillo Caicedo. UIS. 2007
- **Subestaciones de Alta y Extra Alta Tensión** – Segunda Edición. H MV - Mejía y Villegas Consultores.

INTRODUCCIÓN

Además de un conocimiento general de los Sistemas Eléctricos de potencia, el ingeniero analista de protecciones debe tener o poseer un buen entendimiento de herramientas tales como fasores, polaridades y componentes simétricas, incluyendo los fasores de corriente y de voltaje durante las condiciones de falla. Éstas herramientas técnicas son usadas para aplicación, análisis, chequeo y pruebas de relés y sistemas de protección.

FASORES

Un **fasor** es un número complejo usado para representar cantidades eléctricas. Un fasor rota con el paso del tiempo y representa una cantidad senoidal (tiene vida, gira. Un vector es estático en el espacio).

Los fasores deben ser referidos siempre a un mismo eje de referencia. El eje X para las cantidades reales y el eje Y para las cantidades imaginarias.

La convención para la rotación positiva es en sentido contrario a las agujas del reloj.

Rotación de fases Vs Rotación fasorial

Rotación de fases o secuencia de fases, es el orden en el cual los fasores de fase sucesivamente alcanzan su valor positivo máximo.

Rotación fasorial es por convención internacional, en dirección contraria a las agujas del reloj.

Todos los diagramas de protección estándar, son para rotación de fase a, b, c.

VALORES EN POR UNIDAD

El valor en por unidad de una cantidad cualquiera es la razón de un valor en unidades reales y el valor base tomado para el caso.

$$\text{Cantidad en Por Unidad} = \frac{\text{Cantidad Real}}{\text{Valor Base de la Cantidad}}$$

en donde la “cantidad real” se refiere al valor en Voltios, Amperios, Ohmios, etc.

VALORES EN POR UNIDAD

Ventajas de trabajar en por unidad:

- Se “pierden” los niveles de tensión en un sistema de potencia
- Se elimina la relación de transformación en los cálculos con los transformadores de potencia
- En por unidad se tipifican ciertos parámetros eléctricos de los equipos (impedancias, por ejemplo) de tal forma que no son tan indispensables los datos de placa de los elementos para realizar ciertos análisis aproximados

CIRCUITOS TRIFÁSICOS

Los circuitos trifásicos cuentan con varias características:

- Un sistema trifásico es un sistema de generación, distribución y uso de energía conformado por tres fuentes de corriente alterna monofásicas la misma frecuencia.
- Las redes se optimizan respecto a los circuitos monofásicos, se requiere menos cantidad de conductor para transferir una misma cantidad de potencia. Se requiere menos conductor y menos núcleo para transformar la misma potencia.
- Los motores trifásicos arrancan directamente, mientras que los monofásicos necesitan devanado de arranque.
- Para generar corriente continua, es mejor la rectificación trifásica que la monofásica.

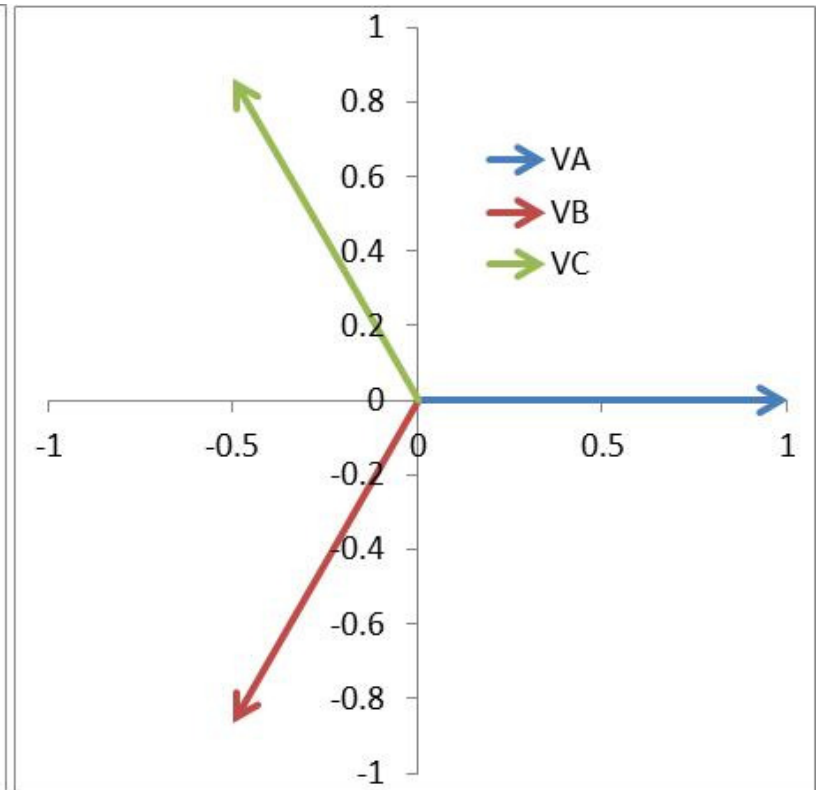
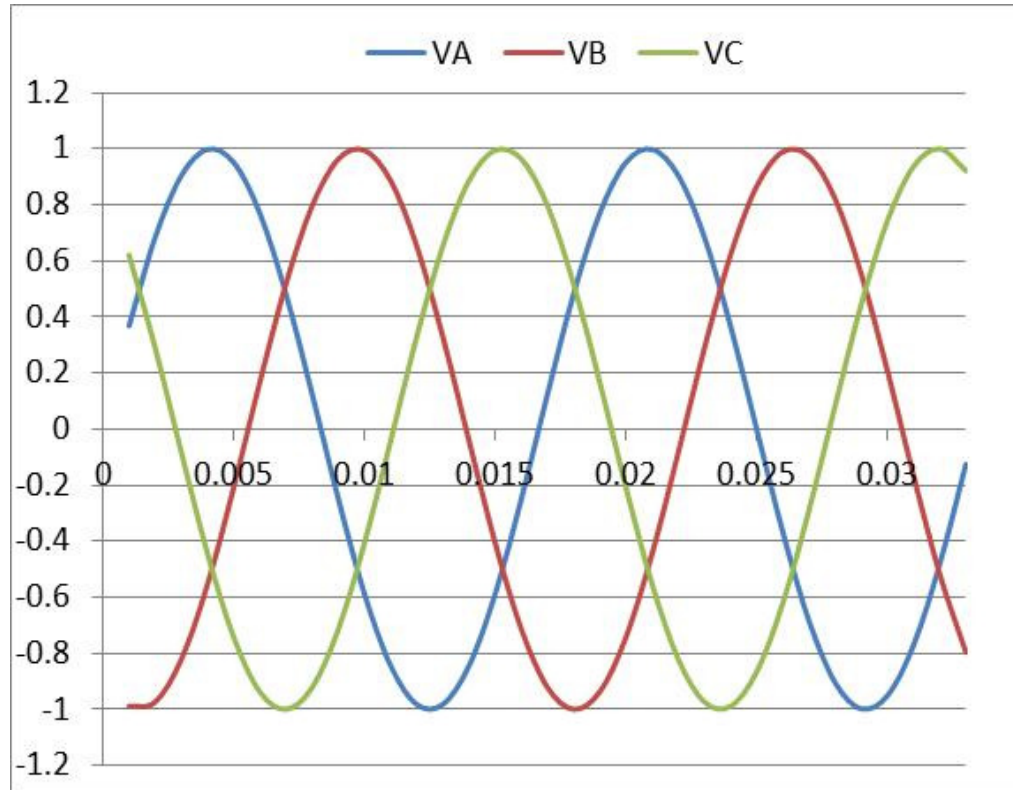
NOMENCLATURA EN CIRCUITOS TRIFÁSICOS

Existen diferentes notaciones para los sistemas trifásicos:

- De acuerdo con el RETIE la designación de las fases es la misma de la norma IEC, L1, L2, L3
- Las normas ANSI utilizan la designación A, B, C

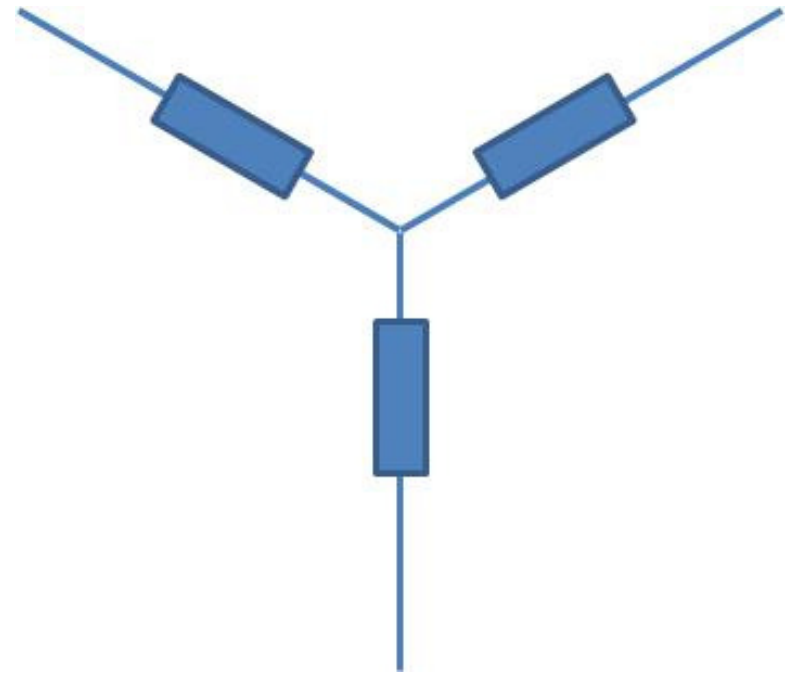
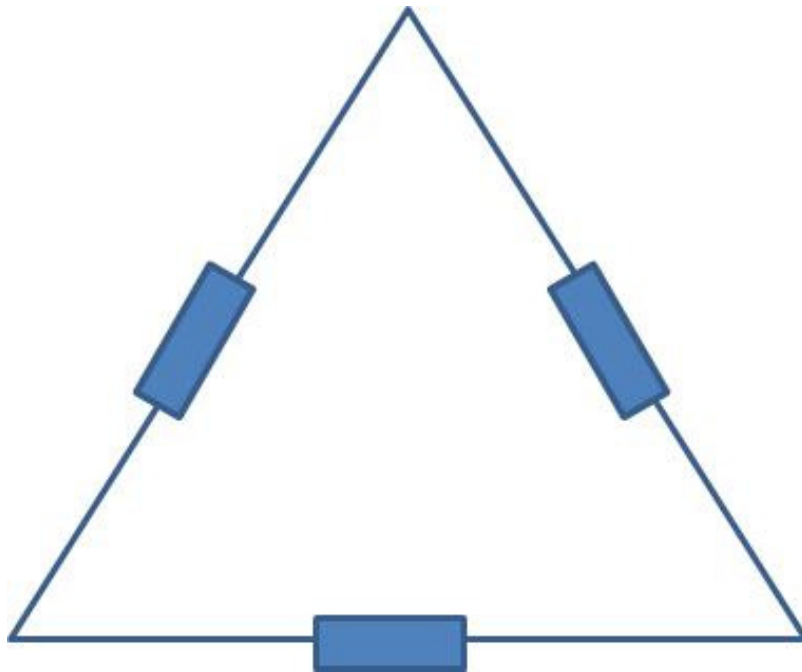
HERRAMIENTAS ANÁLISIS PROTECCIONES

FORMAS DE ONDA Y FASORES



HERRAMIENTAS ANÁLISIS PROTECCIONES

CONEXIÓN EN DELTA Y ESTRELLA



CONEXIÓN EN DELTA Y ESTRELLA

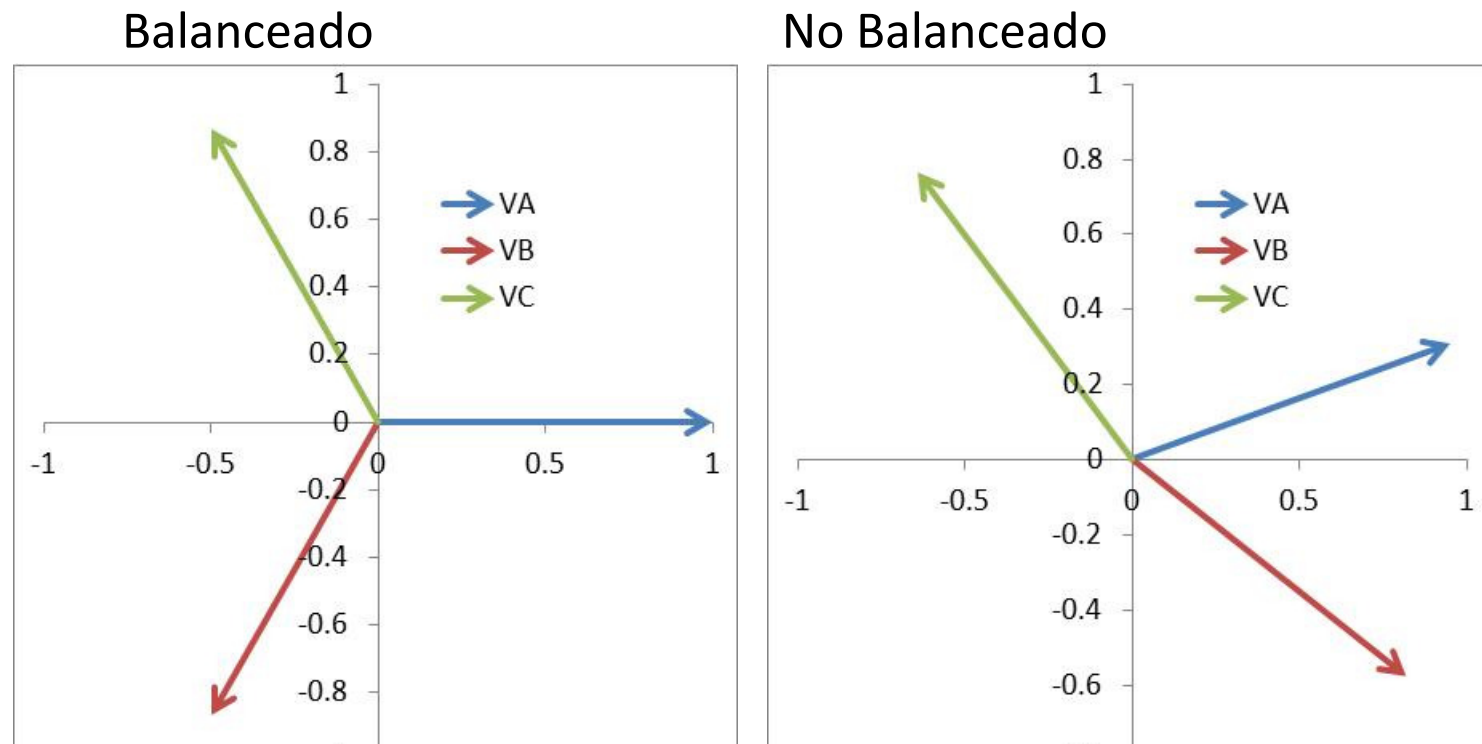
- Los generadores normalmente tienen conexión en estrella
- Los devanados de transformadores y las cargas pueden tener conexiones en estrella o en delta
- El punto neutro de la estrella puede conectarse o no a tierra

HERRAMIENTAS ANÁLISIS PROTECCIONES

CIRCUITOS TRIFÁSICOS BALANCEADOS

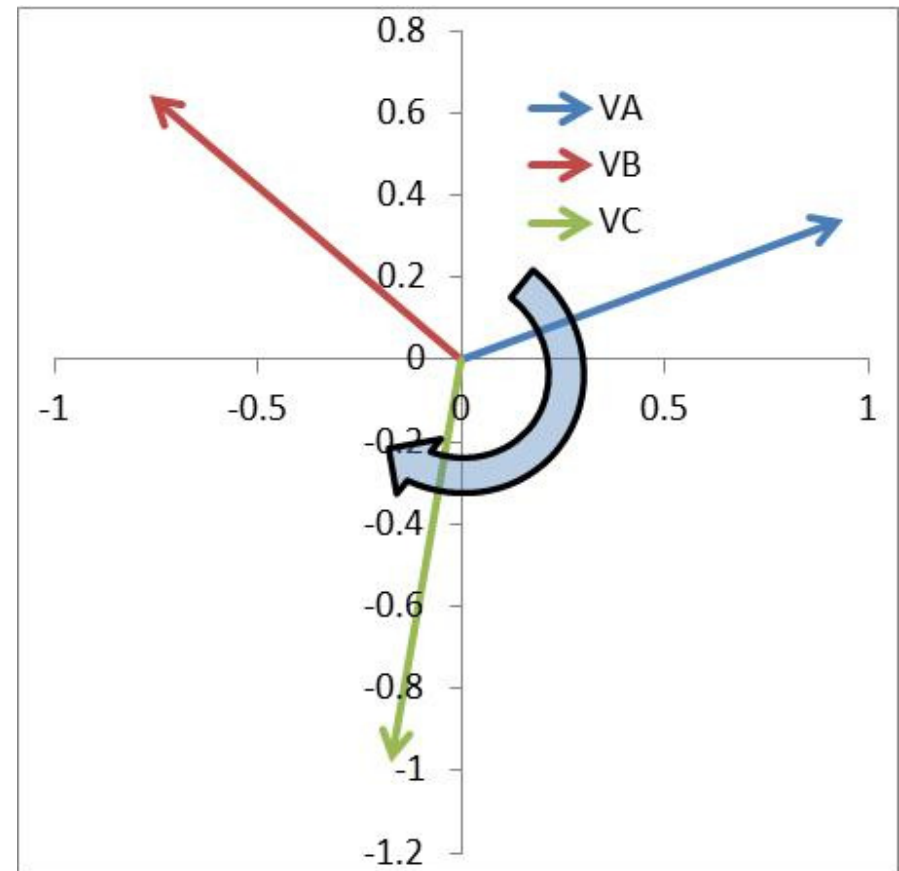
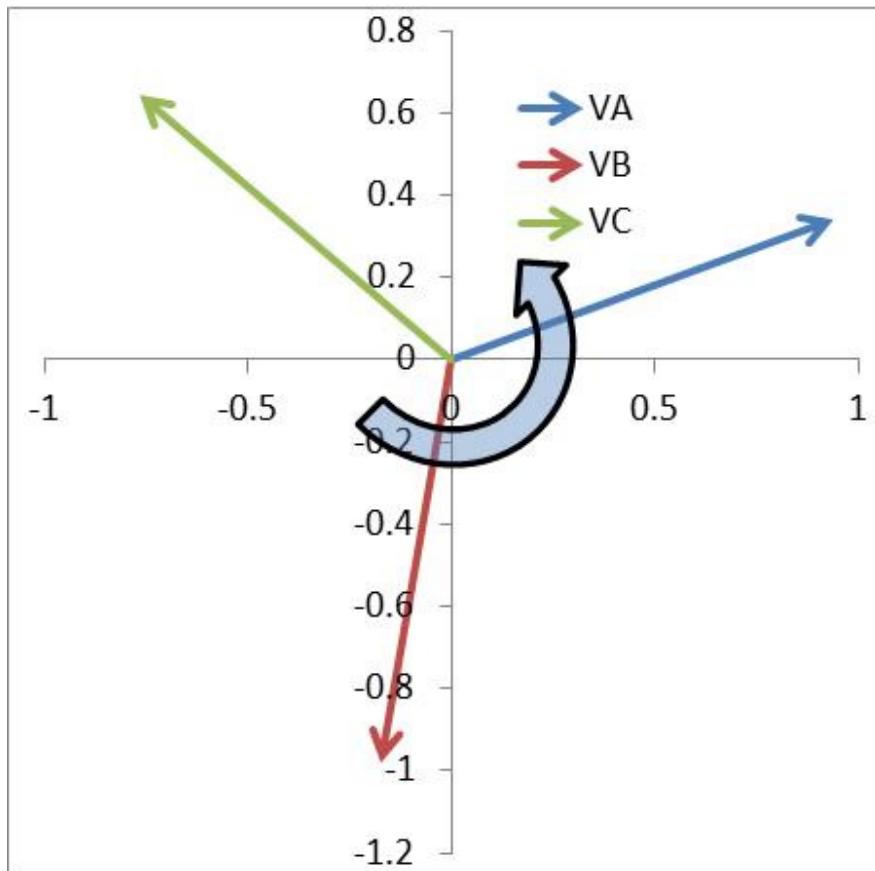
Un circuito trifásico está balanceado cuando se cumplen las siguientes condiciones:

- Las magnitudes de las tres fases son iguales
- Los ángulos de desfase entre fases son de 120°



HERRAMIENTAS ANÁLISIS PROTECCIONES

SECUENCIA DE GIRO



SECUENCIA DE GIRO

- La secuencia positiva
- La secuencia negativa
- La secuencia cero
- Los sistemas trifásicos de potencia están concebidos en general para trabajar como sistemas trifásicos balanceados de secuencia positiva, sin embargo, debido a que los sistemas no son ideales, aparecen componentes de secuencia positiva y de secuencia cero

SECUENCIA NEGATIVA

Originada por:

- Impedancias de las líneas de transmisión y redes de distribución.
- Cargas trifásicas no balanceadas, cargas bifásicas y cargas monofásicas.
- Fases abiertas
- Temporalmente se origina durante fallas monofásicas y bifásicas

Consecuencias:

- Pérdidas adicionales en motores
- Calentamiento adicional en los generadores

SECUENCIA CERO

- Originada por:
- Cargas monofásicas en sistemas de distribución
- Temporalmente se origina durante fallas a tierra

Consecuencias:

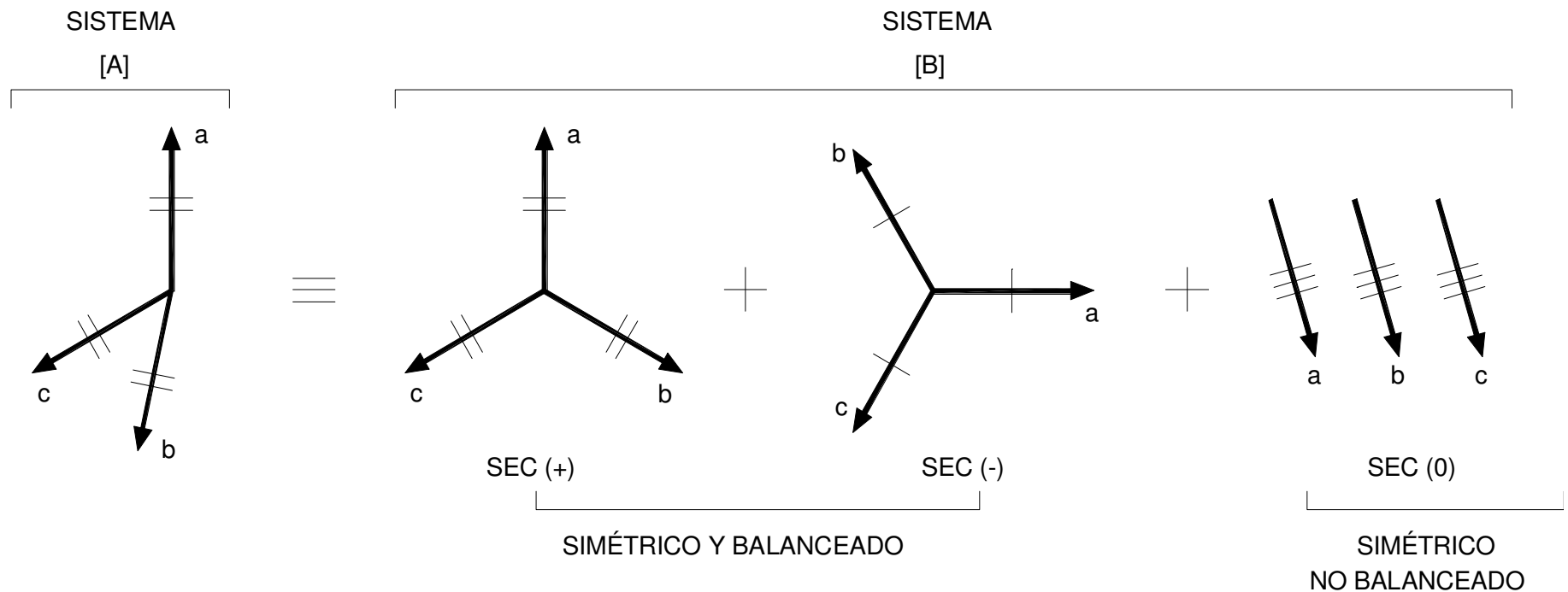
- Corrientes por los cables de neutro
- Las tensiones de secuencia cero originan flujos residuales en los transformadores que pueden circular por el aire si el transformador es de tres columnas.
- Aumento de tensión del sistema de puesta a tierra
- Durante las fallas a tierra se origina GPR (Ground Potential Rise)

COMPONENTES SIMÉTRICAS

- Este método fue presentado en 1918 por Charles LeGeyt Fortescue. Se utiliza para simplificar el análisis de los sistemas eléctricos trifásicos desbalanceados.
- Las componentes simétricas permiten escribir de forma general un sistema polifásico desbalanceado (con n fases) como la suma de n sistemas equilibrados aplicando el principio de superposición.

HERRAMIENTAS ANÁLISIS PROTECCIONES

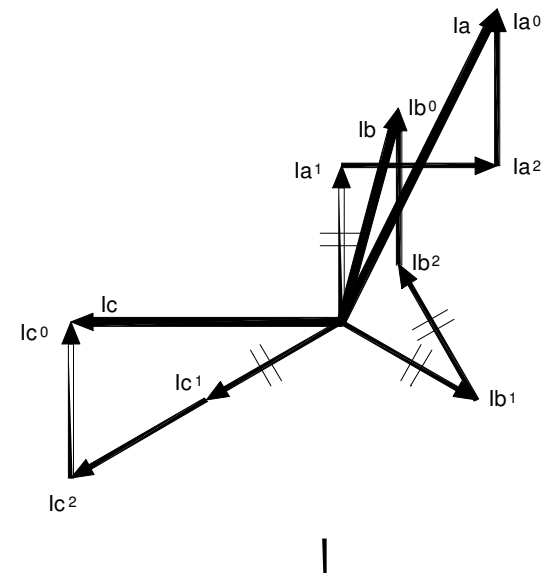
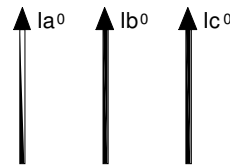
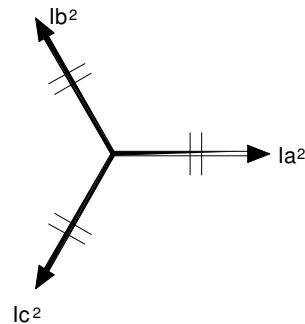
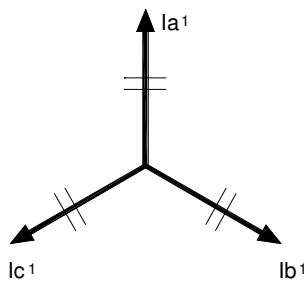
COMPONENTES SIMÉTRICAS



HERRAMIENTAS ANÁLISIS PROTECCIONES

COMPONENTES SIMÉTRICAS

- La relación es biunívoca, es decir, que sólo hay una forma de pasar del Sistema A al Sistema B y viceversa.



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

$$I_b = I_{b0} + I_{b1} + I_{b2}$$

$$I_c = I_{c0} + I_{c1} + I_{c2}$$

COMPONENTES SIMÉTRICAS

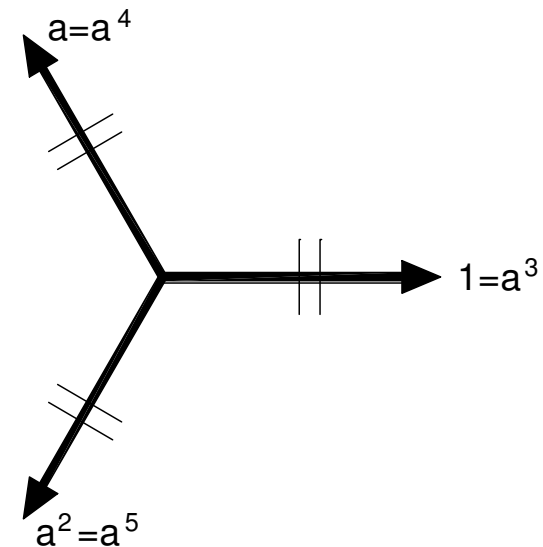
- Representación de la relación ortonormal

Operador a :

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

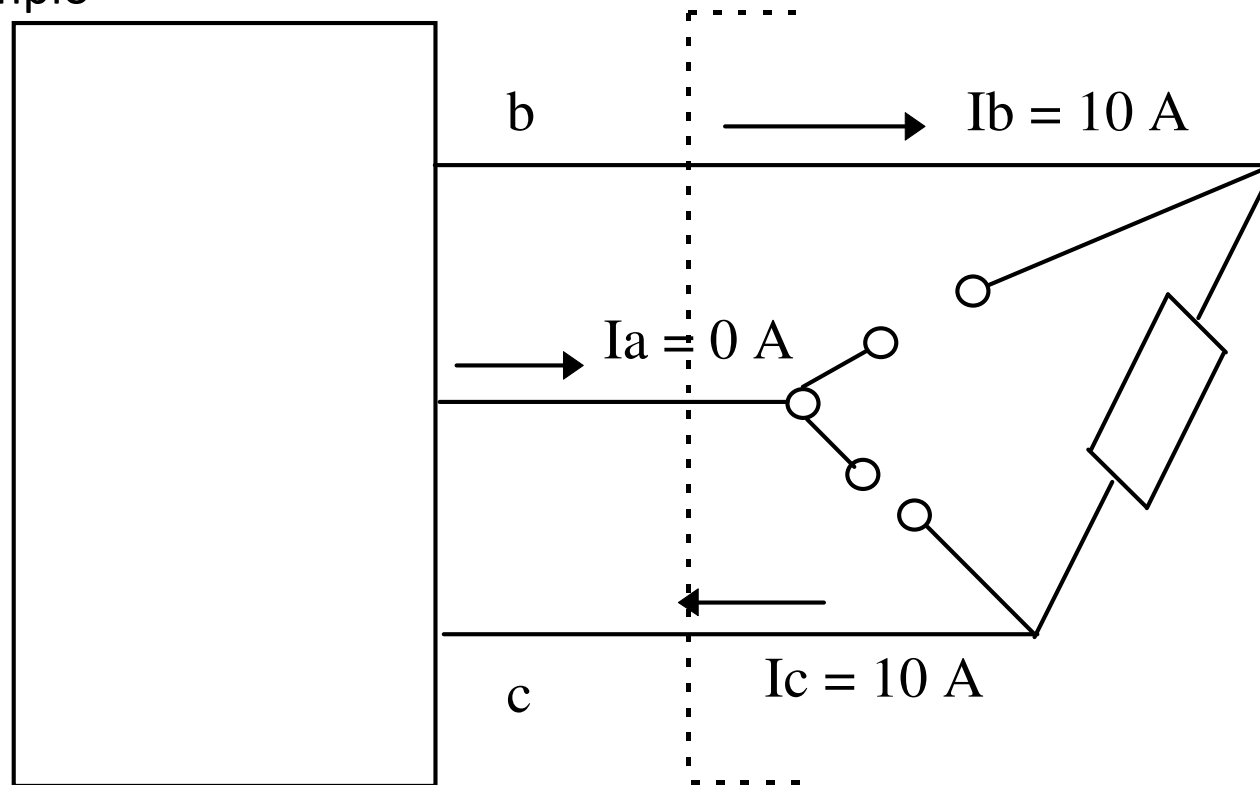
$$I_b = I_{a0} + a^2 I_{a1} + a I_{a2}$$

$$I_c = I_{a0} + a I_{a1} + a^2 I_{a2}$$



COMPONENTES SIMÉTRICAS

- Ejemplo



La fase “rara”
siempre es la fase “a”

COMPONENTES SIMÉTRICAS

- En general

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

$\begin{bmatrix} \mathbf{A} \end{bmatrix}$

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

$\begin{bmatrix} \mathbf{A} \end{bmatrix}^{-1}$

HERRAMIENTAS ANÁLISIS PROTECCIONES

Para el ejemplo:

COMPONENTES SIMÉTRICAS

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 10 \\ -10 \end{bmatrix}$$

$10 \angle 180^\circ \leftarrow$

$$I_{a0} = \frac{1}{3}(10 - 10) = 0 \quad \text{No involucra tierra}$$

$$I_{a1} = \frac{1}{3}(10a - 10a^2) = \frac{10}{3}(a - a^2) = \frac{10}{\sqrt{3}} \angle 90^\circ$$

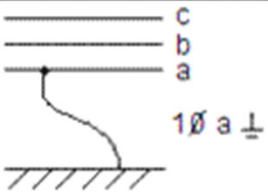
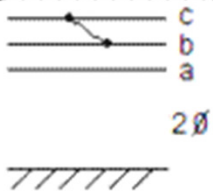
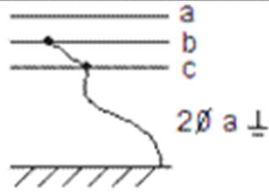
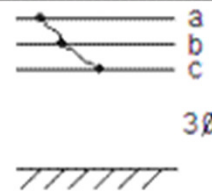
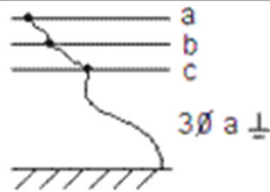
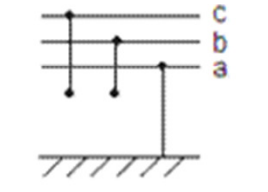
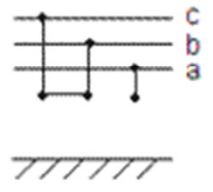
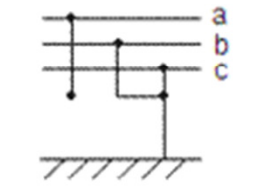
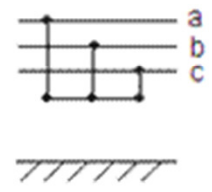
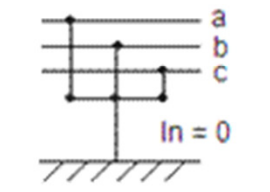
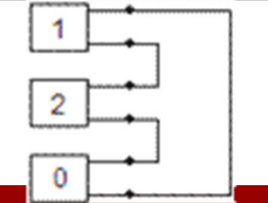
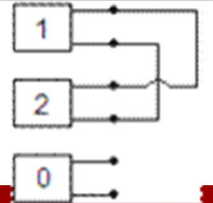
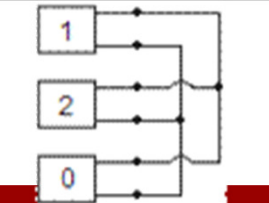
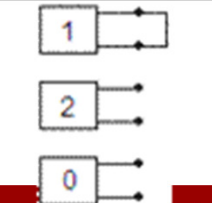
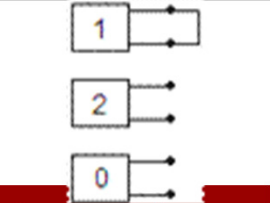
$$I_{a2} = \frac{1}{3}(10a^2 - 10a) = \frac{10}{3}(a^2 - a)$$

$$I_{a1} = -I_{a2} = \frac{10}{\sqrt{3}} \angle 90^\circ$$

$$I_a = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = 0 + \frac{10}{\sqrt{3}} \angle 90^\circ + \frac{10}{\sqrt{3}} \angle -90^\circ = 0$$

HERRAMIENTAS ANÁLISIS PROTECCIONES

Cortocircuito – Definición - Clasificación

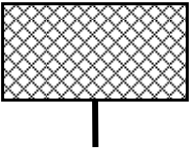
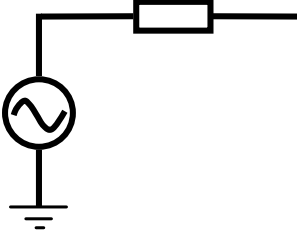
Fallas Simétricas y Asimétricas en Sistemas de Potencia					
Tipo de falla					
Fallas	Asimétricas			Simétricas	
Frecuencia de aparición	0,7	0,15	0,08	0,05	0,02
Gravedad en P _{ij}	30%	45%	75%	100%	100%
Gravedad en I I _{falla}	120%	60%	70%	100%	100%
Modelo de la falla - Conexión					
Diagramas de conexión de secuencias (1, 2, 0)					

CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO

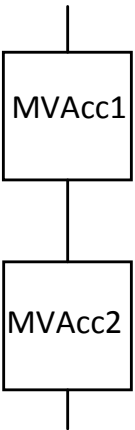
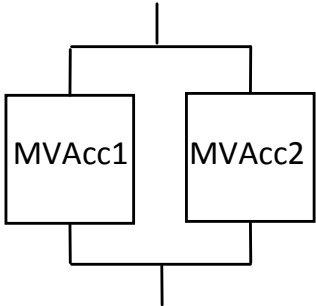
- Este cortocircuito es el que se calcula más fácilmente debido a que es completamente simétrico, es decir, que en las tres fases del sistema de potencia ocurre exactamente lo mismo y por consiguiente es suficiente calcular el cortocircuito solo en una fase. Para el cálculo de este cortocircuito se puede utilizar el concepto de los Megavoltamperios de cortocircuito teniendo en cuenta que éstos son proporcionales a la admitancia, por lo tanto, cuando los circuitos están en paralelo, éstos se suma, y cuando los circuitos están en serie, el resultado es el producto sobre la suma.

HERRAMIENTAS ANÁLISIS PROTECCIONES

CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO

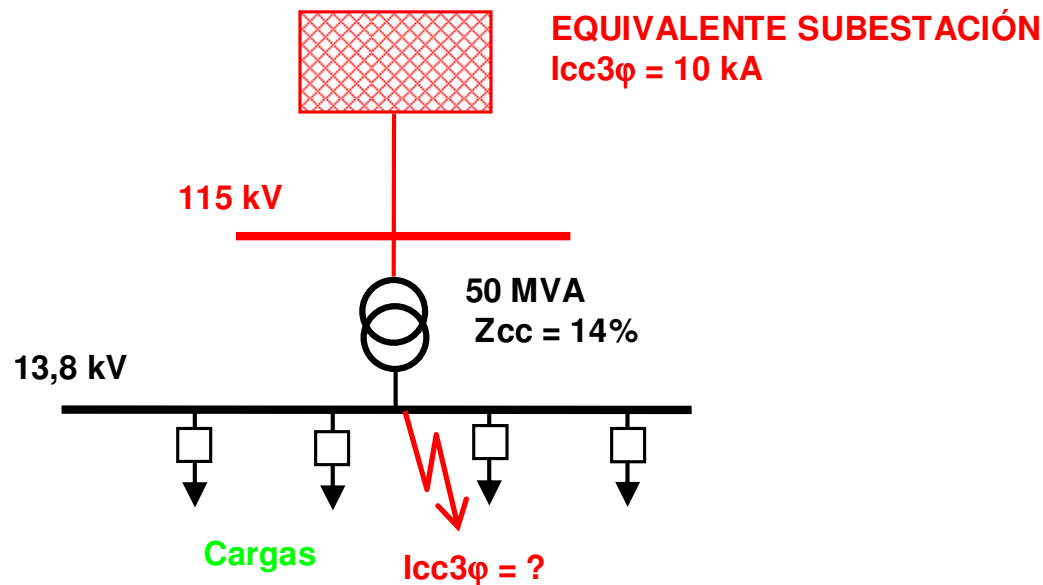
Símbolo	Descripción	Equivalente eléctrico	MVAcc equivalentes
	Equivalente de cortocircuito		$MVAcc3\varphi_{sistema} = \sqrt{3} \times V \times Icc3\varphi_{sistema}$
	Transformador de potencia		$MVAcc3\varphi_{trafo} = \frac{S_{trafo}}{Z1cc}$
	Circuito de distribución, línea de transmisión		$MVAcc3\varphi_{circuito} = \frac{V^2}{Z1}$

CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO

	Conexión serie $MV_{Acc} = \frac{MV_{Acc1} \times MV_{Acc2}}{MV_{Acc1} + MV_{Acc2}}$
	Conexión paralelo $MV_{Acc} = MV_{Acc1} + MV_{Acc2}$

HERRAMIENTAS ANÁLISIS PROTECCIONES

CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO



$$MVAcc3\phi_{sistema} = \sqrt{3} \times V \times I_{cc3\phi_{sistema}} = \sqrt{3} \times 115 \times 10 = 1991,9 \text{ MVA}$$

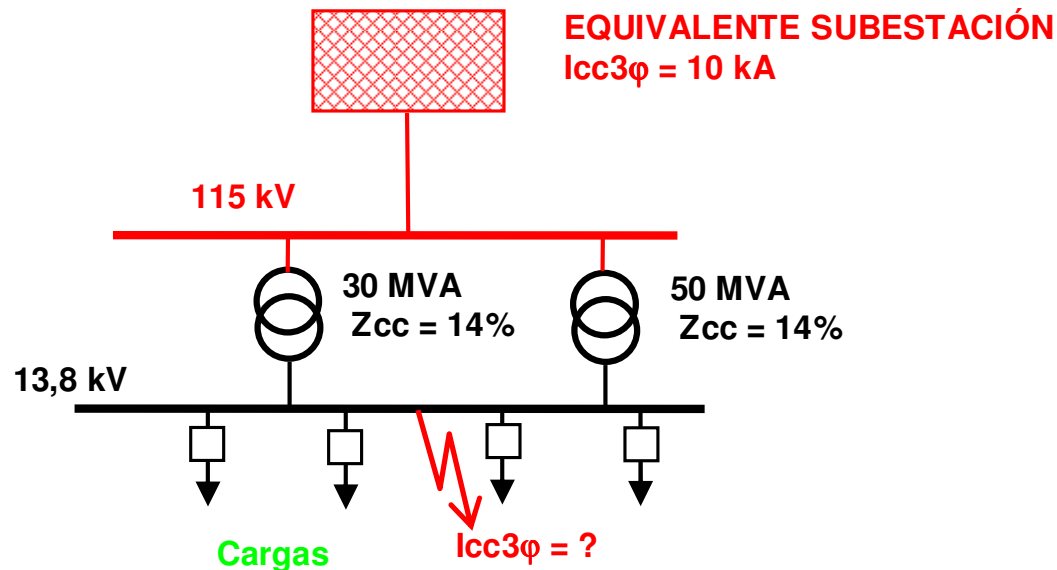
$$MVAcc3\phi_{trafo} = \frac{S_{trafo}}{Z_{1cc}} = \frac{50}{0,14} = 357,1 \text{ MVA}$$

$$MVAcc3\phi_{barra13,8} = \frac{MVAcc3\phi_{trafo} \times MVAcc3\phi_{sistema}}{MVAcc3\phi_{trafo} + MVAcc3\phi_{sistema}} = \frac{357,1 \times 1991,9}{357,1 + 1991,9} = 302,81 \text{ MVA}$$

$$I_{cc3\phi_{barra13,8}} = \frac{MVAcc3\phi_{barra13,8}}{\sqrt{3} \times V} = \frac{302,81}{\sqrt{3} \times 13,8} = 12,67 \text{ kA}$$

HERRAMIENTAS ANÁLISIS PROTECCIONES

CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO



$$MVAcc3\phi_{sistema} = \sqrt{3} \times V \times I_{cc3\phi_{sistema}} = \sqrt{3} \times 115 \times 10 = 1991,9 \text{ MVA}$$

$$MVAcc3\phi_{trafo1} = \frac{S_{trafo1}}{Z_{1cc}} = \frac{30}{0,14} = 214,3 \text{ MVA} \quad MVAcc3\phi_{trafo2} = \frac{S_{trafo2}}{Z_{1cc}} = \frac{50}{0,14} = 357,1 \text{ MVA}$$

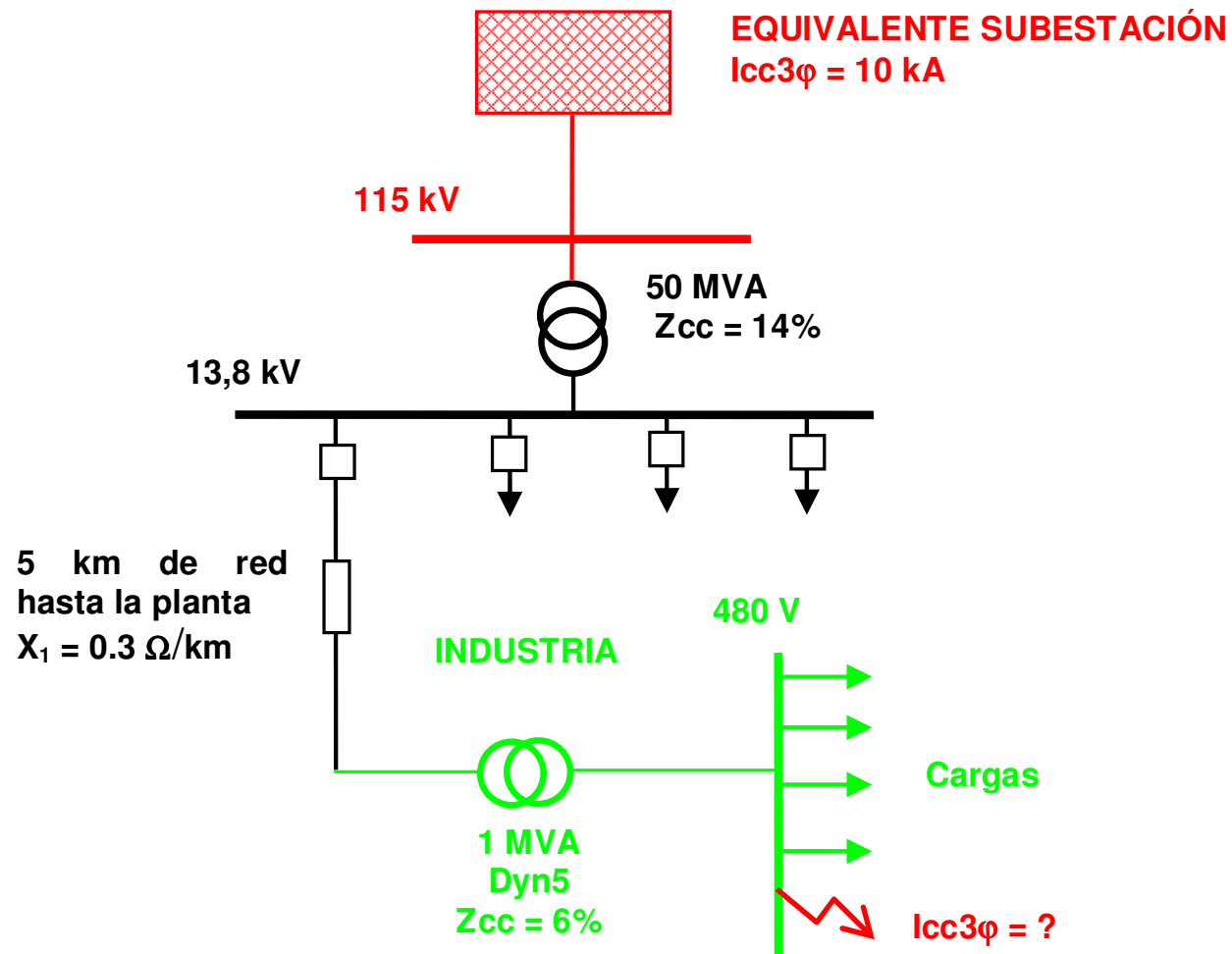
$$MVAcc3\phi_{trafos} = MVAcc3\phi_{trafo1} + MVAcc3\phi_{trafo2} = 357,1 + 214,3 \text{ MVA} = 571,4 \text{ MVA}$$

$$MVAcc3\phi_{barra13,8} = \frac{MVAcc3\phi_{trafos} \times MVAcc3\phi_{sistema}}{MVAcc3\phi_{trafos} + MVAcc3\phi_{sistema}} = \frac{571,4 \times 1991,9}{571,4 + 1991,9} = 440 \text{ MVA}$$

$$I_{cc3\phi_{barra13,8}} = \frac{MVAcc3\phi_{barra13,8}}{\sqrt{3} \times V} = \frac{440}{\sqrt{3} \times 13,8} = 18,58 \text{ kA}$$

HERRAMIENTAS ANÁLISIS PROTECCIONES

CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO



3. Cortocircuito Monofásico

Redes de secuencia

- Las redes de secuencia son la representación de una de las tres fases (fase a tierra o neutro) de un sistema trifásico balanceado y muestran como fluirían las corrientes de secuencia en el SEP en caso de existir. Estas redes se construyen a partir del “punto de falla”, por la interconexión de las impedancias de secuencia de las componentes del SEP.

3. Cortocircuito Monofásico

Redes de secuencia

- En el análisis de SEP's se asume que en condiciones normales de operación éste es perfectamente balanceado (simétrico) y el desbalance (asimetría) ocurre únicamente en el punto de falla.
- En la realidad ésta consideración no se cumple en forma estricta. Sin embargo, el error de mantener esta consideración es despreciable en la mayoría de las veces.

3. Cortocircuito Monofásico

Redes de secuencia

- En análisis de SEP's el “punto de falla” se considera como el punto del SEP, donde ocurre el desbalance (ocurre algún corto circuito, apertura de alguna fase o un desbalance en la carga).
- Los voltajes representados en las redes de secuencia son de línea a neutro.

3. Cortocircuito Monofásico

Redes de secuencia

- De las redes de secuencia, la única red activa (con fuentes de voltaje) es la red de secuencia positiva.
- El voltaje de la fase “a” se toma como referencia, y los voltajes de las fases restantes se expresan con referencia a la fase “a”.

3. Cortocircuito Monofásico

3.1 Representación de los equipos en redes de secuencia

- Los estudios típicos de fallas en los SEP's consideran únicamente un instante de tiempo después de ocurrir la falla o el desbalance en el SEP.
- El modelo matemático del SEP para estudios de fallas es descrito adecuadamente por conjuntos de ecuaciones puramente algebraicas
- El modelo matemático del SEP describe la interacción de las redes de secuencia positiva, negativa y cero interconectadas en el **“punto de falla”**.

3. Cortocircuito Monofásico

3.1 Representación de los equipos en redes de secuencia

□ Impedancias de Secuencia de las componentes del SEP.

- Una característica de las impedancias de secuencia positiva y negativa de elementos estáticos, lineales y simétricos son idénticas.
- La impedancia de este tipo de elementos es independiente de la secuencia de fases siempre que los voltajes que se les apliquen sean balanceados.
- Las impedancias de secuencia positiva, negativa y cero de las componentes del SEP se obtienen aplicando la transformación de componentes simétricas a su modelo matemático en el marco de referencia de fase.

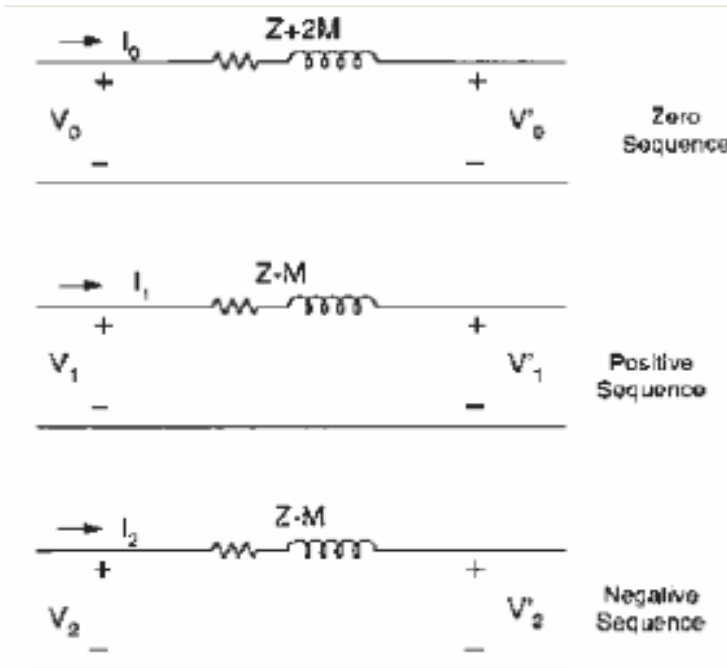
HERRAMIENTAS ANÁLISIS PROTECCIONES

3. Cortocircuito Monofásico

3.1 Representación de los equipos en redes de secuencia

□ Líneas de Transmisión.

- Los circuitos equivalentes de las impedancias de secuencia de una línea trifásica balanceada simétrica son:

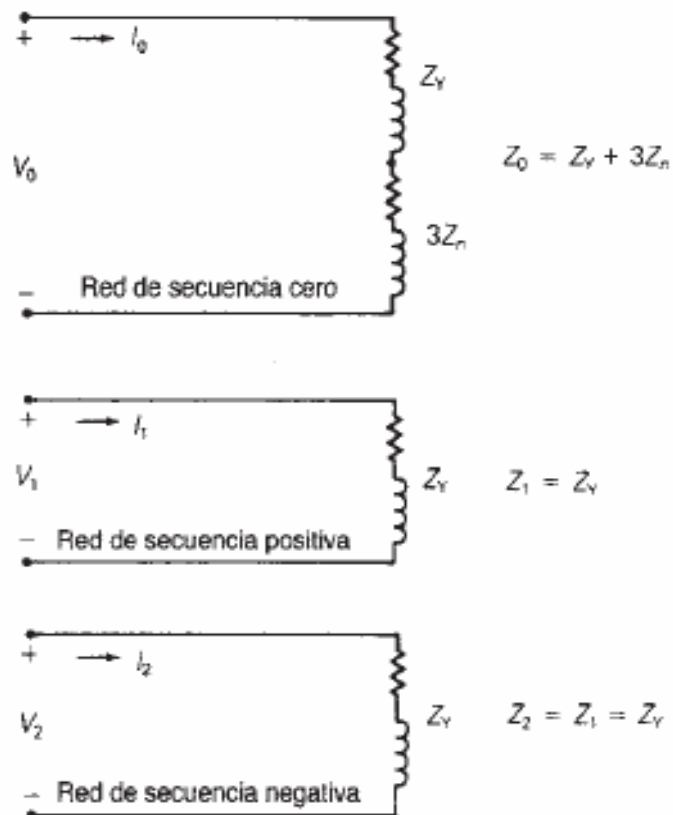


HERRAMIENTAS ANÁLISIS PROTECCIONES

3. Cortocircuito Monofásico

3.1 Representación de los equipos en redes de secuencia

❑ Cargas conectadas en estrella aterrizada.

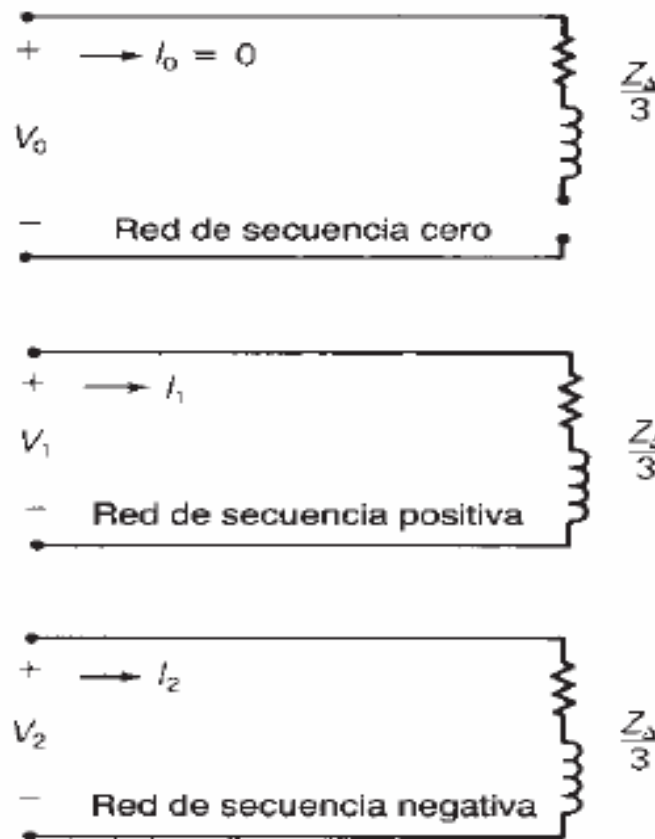


HERRAMIENTAS ANÁLISIS PROTECCIONES

3. Cortocircuito Monofásico

3.1 Representación de los equipos en redes de secuencia

- ❑ Cargas conectadas en estrella sin conexión a tierra o en delta.



HERRAMIENTAS ANÁLISIS PROTECCIONES

3. Cortocircuito Monofásico

3.1 Representación de los equipos en redes de secuencia

□ Transformador trifásico bidevanado con varias conexiones en devanados

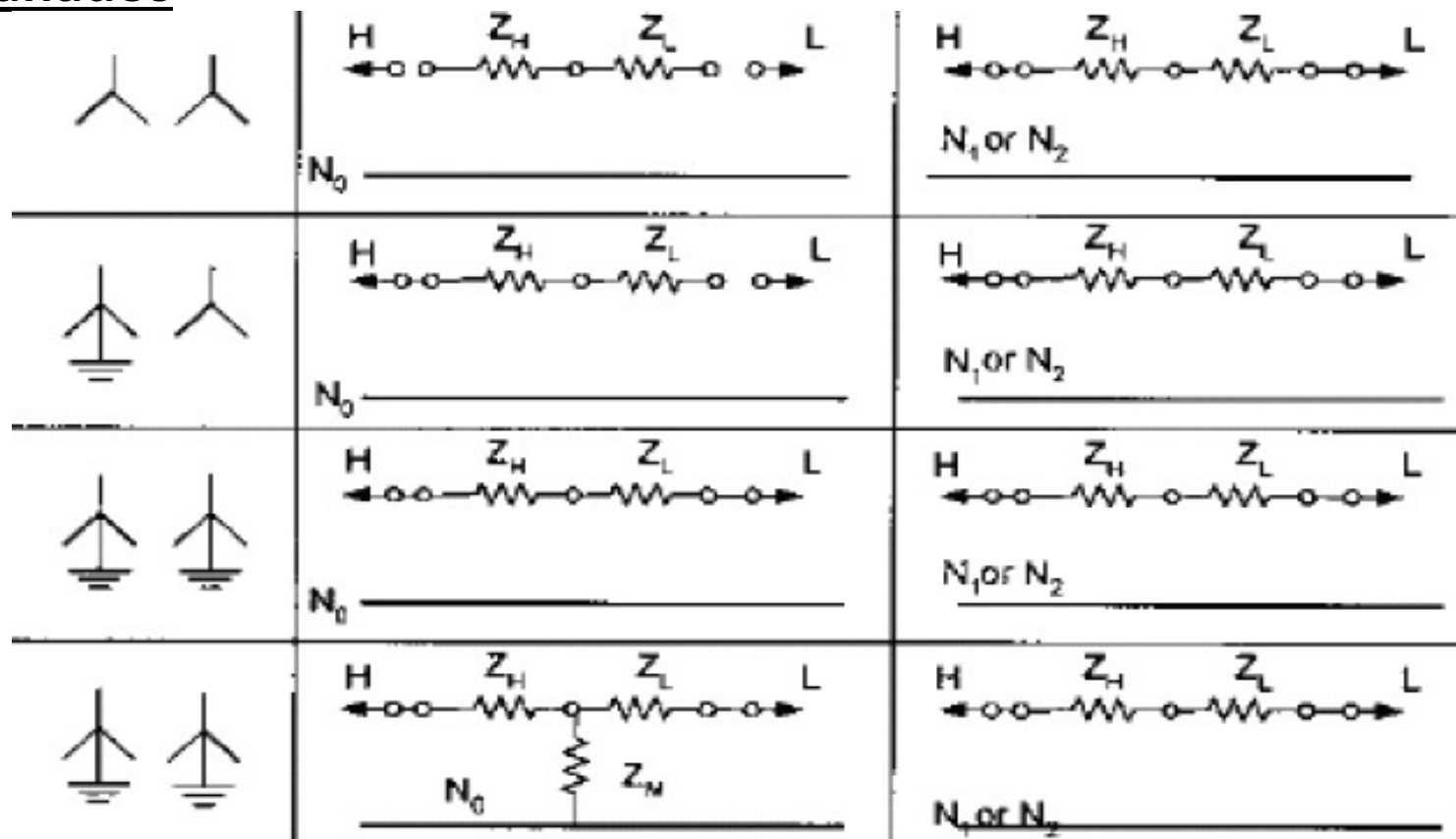
Winding Connections	Zero Sequence Circuit	Positive or Negative Sequence Circuit

HERRAMIENTAS ANÁLISIS PROTECCIONES

3. Cortocircuito Monofásico

3.1 Representación de los equipos en redes de secuencia

□ Transformador trifásico bidevanado con varias conexiones en devanados

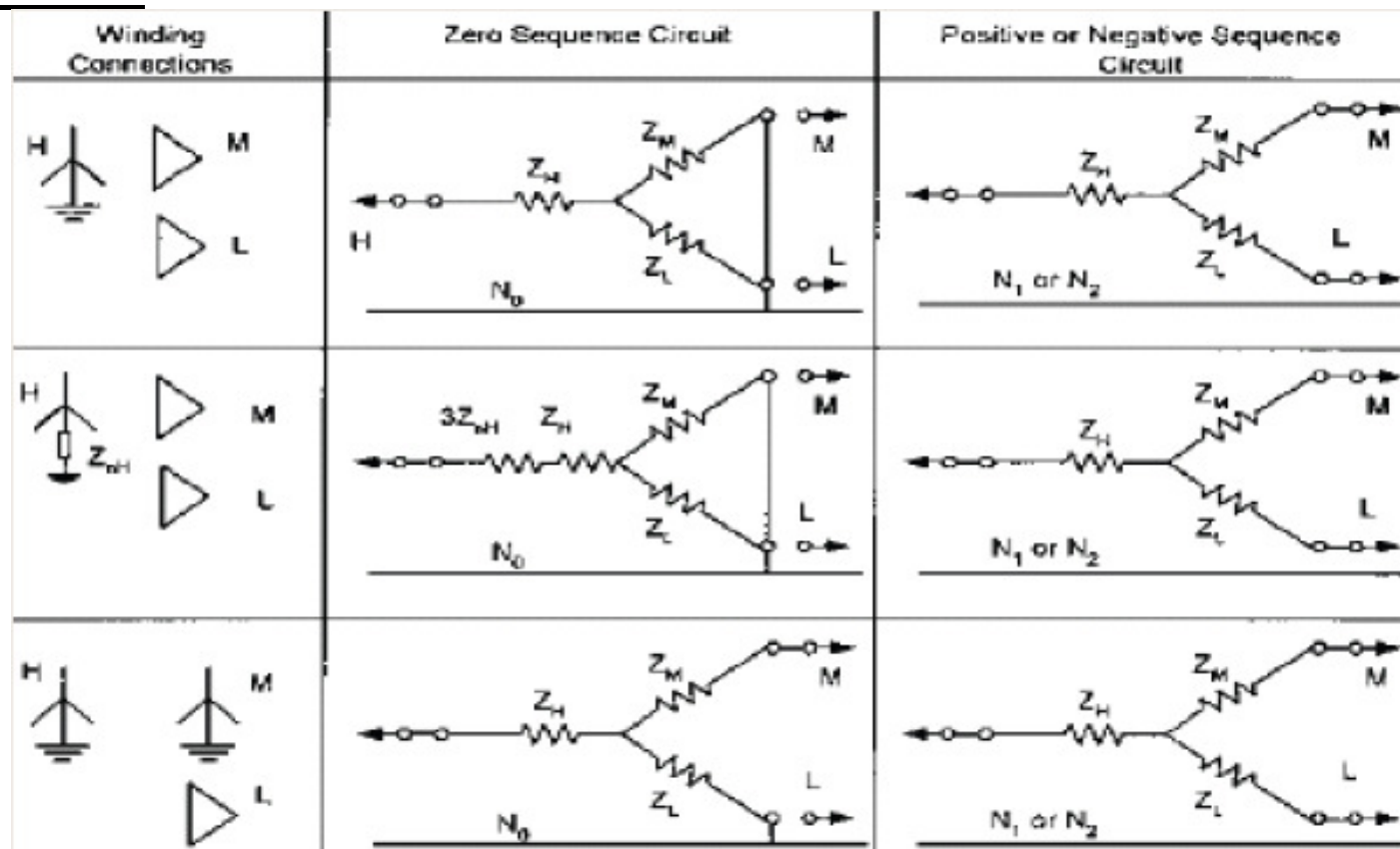


HERRAMIENTAS ANÁLISIS PROTECCIONES

3. Cortocircuito Monofásico

3.1 Representación de los equipos en redes de secuencia

□ Transformador trifásico tridevanado con varias conexiones en devanados

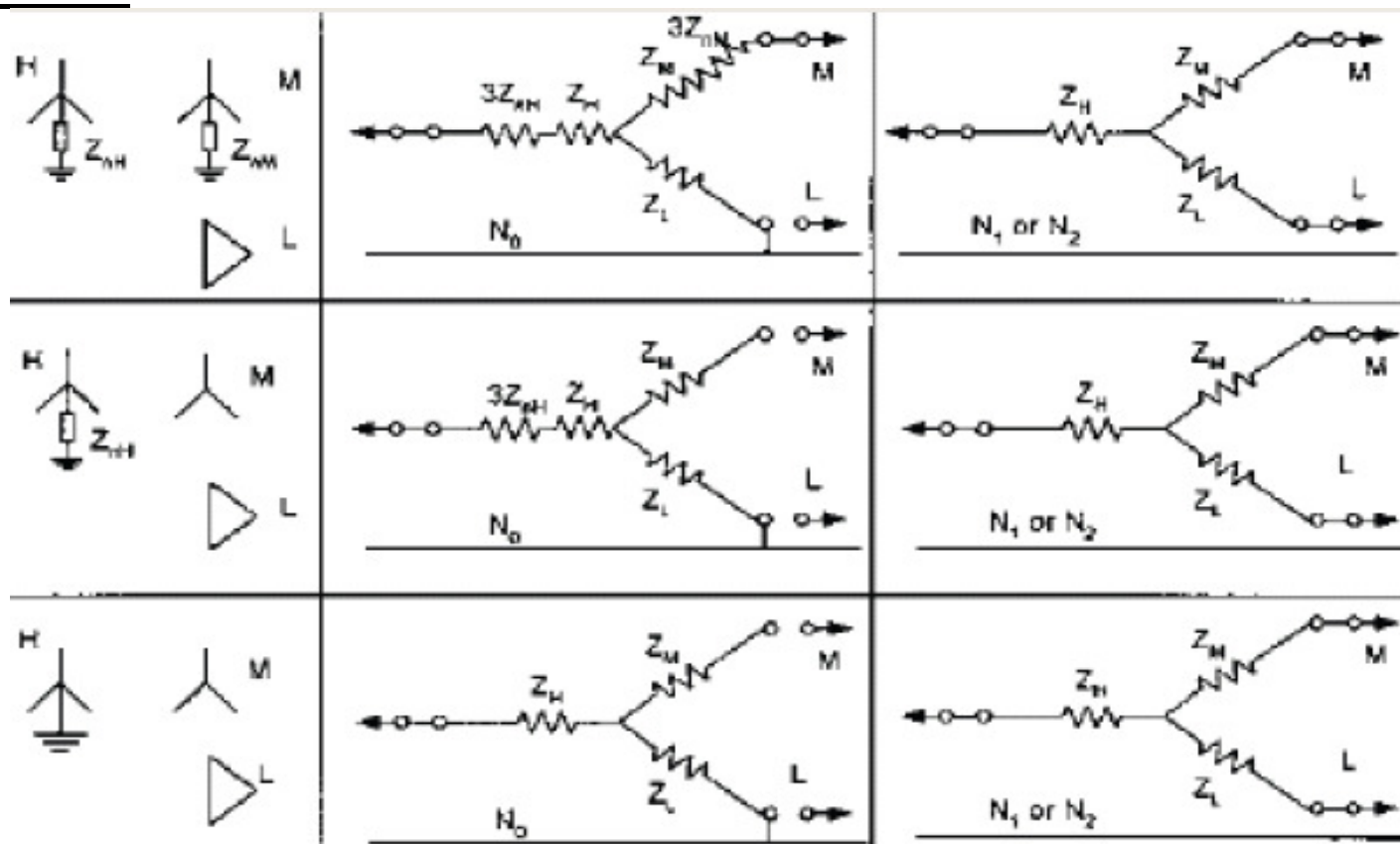


HERRAMIENTAS ANÁLISIS PROTECCIONES

3. Cortocircuito Monofásico

3.1 Representación de los equipos en redes de secuencia

□ Transformador trifásico tridevanado con varias conexiones en devanados

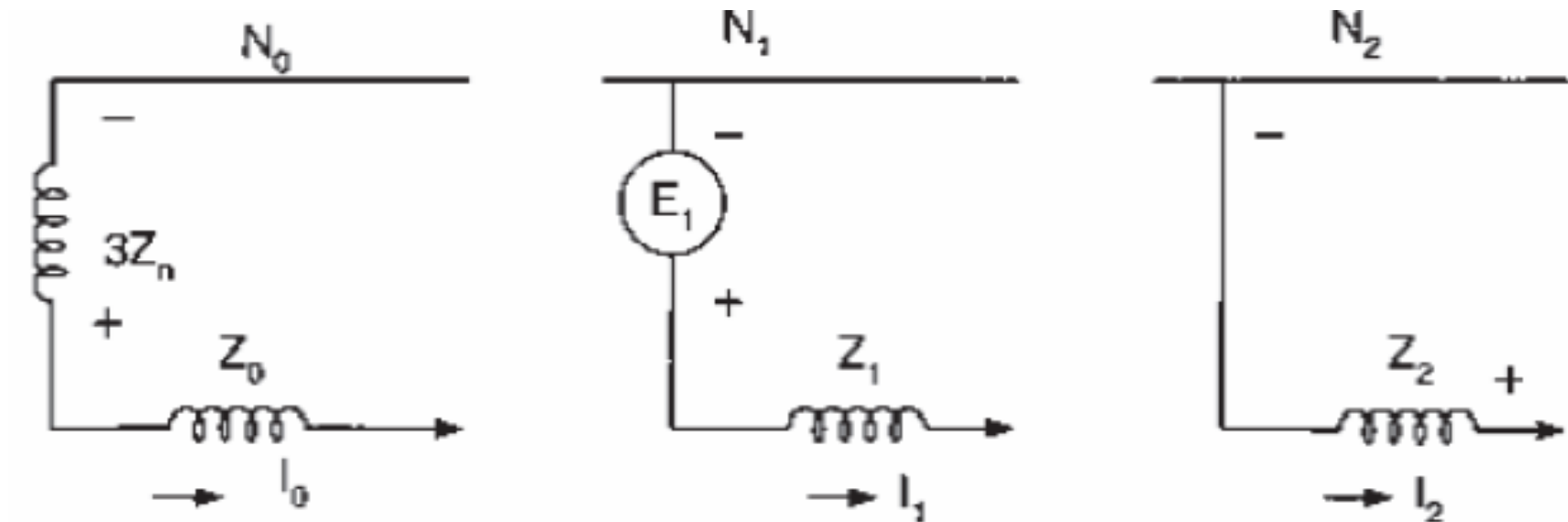


HERRAMIENTAS ANÁLISIS PROTECCIONES

3. Cortocircuito Monofásico

3.1 Representación de los equipos en redes de secuencia

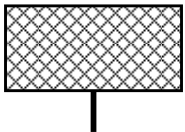
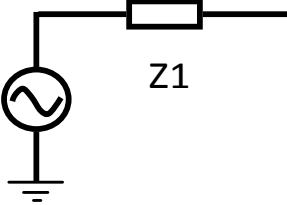
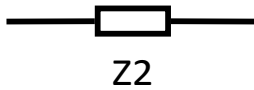
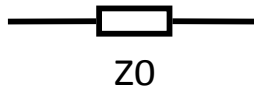
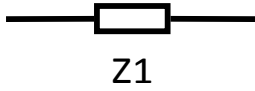
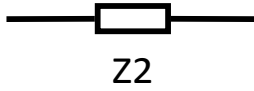
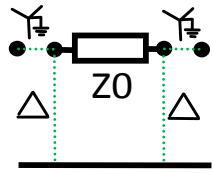
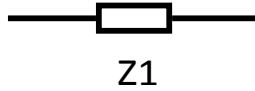
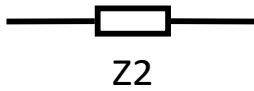
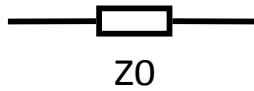
□ Generador Síncrono:



HERRAMIENTAS ANÁLISIS PROTECCIONES

3. Cortocircuito Monofásico

3.1 Representación de los equipos en redes de secuencia

Símbolo	Descripción	Secuencia (+)	Secuencia (-)	Secuencia (0)
	Equivalente de cortocircuito			
	Transformador de potencia			
	Circuito de distribución, línea de transmisión			

3. Cortocircuito Monofásico

3.2 Análisis de fallas – Redes de Secuencia

- La ocurrencia de fallas o corto circuitos en SEP's es un fenómeno de naturaleza aleatoria.
- Una falla es en realidad una conexión no planeada que modifica drásticamente la condición de operación de un SEP.
- El impacto de la falla en la operación del SEP en el tiempo, siendo en los primeros ciclos después de su ocurrencia donde se presentan los valores mayores de corrientes

3. Cortocircuito Monofásico

3.2 Análisis de fallas – Redes de Secuencia

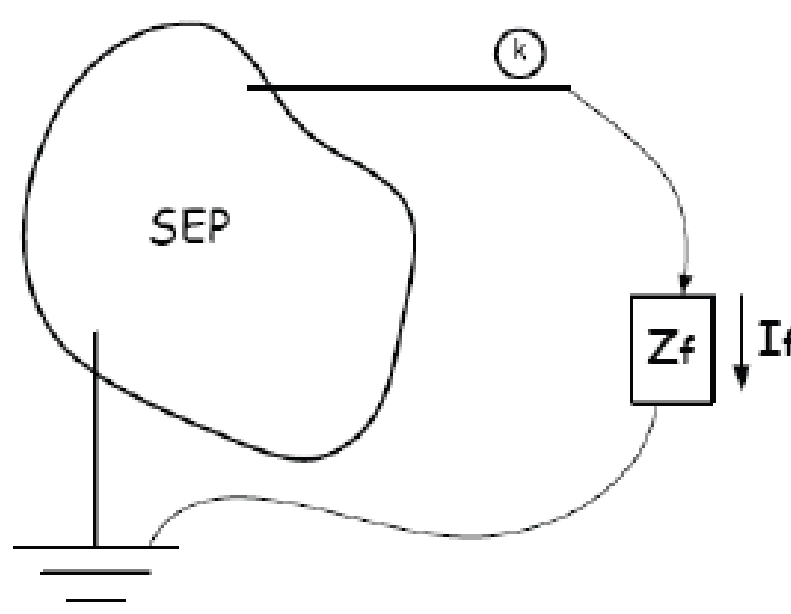
- El estudio completo de fallas en SEP's requiere de estudios dinámicos (estabilidad transitoria) con el propósito de conocer el impacto de éstas, sobre el comportamiento de diversas variables del SEP conforme transcurre el tiempo.
- En forma genérica, las fallas en un SEP suelen ser clasificadas como fallas simétricas y asimétricas, o fallas en derivación y fallas serie

HERRAMIENTAS ANÁLISIS PROTECCIONES

3. Cortocircuito Monofásico

3.2 Análisis de fallas – Redes de Secuencia

- Conceptualmente, la ocurrencia de una falla en el SEP's puede representarse como la conexión de una impedancia (Z_f) a través de la cual circulará una corriente (I_f) como se muestra en la siguiente figura:



3. Cortocircuito Monofásico

3.2 Cálculo de corrientes de fallas – Redes de Secuencia

- El procedimiento para el cálculo de las corrientes de falla en sistemas trifásicos balanceados, el modelo del SEP estará definido por la interconexión de sus redes de secuencia según el tipo de falla que habrá de ser analizada.
- El tipo de fallas que con mayor frecuencia experimenta un SEP son las asimétricas o desbalanceadas.

3. Cortocircuito Monofásico

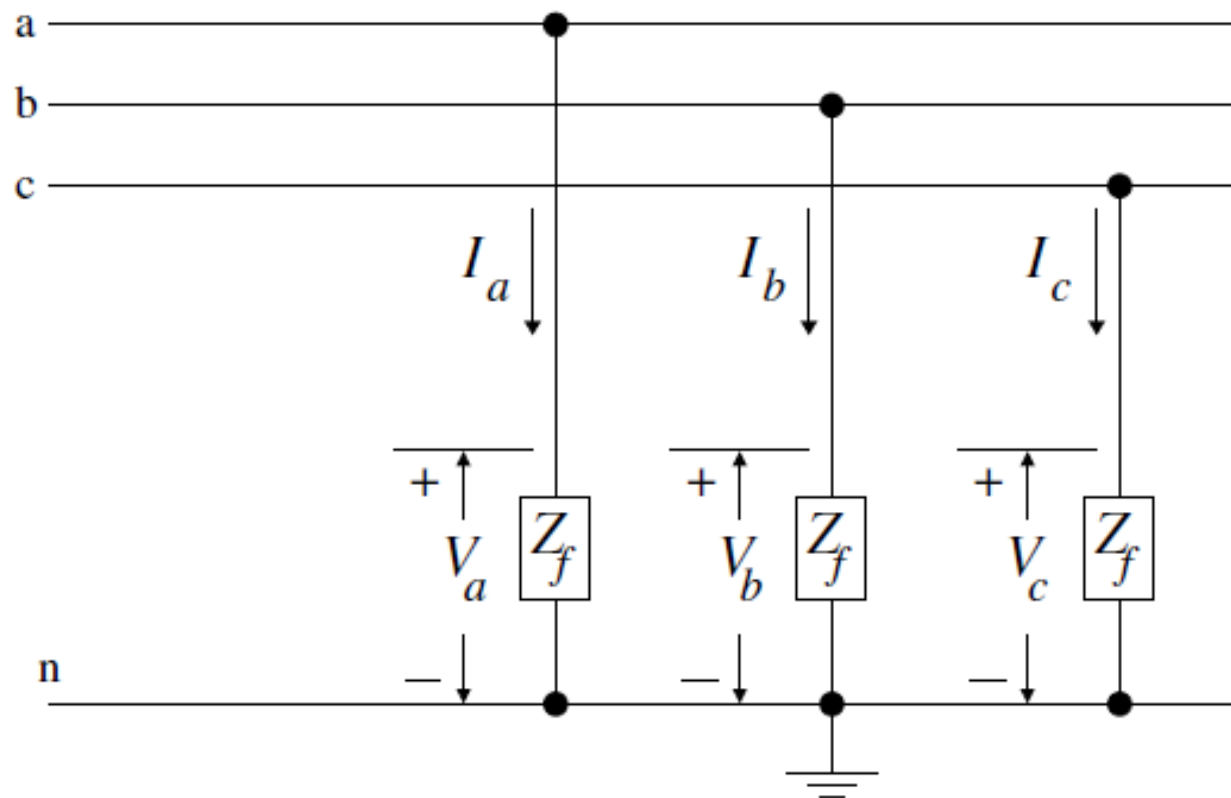
3.2 Cálculo de corrientes de fallas – Redes de Secuencia

- Según la frecuencia con que ocurren en un SEP, se tiene el orden siguiente:
 - Falla sencilla línea (fase) a tierra (representa aproximadamente el 70% de las fallas que experimenta un SEP)
 - Falla línea a línea (fase a fase).
 - Fallas doble línea a tierra.
 - Fallas trifásicas balanceadas

HERRAMIENTAS ANÁLISIS PROTECCIONES

3. Cortocircuito Monofásico

3.2 Redes de secuencia – Falla trifásica a tierra



3. Cortocircuito Monofásico

Redes de secuencia – Falla trifásica a tierra

Condiciones de Falla:

$$V_a = I_a Z_f$$

$$V_b = I_b Z_f$$

$$V_c = I_c Z_f$$

3. Cortocircuito Monofásico

Redes de secuencia – Falla trifásica a tierra

Matrices secuencias:

- En forma matricial:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_f & 0 & 0 \\ 0 & Z_f & 0 \\ 0 & 0 & Z_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

- En función de sus componentes simétricas, se tiene:

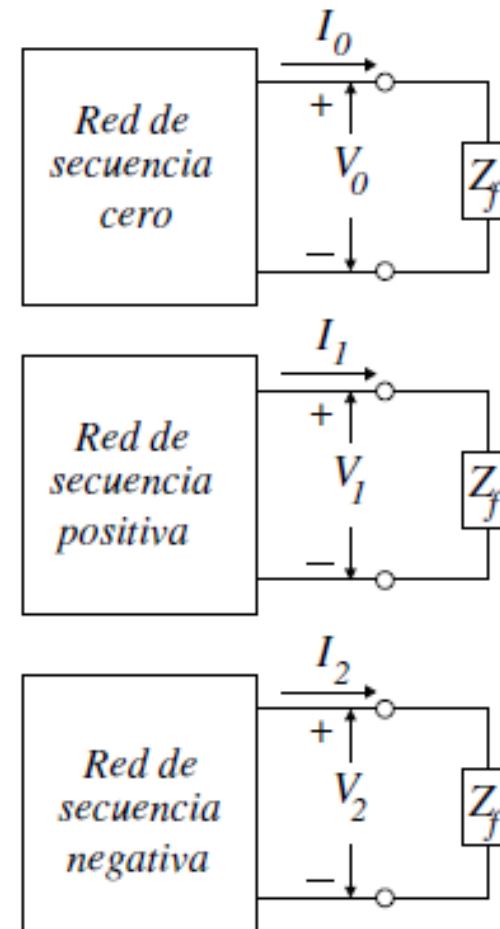
$$\begin{bmatrix} V_{a(0)} \\ V_{a(1)} \\ V_{a(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_f & 0 & 0 \\ 0 & Z_f & 0 \\ 0 & 0 & Z_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a(0)} \\ I_{a(1)} \\ I_{a(2)} \end{bmatrix}$$

3. Cortocircuito Monofásico

Redes de secuencia – Falla trifásica a tierra

Red de secuencias:

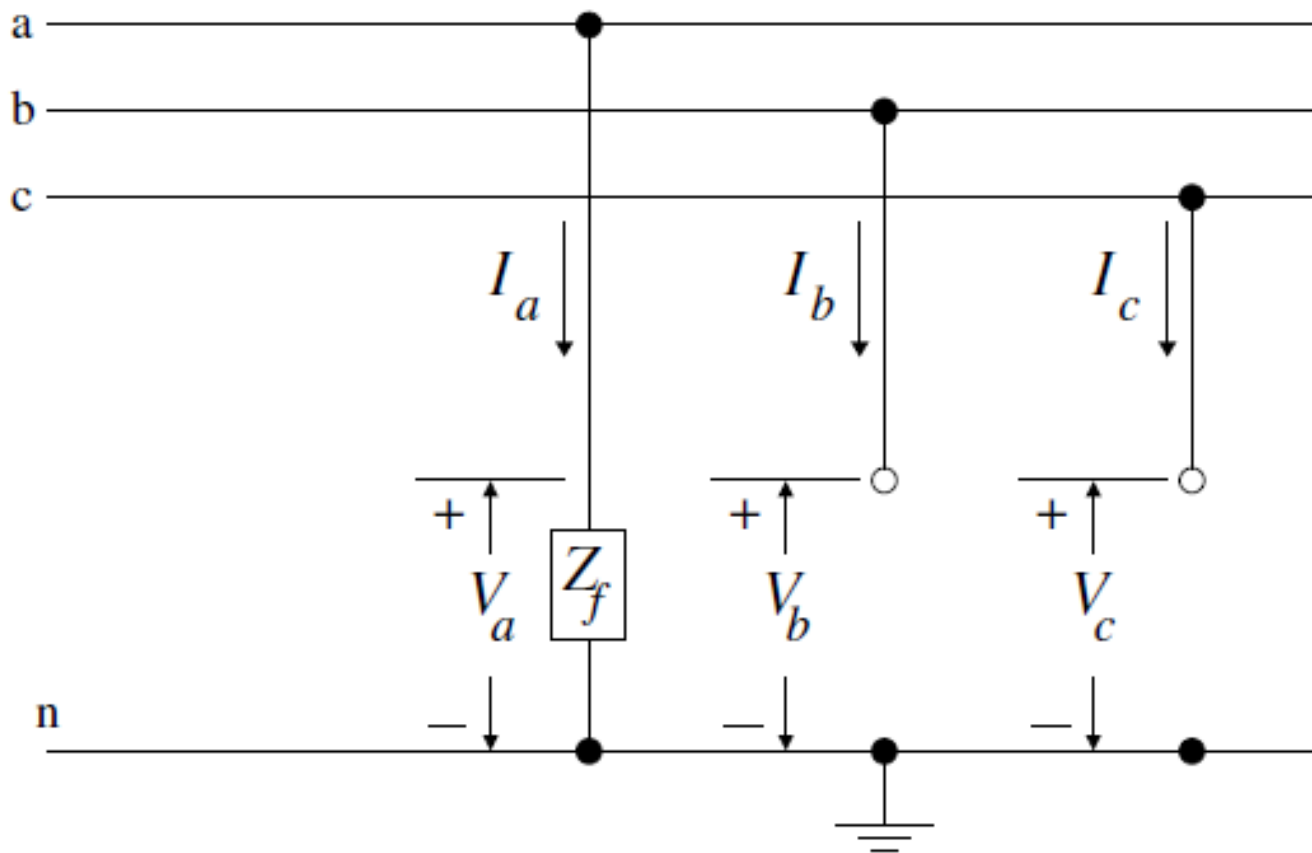
- Las ecuaciones de secuencia de la ecuación se representan graficamente:



HERRAMIENTAS ANÁLISIS PROTECCIONES

3. Cortocircuito Monofásico

Redes de secuencia – Falla línea a tierra



3. Cortocircuito Monofásico

Redes de secuencia – Falla línea a tierra

Condiciones de Falla:

- De la figura se obtiene:

$$I_b = 0, I_c = 0 \quad \wedge \quad V_a = I_a Z_f$$

- De la anterior ecuación $I_b = I_c$, por tanto reemplazando en sus componentes, se tiene:

$$I_{a(0)} + a^2 I_{a(1)} + a I_{a(2)} = I_{a(0)} + a I_{a(1)} + a^2 I_{a(2)}$$

- Si se manipula la ecuación:

$$(a^2 - a) I_{a(1)} = (a^2 - a) I_{a(2)}$$

3. Cortocircuito Monofásico

Redes de secuencia – Falla línea a tierra

- Por tanto: $I_{a(1)} = I_{a(2)}$
- También: $I_b = I_{a(0)} + a^2 I_{a(1)} + a I_{a(2)} = 0$

$$I_{a(0)} + (a + a^2) I_{a(1)} = 0$$

$$I_{a(0)} = - (a + a^2) I_{a(1)}$$

$$I_{a(0)} = I_{a(1)}$$

3. Cortocircuito Monofásico

Redes de secuencia – Falla línea a tierra

- Además por la ecuación de definición:

$$V_a = Z_f I_a$$

$$V_{a(0)} + V_{a(1)} + V_{a(2)} = Z_f (I_{a(0)} + I_{a(1)} + I_{a(2)})$$

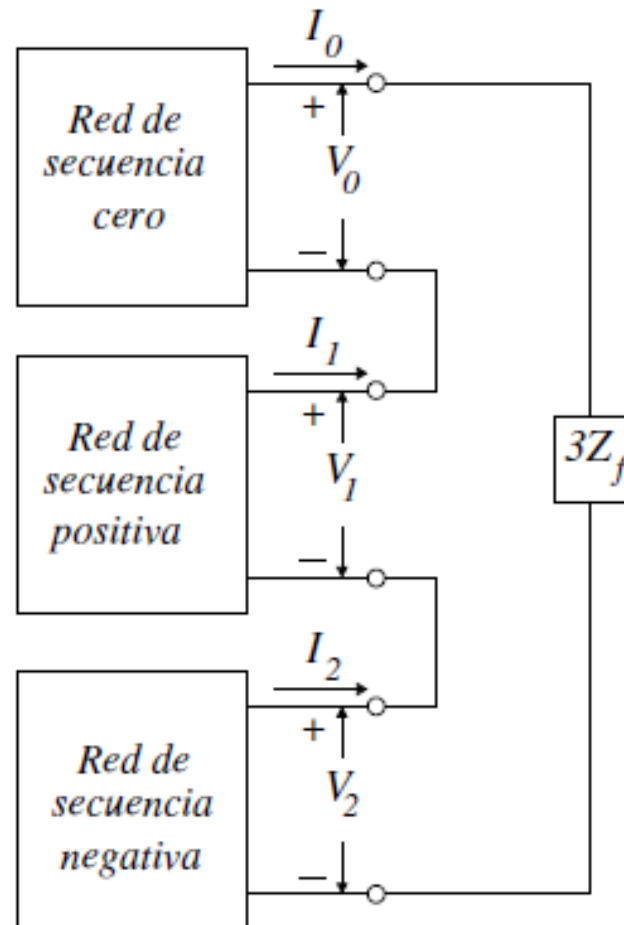
$$V_{a(0)} + V_{a(1)} + V_{a(2)} = 3Z_f I_{a(1)}$$

- Reemplazando éstas ecuaciones en conexión de redes de secuencia, obtenemos lo siguiente:

HERRAMIENTAS ANÁLISIS PROTECCIONES

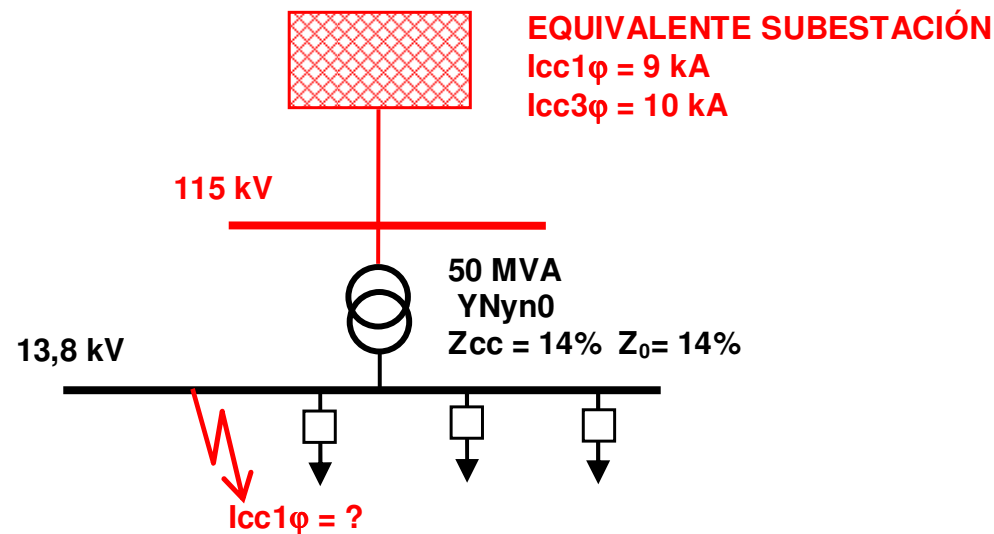
3. Cortocircuito Monofásico

- Interconexión de redes de secuencia para una falla línea a tierra:



HERRAMIENTAS ANÁLISIS PROTECCIONES

3. Cortocircuito Monofásico



- Se llevan todas las impedancias al lado de 13,8 kV
- Impedancia del transformador de potencia
- Para el transformador de potencia

$$Z(\Omega) = Z_{base} \times Z_{pu} \quad Z_{base} = \frac{V^2}{S} = \frac{13,8^2}{50} = 3,81\Omega$$

$$Z_{trafo}(\Omega_{13,8}) = Z_{base} \times Z_{pu} = 3,81 \times 0,14 = 0,5334\Omega$$

HERRAMIENTAS ANÁLISIS PROTECCIONES

3. Cortocircuito Monofásico

- Para el sistema:
- Primero se debe hallar la impedancia de secuencia positiva, la cual solo está relacionada con el nivel de cortocircuito trifásico

$$Z1(\Omega_{115}) = \frac{V}{\sqrt{3} I_{cc3\phi}} = \frac{115000}{\sqrt{3} \times 10000} = 6,64\Omega$$

$$Z0(\Omega_{115}) = \frac{\sqrt{3}V}{I_{cc1\phi}} - Z1(\Omega) - Z2(\Omega) = \frac{\sqrt{3} \times 115000}{9000} - 2 \times 6,64 = 8,85\Omega$$

- Ahora, estos resultados se deben pasar a los valores vistos en el lado de 13,8 kV

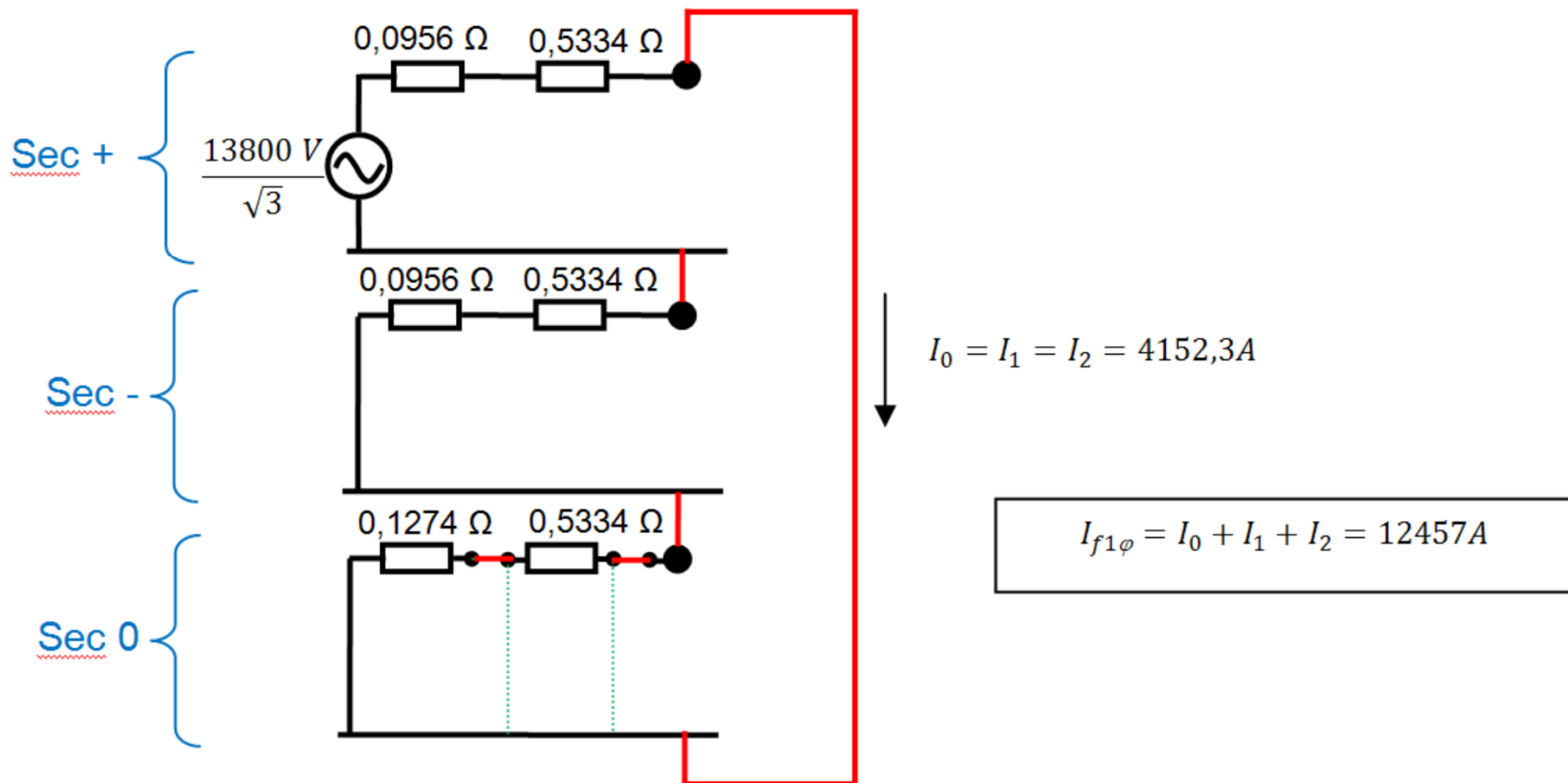
$$Z1(\Omega_{13,8}) = Z1(\Omega_{115}) \frac{13,8^2}{115^2} = 0,0956\Omega$$

$$Z0(\Omega_{13,8}) = Z0(\Omega_{115}) \frac{13,8^2}{115^2} = 0,1274\Omega$$

HERRAMIENTAS ANÁLISIS PROTECCIONES

3. Cortocircuito Monofásico

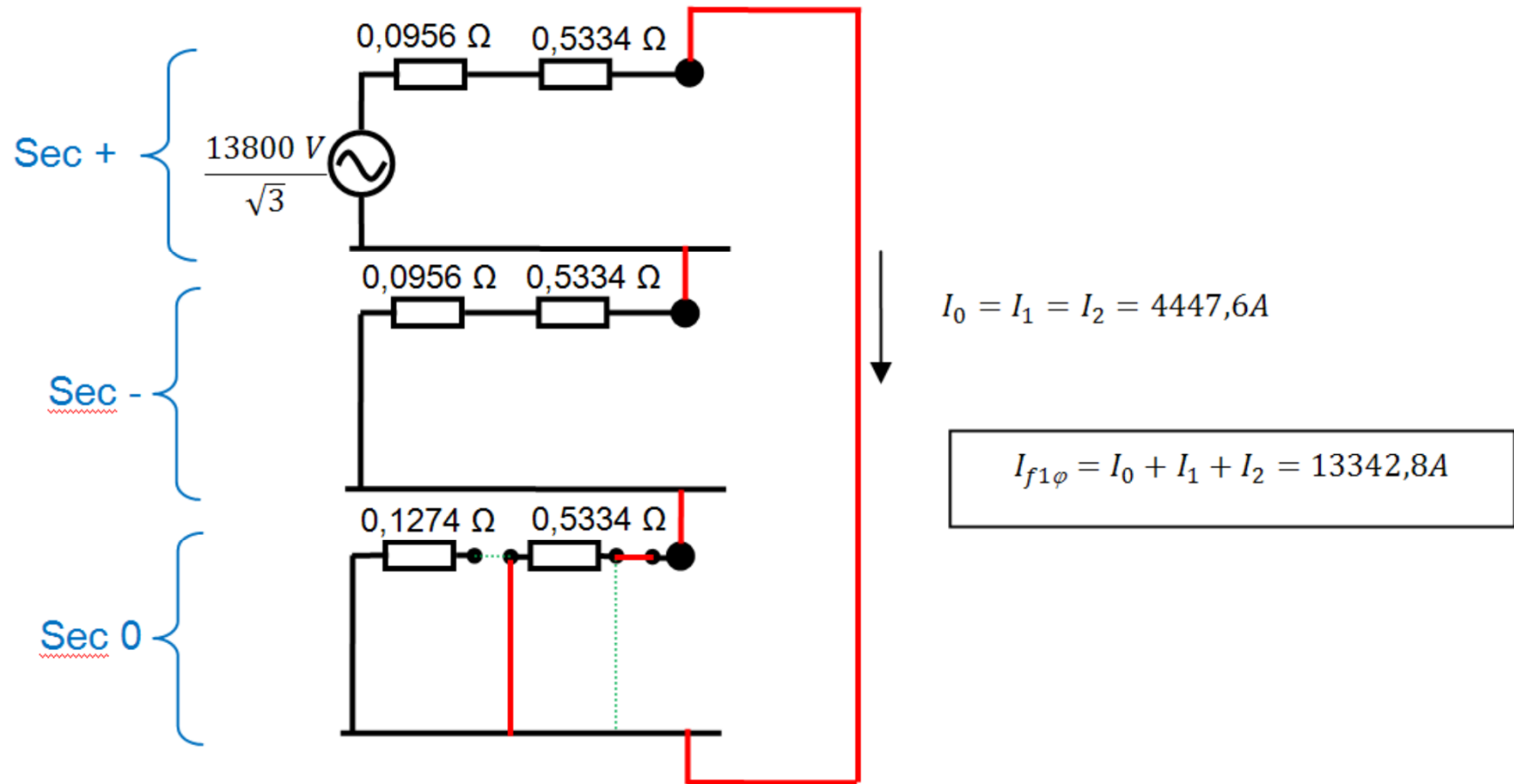
• Transformador en conexión YNyn



HERRAMIENTAS ANÁLISIS PROTECCIONES

3. Cortocircuito Monofásico

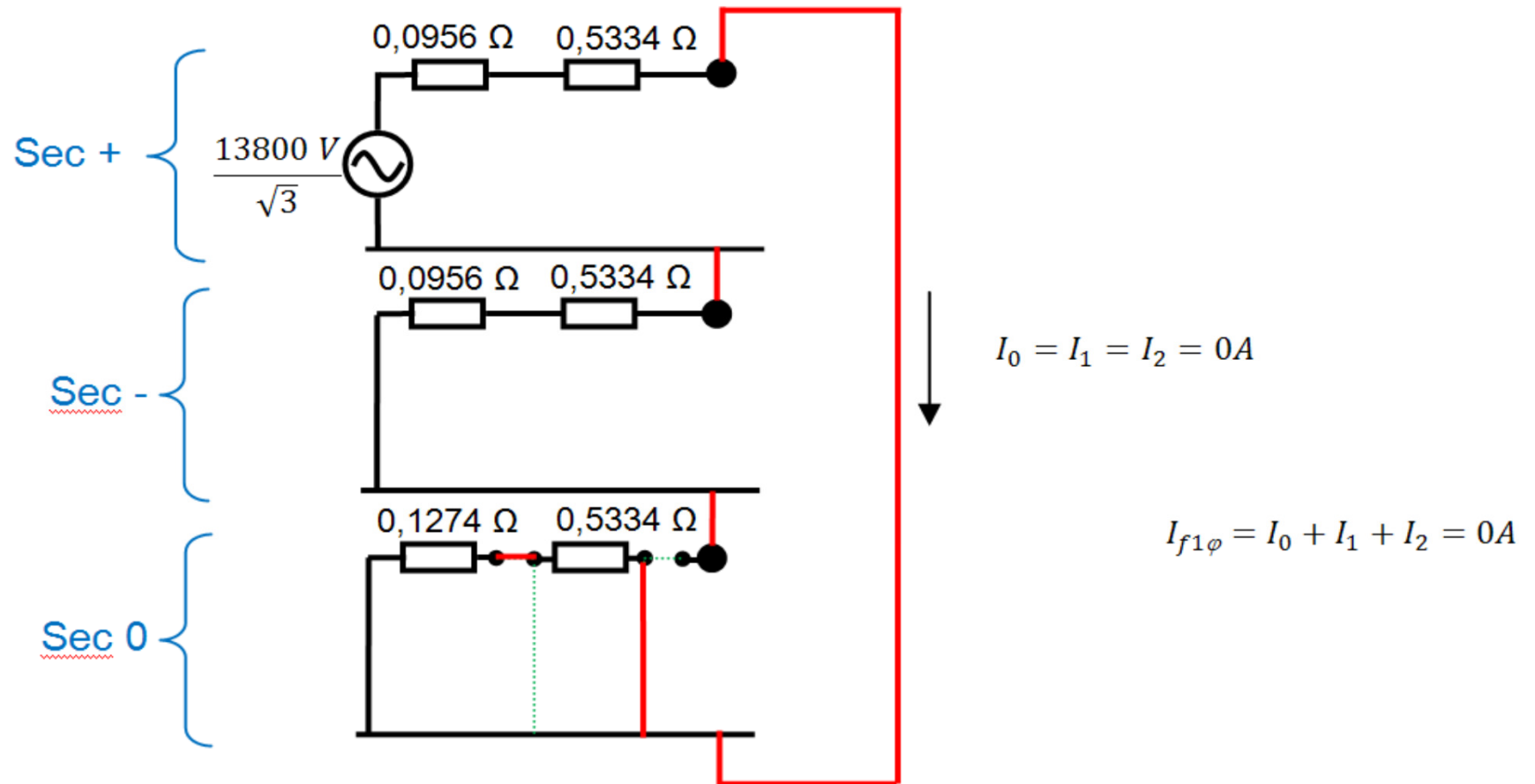
• Transformador en conexión Dyn



HERRAMIENTAS ANÁLISIS PROTECCIONES

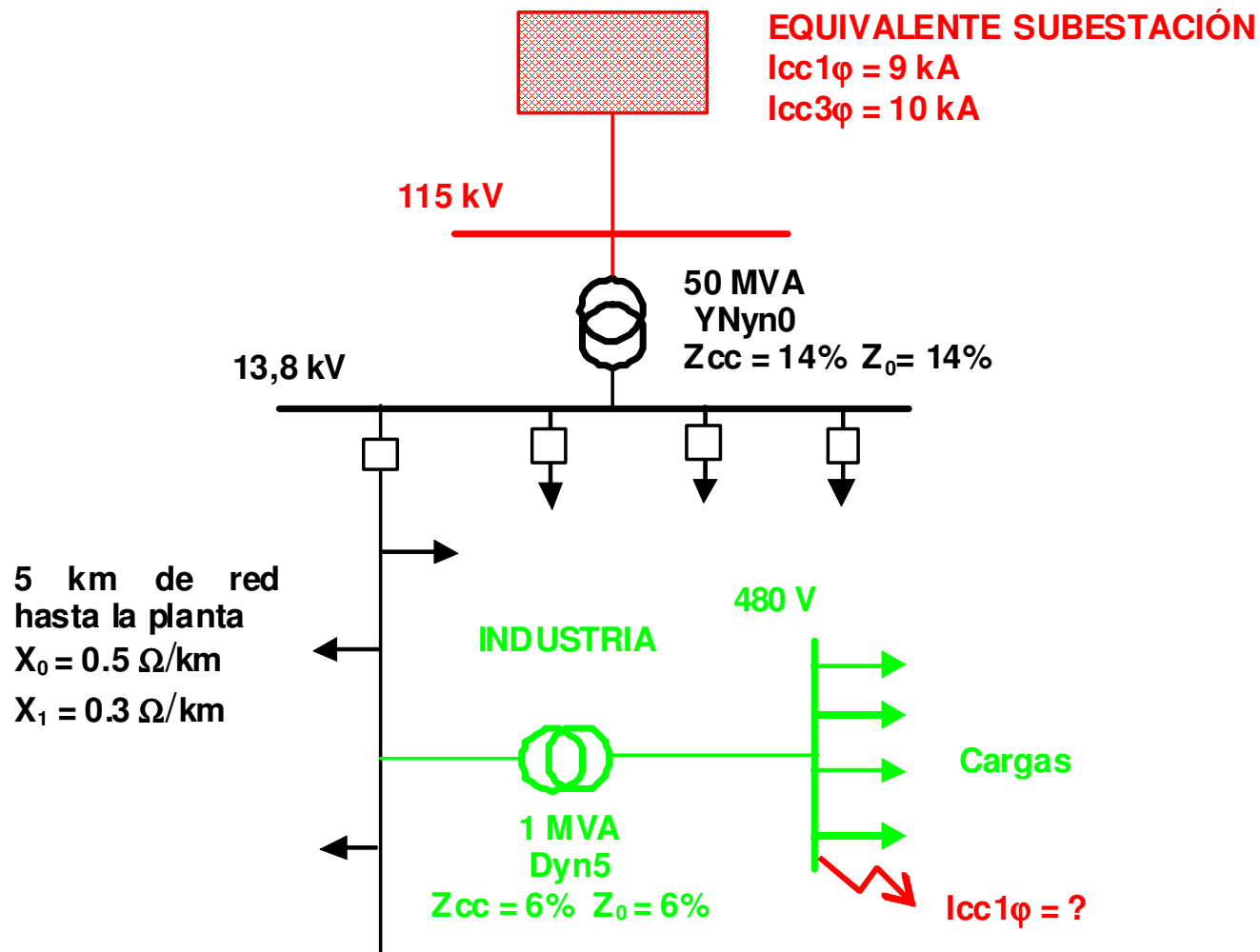
3. Cortocircuito Monofásico

- Transformador en conexión YD



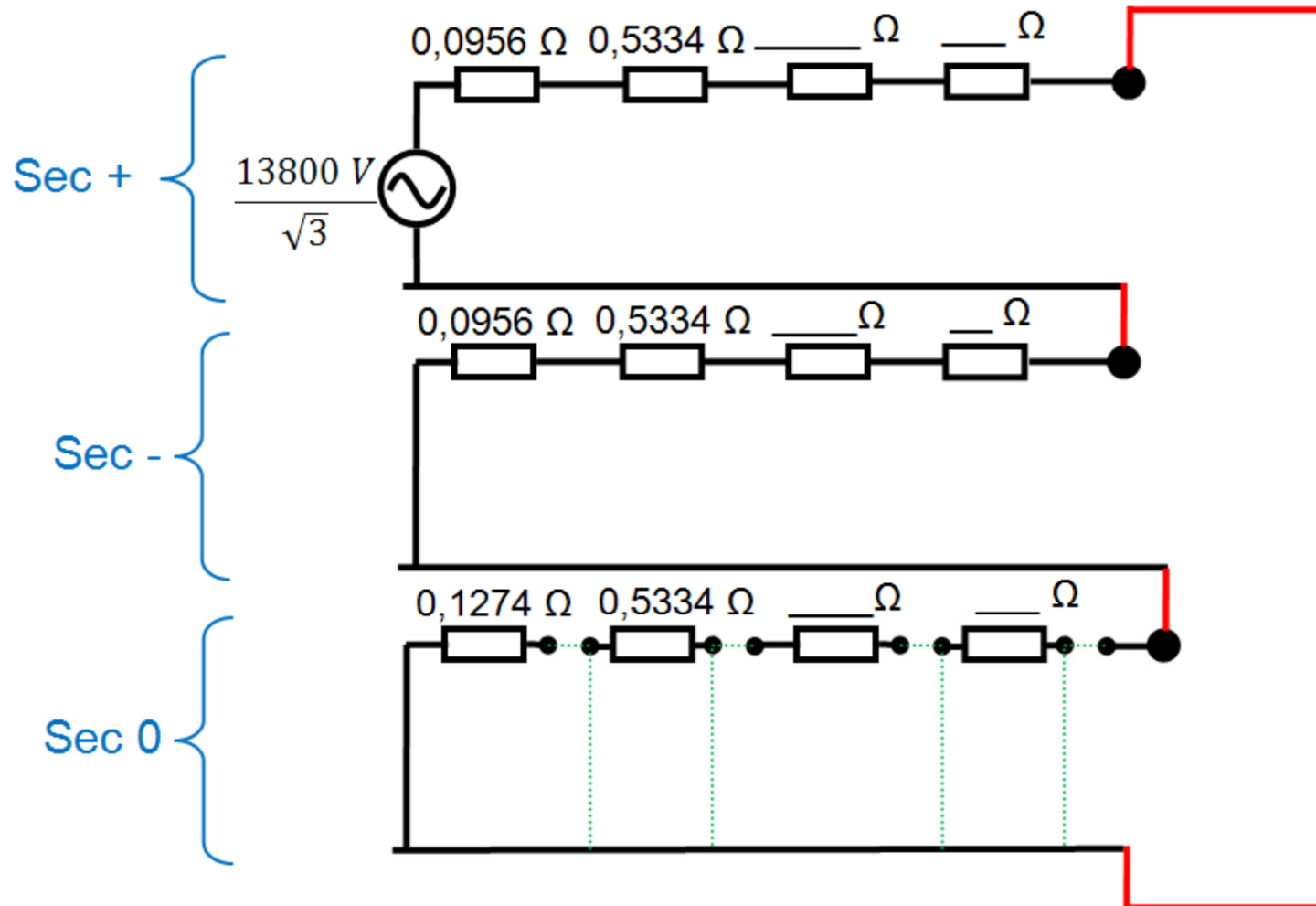
HERRAMIENTAS ANÁLISIS PROTECCIONES

3. Cortocircuito Monofásico

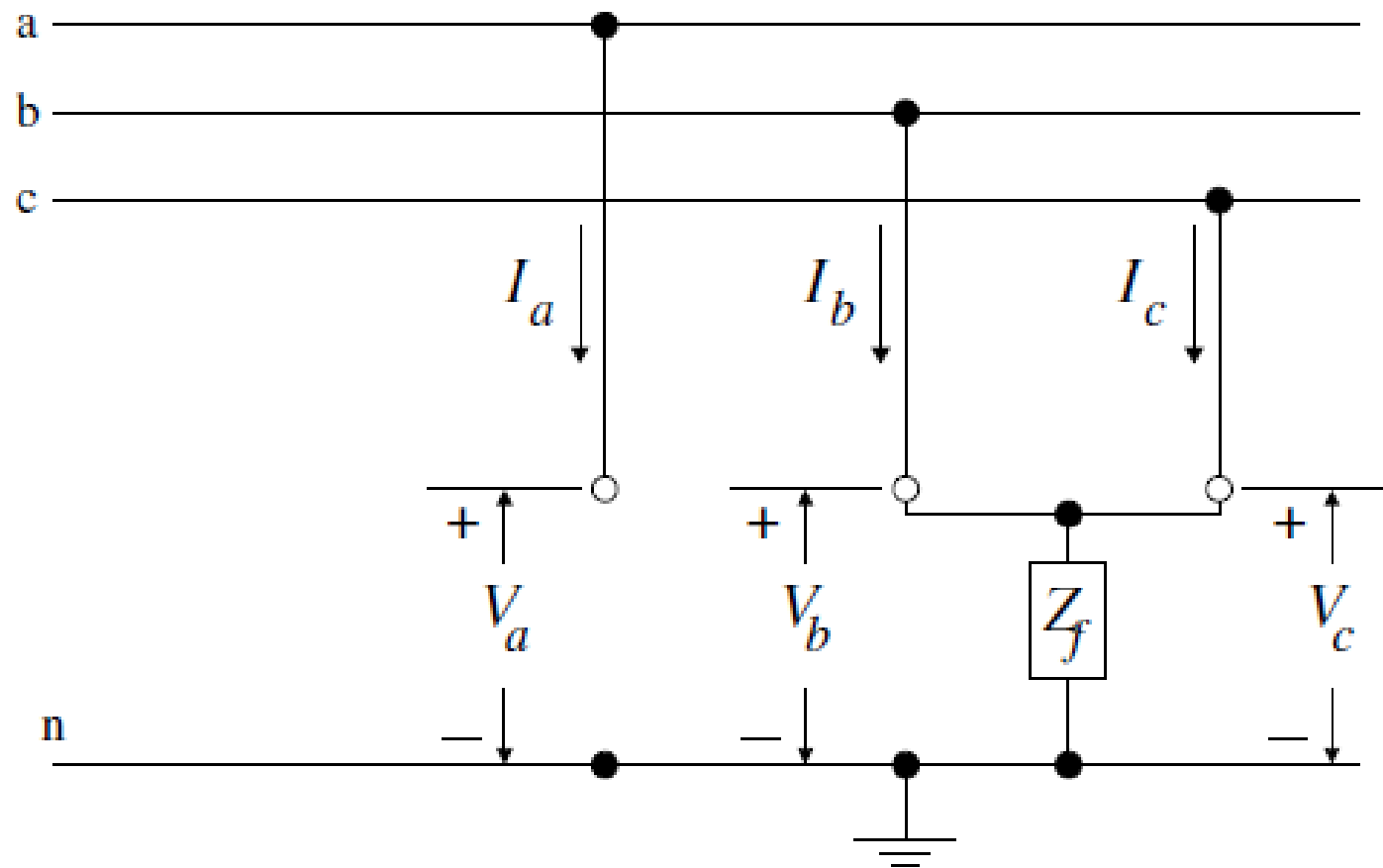


HERRAMIENTAS ANÁLISIS PROTECCIONES

3. Cortocircuito Monofásico



CORTOCIRCUITO BIFÁSICO A TIERRA ***Redes de secuencia – Falla línea-línea a tierra***



CORTOCIRCUITO BIFÁSICO A TIERRA

Redes de secuencia – Falla línea-línea a tierra

Condiciones de Falla:

$$I_a = 0$$

$$V_b = V_c$$

$$V_b = Z_f(I_b + I_c)$$

- De la ecuación la se tiene que:

$$I_{a(0)} + I_{a(1)} + I_{a(2)} = 0$$

CORTOCIRCUITO BIFÁSICO A TIERRA ***Redes de secuencia – Falla línea-línea a tierra***

- De la ecuación $V_b = V_c$ se tiene:

$$V_{a(0)} + a^2 V_{a(1)} + a V_{a(2)} = V_{a(0)} + a V_{a(1)} + a^2 V_{a(2)}$$

- Si se simplifica se tiene:

$$V_{a(1)} = V_{a(2)}$$

- De la ecuación V_b se tiene:

$$V_{a(0)} + a^2 V_{a(1)} + a V_{a(2)} = (I_{a(0)} + a^2 I_{a(1)} + a I_{a(2)} + I_{a(0)} + a I_{a(1)} + a^2 I_{a(2)}) Z_f$$

CORTOCIRCUITO BIFÁSICO A TIERRA ***Redes de secuencia – Falla línea-línea a tierra***

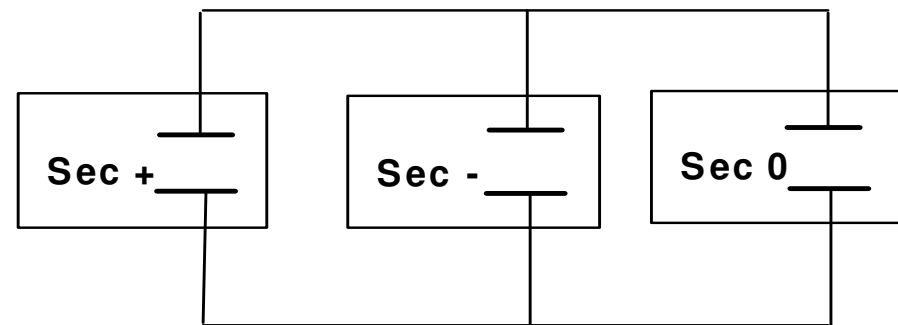
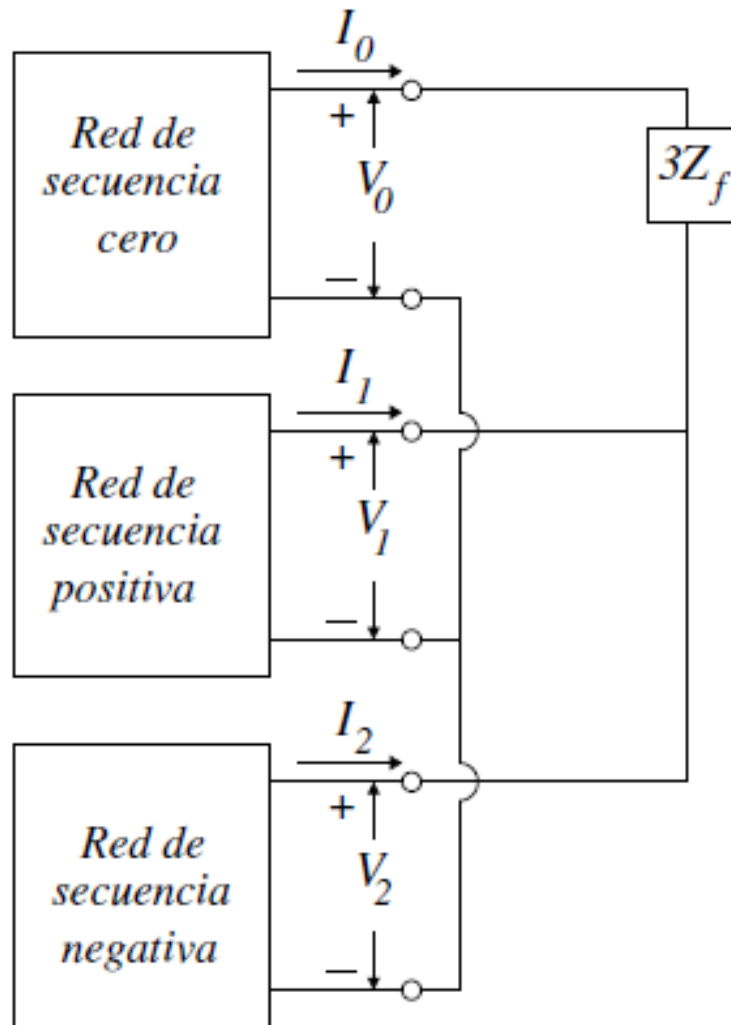
- Que se simplifica:

$$V_{a(0)} - V_{a(1)} = [2I_{a(0)} + (a^2 + a)(I_{a(1)} + I_{a(2)})] Z_f$$

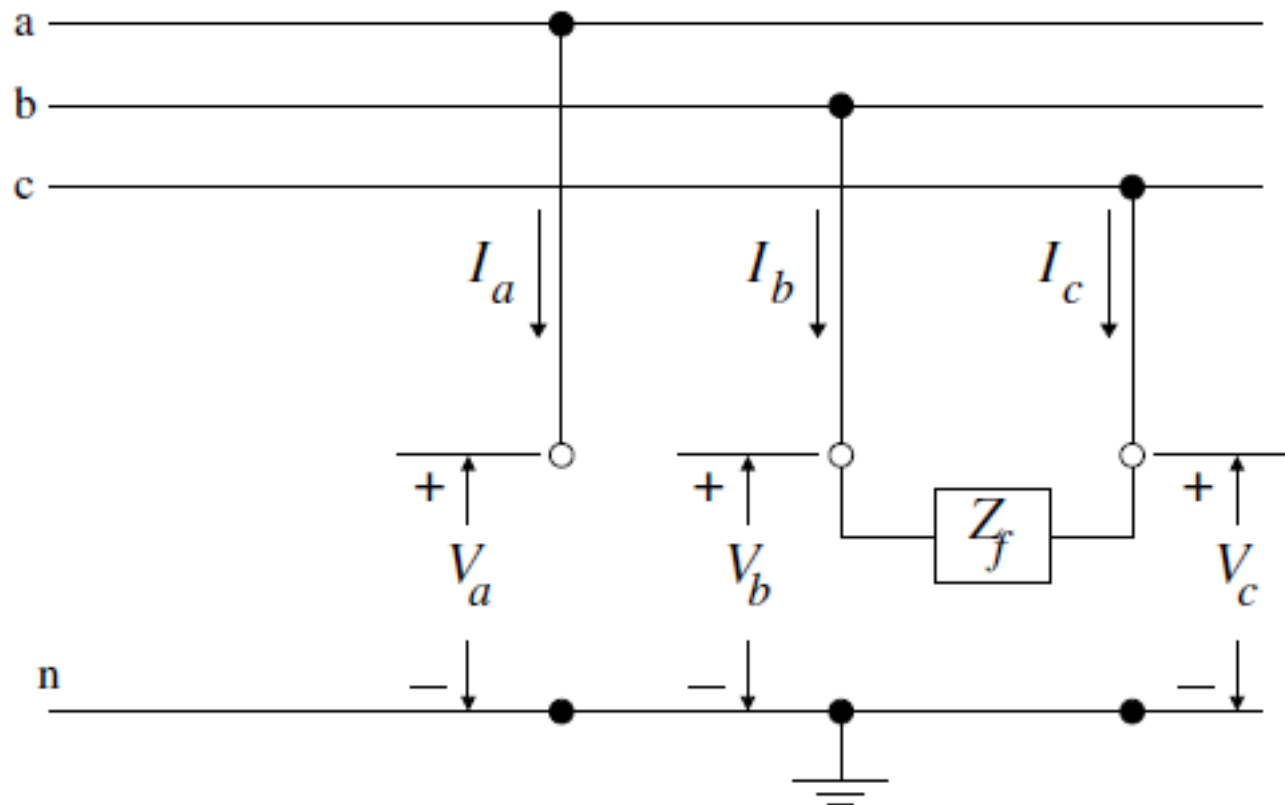
$$V_{a(0)} - V_{a(1)} = 3I_{a(0)}Z_f$$

- Lo mismo que para los casos anteriores, en general y de manera simultánea se deben satisfacer las ecuaciones planteada mediante la interconexión de las redes de secuencia:

CORTOCIRCUITO BIFÁSICO A TIERRA



CORTOCIRCUITO BIFÁSICO A TIERRA ***Redes de secuencia – Falla línea-línea***



CORTOCIRCUITO BIFÁSICO A TIERRA ***Redes de secuencia – Falla línea-línea***

Condiciones de Falla:

$$I_a = 0$$

$$I_b = -I_c$$

$$V_b = Z_f I_b + V_c$$

- De la ecuación la se tiene que:

$$I_{a(0)} + I_{a(1)} + I_{a(2)} = 0$$

CORTOCIRCUITO BIFÁSICO A TIERRA ***Redes de secuencia – Falla línea-línea***

- Y de la ecuación $I_b = -I_c$ se tiene:

$$I_{a(0)} + a^2 I_{a(1)} + a I_{a(2)} = - (I_{a(0)} + a I_{a(1)} + a^2 I_{a(2)})$$

- Al manipular la ecuación anterior:

$$2I_{a(0)} + (a^2 + a) (I_{a(1)} + I_{a(2)}) = 0$$

- Al reemplazar la en la ecuación anterior:

$$3I_{a(0)} = 0$$

- Entonces:

$$I_{a(0)} = 0$$

CORTOCIRCUITO BIFÁSICO A TIERRA ***Redes de secuencia – Falla línea-línea***

- Se puede simplificar la ecuación $I_{a(0)} + I_{a(1)} + I_{a(2)} = 0$ así:

$$I_{a(1)} = -I_{a(2)}$$

- También se puede transformar la ecuación $V_b = Z_f \cdot I_b + V_c$ en sus componentes de secuencia:

$$V_{a(0)} + a^2 V_{a(1)} + a V_{a(2)} = Z_f (I_{a(0)} + a^2 I_{a(1)} + a I_{a(2)}) + V_{a(0)} + a V_{a(1)} + a^2 V_{a(2)}$$

- Si se simplifica esta ecuación y se manipula se tiene:

$$(a^2 - a) V_{a(1)} = (a^2 - a) I_{a(1)} Z_f + (a^2 - a) V_{a(2)}$$

CORTOCIRCUITO BIFÁSICO A TIERRA ***Redes de secuencia – Falla línea-línea***

- o:

$$V_{a(1)} = I_{a(1)}Z_f + V_{a(2)}$$

- En general y de manera simultánea se deben satisfacer las ecuaciones anteriores mediante la conexión de las redes de secuencia:

HERRAMIENTAS ANÁLISIS PROTECCIONES

CORTOCIRCUITO BIFÁSICO

- Interconexión de redes de secuencia para una falla línea a línea:

