

Método de Componentes Simétricas para el análisis de corrientes de cortocircuito

Alfredo R. Carella

Introducción

El método de las Componentes Simétricas fue desarrollado por D. L. Fortescue en 1918 en "Método de las Coordenadas Simétricas". Es aplicable a cualquier sistema lineal de tensión n-fásica en el cual n fasores desequilibrados pueden descomponerse en n sistemas de fasores equilibrados, cada uno de los cuales recibe el nombre de componente simétrica.

Un cortocircuito unipolar en una red eléctrica trifásica equivale a una carga desbalanceada o asimétrica, por lo que el cálculo de las corrientes de falla no puede limitarse a una sola fase como en un cortocircuito tripolar. Si las impedancias son constantes, el sistema es lineal (se cumple la ley de Ohm) y por lo tanto vale el principio de superposición. Entonces un sistema trifásico puede descomponerse en tres sistemas equilibrados cuya suma es igual al sistema original. Para determinar la respuesta en tensión del sistema completo simplemente se suman las respuestas de los sistemas equilibrados.

Descripción del método

Un vector $\vec{I}$ (Figura 1) cualquiera puede pensarse siempre como la suma de tres componentes:

$$\vec{I} = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3 \quad (1)$$

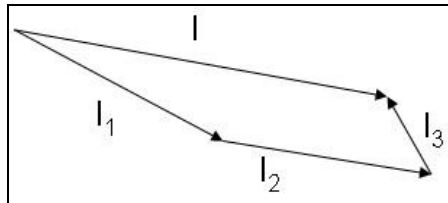


Figura 1. Vector escrito como suma de tres componentes.

Si se complementa cada una de las componentes del vector $\vec{I}$ hasta formar tres grupos de fasores linealmente independientes, puede representarse cualquier sistema trifásico (equilibrado o no) como combinación lineal de ellos. Para dar mayor generalidad a las figuras, se supondrá un sistema desequilibrado. Se verá más adelante que aplicar este método a un sistema equilibrado devuelve como resultado al mismo sistema, lo cual no aporta ninguna simplificación adicional.

Se complementará (Figura 2) la componente $\vec{I}_1$ para formar un sistema trifásico simétrico de secuencia directa (R S T), la componente $\vec{I}_2$ para formar un sistema trifásico simétrico de secuencia inversa (R T S) y la componente $\vec{I}_3$ para formar un sistema homopolar.

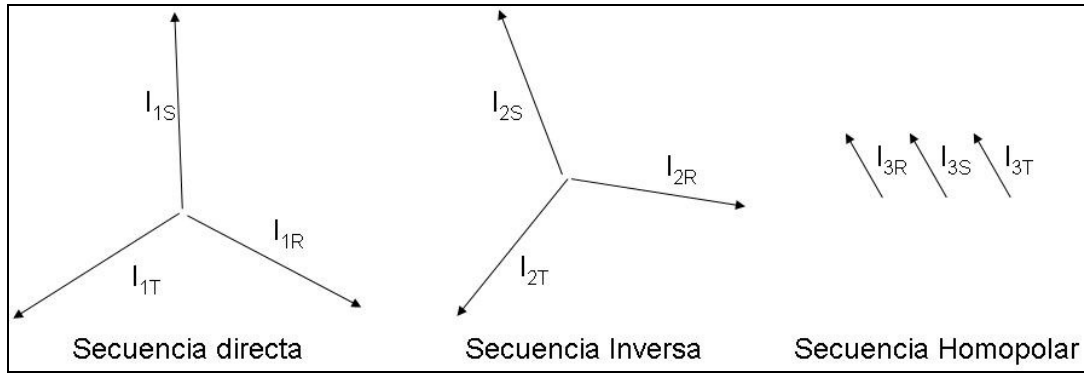


Figura 2. Secuencias equilibradas directo, inverso y homopolar.

El sistema trifásico $\vec{I}_R, \vec{I}_S, \vec{I}_T$ resultante (Figura 3) de sumar las componentes es:

$$\begin{aligned}\vec{I}_R &= \vec{I}_{1R} + \vec{I}_{2R} + \vec{I}_{3R} \\ \vec{I}_S &= \vec{I}_{1S} + \vec{I}_{2S} + \vec{I}_{3S} \\ \vec{I}_T &= \vec{I}_{1T} + \vec{I}_{2T} + \vec{I}_{3T}\end{aligned}\quad (2)$$

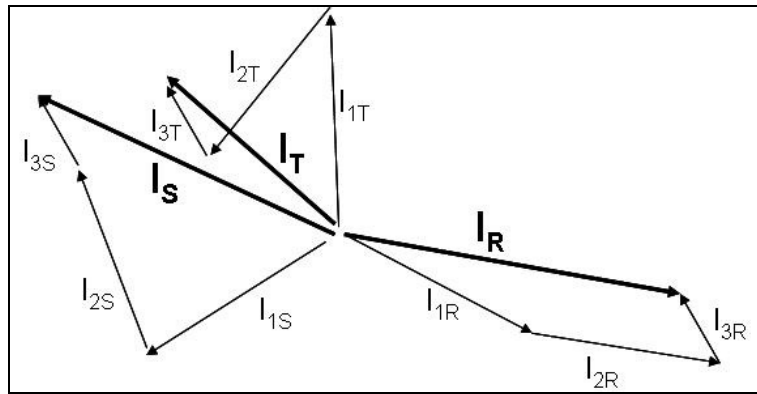


Figura 3. Suma de las componentes del sistema desequilibrado.

Si se define un vector $\vec{r}$ de rotación como:

$$\vec{r} = 1_{<120^\circ} = \frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}, \quad (3)$$

la suma vectorial anterior puede escribirse como:

$$\begin{aligned}\vec{I}_R &= \vec{I}_{1R} + \vec{I}_{2R} + \vec{I}_{3R} \\ \vec{I}_S &= \vec{r}^2 \cdot \vec{I}_{1R} + \vec{r} \cdot \vec{I}_{2R} + \vec{I}_{3R} \\ \vec{I}_T &= \vec{r} \cdot \vec{I}_{1R} + \vec{r}^2 \cdot \vec{I}_{2R} + \vec{I}_{3R}\end{aligned}\quad (4)$$

Esto puede expresarse en forma matricial como:

$$\begin{bmatrix} \vec{I}_R \\ \vec{I}_S \\ \vec{I}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \vec{r}^2 & \vec{r} & 1 \\ \vec{r} & \vec{r}^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{I}_{1R} \\ \vec{I}_{2R} \\ \vec{I}_{3R} \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} \vec{I}_{1R} \\ \vec{I}_{2R} \\ \vec{I}_{3R} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Según como se hayan definido la magnitud y posición relativa de las componentes simétricas, los vectores $\vec{I}_R$, $\vec{I}_S$ e $\vec{I}_T$ pueden tener módulo y fase arbitrarios. La descomposición en componentes simétricas puede efectuarse sencillamente invirtiendo la matriz A, resultando:

$$\begin{bmatrix} \vec{I}_{1R} \\ \vec{I}_{2R} \\ \vec{I}_{3R} \end{bmatrix} = A^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \vec{I}_R \\ \vec{I}_S \\ \vec{I}_T \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \vec{r} & \vec{r}^2 \\ 1 & \vec{r}^2 & \vec{r} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{I}_R \\ \vec{I}_S \\ \vec{I}_T \end{bmatrix} \quad (6)$$

Lo desarrollado vale para corrientes y también para tensiones. Por lo tanto también puede escribirse:

$$\begin{bmatrix} \vec{U}_{1R} \\ \vec{U}_{2R} \\ \vec{U}_{3R} \end{bmatrix} = A^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \vec{U}_R \\ \vec{U}_S \\ \vec{U}_T \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \vec{r} & \vec{r}^2 \\ 1 & \vec{r}^2 & \vec{r} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{U}_R \\ \vec{U}_S \\ \vec{U}_T \end{bmatrix} \quad (7)$$

Al estar equilibrado cada uno de los sistemas $\vec{I}_1$, $\vec{I}_2$, $\vec{I}_3$, $\vec{U}_1$, $\vec{U}_2$ y $\vec{U}_3$, los cálculos de corrientes y tensiones pueden realizarse como si se tratara de un circuito monofásico para cada sistema, para luego sumarlos y obtener las corrientes y tensiones del sistema completo.

Cálculo de corrientes de cortocircuito

Para calcular las corrientes durante un cortocircuito deben conocerse con un cierto grado de exactitud la tensión del generador y las impedancias de las líneas. El método más sencillo para efectuar el cálculo consiste en utilizar una vez más el principio de superposición. A continuación se detalla el procedimiento:

- I. Como primer paso (Figura 4) se miden las impedancias Directa (Z_1), Inversa (Z_2) y Homopolar (Z_3).
- La Impedancia Directa Z_1 de un aparato o de un componente eléctrico es el cociente entre la tensión fase-neutro y la corriente de fase en el caso de que se le alimente mediante un sistema equilibrado de secuencia directa.
- La Impedancia Inversa Z_2 de un aparato o de un componente eléctrico es el cociente entre la tensión fase-neutro y la corriente de fase en el caso de que se le alimente mediante un sistema equilibrado de secuencia inversa.
- La Impedancia Homopolar Z_3 de un aparato o de un componente eléctrico es el cociente entre la tensión fase-neutro y la corriente de fase en el caso de que la alimentación sea una fuente de tensión monofásica. La Impedancia Homopolar se refiere siempre a la conexión estrella.

- II. A continuación deben calcularse las corrientes en servicio normal (es decir, debe resolverse el circuito) y la tensión en el punto de falla.
- III. Luego se calculan para el mismo circuito las corrientes resultantes de anular todas las fuentes (cortocircuitar las de tensión y abrir las de corriente) y aplicar en el punto de falla una tensión opuesta a la tensión de falla calculada en el segundo paso.
- IV. Finalmente se suman las corrientes calculadas en los pasos II y III obteniéndose así la corriente de cortocircuito.

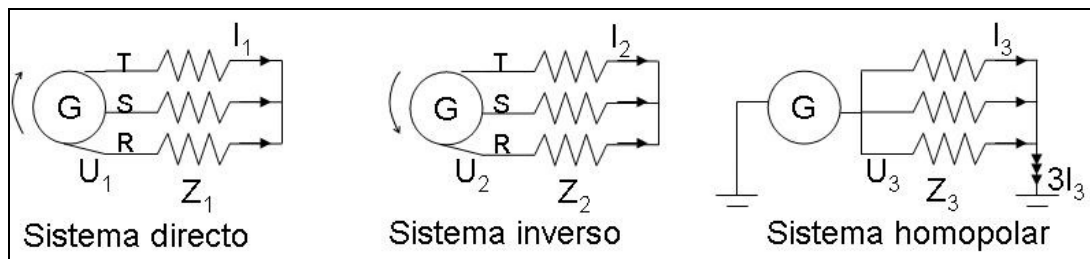


Figura 4. Esquema de conexión para la medición de las impedancias.

Referencias

1. Roeper, "Corrientes de cortocircuito en sistemas trifásicos", Siemens.
2. Wagner & Evans, "Symmetrical Components"
3. www.fi.uba.ar/materias/6509/Comp%20Sim%20E9tricas-Versi%F3n%2013-3-06.pdf