

Cálculo de Corrientes de Cortocircuito en Baja Tensión

Prof. Claudio González Cruz

Año Académico : P'2001

Generalidades

Dentro del dimensionamiento de protecciones, conductores o juegos de barras de una red eléctrica interior, uno de los parámetros de importancia a determinar es el nivel de la corriente de cortocircuito que se estaría presentando en distintos puntos del sistema.

La corriente de cortocircuito calculada dentro del diseño de un sistema eléctrico interior, define el mínimo valor de capacidad de ruptura que deben tener los elementos involucrados en la falla de cortocircuito, para que sean capaz de soportarlos, y en el caso de las protecciones termomagnéticas y fusibles, también despejarlos.

En general, entre las múltiples metodologías de cálculo de corrientes de cortocircuitos, las más difundidas son el método de las componentes simétricas según el estándar ANSI/IEEE (norte americano), y el método de la impedancia según el estándar europeo IEC (IEC 909-1 e IEC 909-2).

El presente apunte tiene como objetivo el explicar una simplificación del método europeo (IEC), aplicado a instalaciones interiores, el que nos dará la respuesta de manera sencilla y eficaz, en la determinación de los niveles de cortocircuito en distintos puntos del sistema.

1.0 El Cortocircuito

Un cortocircuito es la desaparición intempestiva de la aislación relativa de dos conductores de tensión diferente (alimentados de la misma fuente), sin la interposición de una impedancia conveniente.

Las instalaciones eléctricas requieren siempre de la protección contra cortocircuitos dondequiera que exista esta falla. La corriente de cortocircuito se debe calcular en cada nivel de la instalación, con el propósito de determinar las características del equipo requerido para soportarla y/o eliminarla.

2.0 Amplitud de la Corriente de Cortocircuito

La amplitud de la corriente de cortocircuito depende fundamentalmente del momento en que la falla ocurra, de la duración, de la ubicación y la topología.

2.1 El Momento de Ocurrencia de la Falla

Dependiendo del momento en que se presenta la falla de cortocircuito, la corriente resultante puede adquirir dos amplitudes características, simétrica o asimétrica.

La corriente de cortocircuito resultante puede alcanzar una magnitud simétrica (semiciclos positivos y negativos de igual amplitud), si la falla ocurre en el instante en que la tensión de alimentación está pasando por su valor máximo.

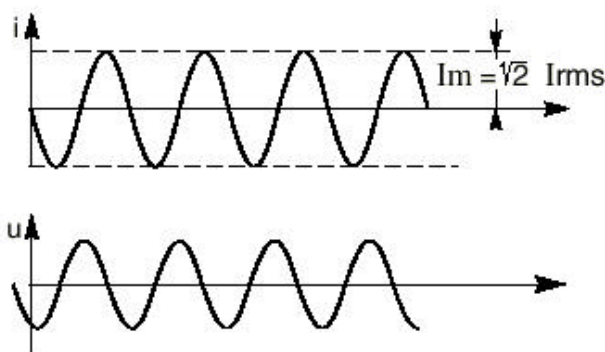


Figura 1 / Cortocircuito simétrico

Según la Figura 1, la amplitud máxima (I_m), de esta corriente es equivalente a raíz de dos veces el valor rms (I_{rms}). Normalmente los métodos de cálculo de corriente de cortocircuito entregan como solución a sus ecuaciones, corrientes simétricas de valores rms, las que en general son de menor amplitud (incluso al convertirlas en valores máximos), que las corrientes del tipo asimétricas. Estas corrientes se les llama de esta forma debido a que las amplitudes de sus semiciclos positivos y negativos son de distinto valor, es decir, la semionda alterna característica no es simétrica respecto al eje de coordenadas.

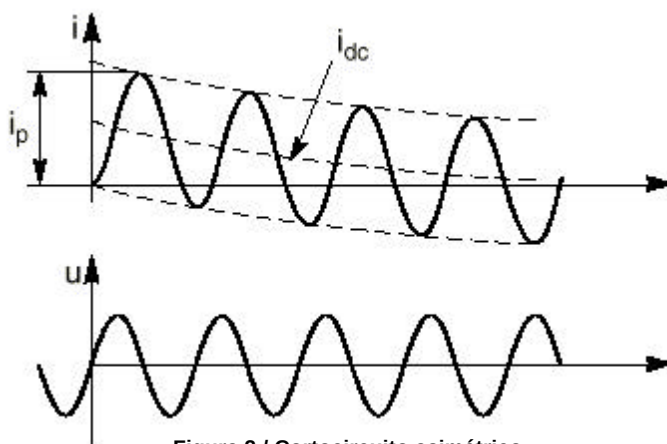


Figura 2 / Cortocircuito asimétrico

Este tipo de corrientes se presenta cuando la falla ocurre en el instante en que la tensión de alimentación del sistema, está pasando por su valor cero.

Como es imposible saber con certeza el momento en que la falla de cortocircuito se presentará en una instalación interior, los sistemas involucrados en el camino del cortocircuito se deberán dimensionar de modo que sean capaces de soportar el valor asimétrico (peor condición).

Tal como se mencionó anteriormente, los métodos de cálculo entregan valores simétricos, pero dentro del dimensionamiento del sistema deberemos trabajar con el valor asimétrico. Para convertir una corriente de cortocircuito simétrica en asimétrica, basta con multiplicar la primera con un factor de asimetría (*), el que está directamente relacionado con la componente continua (I_{dc}), que aparece en la Figura 2.

(*) La determinación y la forma de aplicación del factor de asimetría será descrito en el punto 5.0

2.2 La Duración de la Falla

En función de la duración de la falla (tiempo de existencia sin despeje por los órganos de protección), la corriente de cortocircuito puede presentar tres valores característicos, subtransiente, transiente y permanente.

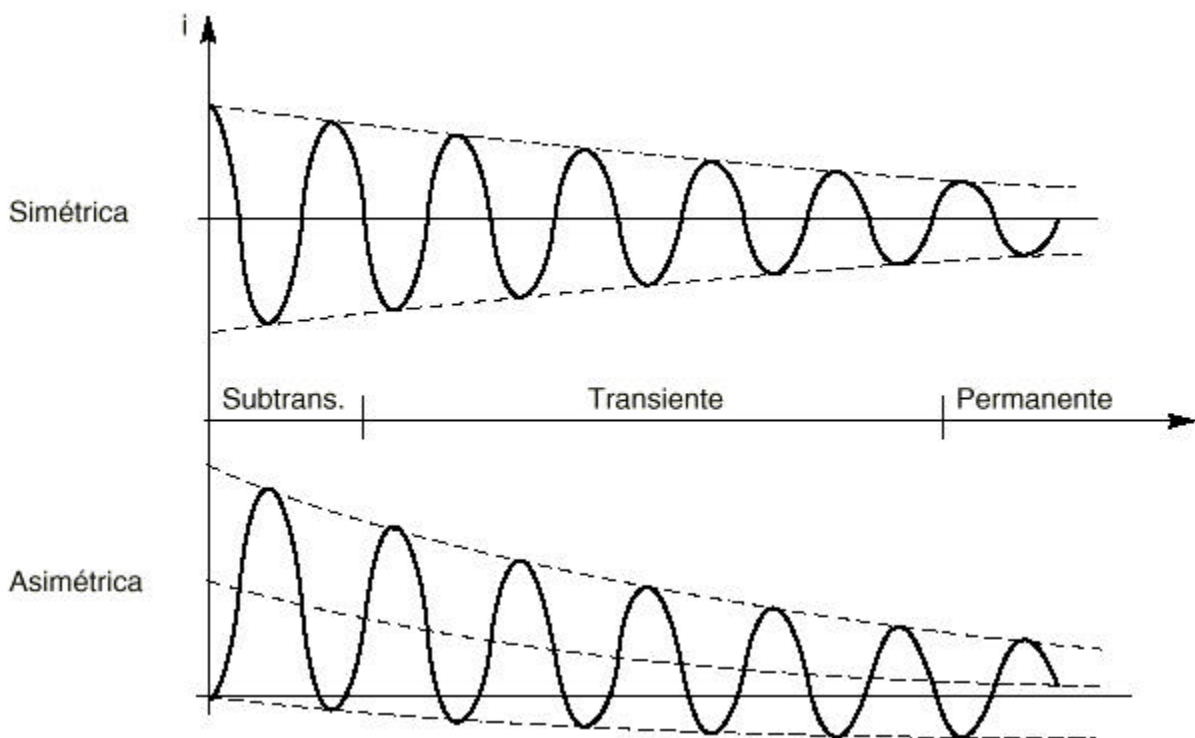


Figura 3 / Valores característicos de la corriente de cortocircuito

El estado subtransiente tiene una duración de no más de 0,1 segundos, el transiente entre 0,1 y 0,3 segundos y el estacionario se alcanza luego de transcurridos más de 0,3 segundos desde el inicio de la falla.

Tal como lo señala la Figura 3, una corriente de cortocircuito asimétrica, puede convertirse en simétrica, solo cuando la falla alcanza su estado permanente. Lamentablemente si el defecto permanece el tiempo necesario para alcanzar el estado simétrico, la instalación eléctrica se destruiría en prácticamente su totalidad.

Resulta claro pensar que la falla de cortocircuito es extremadamente destructiva, luego se debe eliminar en el menor tiempo posible.

En general, los dispositivos de protección contra corrientes de cortocircuito, están diseñados para abrir el circuito en un tiempo no superior a 10 ms (0,01 segundos), luego dentro del estudio de cortocircuito para determinar la capacidad de ruptura de los dispositivos, se deberá tomar el estado subtransiente de la corriente de defecto.

2.3 La Ubicación de la Falla

La amplitud de la corriente de cortocircuito desde el punto de vista del cálculo, esta dada en función de la ley de ohm, es decir, que la corriente es inversamente proporcional a la impedancia.

La impedancia de cortocircuito mayoritariamente esta dada por la impedancia de los conductores que se verían involucrados en el camino de circulación de la corriente, luego entre más cerca del transformador de alimentación se produzca el defecto, la impedancia de cortocircuito tendrá un valor menor que si la falla ocurriese en el punto más alejado de la fuente. En otras palabras, si la falla ocurre en las proximidades del transformador, la corriente de cortocircuito tendrá una amplitud mayor que si esta ocurriese en el punto más alejado.

2.4 La Topología de la Falla

Dependiendo de la topología de la red eléctrica, un cortocircuito puede alcanzar en general cuatro tipos de formas de ocurrencia.

- (a) Cortocircuito entre tres líneas de fase (trifásico)
- (b) Cortocircuito entre dos líneas de fase (bifásico)
- (c) Cortocircuito entre una línea de fase y el conductor neutro (monofásico a neutro)
- (d) Cortocircuito entre una línea de fase y el conductor de tierra (monofásico a tierra)

El cortocircuito trifásico evidentemente solo puede presentarse en redes trifásicas ya sea de tres o cuatro hilos. Su característica principal es la muy baja impedancia de línea que se estaría oponiendo a la corriente de falla.

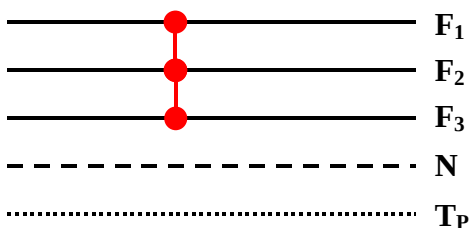


Figura 4 / Cortocircuito trifásico

El cortocircuito bifásico se puede presentar al igual que en el caso anterior, solo en redes del tipo trifásicas, pero su diferencia es que la impedancia de línea es mayor, y por lo tanto, la corriente de cortocircuito alcanzada es de menor amplitud que en el caso trifásico.

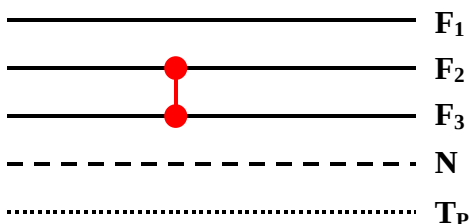


Figura 5 / Cortocircuito bifásico

El cortocircuito monofásico a neutro puede presentarse tanto en redes trifásicas de cuatro hilos como en sistemas monofásicos y es de menor amplitud (corriente), que los casos anteriores.

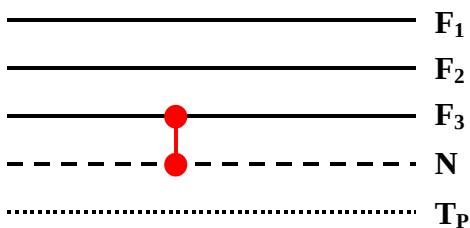


Figura 6 / Cortocircuito monofásico a neutro

El cortocircuito monofásico a tierra puede presentarse al igual que el anterior (monofásico a neutro), en redes trifásicas de cuatro hilos como en sistemas monofásicos. Su impedancia puede ser del mismo valor que en el caso de la falla monofásica a neutro, siempre y cuando el régimen de neutro sea del tipo TNC. Si el sistema de neutro es el tipo TT, la falla alcanzada será de menor valor debido a que la impedancia del sistema es alta (se debe considerar la puesta a tierra de protección y servicio).

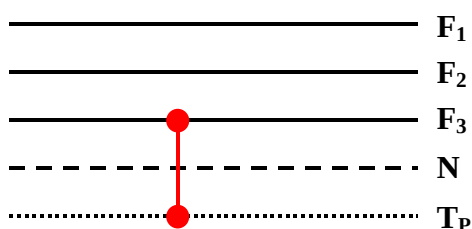


Figura 7 / Cortocircuito monofásico a tierra

3.0 Elementos Constituyentes del Sistema en Falla

El sistema eléctrico de análisis para el establecimiento de las corrientes de cortocircuito, en general, esta compuesto de dos elementos:

- (a) Elemento fuente
- (b) Elemento carga

3.1 Elemento Fuente

El elemento fuente para el estudio del cortocircuito en redes interiores está compuesto por la red eléctrica de alimentación externa (sistema en media tensión), y el transformador particular del cliente en el caso de que sea del tipo alta tensión. En el caso de las instalaciones de baja tensión, el sistema esta compuesto por la red de alimentación externa en media tensión, y el transformador de distribución más próximo al empalme del cliente.

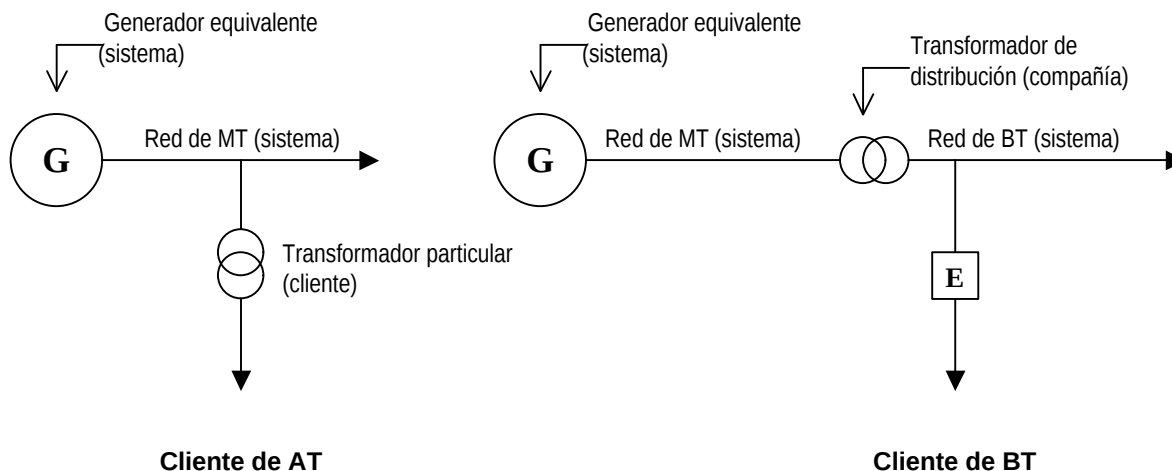


Figura 8 / Componentes del elemento fuente

Si analizamos los esquemas anteriores, y los representamos como impedancias participantes en la falla de cortocircuito, tendríamos lo siguiente:

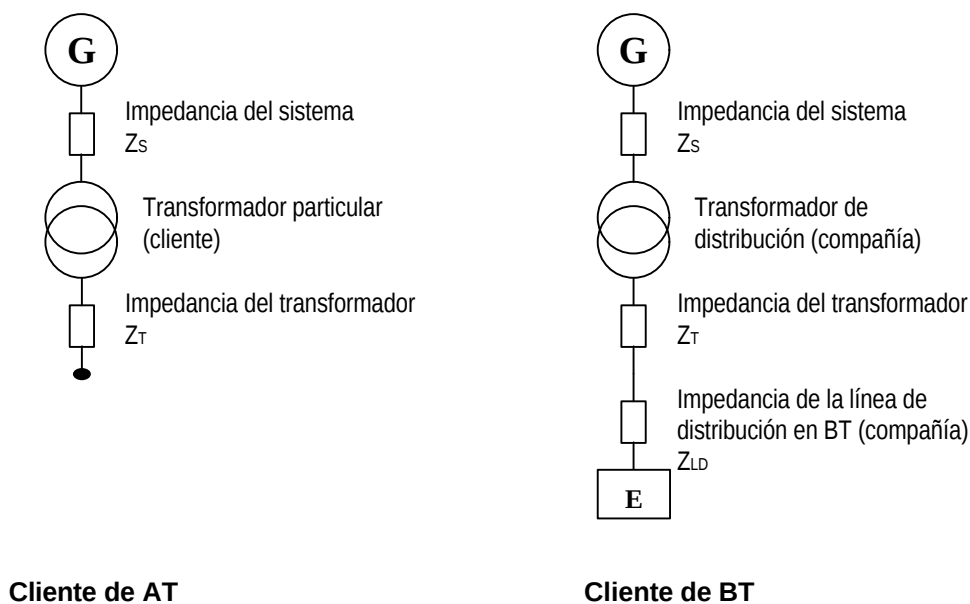


Figura 9 / Impedancias del elemento fuente

La impedancia del sistema (Z_s) se determina tanto para el caso de clientes en alta como en baja tensión, por medio de la siguiente ecuación:

$$Z_s = \frac{U^2}{1000 \times P_{cc}} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

Z_s : Impedancia del sistema ($m\Omega$)
 U : Tensión de línea del sistema (kV)
 P_{cc} : Potencia de cortocircuito del sistema (MVA)

La tensión de línea del sistema en nuestro caso, es el nivel de tensión de la red de distribución de la compañía concesionaria del sector de ubicación del proyecto de cálculo (media tensión).

La potencia de cortocircuito del sistema es un dato que se le solicita a la compañía eléctrica, la que normalmente no lo entrega. Con esta condición, y pensando en la simplificación del método de cálculo, se recomienda considerar que la potencia de cortocircuito tiene un valor infinito, luego entonces la impedancia del sistema sería igual a cero.

$$Z_s = \frac{U^2}{1000 \times P_{cc}}, \text{ si } : P_{cc} \rightarrow \infty \Rightarrow Z_s = 0$$

Según lo anterior, los esquemas representativos serían:

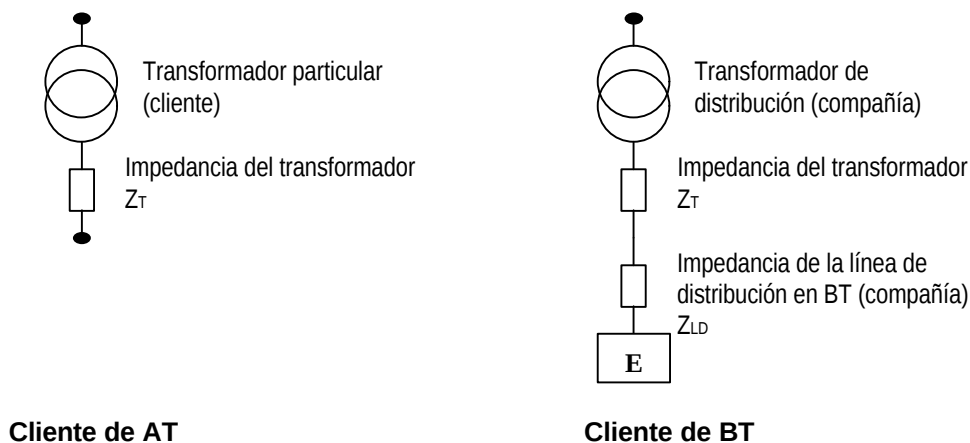


Figura 10 / Impedancias del elemento fuente (simplificado)

Para el caso de los clientes de baja tensión, la impedancia de las líneas de distribución de la compañía es dificultoso determinarla, luego se aconseja que se considere que el empalme eléctrico de la instalación interior, está ubicado directamente en los bornes del secundario del transformador de la compañía. Según esto, los esquemas finales serían los siguientes:

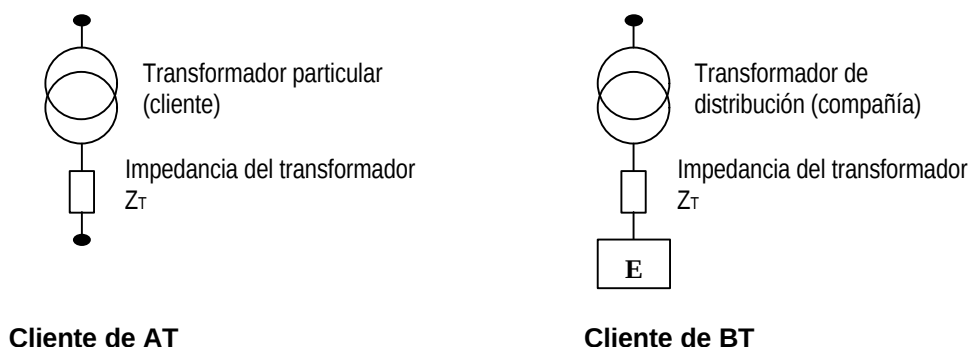


Figura 11 / Impedancias del elemento fuente (simplificado para clientes de baja tensión)

La impedancia del transformador, ya sea particular o de distribución, se determina por medio de la siguiente expresión:

$$Z_T = \frac{Z\%}{100} \times \frac{U_L^2}{S_T} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

- Z_T : Impedancia del transformador ($m\Omega$)
- $Z\%$: Impedancia porcentual de cortocircuito del transformador (%)
- U_L : Tensión entre fases del secundario del transformador (V)
- S_T : Potencia nominal del transformador (kVA)

La impedancia porcentual de cortocircuito del transformador, es un dato entregado por el fabricante, ya sea en la placa característica de la máquina o bien en su catálogo o ficha técnica.

Lamentablemente la impedancia porcentual en el caso de los clientes de baja tensión, es prácticamente imposible de obtener, debido a la dependencia de estos, del transformador de distribución de la compañía eléctrica.

En el caso de desconocer la impedancia porcentual, se pueden utilizar los siguientes valores indicados en la tabla siguiente, con un margen de error aceptable:

Tabla 1
Impedancias porcentuales típicas de transformadores

Rango de potencia (kVA)	Z%
$5 \leq S_T \leq 100 \text{ kVA}$	3,5%
$100 < S_T \leq 400 \text{ kVA}$	4,0%
$400 < S_T \leq 1000 \text{ kVA}$	4,6%
$S_T > 1000 \text{ kVA}$	5,0 %

La potencia del transformador en el caso de empalmes de alta tensión (transformador particular), es un dato que lógicamente se conoce, debido a que es parte del trabajo del diseñador y/o calculista del sistema eléctrico determinar su capacidad.

En el caso de clientes con empalmes en baja tensión, la potencia del transformador de distribución de la compañía eléctrica, es un dato que normalmente no se conoce, luego se recomienda asumir una potencia de 150 (kVA) en el caso de instalaciones unifamiliares, y 300 (kVA) para edificios colectivos.

Dentro del método de cálculo, se pide sumar las impedancias involucradas en el sistema, pero como sabemos, no se pueden sumar coordenadas polares de distinto ángulo en forma lineal, por lo tanto, se deberá descomponer la impedancia del transformador en sus componentes reales e imaginarias.

La componente real de la impedancia del transformador, se determina por medio de la siguiente expresión:

$$R_T = \frac{P_{CU} \times U_L^2}{1000 \times S_T^2} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

- R_T : Resistencia del transformador (m Ω)
- P_{CU} : Pérdidas en el cobre del transformador (W)
- U_L : Tensión entre fases del secundario del transformador (V)
- S_T : Potencia nominal del transformador (kVA)

La pérdida en el cobre del transformador es un dato que debería conocerse por medio de la ficha técnica o catálogo del fabricante de la máquina. Lamentablemente en la práctica, este dato es normalmente desconocido, luego para conocerlo (en ausencia del dato del fabricante), se recomienda utilizar la siguiente información:

Tabla 2
Pérdidas en el cobre típicas de transformadores

Rango de potencia (kVA)	P_{CU} (W)
5 ≤ S _T ≤ 100 kVA	600
100 < S _T ≤ 400 kVA	2200
400 < S _T ≤ 1000 kVA	4300
S _T > 1000 kVA	5000

La reactancia del transformador (componente imaginaria), se determina por medio de la siguiente expresión:

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

- X_T : Reactancia del transformador (mΩ)
- Z_T : Impedancia del transformador (mΩ)
- R_T : Resistencia del transformador (mΩ)

3.2 Elemento Carga

Como elemento carga, vamos a considerar a todos los dispositivos al interior de la instalación que estarían participando en el camino de circulación de la corriente de falla.

Uno de los elementos que evidentemente participan en el camino de circulación de la corriente de falla son los conductores. Cada conductor en función de sus características, presentará una determinada resistencia y reactancia a la corriente de cortocircuito.

La resistencia de un conductor se determina por medio de la siguiente expresión:

$$R_c = \frac{\rho_{cc} \times L_c}{S_c} \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

- R_c : Resistencia del conductor ($m\Omega$)
- ρ_{cc} : Resistividad del material a la temperatura del cortocircuito ($m\Omega \times mm^2/m$)
- L_c : Longitud del conductor (m)
- S_c : Sección del conductor (mm^2)

La resistividad del material que normalmente es de cobre, se debe trabajar en función de la elevación de temperatura producida por la circulación de la corriente de cortocircuito durante el tiempo de extinción de la falla.

Como se indico en párrafos anteriores, el tiempo de operación máxima de las protecciones termomagnéticas en presencia de un cortocircuito es de 10 (ms). Por ensayos se ha determinado que durante este tiempo la temperatura en el conductor involucrado puede alcanzar aproximadamente 82,5°C.

La resistividad de un conductor es dependiente de la variación de la temperatura en forma lineal, es decir, si la temperatura aumenta la resistividad también se eleva. En general, la resistividad de los conductores de cobre a 20°C es de 0,018 ($\Omega \times mm^2/m$), o expresada en un submúltiplo tendremos un valor de 18 ($m\Omega \times mm^2/m$). La tarea entonces es determinar la resistividad del cobre a una temperatura de 82,5 °C.

La resistividad del material esta determinada por el concepto de la ecuación de la recta, la cual tiene la estructura indicada en la página siguiente (Figura 12).

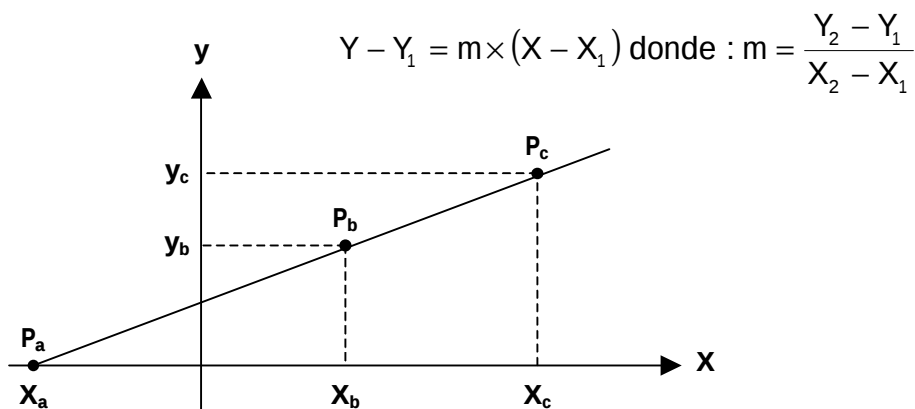
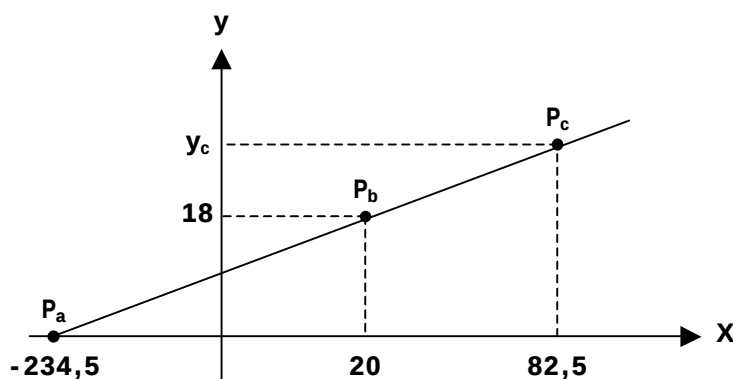


Figura 12 / Modelo representativo de la ecuación de la recta

De la gráfica anterior conocemos los siguientes datos:

- X_a : Temperatura a la cual el conductor presenta una resistividad nula ($-234,5^{\circ}\text{C}$)
- X_b : Temperatura ambiente inicial (20°C)
- Y_b : Resistividad del cobre para X_1 ($18 \text{ m}\Omega \times \text{mm}^2/\text{m}$)
- X_c : Temperatura ambiente final ($82,5^{\circ}\text{C}$)

Según los datos anteriores la gráfica de la Figura 12, tomaría la siguiente asignación de coordenadas:



La pendiente “m” se determina por el uso de las coordenadas de $P_a (-234,5 ; 0)$ y $P_b (20;18)$, por lo tanto:

$$m = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} = \frac{18 - 0}{20 - (-234,5)} = \frac{18}{20 + 234,5} = \frac{18}{254,5} = 71,73 \times 10^{-3}$$

Conocida la pendiente, podemos determinar el valor de la coordenada Y_c la que nos representa la resistividad del cobre a la temperatura de $82,5^\circ\text{C}$, por medio de la siguiente expresión:

$$Y_c - Y_b = m \times (X_c - X_b)$$

Si :

$Y_c = \rho_f$: Resistividad final a $82,5^\circ\text{C}$ ($\text{m}\Omega \times \text{mm}^2/\text{m}$)

$Y_b = \rho_i$: Resistividad inicial a 20°C ($\text{m}\Omega \times \text{mm}^2/\text{m}$)

$X_c = t_f$: Temperatura final ($^\circ\text{C}$)

$X_b = t_i$: Temperatura inicial ($\text{m}\Omega \times \text{mm}^2/\text{m}$)

$$\rho_f - \rho_i = m \times (t_f - t_i)$$

Despejando para ρ_f :

$$\rho_f = [m \times (t_f - t_i)] + \rho_i$$

Finalmente :

$$\rho_f = [m \times (t_f - t_i)] + \rho_i$$

$$\rho_f = [71,73 \times 10^{-3} \times (82,5 - 20)] + 18$$

$$\rho_f = 22,5 \text{ m}\Omega \times \text{mm}^2/\text{m}$$

La reactancia de los conductores de cobre depende de la siguiente expresión:

$$X_c = k \times L_c \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

- X_c : Reactancia del conductor ($m\Omega$)
 k : Constante que depende del tipo de conductor
($k=0,12$ para unipolares)
($k=0,08$ para multipolares)
 L_c : Longitud del conductor (m)

4.0 Amplitud Simétrica de la Corriente de Falla

La amplitud simétrica de la corriente de falla esta dada en función de los elementos que intervienen en el camino de circulación del cortocircuito, y es representada por la ley de ohm.

Las expresiones que nos permiten determinar esta amplitud simétrica son:

(a) Cortocircuito trifásico

$$I_{CCS3\phi} = \frac{U_L}{\sqrt{3} \times (Z_T + Z_{LF})} \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde:

- $I_{CCS3\phi}$: Corriente de cortocircuito simétrica trifásica (kA)
 U_L : Tensión de línea (V)
 Z_T : Impedancia del transformador ($m\Omega$)
 Z_{LF} : Impedancia de la línea de fase ($m\Omega$)

(b) Cortocircuito bifásico

$$I_{CCS2\phi} = \frac{U_L}{2 \times (Z_T + Z_{LF})} \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde:

$I_{CCS2\phi}$: Corriente de cortocircuito simétrica bifásica (kA)
 U_L : Tensión de línea (V)
 Z_T : Impedancia del transformador (mΩ)
 Z_{LF} : Impedancia de la línea de fase (mΩ)

(c) Cortocircuito monofásico a neutro

$$I_{CCS1\phi N} = \frac{U_L}{\sqrt{3} \times (Z_T + Z_{LF} + Z_{LN})} \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde:

$I_{CCS1\phi N}$: Corriente de cortocircuito simétrica monofásica a neutro (kA)
 U_L : Tensión de línea (V)
 Z_T : Impedancia del transformador (mΩ)
 Z_{LF} : Impedancia de la línea de fase (mΩ)
 Z_{LN} : Impedancia de la línea de neutro (mΩ)

(d) Cortocircuito monofásico a tierra en sistema TNC

$$I_{CCS1\phi T} = \frac{U_L}{\sqrt{3} \times (Z_T + Z_{LF} + Z_{LT})} \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde:

$I_{CCS1\phi T}$: Corriente de cortocircuito simétrica monofásica a tierra (kA)
 U_L : Tensión de línea (V)
 Z_T : Impedancia del transformador (mΩ)
 Z_{LF} : Impedancia de la línea de fase (mΩ)
 Z_{LT} : Impedancia de la línea de tierra (mΩ)

(e) Cortocircuito monofásico a tierra en sistema TT

$$I_{CCS1\phi T} = \frac{U_L}{\sqrt{3} \times (Z_T + Z_{LF} + Z_{LT} + R_{TP} + R_{TS})} \quad (\text{Ec. 11})$$

Donde:

- $I_{CCS1\phi T}$: Corriente de cortocircuito simétrica monofásica a tierra (kA)
- U_L : Tensión de línea (V)
- Z_T : Impedancia del transformador ($m\Omega$)
- Z_{LF} : Impedancia de la línea de fase ($m\Omega$)
- Z_{LT} : Impedancia de la línea de tierra ($m\Omega$)
- R_{TP} : Resistencia de la puesta a tierra de protección ($m\Omega$)
- R_{TS} : Resistencia de la puesta a tierra de servicio ($m\Omega$)

5.0 Amplitud Asimétrica de la Corriente de Falla

La amplitud asimétrica de la corriente de falla depende del factor de potencia de cortocircuito que exista en el punto en donde se desea conocer la amplitud del cortocircuito.

$$\cos \phi_{cc} = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n R_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n X_i\right)^2}} \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde:

- $\cos \phi_{cc}$: Factor de potencia en el punto de falla
- R_i : Resistencia desde el transformador hasta el punto de falla ($m\Omega$)
- X_i : Reactancia desde el transformador hasta el punto de falla ($m\Omega$)

Conocido el factor de potencia de cortocircuito el paso siguiente es determinar el factor de asimetría por medio de la siguiente gráfica:

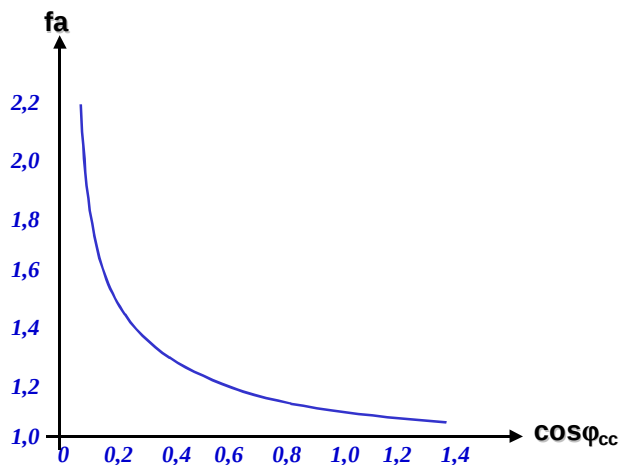


Figura 13 / Gráfica para la obtención del factor de asimetría

El factor de asimetría (f_a), que se obtiene de la gráfica anterior, se multiplica con la corriente de cortocircuito simétrica, y se obtiene por lo tanto, su valor asimétrico.

$$I_{CCA} = f_a \times I_{CCS} \quad (\text{Ec. 13})$$

Donde:

- I_{CCA} : Corriente de cortocircuito asimétrica (kA)
- f_a : Factor de asimetría
- I_{CCS} : Corriente de cortocircuito simétrica (kA)



Un Compromiso de los Empresarios de Chile

**INSTITUTO NACIONAL DE CAPACITACIÓN PROFESIONAL
ÁREA ELECTRICIDAD, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
SEDE COLON**

Cálculo de Corrientes de Cortocircuito en Baja Tensión

Prof. Claudio González Cruz

Referencias

- Cahier technique N° 158 "Calculation of short-circuit currents"
Schneider Electric
- Apuntes Curso "Seminario de Protecciones"
Depto. de Capacitación Legrand