

[ANEXO N° 4]

GENERALIDADES SOBRE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO

Corrientes de cortocircuito

Un cortocircuito [2] en un sistema de potencia ocurre cuando se ponen en contacto entre sí o con tierra, conductores energizados correspondientes a distintas fases. Caracterizándose por elevadas corrientes circulantes hasta el punto de falla.

La magnitud de la corriente que fluirá a través de un cortocircuito depende principalmente las características y el número de fuentes que alimentan al cortocircuito y esta limitada por la impedancia de los elementos del sistema entre las fuentes de energía y el punto de falla.

Las fuentes principales de corrientes de cortocircuito [3] son los generadores existentes en el sistema de potencia local y la generación remota de la red que le suministra energía eléctrica (red pública), sin embargo, los motores sincrónicos y de inducción que antes de la falla representaban una carga para el sistema, en condiciones de cortocircuito, se comportan como generadores durante un tiempo relativamente corto. La contribución de estas fuentes se observa en la figura A4.1.

La oposición que presenta el propio circuito de distribución al flujo de la corriente de cortocircuito se denomina “impedancia” en términos eléctricos y depende de la configuración del sistema eléctrico, y se calcula a partir de la impedancia de cada uno de los componentes del sistema.

Otro de los factores que influyen sobre la magnitud de la corriente de cortocircuito son el momento, tipo y ubicación de la falla.

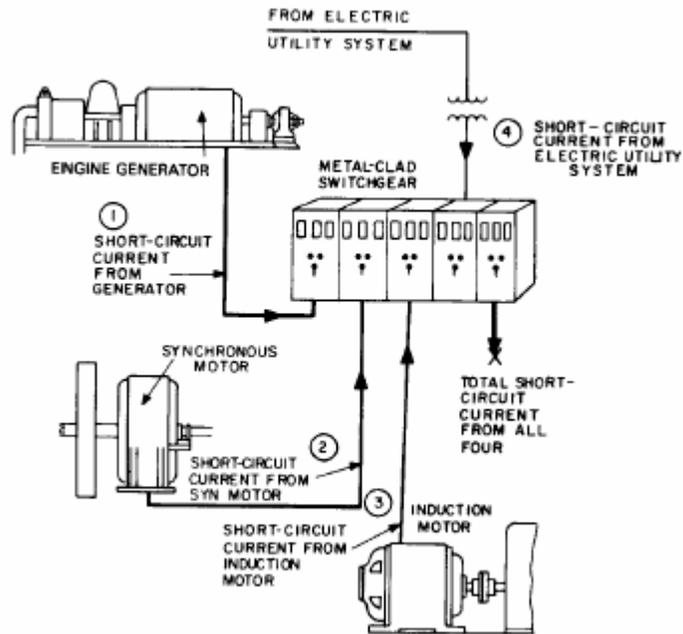


Figura A4.1. Contribuciones de varias fuentes a la corriente de cortocircuito
(IEEE 241-1990 Pág. 301[3])

Los efectos de las corrientes de cortocircuitos son muy variados, pero los más importantes son el debido al efecto Joule (calentamiento de los equipos eléctricos debido a la gran circulación de corriente), esfuerzos electromecánicos en las máquinas eléctricas y destrucción física del lugar de la falla cuando se producen grandes arcos eléctricos. De los efectos de las fallas por cortocircuito, el más notorio es la interrupción del suministro eléctrico debido a la necesaria apertura del circuito eléctrico por parte de los dispositivos de protección para despejar la falla y evitar mayores daños en el sistema.

Aún cuando se diseñe muy cuidadosamente un sistema de potencia, este estará siempre expuesto al daño que puedan causar flujos de corriente en condiciones de

cortocircuito tales como sobrecalentamientos y arcos eléctricos destructivos. Para asegurar que los equipos de protección puedan aislar fallas rápidamente y minimizar el daño de cada uno de los componentes del sistema de potencia y el riesgo del personal, el estudio de corrientes de cortocircuito debe ser incluido en el diseño de los sistemas de potencia y también cuando se hagan modificaciones a los sistemas existentes.

Características de la corriente de cortocircuito

El proceso [2] que ocurre en el sistema de potencia al producirse una falla causada por un cortocircuito es esencialmente de carácter transitorio. La corriente en régimen normal es una onda sinusoidal a 60 hertz de frecuencia y amplitud constante, no así cuando sucede un cortocircuito. La forma de onda en este caso sigue teniendo una forma sinusoidal a 60 hertz pero la envolvente va decreciendo exponencialmente desde un valor inicial máximo hasta su valor en régimen estacionario (ver figura A4.2).

Es posible estudiar el sistema pasando por una serie sucesiva de intervalos “casi estacionarios” los cuales son el período subtransitorio, transitorio y estacionario o permanente, y se aplica el concepto de impedancia para determinar la corriente correspondiente a cada uno de estos estados o intervalos.

La aplicación del concepto de impedancia se ve plasmada en la asignación de impedancias variables con el tiempo a las máquinas rotativas las cuales son las fuentes de corriente de cortocircuito. En las máquinas rotativas de corriente alterna generalmente la impedancia puede modelarse como una reactancia inductiva debido a la naturaleza inductiva de sus arrollados, por lo que generalmente se consideran tres reactancias (X) asociadas a cada uno de los intervalos en los que se divide la falla [4]:

- (a) La reactancia subtransitoria X_d'' de eje directo que determina la magnitud de corriente en el primer ciclo de la falla.
- (b) La reactancia transitoria X_d' de eje directo que determina la corriente durante el período siguiente al subtransitorio y abarca el rango de tiempo entre 1 y 2 segundos después de la ocurrencia del cortocircuito.
- (c) La reactancia sincrónica X_d de eje directo, la cual determina el flujo de corriente cuando la maquina alcanza el estado estable y se establece el período estacionario.

Dependiendo de la magnitud y defasaje en el tiempo entre las ondas de tensión y corriente de un sistema en el instante del cortocircuito, la corriente de falla puede presentar características de asimetría con respecto al eje normal de la corriente, en la figura A4.2 se observa esta asimetría para una de las fases de un sistema trifásico. En general esto ocurre cuando la onda de tensión normal se encuentra en un valor distinto a su pico máximo en el momento de ocurrencia de la falla. Para producir la máxima asimetría el cortocircuito siempre debe ocurrir cuando la onda de tensión se encuentre pasando por cero (magnitud cero).

La asimetría de la corriente de cortocircuito surge debido a que la corriente que fluye tiene dos componentes: el componente de corriente alterna (componente ac) y un componente de corriente directa (componente dc) (ver figura A4.2). Este componente dc decrece a medida que pasa el tiempo ya que su energía se disipa en forma de calor por la resistencia del circuito (efecto Joule). Motivado a esto, la rata de decrecimiento es inversamente proporcional a la relación entre la resistencia y reactancia del circuito (X/R) (entre mas baja es la relación X/R , más rápido es el decrecimiento). Por ejemplo, en sistemas de baja tensión, la relación X/R generalmente es baja (menor a 15). [2]

Como se observa en la figura A4.2, el valor máximo de la corriente asimétrica ocurre cerca del medio ciclo a partir del instante del cortocircuito.

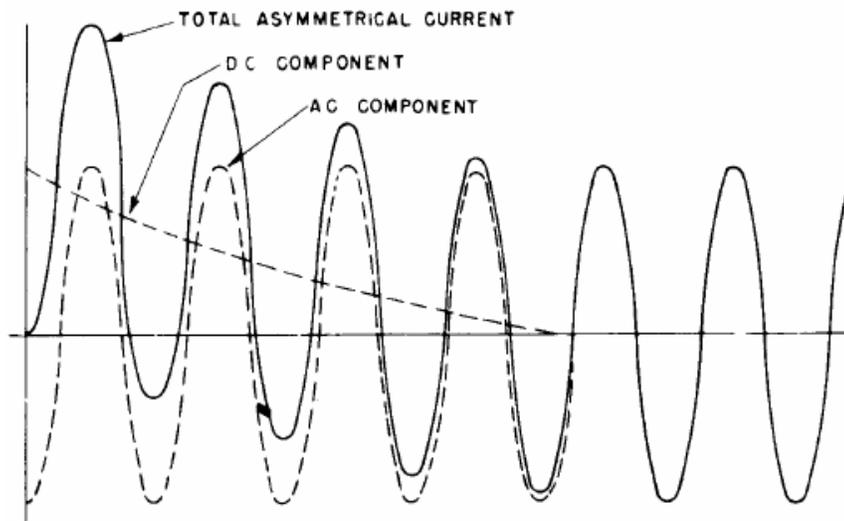


Figura A4.2. Efecto de asimetría en la corriente de cortocircuito (IEEE 241-1990 Pág. 307 [3])

Como se dijo anteriormente, las corrientes de cortocircuito tienen varias fuentes, las cuales contribuyen en forma diferente dependiendo de su naturaleza. La forma en que las distintas fuentes alimentan al cortocircuito se muestra en la figura A4.3. A causa de que las corrientes de las máquinas rotativas decrecen a medida que se reduce el flujo después del cortocircuito, la corriente de cortocircuito total decae con el tiempo. Considerando solamente la parte simétrica de la corriente de cortocircuito, la magnitud es máxima en el primer medio ciclo luego del cortocircuito y de un valor más bajo unos pocos ciclos después. Nótese que el componente del motor de inducción desaparecerá completamente luego de uno o dos ciclos, exceptuando los motores más grandes en la cual se puede presentar por más de cuatro ciclos.[3]

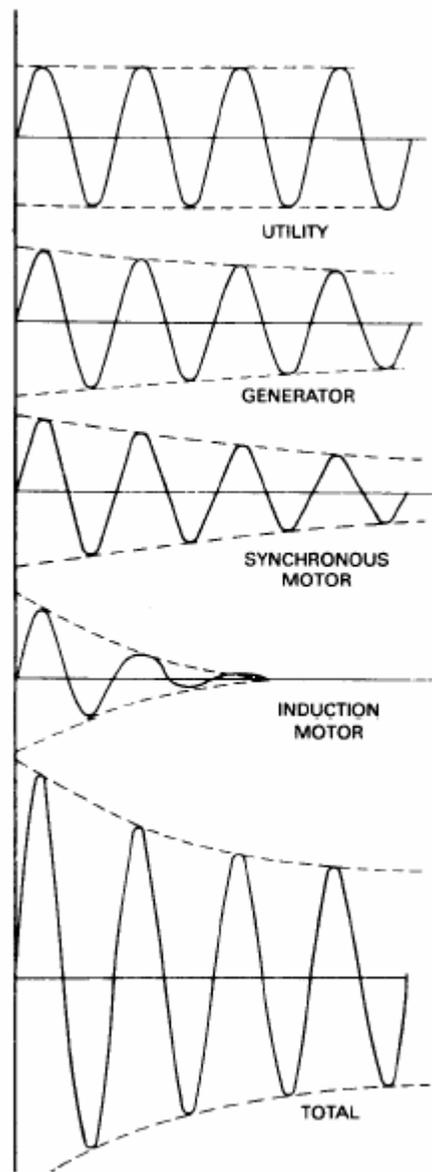


Figura A4.3. Corrientes de cortocircuito simétricas de algunas fuentes y la total
 (IEEE 241-1990 Pág. 308 [3])

Cálculo de las corrientes de cortocircuito

Existen varios métodos para calcular corrientes de c.c. y todos necesitan de una elaboración previa de un diagrama unifilar con su correspondiente diagrama de impedancias.

Diagrama unifilar

El diagrama unifilar [5] es la representación del sistema a ser estudiado. Resulta de la simplificación de un sistema trifásico indicando sus partes componentes por medio de símbolos normalizados en vez de sus circuitos equivalentes.

La finalidad de un diagrama unifilar es suministrar de manera sencilla y concisa los datos más significativos e importantes de un sistema. La información que se representa en el diagrama depende del estudio que se está realizando. Por ejemplo, para estudios de cortocircuito es fundamental representar los equipos de maniobra y protección tales como interruptores y fusibles.

Diagrama de impedancias

El diagrama unifilar [5] debe transformarse en un diagrama de impedancias que muestre el circuito equivalente de cada componente del sistema referido al mismo lado de uno de los transformadores para estudiar el comportamiento en condiciones de carga o al presentarse un cortocircuito.

Los circuitos equivalentes para el estudio de cortocircuito de los distintos componentes del sistema son los siguientes:

- (a) Generadores y Motores: La representación elemental de una máquina sincrónica es una fuente de tensión en serie con una impedancia. Los motores

de inducción se representan igual que las máquinas sincrónicas pero se considera su contribución al cortocircuito solo en los primeros ciclos.

- (b) Transformadores: Generalmente se representan por su circuito equivalente “T” ignorando su rama magnetizante.
- (c) Líneas de transmisión y Cables: El circuito equivalente a utilizar depende de la longitud de la línea, usándose el modelo “ π ” para líneas largas y medias. Las líneas y cables cortos se representan como una resistencia en serie con una inductancia.
- (d) Cargas: Se pueden modelar como impedancias de valor constante que consumen potencia activa y reactiva. En estudios de cortocircuito se representan como circuitos abiertos.
- (e) Sistemas externos: Se modela por el circuito equivalente de Thevenin donde la tensión equivalente depende de las tensiones internas de los generadores y la impedancia equivalente depende del resto de elementos del sistema.

El diagrama de impedancia que se describe en esta sección se denomina diagrama de secuencia positiva, ya que representan impedancias para las corrientes equilibradas de un circuito trifásico simétrico. Como se explicará más adelante, también existen diagramas de impedancias para otras secuencias (negativa y cero), siendo en esencia iguales a los de secuencia positiva pero usando otros circuitos equivalentes.

Sistema por unidad

Para simplificar la elaboración del diagrama de impedancias y los cálculos de corrientes de cortocircuito, frecuentemente se transforman los valores reales de las variables e impedancias (Voltios, Amperios, Ohmios) a una nueva magnitud llamada “por unidad” (p.u.). [5] Esta magnitud resulta de dividir el valor real de la variable entre un valor base o de referencia de la misma (un valor razonable), el cual tiene una unidad igual a la del valor real resultando un número adimensional.

$$\text{Variable en p.u.} = \frac{\text{valor real de la variable}}{\text{valor base de la variable}}$$

Otro sistema usado es el valor “por ciento” (%) que es igual a 100 veces el valor por unidad.

La utilización del sistema por unidad tiene muchas ventajas, entre ellas:

- (a) Las impedancias de las máquinas rotativas y transformadores son del mismo orden independiente del tamaño de los mismos.
- (b) Permite detectar fácilmente los errores de cálculo.
- (c) Se reduce el empleo de la $\sqrt{3}$ en los cálculos trifásicos.
- (d) Se evita la referencia de cantidades de uno a otro lado de los transformadores.
- (e) Se evita el trabajo con cantidades demasiado grandes, disminuyendo los errores en el caso de usar computadores para los cálculos.
- (f) Los fabricantes normalmente especifican las impedancias de los equipos eléctricos en por unidad o en por ciento.

Una elección de dos cantidades (generalmente tensión y potencia) como valores bases, fijan al mismo tiempo los demás valores base necesarios (corriente, impedancia) para elaborar el diagrama a partir de las relaciones entre ellas como por ejemplo la ley de Ohm. Las ecuaciones para la impedancia base y corriente base son las siguientes:

$$Z_{base} = \left(\frac{V_{base}^2}{S_{base}} \right)$$

$$I_{base} = \left(\frac{S_{base}}{\sqrt{3} \cdot V_{base}} \right)$$

Respetando ciertas condiciones al seleccionar los valores base (como tensión base igual a la tensión línea a línea del sistema), las leyes y relaciones eléctricas más utilizadas tales como la ley de Ohm, leyes de Kirchoff, ley de la potencias, etc.; se cumplen igual que en un circuito monofásico de corriente alterna.

En muchos casos la impedancia en por unidad de un componente de un sistema está expresado en una base distinta que la seleccionada como base en el estudio (como en el caso de transformadores, generadores y motores), siendo necesario cambiarla a la nueva base usando la ecuación

$$Z_{p.u. \text{ nueva}} = Z_{p.u. \text{ vieja}} \cdot (V_{\text{base viejo}} / V_{\text{base nuevo}})^2 \cdot (S_{\text{base nueva}} / S_{\text{base vieja}})$$

Donde:

$Z_{p.u. \text{ vieja}}$ = Impedancia de placa del equipo.

$V_{\text{base viejo}}$ = Tensión nominal del equipo.

$V_{\text{base nuevo}}$ = Tensión base del sistema.

$S_{\text{base viejo}}$ = Potencia nominal del equipo.

$S_{\text{base nuevo}}$ = Potencia base del sistema.

Tipos de fallas por cortocircuitos en sistemas de potencia

Se produce un cortocircuito [2] en un sistema de potencia, cuando entran en contacto, entre sí o con tierra, conductores energizados correspondientes a distintas fases. También cuando la corriente circula a través de un arco eléctrico debido a la ruptura del aire. Normalmente las corrientes de cortocircuito son muy elevadas, entre 5 y 20 veces el valor máximo de la corriente de carga en el punto de falla. Los cortocircuitos se pueden clasificar en simétricas (balanceadas) y asimétricas (desbalanceadas). En las fallas simétricas la corriente de las tres fases del sistema son iguales en el instante del cortocircuito. Entre ellas tenemos:

- (a) Cortocircuito trifásico: Se ponen en contacto las tres fases en un mismo punto del sistema. Es el cortocircuito más severo en la mayoría de los casos.

- (b) Cortocircuito trifásico a tierra: Se ponen en contacto las tres fases y tierra en un mismo punto del sistema.

En las fallas asimétricas la corriente en las tres fases del sistema no son iguales en el instante del cortocircuito. Entre ellas tenemos:

- (a) Cortocircuito bifásico (fase a fase): Entran en contacto dos fases cualesquiera del sistema.
- (b) Cortocircuito bifásico a tierra (dos fases a tierra): Entran en contacto dos fases cualquiera y la tierra del sistema.
- (c) Cortocircuito monofásico (fase a tierra): Ocurre al ponerse en contacto una fase cualquiera con la tierra del sistema. Es el cortocircuito más frecuente.

Métodos para el cálculo de corrientes de cortocircuito

Existen diferentes métodos para hallar el valor de las corrientes de cortocircuito en cualquier punto de un sistema de potencia, siendo algunos el método de reducción de mallas, el método de contribución y el método de componentes simétricas.

El método de reducción de mallas se basa en el teorema de Thevenin, modelando el sistema en el punto de falla como una fuente de tensión (voltaje Thevenin) con magnitud igual al voltaje previo a la falla en serie con una impedancia equivalente (impedancia de Thevenin vista desde el punto de falla) la cual se halla por reducción de mallas del diagrama de impedancias correspondiente. Ya con el modelo de Thevenin es muy sencillo calcular la corriente de cortocircuito que viene dada por el voltaje de Thevenin entre la impedancia de Thevenin. Este método no considera las corrientes que circulan previas a la falla, pero en la mayoría de los sistemas de potencia la aproximación es razonable.

El método de contribución es una aplicación del teorema de superposición, partiendo del cálculo de la corriente de cortocircuito que produce cada fuente individualmente sobre el punto de falla. Luego, la corriente de cortocircuito total será la suma de las distintas contribuciones individuales de cada fuente. Presenta la desventaja de ser poco práctico en el caso de existir muchas fuentes de corrientes de cortocircuito.

El método de componentes simétricas está basado en la descomposición de vectores que representan corrientes desequilibradas (fallas asimétricas) en sistemas de vectores equilibrados denominados componentes simétricos. Con esta herramienta, las fallas asimétricas se pueden estudiar de manera similar a como se estudian las fallas simétricas (trifásicas). Este método se explicara con más detalle más adelante.

Un método adicional muy usado para el cálculo utilizando computadores es empleando la matriz de impedancia de barra para determinar las corrientes de cortocircuito. Este método se fundamenta en las propiedades que tiene esta matriz las cuales se explican a continuación.

La matriz de impedancias de barra en los cálculos de cortocircuito

La matriz de impedancias de barra ($\mathbf{Z}_{\text{barra}}$) es importante y muy útil para efectuar cálculos de fallas. Existen diversos métodos rápidos para desarrollar $\mathbf{Z}_{\text{barra}}$ a partir de una lista de elementos de impedancia. El método que se describe en esta sección es a través de la inversión de la matriz de admitancias de barra ($\mathbf{Y}_{\text{barra}}$) debido a su gran sencillez y exactitud.

Las matrices $\mathbf{Z}_{\text{barra}}$ y $\mathbf{Y}_{\text{barra}}$ son simétricas respecto a la diagonal principal y están relacionadas por $[\mathbf{Z}_{\text{barra}}] = [\mathbf{Y}_{\text{barra}}]^{-1}$. Los elementos de $\mathbf{Z}_{\text{barra}}$ en la diagonal principal

se llaman “impedancias propias de los nodos” y los elementos fuera de la diagonal se conocen como “impedancias mutuas de los nodos”.

Para hallar la matriz $\mathbf{Z}_{\text{barra}}$ se invierte la matriz $\mathbf{Y}_{\text{barra}}$ por cualquier método (tal como Gauss - Jordan). Para conseguir la matriz de admitancia de barra se deben seguir los siguientes pasos:

- (a) Se construye un diagrama de admitancias del sistema a partir del diagrama de impedancias (invirtiendo una a una cada impedancia).
- (b) Los nodos o puntos de interés (puntos de falla) se consideran como “barras” del sistema.
- (c) Cada valor de la diagonal de la matriz de admitancia es la suma de las admitancias unidas a la barra respectiva y cada elemento (i,j) fuera de la diagonal es igual al negativo (multiplicada por -1) de la admitancia que une a las dos barras i y j.

Este método se explica con detalle en la sección 7.4 del Stevenson [5]

Para una falla trifásica en la barra k, con un voltaje de prefalla igual a V_f , la corriente de cortocircuito es $I_{cc} = V_f / Z_{kk}$, donde Z_{kk} es el elemento (k,k) de la matriz $\mathbf{Z}_{\text{barra}}$.

Si se desprecian las corrientes de prefalla, los voltajes de prefalla en todas las barras son iguales, por lo que la tensión en la barra m en el momento de un cortocircuito en la barra k es $V_m = V_f (1 - Z_{mk}/Z_{kk})$.

La corriente total de cortocircuito entre las dos barra n y m es

$I_{nm} = (V_n - V_m) / z_{nm}$, donde z_{nm} es la impedancia del elemento entre las barras n y m.

Método de componentes simétricos

Este método [2] se usa para estudiar fallas asimétricas en los sistemas de potencia, tales como cortocircuitos, conductores abiertos y fallas a través de impedancias. Este método se basa en un trabajo publicado por C.L. Fortescue, donde se demuestra que un sistema trifásico desequilibrado se puede descomponer en un sistema trifásico de vectores equilibrados llamados “componentes simétricos” de los valores originales. Los conjuntos equilibrados son:

- (a) Componentes de secuencia positiva, formados por tres vectores de igual módulo, con diferencias de fase de 120° y con la misma secuencia de fases de los vectores originales.
- (b) Componentes de secuencia negativa, formados por tres vectores de igual módulo, con diferencias de fase de 120° y con la secuencia de fases opuestas a la de los vectores originales.
- (c) Componentes de secuencia cero, formados por tres vectores de igual módulo y con una diferencia de fase nula.

La caída de tensión que se origina en una parte de la red por la corriente de una secuencia determinada depende de la impedancia de tal parte del circuito para la corriente de dicha secuencia. Las impedancias de un circuito o un elemento a las corrientes de distintas secuencias se suelen llamar impedancias de secuencia positiva, impedancia de secuencia negativa e impedancia de secuencia cero. Las corrientes de cualquier secuencia pueden considerarse como circulando en una red independiente formada por solamente por las impedancias a la corriente de tal secuencia, por lo tanto el análisis de una falla asimétrica en un sistema simétrico consiste en la determinación de los componentes simétricos de las corrientes desequilibradas que circulan.

El circuito equivalente monofásico formado por las impedancias a la corriente de cualquier secuencia exclusivamente, se denomina “red de secuencia” para tal secuencia. Las impedancias de secuencia de los distintos elementos que pueden conformar un sistema de potencia son las siguientes:

- (a) Máquinas giratorias: las impedancias de las tres secuencias generalmente son diferentes, aunque no hay casi diferencia entre la magnitud de la impedancia de secuencia positiva y negativa. La impedancia de secuencia cero generalmente tiene un valor menor a las de secuencia positiva y negativa.
- (b) Líneas y Cables: las impedancias de secuencia positiva y negativa son iguales. La impedancia de secuencia cero es de 2 a 3,5 veces mayor que la reactancia de secuencia positiva.
- (c) Transformadores: se acostumbra suponer que las impedancias de todas las secuencias son iguales, cualquiera sea el tipo de transformador.
- (d) Cargas: las cargas conectadas en estrella o en delta suelen tener también las tres impedancias de secuencia iguales.

En cuanto a las redes de secuencia, se puede decir que las corrientes de secuencia cero circularán sólo si existe un camino de retorno por tierra (puestas a tierra) por donde pueda cerrarse el circuito. La impedancia conectada entre el neutro de una máquina y tierra sólo forma parte de la red de secuencia cero, ya que las corrientes de secuencia positiva y negativa no circularán al ser cero su suma vectorial en el neutro. Si una impedancia con valor Z_n se intercala entre el neutro y la tierra de un circuito conectado en estrella, debe colocarse una impedancia de valor $3Z_n$ entre el neutro y la barra de referencia de la red de secuencia cero.

Un circuito conectado en delta, por no disponer de camino de retorno, presenta una impedancia infinita a las corrientes de secuencia cero, aunque estas pueden circular en el interior de la delta.

Las máquinas rotativas (generadores, motores) tienen tensiones internas solamente de secuencia positiva. Las redes de secuencia negativa y cero, si se necesitan, se hallan sustituyendo las impedancias de secuencia y omitiendo las fuentes de tensión.

La red de secuencia cero de líneas y cables se representan tal cual como su equivalente de secuencia positiva, pero cambiando los valores de la impedancia de secuencia cero. La red de secuencia negativa es igual a la de secuencia positiva.

Las redes de secuencia positiva y negativa de las cargas son iguales, sin embargo, la forma de la red de secuencia cero depende de la forma de conexión de la impedancia entre neutro y tierra. En estudios de corrientes de cortocircuito generalmente se desprecia la influencia de las cargas pasivas.

La red de secuencia negativa de transformadores es igual a la de secuencia positiva, pero las diversas combinaciones posibles de los devanados primario y secundario en estrella y delta varían la red de secuencia cero.

Cálculo de corrientes de cortocircuito asimétricas utilizando el método de componentes simétricos

Luego de determinadas las redes de secuencia del circuito, estas se interconectan para representar los diferentes tipos de falla. Ya que se supone linealidad en las redes de secuencia, cada una de las redes puede reemplazarse por su equivalente de Thevenin, entre la barra de referencia y el punto de falla. La tensión del generador único del circuito equivalente para la red de secuencia positiva es V_f (tensión prefalla) respecto al neutro en el punto de aplicación de la falla. La impedancia Z_1 del circuito equivalente es la impedancia medida entre el punto P y la barra de referencia de la red de secuencia positiva con todas las fuentes de tensión internas en cortocircuito.

Como no circulan corrientes de secuencia negativa o cero antes de la ocurrencia de la falla, no aparecen fuentes de tensión en los circuitos equivalentes de las redes de secuencia negativa o cero. Las impedancias Z_2 y Z_0 se miden entre el punto P y la barra de referencia en sus redes respectivas.

Al interconectar las redes de secuencia convenientemente y realizar los análisis correspondientes (véase capítulo 13 del Stevenson [5]), se obtienen los siguientes resultados para las distintas fallas asimétricas en un punto del sistema de potencia:

(a) Falla simple línea a tierra (fase a tierra):

$$I_a = \frac{3 V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0}, \quad I_b = I_c = 0$$

(b) Falla línea a línea (entre las fases b y c):

$$I_b = -I_c = \frac{\sqrt{3} V_f}{Z_1 + Z_2}, \quad I_a = 0. \quad \text{Si } Z_1 = Z_2, \text{ entonces } I_b = 0.866 I_{cc3\phi}$$

(c) Falla doble línea a tierra (entre las fases b, c y tierra):

$$I_b = -I_c = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 Z_0 / (Z_2 + Z_0)}, \quad I_a = 0.$$

donde:

I_a, I_b, I_c = Corrientes de cortocircuito en las fases a, b y c.

V_f = Tensión de prefalla entre fase y neutro

$I_{cc3\phi}$ = Corriente de cortocircuito trifásica

Z_1, Z_2, Z_0 = Impedancias equivalentes de secuencia positiva, negativa y cero.

El método de la matriz de impedancias de barra para hallar corrientes de cortocircuito trifásicas se puede ampliar fácilmente a fallas asimétricas teniendo en cuenta que las redes de secuencia negativa y cero pueden representarse por redes

equivalentes de igual manera como se hizo con las redes de secuencia positiva. El método es útil para hallar las impedancias equivalentes Z_1 , Z_2 y Z_0 , representadas por las impedancias de la diagonal de la matriz Z_{barra} . Así, con la matriz de impedancias de barra para cada red de secuencia todas las características de las soluciones con un computador digital para fallas simétricas trifásicas pueden extenderse a fallas asimétricas.