



Ingeniería Eléctrica
FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

CLASE AUXILIAR 3 DE AGOSTO DE 2009– EL605

Prof.: Agustín León T.
Aux.: Pablo Medina C.

Control de corrientes de cortocircuito

Dentro de los estudios típicos que deben realizarse en sistemas de potencia, se encuentra el de cortocircuito. A través de este estudio se determinan las sobretensiones y sobrecorrientes que se originan en el sistema.

En esta clase, analizaremos el cortocircuito en bornes de un generador. De esta forma, introduciremos algunos conceptos básicos y discutiremos sobre cómo la conexión de este equipo altera el nivel de cortocircuito.

1.- Cálculo de cortocircuito

Para todos los efectos, se supondrá que el neutro del generador está conectado sólidamente a tierra.

En esta clase, analizaremos el siguiente generador:

S_{nom}	:	456 [MVA]
V	:	18 [kV]
X_d''	:	19 %
$X^{(2)}$:	14%
$X^{(0)}$:	10%

1.1.- Corrientes de cortocircuito en bornes del generador.

Las corrientes en [p.u.] por las fases en falla son (Ver Anexo A):

$$\begin{aligned} |I_{cc3\phi}| &= \frac{1}{X^{(1)}} \\ |I_{cc1\phi}| &= \frac{3}{X^{(1)} + X^{(2)} + X^{(0)}} \\ |I_{cc2\phi}| &= \frac{\sqrt{3}}{X^{(1)} + X^{(2)}} \\ |I_{cc2\phi-t}| &= \frac{\sqrt{\left(\frac{3}{2}X^{(2)}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}X^{(2)} + \sqrt{3}X^{(0)}\right)^2}}{X^{(1)}X^{(2)} + X^{(2)}X^{(0)}} \end{aligned}$$

Considerando que $I_b = \frac{456[MVA]}{\sqrt{3} \cdot 18[kV]} = 14626,64[A]$ se tendrán los siguientes niveles de cortocircuito para el generador bajo análisis:

$$\begin{aligned} |I_{cc3\phi}| & : 76,98 \text{ [kA]} \\ |I_{cc1\phi}| & : 102,04 \text{ [kA]} \\ |I_{cc2\phi}| & : 76,77 \text{ [kA]} \\ |I_{cc2\phi-t}| & : 130,29 \text{ [kA]} \end{aligned}$$

1.2.- Comentarios

De las tablas anteriores vemos que la corriente de cortocircuito bifásica a tierra da origen a las mayores corrientes de falla. Esto es importante a la hora de dimensionar los equipos de la instalación, ya que en algunas ocasiones es esta contingencia la que suele dimensionar los equipos, y no el cortocircuito trifásico como se podría pensar.

2.- Limitación de sobrecorrientes mediante resistencias en los neutros

Toda impedancia que se conecte en los neutros tanto de transformadores como generadores, tendrá una repercusión en los valores de las corrientes y voltajes durante fallas bifásicas a tierra y monofásicas, dada la relación entre estas magnitudes y las mallas de secuencia cero (impedancias entre neutros y tierra sólo aparecen en la malla de secuencia cero)

Tomemos como ejemplo el caso de una falla monofásica. Si la impedancia de secuencia cero aumenta, claramente la intensidad del cortocircuito disminuirá. De esta forma se ve que si se agrega una impedancia al neutro de un generador o transformador, se podrá controlar el valor del cortocircuito

En esta sección analizaremos la utilización de dos tipos de impedancias: resistencias y reactancias.

2.1.- Uso de resistencias en neutros

El tamaño de estas resistencias dependerá del nivel de tensión y de la aplicación del sistema eléctrico.

En general, la expresión de la corriente de cortocircuito es:

$$I_{cc1\phi} = \frac{3}{j(X^{(1)} + X^{(2)} + X^{(0)}) + 3R_n} [p.u.]$$

De la expresión anterior se puede ver que si R tiende a infinito, la corriente de falla será cero.

En sistemas en donde se quiera asegurar "continuidad de suministro", es deseable un alto valor para R. Por ejemplo, imaginemos un transformador al cual están conectados largos alimentadores de media tensión, los cuales pasan a través de

cerros llenos de vegetación. Bastaría con que una rama tocara la línea para que se produjera una falla, teniendo que sacarla de servicio. Sin embargo, claramente se ve que existe un riesgo al utilizar esquemas de este tipo (las fallas a tierra no se detectan)

¿Qué pasa con los voltajes cuando se tienen grandes valores de R?

Para responder lo anterior, calculemos la tensión en bornes de una de las fases sanas del generador y luego tomemos el límite de esa expresión cuando R tiende a infinito.

No olvidando que las tres mallas de secuencia están conectadas en serie, se tiene que:

$$V_a^{(1)} = 1 - \frac{jX^{(1)}}{3R_n + j(X^{(1)} + X^{(2)} + X^{(0)})} [p.u.]$$

$$V_a^{(2)} = -\frac{jX^{(2)}}{3R_n + j(X^{(1)} + X^{(2)} + X^{(0)})} [p.u.]$$

$$V_a^{(0)} = -\frac{3R_n + jX^{(0)}}{3R_n + j(X^{(1)} + X^{(2)} + X^{(0)})} [p.u.]$$

La expresión para el voltaje de la fase b es:

$$\begin{aligned} V_b &= a^2 V_a^{(1)} + a V_a^{(2)} + V_a^{(0)} \\ &= a^2 - \frac{ja^2(X^{(1)} + X^{(2)} + X^{(0)})}{3R_n + j(X^{(1)} + X^{(2)} + X^{(0)})} - \frac{jaX^{(2)}}{3R_n + j(X^{(1)} + X^{(2)} + X^{(0)})} - \frac{3R_n + jX^{(0)}}{3R_n + j(X^{(1)} + X^{(2)} + X^{(0)})} \\ &= a^2 - \frac{ja^2(X^{(1)} + X^{(2)} + X^{(0)})}{3R_n + j(X^{(1)} + X^{(2)} + X^{(0)})} - \frac{jaX^{(2)}}{3R_n + j(X^{(1)} + X^{(2)} + X^{(0)})} - \frac{3R_n + jX^{(0)}}{3R_n + j(X^{(1)} + X^{(2)} + X^{(0)})} \end{aligned}$$

Luego:

$$\lim_{R_n \rightarrow \infty} V_b = a^2 - 1 = \sqrt{3} \angle -120^\circ [p.u.]$$

En conclusión, en las fases sanas se produce un sobrevoltaje tal que la tensión fase neutro es igual a la tensión fase – fase del generador.

También es importante notar que en esta situación extrema, no hay corriente de cortocircuito monofásico a tierra.

2.2.- Uso de reactancias en neutros

De acuerdo al estándar IEEE Std 142, este tipo de aterrizamiento de neutros se utiliza en situaciones en donde se desea limitar el nivel de cortocircuito monofásico a una magnitud relativamente cercana a la falla trifásica. Además, indica que el uso de este aterrizamiento resultará más barato que el aterrizamiento mediante resistencias, si la magnitud de la corriente es de varios miles de amperes.

En particular, los generadores de media tensión por lo general no están diseñados para soportar fuerzas mecánicas desbalanceadas asociadas a corrientes de fallas superiores a las que se observarían en un cortocircuito trifásico en sus bornes.

Calculemos entonces el valor de la reactancia que se debe utilizar para que la corriente de cortocircuito monofásico sea a lo más igual a la corriente monofásica.

$$|I_{cc3\phi}| = |I_{cc1\phi}| \Rightarrow \frac{1}{X^{(1)}} = \frac{3}{(X^{(1)} + X^{(2)} + X^{(0)}) + 3X_n} \Rightarrow X_n = \frac{2X^{(1)} - (X^{(2)} + X^{(0)})}{3} = 0,0467 [p.u.]$$

El reactor también es un equipo, por lo que habrá que especificar su nivel de aislamiento y su potencia. Con respecto a lo primero, se debe calcular la máxima tensión a la que estará sometido durante el cortocircuito:

$$V_n = 3X_n \cdot I_{cc1\phi}^{(0)} = 0,2467 [p.u.] = 2,55 [kV_{fn}]$$

La potencia está dada por:

$$S_n = 3X_n (I_{cc1\phi}^{(0)})^2 = 0,4311 [p.u.] = 196,58 [MVA]$$

¿Por qué utilizar un reactor en vez de una resistencia?

Ya el estandar entrega indicios de que la solución con resistencias saldrá más cara, ya que el tamaño de este equipo debe ser tal que permita liberar en forma de calor la potencia del cortocircuito.

Como ejercicio, se deja propuesto repetir el cálculo anterior, pero esta vez considerando una resistencia. Se deberá concluir que el tamaño de la resistencia es mayor que el reactor, en términos de MVA.

Anexo A: Corrientes de cortocircuito

a) CC. Trifásico

Por tratarse de un caso balanceado, sólo interviene la malla de secuencia positiva. Luego, en todas las fases en el punto de falla se tendrá que:

$$I_{cc\ 3\phi} = -\frac{j}{X^{(1)}}$$

El número uno en estricto rigor es el valor de la fuente del equivalente de Thevenin del sistema, pero se suele aproximar por la unidad (tensión nominal)

b) CC. Monofásico a tierra

En este caso, las ecuaciones de Fortescue se resuelven considerando que las tres mallas de secuencia se conectan en serie. De esta forma:

$$I_a^{(1)} = I_a^{(2)} = I_a^{(0)} = -\frac{j}{X^{(1)} + X^{(2)} + X^{(0)}}$$

Utilizando la matriz de Fortescue se concluye que:

$$I_a = I_a^{(1)} + I_a^{(2)} + I_a^{(0)} = -\frac{j3}{X^{(1)} + X^{(2)} + X^{(0)}}, I_b = I_c = 0$$

c) CC. Bifásico

En este caso, las ecuaciones de Fortescue se resuelven considerando que la malla de secuencia positiva está en paralelo con la malla de secuencia negativa. De esta forma:

$$I_a^{(1)} = -I_a^{(2)} = -\frac{j}{X^{(1)} + X^{(2)}}, I_a^{(0)} = 0$$

Utilizando la matriz de Fortescue se concluye que:

$$I_a = 0, I_b = -I_c = (a - a^2) \frac{j}{X^{(1)} + X^{(2)}} = \frac{j\sqrt{3}}{X^{(1)} + X^{(2)}}$$

d) CC. Bifásico a tierra

En este caso, las ecuaciones de Fortescue se resuelven considerando que las tres mallas de secuencia están en paralelo. De esta forma:

$$I_a^{(1)} = -\frac{j}{X^{(1)} + \frac{X^{(2)}X^{(0)}}{X^{(2)} + X^{(0)}}} = -j \frac{X^{(2)} + X^{(0)}}{X^{(1)}X^{(2)} + X^{(1)}X^{(0)}}$$
$$I_a^{(2)} = -I_a^{(1)} \frac{X^{(0)}}{X^{(2)} + X^{(0)}}, I_a^{(0)} = -I_a^{(1)} \frac{X^{(2)}}{X^{(2)} + X^{(0)}}$$

Utilizando la matriz de Fortescue se concluye que:

$$I_a = 0$$

$$I_b = \frac{(a^2 - 1)X^{(2)} + (a^2 - a)X^{(0)}}{X^{(2)} + X^{(0)}} I_a^{(1)} = \frac{-\frac{3}{2}X^{(0)} - j\left(\frac{\sqrt{3}}{2}X^{(2)} + \sqrt{3}X^{(0)}\right)}{X^{(2)} + X^{(0)}} I_a^{(1)}$$

$$I_c = \frac{(a - 1)X^{(2)} + (a - a^2)X^{(0)}}{X^{(2)} + X^{(0)}} I_a^{(1)} = \frac{-\frac{3}{2}X^{(0)} + j\left(\frac{\sqrt{3}}{2}X^{(2)} + \sqrt{3}X^{(0)}\right)}{X^{(2)} + X^{(0)}} I_a^{(1)}$$

Anexo B: Sobre magnitudes físicas en los estudios de cortocircuito

En los estudios de régimen permanente de sistemas balanceados se utiliza la *base trifásica*, razón por la cual se están utilizando:

- Corrientes de fase
- Tensiones fase-fase

No obstante lo anterior, debemos tener presente que cuando se realiza un estudio de cortocircuito, las tensiones obtenidas son fase-neutro.

Tal vez esto pueda llevar a confusiones, ya que cuando se definen las bases para las impedancias y para las corrientes, en las expresiones se utiliza una tensión base fase-fase, por lo que se podría pensar que la tensión resultante en p.u. debe ser multiplicada exclusivamente por la esta base de tensión. Sin embargo, cuando se define una tensión base fase-fase automáticamente se está definiendo una tensión base fase-neutro, la cual se relaciona a través del "raíz de tres"

Para aclarar un poco más lo anterior, considérese que el resultado de un cálculo de tensión en un sistema balanceado fue de 1,05 [p.u.]. Esto significa que:

- La tensión fase-fase del sistema es un 5% superior a su valor nominal.
- La tensión fase-neutro del sistema es un 5% superior a su valor nominal.

De esta forma, en un unilineal cualquiera en por unidad con base trifásica común, se puede obtener en cualquier instante ya sea la tensión fase-neutro o fase-fase sólo con multiplicar por la base adecuada.

Con respecto a las tensiones en los neutros, si se desea tener el valor de la magnitud física se deberá multiplicar el resultado en por unidad por la tensión base fase-neutro. Para ver esto de mejor forma, considérese el siguiente sistema:

Sea $I^{(0)}$ la corriente de secuencia cero que circula por el neutro y Z la impedancia entre neutro y tierra. Sus valores en magnitudes físicas son:

$$I^{(0)} = I_{pu}^{(0)} \cdot \frac{S_{3\phi}}{\sqrt{3}V_{ff}}$$
$$Z = Z_{pu} \frac{V_{ff}^2}{S_{3\phi}}$$

Físicamente, la caída de tensión en la impedancia del neutro será:

En por unidad:

$$\Delta V_{n\ pu} = 3Z_{pu} I_{pu}^{(0)}$$

En Volt:

$$\Delta V_n = 3ZI^{(0)} = 3Z_{pu} \frac{V_{ff}}{S_{3\phi}} I_{pu}^{(0)} \cdot \frac{S_{3\phi}}{\sqrt{3}V_{ff}} = \left[3Z_{pu} I_{pu}^{(0)} \right] \frac{V_{ff}}{\underbrace{\sqrt{3}}_{V_{fn}}} = \Delta V_{n\ pu} V_{fn}$$

De esta forma, se puede ver que el resultado en Volt de la tensión de una impedancia en el neutro se obtiene multiplicando el resultado obtenido en por unidad en base trifásica por el voltaje base fase-neutro.

Con respecto a la potencia, se puede operar de manera similar:

En por unidad:

$$S_{n\ pu} = 3Z_{pu} \left(I_{pu}^{(0)} \right)^2$$

En MVA:

$$S_n = Z \left(3I^{(0)} \right)^2 = Z_{pu} \frac{V_{ff}^2}{S_{3\phi}} \frac{3}{\sqrt{3}} \cdot I_{pu}^{(0)} \cdot \frac{S_{3\phi}}{\sqrt{3} V_{ff}^2} = \left[3Z_{pu} \left(I_{pu}^{(0)} \right)^2 \right] S_{3\phi} = S_{n\ pu} S_{3\phi}$$

De esta forma, se puede ver que el resultado en MVA de la potencia aparente de una impedancia en el neutro se obtiene multiplicando el resultado obtenido en por unidad en base trifásica por la potencia base trifásica.