

# Cálculo de la intensidad de cortocircuito con los cambios normativos

José Luis Rodríguez Espantoso y Pablo Zapico Gutiérrez

*Calculation of short circuit current with regulatory changes*

## RESUMEN

Con la entrada en vigor del actual reglamento electrotécnico para baja tensión, se hace necesario incluir en los cálculos la estimación de la corriente de cortocircuito prevista. Este cálculo se hará, como mínimo, en aquellos puntos donde existan protecciones eléctricas, con el fin de determinar, principalmente, el poder de corte mínimo que han de tener las protecciones magnetotérmicas. De esta forma, podrá asegurarse con suficiente fiabilidad, que las protecciones tendrán capacidad para desconectar de forma segura y adecuada, cuando por ellas circule la intensidad de cortocircuito.

Para estimar el valor de la corriente de cortocircuito, se presentan en este artículo dos métodos diferentes, uno denominado método de impedancias y el otro método en valores unitarios o en "por unidad". Estos dos métodos utilizan los mismos criterios, es decir: averiguar las impedancias existentes en el recorrido de la intensidad y aplicar la Ley de Ohm, pero utilizando expresiones matemáticas diferentes. Los dos métodos proporcionan los mismos resultados. De esta forma, el técnico, podrá escoger el método que le sea más cómodo.

Recibido: 8 de diciembre de 2010

Aceptado: 31 de marzo de 2011

## Palabras clave

Baja tensión, intensidad de corriente, cortocircuito, legislación, poder de corte

## ABSTRACT

*With the implementation of the current low-voltage electro-technical regulation, it is necessary to include in the calculations an estimate of the expected short-circuit current. This must be done at least at those points where there are electrical protections, in order to determine primarily the minimum breaking effect which the circuit breakers must have. In this way it can be reliably ensured that the protections will have the ability to disconnect safely and properly, when a short-circuit current flows through them.*

*To estimate the value of the short circuit current, two different methods are presented in this article, a method called impedance and the other method in unitary values or "by unit". These two methods use the same criteria, i.e., finding the impedances existing in the path of the current, and applying Ohm's Law, but using different mathematical expressions. The two methods give the same results. Thus, the technician can choose the one that is most convenient.*

Received: December 8, 2010

Accepted: March 31, 2011

## Keywords

Low voltage, current, short circuit, legislation, circuit breaking



Foto: Shutterstock

### Evolución del marco normativo

La promulgación del Real Decreto 3275/1982, de 12 de noviembre, por el que se aprobó el *Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en centrales eléctricas, subestaciones y centros de transformación*, introdujo en nuestra reglamentación la novedad de que las compañías eléctricas proporcionarán a sus clientes la intensidad de cortocircuito (o la potencia de cortocircuito) en el punto de entronque con su red de alta tensión. En la instrucción técnica MIE-RAT 19.4 se especifica que las compañías eléctricas tienen que entregar, entre otros, los siguientes datos: intensidad de cortocircuito trifásica y a tierra y tiempos máximos de desconexión en caso de defectos. Esto no se generalizó y muchas compañías proporcionaron, durante muchos años, unos valores tipo, lo que obligó a los proyectistas a utilizar, en muchos casos, y por defecto ante la falta de datos, el valor de 500 MVA expresado en la norma UNE 20099 (derogada) y la norma UNE 62271. Se trata de una potencia de cortocircuito máxima definida en dicha norma, más bien, como un referente tope para el diseño de las celdas frente a los posibles efectos electrodinámicos y térmicos que se puedan producir, que como dato de cálculo real para todas las instalaciones.

Sin embargo, la publicación del Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto, por el que se aprobó el *Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión*, establecía, en su artículo 15: “Las compañías suministradoras facilitarán los valores máximos previsibles de las potencias o corrientes de cortocircuito de sus redes de distribución, con el fin de que el proyectista tenga en cuenta este dato en sus cálculos”, generalizando el cálculo de cortocircuito en todos los suministros o, por lo menos, en los que se hace proyecto. Esto va a suponer que

se puedan dimensionar unas protecciones que hasta entonces se colocaban con una capacidad de corte se supone que “suficiente”, pero que no estaba calculada y a veces quedaba cubierta, a duras penas, por la capacidad de corte de los fusibles de cabecera de las centralizaciones de contadores de las compañías suministradoras.

Otro tema que no ha quedado previsto en el actual *Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión*, son las consecuencias de un cambio en la red de la compañía eléctrica y, por ende, de la potencia de cortocircuito de los usuarios existentes. En puridad técnica deberían adaptar sus equipos a los nuevos valores, sin que tampoco quede claro a quién le corresponde abonar dichos gastos. Esta situación puede obligar a sustituir los interruptores existentes, previstos para un poder de corte máximo determinado, por otros con una capacidad de apertura, en caso de cortocircuito, mayor. Es más, si nadie avisa de que se han producido modificaciones, se puede mantener una situación de peligro latente durante largos periodos de tiempo, sin que los usuarios sepan lo que está ocurriendo. El problema se producirá si sobreviene un cortocircuito y el interruptor no es capaz de despejarlo; mientras tanto no hay señal alguna de alarma.

El Real Decreto 223/2008, de 15 de febrero, por el que se aprueba el *Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión* y sus instrucciones técnicas complementarias ITC-LAT 01 a 09 deja el tema mucho más claro. Establece en su artículo 5 que el propietario de la instalación afectada pague las modificaciones y repita dichos costes contra el que realice la modificación de la misma y lo denomina “causante último de la modificación”. Esto es una novedad normativa en España, pues hasta ahora no se había estipulado reglamentariamen-

te en el sector eléctrico. En el caso de que se generalice para todas las tensiones, puede suponer una novedad muy importante.

Estos cambios normativos han llevado a que se generalice el cálculo del cortocircuito con valores reales, que ya responden a la configuración de la red de distribución en cada caso concreto.

Este trabajo pretende proporcionar una ayuda a los profesionales que realicen los precitados cálculos. Hay dos sistemas fundamentales para efectuar los cálculos comentados, el sistema de impedancias y el sistema denominado "por unidad". Se desarrollarán ambos y cada proyectista que escoja el que le resulte más sencillo.

**Cálculo por el sistema de impedancias**

Partimos de la potencia de cortocircuito  $S_{cc}$  (dato proporcionado por la compañía eléctrica en MVA) en el primario en media tensión. Este dato hay que pasarlo al secundario del transformador, para ello se aplica la fórmula 1:

$$X_{\alpha 2} = \frac{U_2^2}{10^6 S_{cc}}$$

Este resultado nos da el aporte primario de la potencia de cortocircuito reducido al secundario en  $\Omega$ .

Otro valor que hay que reducir al secundario es la impedancia de cortocircuito del transformador, que usualmente se nos proporciona en forma de porcentaje. Las tablas incluidas en el anexo III, proporcionan los valores normales de dicha tensión para transformadores de distribución en baño de aceite y secos con el secundario a 230/400 V y la tensión primaria que se indica. Para otros valores, aislamientos, potencias, tensiones o similares es necesario consultar los catálogos de los fabricantes y aplicar el procedimiento indicado en dicho anexo. (En las fórmulas cuando se incluye el subíndice 2 se está indicando que nos encontramos en el secundario del transformador.)

El aporte resistivo del transformador se calcula:

$$E_{Rcc2} = \frac{E_{Rcc}}{100} \frac{U_2^2}{10^3 S_n}$$

Y el aporte inductivo:

$$E_{Xcc2} = \frac{E_{Xcc}}{100} \frac{U_2^2}{10^3 S_n}$$

Ambos expresados en  $\Omega$ . Con estos datos ya podemos calcular el valor y los parámetros del cortocircuito en el punto A, aplicando:

$$Z_{A2} = \left[ \{(1) + (3)\}^2 + (2)^2 \right]^{1/2} = \left[ \{E_{Xcc2} + X_{\alpha 2}\}^2 + E_{Rcc2}^2 \right]^{1/2} \text{ en } \Omega.$$

$$I_{\alpha}(A) = \frac{U_2}{Z_{A2} \sqrt{3}} \text{ en amperios (valor simétrico).}$$

$$\cos\varphi_{\alpha}(A) = \frac{E_{Rcc2}}{Z_{A2}} \text{ cos}\varphi \text{ del cortocircuito en el punto A.}$$

Si queremos calcular el cortocircuito en el punto B de la figura 1, partimos de los datos que ya tenemos y añadimos a

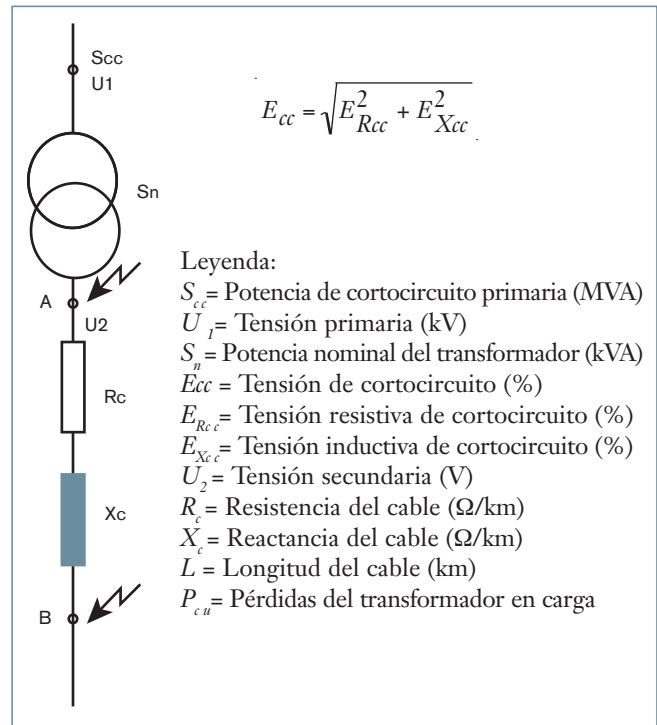


Figura 1. Esquema del circuito.

mayores la resistencia y reactancia del cable y volvemos a calcular la impedancia hasta el punto B de la siguiente forma:

$$X_{B2} = X_{\alpha 2} + E_{Xcc2} + X_c L$$

$$R_{B2} = E_{Rcc2} + R_c L$$

$$Z_{B2} = \left[ R_{B2}^2 + X_{B2}^2 \right]^{1/2}$$

$$I_{\alpha}(B) = \frac{U_2}{Z_{B2} \sqrt{3}} \text{ en amperios (valor simétrico).}$$

$$\cos\varphi_{\alpha}(B) = \frac{R_{B2}}{Z_{B2}} \text{ cos}\varphi \text{ del cortocircuito en el punto B.}$$

El valor del cortocircuito mínimo se puede calcular por la fórmula definida en la norma VDE 0102 y el coeficiente de la VDE 0118:

$$I_{cc\min}(B) = \frac{0,8 U_2}{2 Z_{B2}}$$

El factor 0,8 se introduce para compensar las impedancias anteriores a  $S_{cc}$  y otros elementos no considerados. Recordemos que en este caso estamos buscando un valor mínimo. La *Guía Técnica del Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión* también propone este método. La tensión que se debe utilizar es la tensión simple monofásica.

Para obtener el valor del cortocircuito mínimo, se ha utilizado la fórmula propuesta por las normas VDE 0102 y 0118 en lugar de la incluida en la *Guía Técnica del Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión*:

$$I_{cc\min} = \frac{0,8 U_2}{2 Z_2} \text{ (s/VDE 0102 y 0118)}$$

$$I_{cmin} = \frac{0,8U_2}{Z_2} \quad (\text{s/Guía Técnica del REBT, documento n° 22})$$

La fórmula propuesta por la norma VDE prevé un caso más desfavorable; cuando se busca el valor de cortocircuito mínimo, lo que se pretende es el más bajo posible y eso lo tienen mucho mejor resuelto las normas VDE, pues consideran el cortocircuito mínimo monofásico entre conductores. Con lo que se tiene que multiplicar por 2 el valor de la impedancia del circuito, al igual que se hace para calcular una caída de tensión monofásica.

El cortocircuito mínimo es interesante cuando se pretende saber si una protección magnetotérmica, con una curva determinada, desconectará, o no, el circuito ante un cortocircuito. Es decir, imaginemos un magnetotérmico monofásico de 25A de corriente asignada, con una curva de disparo tipo C. La indicación de curva C quiere decir que, el circuito magnético del interruptor interpretará claramente un cortocircuito cuando la corriente que lo atraviese sea mayor de 10 veces la corriente asignada. Como la protección es de 25 A, quiere decir que saltará de forma prácticamente instantánea cuando la corriente sea superior a 250 A. Si la corriente que lo atraviesa es inferior a 250 A, existirá la posibilidad de que se caliente excesivamente el cable, deteriorándose de esta forma el aislamiento, como consecuencia de la energía pasante.

En el caso de que existan motores de más de 50 CV conectados al mismo transformador, hay que considerar la aportación que realizan al cortocircuito de la siguiente forma (hasta 50 CV se considera despreciable, excepto en el caso de baterías de motores pequeños y cuya potencia total sea igual o superior a la indicada). También hay que tener en cuenta las baterías de condensadores.

### Ejemplo de cálculo por el sistema de impedancias

Según los datos, la empresa suministradora ha proporcionado la potencia de cortocircuito de la instalación de 15.000 V en el punto de entronque, cifrándola en  $S_{eq} = 21,5$  MVA, dato que se utilizará para realizar el cálculo de cortocircuito. Los demás datos se expresan a continuación:

$$U_1 = 15.000 \text{ V} \quad U_2 = 420 \text{ V}$$

$$S_n = 160 \text{ kVA} \quad E_{cc} = 4 \% \quad P_{cu} = 2.350 \text{ W}$$

Basándonos en el esquema de la figura 2, se calcula el aporte primario en  $\Omega$  en función de la potencia de cortocircuito.

$$X_{cc} = \frac{U_2^2}{10^6 * S_{cc}} = \frac{420^2}{10^6 * 21,5} = 8,2046 * 10^{-3} \Omega$$

El desglose de  $E_{cc}$  se realiza aplicando el procedimiento expuesto en el anexo V de este trabajo, se utiliza la expresión (15)

$$E_{Rcc} = \frac{P_{Cu}}{10S_n} = \frac{2350}{10 * 160} = 1,47\%$$

A continuación, y una vez hallado  $E_{Rcc}$ , obtener  $E_{Xcc}$  es muy simple aplicando la fórmula (16)

$$E_{Xcc} = \sqrt{E_{cc}^2 - E_{Rcc}^2} = \sqrt{4^2 - 1,47^2} = 3,72\%$$

Para hacer la reducción de  $E_{Xcc}$  al secundario, se aplica la expresión

$$E_{Rcc2} = \frac{E_{Rcc}}{100} \frac{U_2^2}{10^3 S_n} = \frac{1,47}{100} * \frac{420^2}{10^3 * 160} = 0,01620675 \Omega,$$

que arroja el aporte resistivo del transformador.

Para hallar el aporte inductivo del transformador se utiliza la igualdad.

$$E_{Xcc2} = \frac{E_{Xcc}}{100} \frac{U_2^2}{10^3 S_n} = \frac{3,72}{100} * \frac{420^2}{10^3 * 160} = 0,041013 \Omega$$

A continuación se usa la fórmula (4) para hallar la impedancia en el punto "A" que nos da el valor de la impedancia buscada en  $\Omega$ .

$$Z_{A2} = \left[ (X_{cc} + E_{Xcc})^2 + E_{Rcc}^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \\ = \left[ (0,0082046 + 0,041013)^2 + 0,01620675^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0,051817 \Omega$$

Para calcular la corriente de cortocircuito máximo en el punto "A" se utiliza la igualdad (5)

$$I_{cc}(A) = \frac{U_2}{\sqrt{3} * Z_{A2}} = \frac{420}{\sqrt{3} * 0,051817} = 4679,65 \text{ A},$$

de esta forma obtenemos la corriente de cortocircuito máximo en  $A_{eff}$  (valor simétrico).

A continuación, calcularemos el cortocircuito en el punto "B", teniendo en cuenta las características de los cables que se exponen en la tabla 1.

Tomamos:

$$L(2*25+CP) = 25 \text{ m}$$

$$L(4*70) = 70 \text{ m}$$

$$R_t = 0,037565 \Omega$$

$$X_t = 0,008098 \Omega$$

$$Z_{tc} = \left[ R_t^2 + X_t^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad Z_{tc} = 0,03842 \Omega \text{ (impedancia de los cables)}$$

La impedancia en el punto B será:

$$Z_B = \left| \vec{Z}_A + \vec{Z}_{tc} \right| = \left[ (0,0082046 + 0,041013 + 0,008098)^2 + \right. \\ \left. + (0,01620675 + 0,037565)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0,078590578 \Omega$$

Esta es la impedancia en el punto "B", para calcularla se han despreciado las impedancias del cable de alta tensión, las barras y los empalmes.

El cortocircuito máximo en el punto "B" será:

$$I_{cc}(B) = \frac{U_2}{\sqrt{3} * Z_B} = \frac{420}{\sqrt{3} * 0,078590578} = 3085,45 \text{ A}$$

(corriente de cortocircuito máximo en  $A_{eff}$  (valor simétrico).

Tabla 1. Valores de resistencia y reactancia de los conductores utilizados en el cálculo.

Conductor	R ( $\Omega$ /km)	X ( $\Omega$ /km)
2*25 mm <sup>2</sup> Cu	0,727	0,11
4*70 mm <sup>2</sup> Cu	0,277	0,0764

Lo que asegura el funcionamiento correcto de las protecciones contra cortocircuito.

Cortocircuito mínimo en el punto "B". Se calcula aplicando el procedimiento establecido en la norma VDE 0102 y el coeficiente de la VDE 0118.

$$I_{cc\ min}(B) = \frac{0,8 \cdot U_2}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot Z_B} = \frac{0,8 \cdot 420}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 0,078590578} = 1234,18A$$

(corriente de cortocircuito mínima en  $A_{eff}$ ).

Si hubiera mas conductores se procedería de igual manera, pero incrementando las impedancias de cada uno de ellos.

### Cálculo por el sistema de valores unitarios

Este método, también denominado método de valores unitarios, consiste en calcular las impedancias del circuito, tal como lo hace el método de impedancias.

La diferencia fundamental es cómo se resuelve el circuito, que será de forma adimensional, es decir, las magnitudes eléctricas (tensiones, impedancias, potencias, etc.) no tendrán unidades. Esto se consigue por medio de unos valores, denominados valores base. Para obtener una magnitud adimensional, o en valor por unidad, se divide el valor real de la magnitud por el valor base correspondiente, estando numerador y denominador con la misma escala y unidades.

Una vez resulta el circuito con valores adimensionales, para saber una magnitud en valor real, sólo será necesario multiplicar el valor unitario que tenga por el valor base correspondiente.

La mejor forma para entender el presente método es realizando un ejemplo. Por ello, realizaremos el mismo ejemplo de cálculo que el desarrollado en el método de impedancias y así se podrá comprobar que se llega al mismo resultado, pero por un método de cálculo diferente.

Antes de resolver el ejercicio, se considera adecuado presentar el procedimiento de cálculo, exponiendo las fórmulas matemáticas y definir las variables que intervienen.

Procedimiento de cálculo

1. Se determinan los valores base.

Solo será necesario determinarlos en el lado de secundario del transformador.

$$\begin{aligned} S_b &= S_n \\ U_b &= U_{2V} \\ Z_b &= \frac{U_b^2}{S_b} = \frac{U_{2V}^2}{S_n} \\ I_b &= \frac{S_b}{\sqrt{3} \cdot U_b} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{2V}} \end{aligned}$$

Donde:

$S_b$  = Potencia aparente base (VA)

$S_n$  = Potencia aparente nominal del transformador (VA)

$U_b$  = Tensión base (V)

$U_{2V}$  = Tensión de línea en el secundario, en vacío (V)

$Z_b$  = Impedancia base ( $\Omega$ )

$I_b$  = Intensidad base de secundario del transformador (A)

2. Se calcula la impedancia del sistema.

La impedancia del sistema representa la impedancia equivalente de la red de media tensión de donde proviene la línea eléctrica que alimenta el transformador de nuestra instalación.

$$Z_{s\ pu} = \frac{S_b}{S_{cc}}; \quad X_{s\ pu} = Z_{s\ pu}$$

Donde:

$Z_{s\ pu}$  = Impedancia del sistema, en valor por unidad

$S_b$  = Potencia aparente base (VA)

$S_{cc}$  = Potencia aparente de cortocircuito (VA)

$X_{s\ pu}$  = Reactancia inductiva del sistema, en por unidad

3. Se calcula la impedancia del transformador.

Se calculará tanto la parte real (resistiva) como la parte imaginaria (reactancia inductiva) de la impedancia de cortocircuito del transformador.

Parte resistiva:

$$R_{tr\ pu} = \frac{P_{cu}}{S_b}$$

Donde:

$R_{tr\ pu}$  = Resistencia del transformador, en por unidad

$P_{cu}$  = Perdidas en carga por efecto Joule (W)

$S_b$  = Potencia aparente base (VA)

Parte inductiva:

$$X_{tr\ pu} = \sqrt{\left(\frac{E_{cc}}{100}\right)^2 - R_{tr\ pu}^2}$$

Donde:

$X_{tr\ pu}$  = Reactancia inductiva del transformador, expresada por unidad

$E_{cc}$  = Tensión de cortocircuito del transformador (%)

$R_{tr\ pu}$  = Resistencia del transformador, en por unidad

4. Se calcula la impedancia de las líneas eléctricas aguas abajo del transformador.

Se calculará tanto la parte real (resistiva) como la parte imaginaria (reactancia inductiva) de la impedancia.

Parte resistiva:

$$R_{c\ pu} = L \cdot \left[ \frac{rc \cdot S_b}{U_b^2} \right]$$

Donde:

$R_{c\ pu}$  = Resistencia del conductor, por unidad

$L$  = Longitud del conductor (m)

$rc$  = Resistencia eléctrica del conductor ( $\Omega/m$ )

Si no se tienen tablas de fabricante, puede utilizarse la siguiente fórmula:

$$rc = \frac{\rho}{s}$$

Donde

$\rho$  = coeficiente de resistividad a 20 °C ( $\Omega \cdot mm^2/m$ )

$s$  = sección del conductor ( $mm^2$ )

$S_b$  = Potencia aparente base (VA)

$U_b$  = Tensión base (V)

Parte inductiva:

$$X_{c\ pu} = L \cdot \left[ \frac{xc \cdot S_b}{U_b^2} \right]$$

Donde:

$X_{c\ pu}$  = Reactancia inductiva del conductor, por unidad

$L$  = Longitud del conductor (m)

$xc$  = reactancia eléctrica del conductor ( $\Omega/m$ )

Si no se tienen tablas de fabricante, puede considerarse valor aproximado  $0,00009 \Omega/\text{m}$ .

$S_b$  = Potencia aparente base (VA)

$U_b$  = Tensión base (V)

5. Se calcula la impedancia total del circuito

Resistencia total:

$$R_{cc_{pu}} = R_{tr_{pu}} + R_{c_{pu}}$$

Donde:

$R_{cc_{pu}}$  = Resistencia total de cortocircuito, en por unidad.

$R_{tr_{pu}}$  = Resistencia del transformador, en por unidad.

$R_{L_{pu}}$  = Resistencia del conductor, en por unidad. Si hay varios conductores, se añadirán todas las resistencias parciales.

Reactancia total:

$$X_{cc_{pu}} = X_{s_{pu}} + X_{tr_{pu}} + X_{c_{pu}}$$

Donde:

$X_{cc_{pu}}$  = Reactancia total de cortocircuito, por unidad.

$X_{s_{pu}}$  = Reactancia inductiva del sistema, por unidad.

$X_{tr_{pu}}$  = Reactancia del transformador, por unidad.

$X_{c_{pu}}$  = Reactancia del conductor, por unidad. Si hay varios conductores, se añadirán todas las reactancias parciales.

Impedancia total:

$$Z_{cc_{pu}} = \sqrt{R_{cc_{pu}}^2 + X_{cc_{pu}}^2}$$

Donde:

$Z_{cc_{pu}}$  = Impedancia total cortocircuito, por unidad.

$R_{cc_{pu}}$  = Resistencia total de cortocircuito, por unidad.

$X_{cc_{pu}}$  = Reactancia total de cortocircuito, por unidad.

6. Cálculo de la intensidad de cortocircuito trifásico.

Primero se calcula la  $I_{cc}$  expresada por unidad:

$$I_{cc_{3p_{pu}}} = \frac{U_{pu}}{Z_{cc_{pu}}} = \frac{U_{2V}/U_b}{Z_{cc_{pu}}} = \frac{1}{Z_{cc_{pu}}}$$

Donde:

$I_{cc_{3p_{pu}}}$  = Intensidad de cortocircuito trifásico, por unidad.

$U_{pu}$  = Tensión, por unidad.

$Z_{cc_{pu}}$  = Impedancia total de cortocircuito, por unidad.

Cálculo de la  $I_{cc}$  en valor real:

$$I_{cc_{3p}} = I_{cc_{3p_{pu}}} \cdot I_b$$

Donde:

$I_{cc_{3p}}$  = Intensidad de cortocircuito trifásico (A).

$I_{cc_{3p_{pu}}}$  = Intensidad de cortocircuito trifásico, por unidad.

$I_b$  = Intensidad base (A).

7. Cálculo de la intensidad de cortocircuito mínima.

Primero se calcula la  $I_{cc}$  por unidad:

$$I_{cc_{MIN_{pu}}} = \frac{0,8 \cdot U_{pu}}{2 \cdot Z_{cc_{pu}}}$$

Donde:

$I_{cc_{MIN_{pu}}}$  = Intensidad mínima de cortocircuito, expresada por unidad.

$U_{pu}$  = Tensión, por unidad.

$Z_{cc_{pu}}$  = Impedancia total de cortocircuito, por unidad.

Cálculo de la  $I_{cc}$  en valor real:

$$I_{cc_{min}} = I_{cc_{MIN_{pu}}} \cdot I_b$$

Donde:

$I_{cc_{min}}$  = Intensidad de cortocircuito mínima (A).

$I_{cc_{MIN_{pu}}}$  = Intensidad mínima de cortocircuito, por unidad.

$I_b$  = Intensidad base (A).

### Ejemplo de cálculo por el sistema de valores unitarios

Recordatorio de los datos del ejemplo desarrollado anteriormente:

$S_{cc} = 21,5 \text{ MVA}$ .

$S_n = 160 \text{ kVA}$ ,

$E_{cc} = 4 \%$ .

$P_{cu} = 2.350 \text{ W}$ .

$U_{2V} = 420 \text{ V}$ .

$L1 = 4 \times 25 \text{ mm}^2$ ; 25 m;  $r_c = 0,727 \Omega/\text{km}$ ;  $x_c = 0,110 \Omega/\text{km}$ .

$L2 = 4 \times 70 \text{ mm}^2$ ; 70 m;  $r_c = 0,277 \Omega/\text{km}$ ;  $x_c = 0,0764 \Omega/\text{km}$ .

Determinar la corriente de cortocircuito en el punto A (salida del transformador) y la corriente de cortocircuito en el punto B (al final de los conductores conectados al transformador).

Solución:

1. Se determinan los valores base:

$$S_b = S_n = 160.000 \text{ VA}$$

$$U_b = U_{2V} = 420 \text{ V}$$

$$Z_b = \frac{U_b^2}{S_b} = \frac{420^2}{160.000} = 1,1025 \Omega$$

$$I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3} \cdot U_b} = \frac{160.000}{\sqrt{3} \cdot 420} = 219,943 \text{ A}$$

2. Se calcula la impedancia del sistema:

$$X_{s_{pu}} = \frac{S_b}{S_{cc}} = \frac{160.000}{21.500.000} = 0,00744186$$

3. Se calcula la impedancia del transformador:

$$R_{tr_{pu}} = \frac{P_{cu}}{S_b} = \frac{2.350}{160.000} = 0,0146875$$

$$X_{tr_{pu}} = \sqrt{\left(\frac{E_{cc}}{100}\right)^2 - R_{tr_{pu}}^2} = \sqrt{\left(\frac{4}{100}\right)^2 - \left(\frac{2.350}{160.000}\right)^2} = 0,03720588$$

4. Se calcula la impedancia hasta el punto A:

$$R_{cc_{pu}}(A) = R_{tr_{pu}} = 0,0146875$$

$$X_{cc_{pu}}(A) = X_{s_{pu}} + X_{tr_{pu}} = 0,04464774$$

$$Z_{cc_{pu}}(A) = \sqrt{R_{cc_{pu}}(A)^2 + X_{cc_{pu}}(A)^2} = 0,04700152$$

5. Se calcula la intensidad de cortocircuito trifásico en el punto A:

$$I_{cc_{3p_{pu}}}(A) = \frac{U_{pu}}{Z_{cc_{pu}}(A)} = \frac{1}{0,04700152} = 21,2759$$

$$I_{cc_{3p}}(A) = I_{cc_{3p_{pu}}}(A) \cdot I_b = 21,2759 \cdot 219,943 = 4.679,48 \text{ A}$$

6. Se calcula la impedancia de los conductores:

Cable de  $25 \text{ mm}^2$

$$Rc_{25_{pu}} = L \cdot \left[ \frac{rc \cdot Sb}{Ub^2} \right] = 25 \cdot \left[ \frac{0,000727 \cdot 160.000}{420^2} \right] = 0,01648529$$

$$Xc_{25_{pu}} = L \cdot \left[ \frac{xc \cdot Sb}{Ub^2} \right] = 25 \cdot \left[ \frac{0,000110 \cdot 160.000}{420^2} \right] = 0,00249433$$

$$Rc_{70_{pu}} = L \cdot \left[ \frac{rc \cdot Sb}{Ub^2} \right] = 70 \cdot \left[ \frac{0,000277 \cdot 160.000}{420^2} \right] = 0,0175873$$

Cable de 70 mm<sup>2</sup>

$$Xc_{70_{pu}} = L \cdot \left[ \frac{xc \cdot Sb}{Ub^2} \right] = 70 \cdot \left[ \frac{0,0000764 \cdot 160.000}{420^2} \right] = 0,00485079$$

7. Se calcula la impedancia total hasta el punto B:

$$Rcc_{pu}(B) = Rtr_{pu} + Rc_{25_{pu}} + Rc_{70_{pu}} = 0,04876006$$

$$Xcc_{pu}(B) = Xs_{pu} + Xtr_{pu} + Xc_{25_{pu}} + Xc_{70_{pu}} = 0,05199286$$

$$Zcc_{pu}(B) = \sqrt{Rcc_{pu}(B)^2 + Xcc_{pu}(B)^2} = 0,07127974$$

8. Se calcula la intensidad de cortocircuito trifásico en el punto B:

$$Icc_{3p_{pu}}(B) = \frac{U_{pu}}{Zcc_{pu}(B)} = \frac{1}{0,07127924} = 14,0293$$

$$Icc_{3p}(B) = Icc_{3p_{pu}}(B) \cdot Ib = 14,0293 \cdot 219,943 = 3.085,64 A$$

9. Se calcula la intensidad de cortocircuito mínimo en el punto B:

$$Icc_{MIN_{pu}}(B) = \frac{0,8 \cdot U_{pu}}{2 \cdot Zcc_{pu}} = \frac{0,8 \cdot 1}{2 \cdot 0,07127924} = 5,6117$$

$$Icc_{min}(B) = Icc_{MIN_{pu}}(B) \cdot Ib = 5,6117 \cdot 219,943 = 1.234,25 A$$

Como puede comprobarse, salvo diferencias por considerar un decimal más o un decimal menos en los cálculos, los resultados son los mismos, tanto por el método de las impedancias como por el método de valores por unidad. Ahora el profesional puede escoger el sistema que le resulte más sencillo.

### Anexo I

Se incluyen a continuación las tablas 2, 3 y 4 extraídas del catálogo de media tensión de Prismyan, por su utilidad a la hora de encontrar los valores de resistencia y reactancia de los conductores de media tensión.

Nota: La caída de tensión de la línea para el caso de corriente alterna trifásica, se calcula con la fórmula aproximada:

$$\Delta U = \sqrt{3}LI(R \cos\varphi + X \sin\varphi)$$

L es la longitud de la línea en km I es la intensidad de corriente que transportar en A.

### Anexo II

Resistencias y reactancias de conductores de baja tensión (figura 2 y tabla 5)

### Anexo III

Tabla de resistencias y reactancias de transformadores de distribución (tablas 6 y 7)

El problema que se encuentra el técnico cuando llega a este punto es que el fabricante del transformador le proporciona en su catálogo los siguientes valores: tensiones, potencia del transformador, tensión de cortocircuito en porcentaje, pérdidas en vacío y pérdidas a plena carga. Pero no le desglosa la tensión de cortocircuito en sus valores resistivo e inductivo. Sin embargo, estos valores son suficientes para hallar dichos porcentajes separadamente. Partimos de que el valor de las pérdidas a plena carga del transformador se puede asimilar a las pérdidas en el cobre del mismo y, por tanto, a la parte real, o resistiva, de la impedancia de cortocircuito. A partir de dicho dato se aplica:

Tabla 2. Resistencia de los conductores de alta tensión a la frecuencia de 50 Hz (90°C).

Sección nominal mm <sup>2</sup>	Resistencia máxima en corriente alterna y a 90 °C			
	Cables unipolares		Cables tripolares	
	Cu	Al	Cu	Al
10	2,310	-	2,346	-
16	1,455	2,392	1,479	2,431
25	0,918	1,513	0,936	1,542
35	0,663	1,093	0,675	1,112
50	0,490	0,800	0,499	0,822
70	0,339	0,558	0,345	0,568
95	0,245	0,403	0,249	0,410
120	0,195	0,321	0,097	0,324
150	0,159	0,262	0,161	0,265
185	0,127	0,209	0,129	0,212
240	0,098	0,161	0,099	0,163
300	0,078	0,128	-	-
400	0,062	0,102	-	-
500	0,051	0,084	-	-

Tabla 3. Resistencia de los conductores de alta tensión a la frecuencia de 50 Hz (105°C).

Sección nominal mm <sup>2</sup>	Resistencia máxima en corriente alterna y a 90 °C			
	Cables unipolares		Cables tripolares	
	Cu	Al	Cu	Al
10	2,446	-	2,484	-
16	1,540	2,533	1,566	2,574
25	0,972	1,602	0,991	1,633
35	0,702	1,157	0,715	1,176
50	0,519	0,847	0,528	0,807
70	0,359	0,591	0,365	0,601
95	0,259	0,427	0,264	0,434
120	0,206	0,340	0,209	0,343
150	0,168	0,227	0,170	0,281
185	0,134	0,221	0,137	0,224
240	0,104	0,170	0,105	0,173
300	0,083	0,136	-	-
400	0,066	0,108	-	-
500	0,054	0,089	-	-

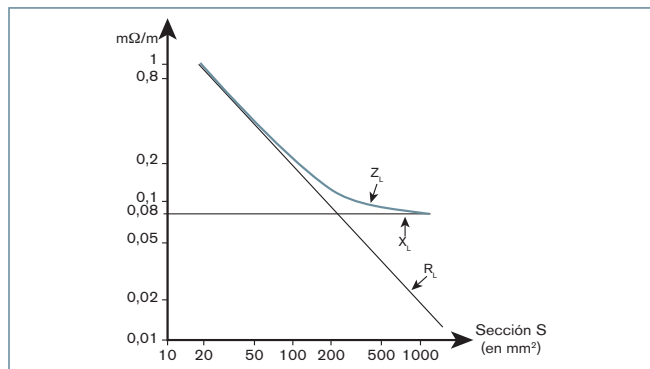
Sección nominal mm <sup>2</sup>	Reactancia X en Ω/km por fase						
	1,8/3 kV	3,6/6 kV	6/10 kV	Tensión nominal del cable 8,7/15 kV	12/20 kV	12/25 kV	18/30 kV
Tres cables unipolares en contacto mutuo							
10	0,135	-	-	-	-	-	-
16	0,126	-	-	-	-	-	-
25	0,118	0,125	0,134	0,141	-	-	-
35	0,113	0,118	0,128	0,135	0,140	-	-
50	0,108	0,113	0,122	0,128	0,130	0,140	0,148
70	0,101	0,106	0,115	0,120	0,122	0,130	0,137
95	0,099	0,102	0,110	0,115	0,116	0,121	0,129
120	0,095	0,098	0,106	0,111	0,112	0,118	0,123
150	0,093	0,096	0,102	0,108	0,109	0,115	0,118
185	0,089	0,093	0,100	0,104	0,106	0,110	0,113
240	0,088	0,090	0,097	0,101	0,103	0,106	0,109
300	0,086	0,088	0,093	0,097	0,099	0,103	0,105
400	0,085	0,086	0,091	0,095	0,095	0,100	0,103
500	0,084	0,084	0,089	0,092	0,093	0,096	0,099
Un cable tripolar							
10	0,115	-	-	-	-	-	-
16	0,107	-	-	-	-	-	-
25	0,100	0,105	0,118	0,127	-	-	-
35	0,095	0,100	0,112	0,120	0,121	-	-
50	0,091	0,095	0,106	0,114	0,113	0,124	0,135
70	0,086	0,090	0,100	0,107	0,106	0,115	0,125
95	0,083	0,087	0,096	0,102	0,101	0,108	0,115
120	0,081	0,084	0,093	0,098	0,097	0,103	0,110
150	0,079	0,082	0,090	0,096	0,095	0,100	0,105
185	0,079	0,081	0,089	0,094	0,093	0,097	0,101
240	0,076	0,079	0,085	0,090	0,090	0,093	0,097

Tabla 4. Reactancia a la frecuencia de 50 Hz.

$E_{Rcc} = \frac{P_{Cu}}{10S_n}$  (15) donde  $P_{Cu}$  es igual al valor de las pérdidas del transformador en carga. A continuación, y una vez hallado  $E_{Rcc}$ , se obtiene  $E_{Xcc}$ , que es muy simple aplicando

$$E_{Xcc} = \sqrt{E_{cc}^2 - E_{Rcc}^2}$$

Figura 2. Impedancia  $Z_L$  de un cable trifásico, a 20 °C, con conductores de cobre.



**Notas**

- No hay que olvidar que se debe de cumplir que  $E_{cc} = \sqrt{E_{Rcc}^2 + E_{Xcc}^2}$
- Hay que tener en cuenta que los cálculos propuestos en el presente trabajo, se refieren a la corriente permanente de cortocircuito, también denominada simétrica. Existen efectos transitorios (asimétricos) que no se han considerado, pues se pretende una simplificación y accesibilidad del procedimiento.
- Se ha utilizado la misma terminología que la indicada por el profesor Dr. D. Enrique Ras Oliva, en su libro *Transformadores de potencia, de medida y de protección* indicado en la bibliografía, para facilitar su seguimiento.

**Bibliografía**

Aenor (1990). UNE 20099:1990. Aparata de alta tensión bajo envolvente metálica para corriente alterna de tensiones asignadas superiores a 1 kV e inferiores o iguales a 72,5 kV. (Anulada).

Aenor (2001). UNE 60076-1:2001. Transformadores de potencia. Parte 3: Niveles de aislamiento, ensayos dieléctricos y distancias de aislamiento en el aire.

Aenor (2007). UNE 21538-1:2007. Transformadores trifásicos sumergidos en aceite para distribución en baja tensión de 100 a 2.500 kVA, 50 Hz, con tensión más elevada en el material de hasta 36 kV. Parte 1: requisitos generales.

Aenor (2001). UNE 60076-1:2001. *Transformadores de potencia. Parte 1: generalidades.*

Aenor (2005). UNE 62271-200:2005. Aparata de alta tensión. Parte 200: Aparata de corriente alterna para tensiones asignadas superiores a 1 kV e inferiores a 52 kV.

BOE (1982). Real Decreto 3275/1982, de 12 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre Condiciones Técnicas y Garantías de Seguridad en Centrales Eléctricas, Subestaciones y Centros de Transformación.

Tipo de instalación	Juego de barras	Cable trifásico	Cables unipolares separados	Cables unipolares colocados en triángulo	3 cables en línea juntos	3 cables en línea separados "d"	
						d = 2r	d = 4r
Esquema							
Reactancia unitaria Valor típico en mΩ /m	0,15	0,08	0,15	0,085	0,095	0,145	0,19
Reactancia unitaria Valores extremos en mΩ/m	0,12-0,18	0,06-0,1	0,1-0,2	0,08-0,09	0,09-0,1	0,14-0,15	0,18-0,20

Tabla 5. Valores de la reactancia de los conductores por metro lineal (Metz-Noblat, 2000).

Potencia kVA	Tensión de CC hasta 24 kV (E <sub>cc</sub> )	Pérdidas en carga (w)	DESGLOSADO		Tensión de CC hasta 36 kV (U <sub>kn</sub> )	Pérdidas en carga (w)	DESGLOSADO	
			E <sub>Rcc</sub>	E <sub>Xcc</sub>			E <sub>Rcc</sub>	E <sub>Xcc</sub>
50	4	1.100	2,2	3,3	4,5	1.250	2,5	3,7
100	4	1.750	1,8	3,6	4,5	1.950	2,0	4,1
160	4	2.350	1,5	3,7	4,5	2.550	1,6	4,2
250	4	3.250	1,3	3,8	4,5	3.500	1,4	4,3
400	4	4.600	1,2	3,8	4,5	4.900	1,2	4,3
630	4	6.500	1,0	3,9	4,5	6.500	1,0	4,4
800	6	8.100	1,0	5,9	6	8.500	1,1	5,9
1.000	6	10.500	1,1	5,9	6	10.500	1,1	5,9
1.250	6	13.500	1,1	5,9	6	13.500	1,1	5,9
1.600	6	17.000	1,1	5,9	6	17.000	1,1	5,9
2.000	6	20.200	1,0	5,9	6	20.200	1,0	5,9
2.500	6	26.500	1,1	5,9	6	26.500	1,1	5,9

Tabla 6. Tabla indicativa de las tensiones de cortocircuito en % (U<sub>kn</sub>) de transformadores de distribución en baño de aceite, tipo Dyn, normalizados según UNE 21428, con la tensión secundaria normalizada de 230/400 V y la tensión máxima primaria que se indica.

Tabla 7. Tabla indicativa de las tensiones de cortocircuito en % (U<sub>kn</sub>) de transformadores de distribución secos, tipo Dyn, normalizados según la norma UNE 21428, con la tensión secundaria normalizada de 230/400 V y la tensión máxima primaria que se indica

Potencia kVA	Tensión de CC hasta 24 kV (E <sub>cc</sub> )	Pérdidas en carga (w)	DESGLOSADO		Tensión de CC hasta 36 kV (U <sub>kn</sub> )	Pérdidas en carga (w)	DESGLOSADO	
			E <sub>Rcc</sub>	E <sub>Xcc</sub>			E <sub>Rcc</sub>	E <sub>Xcc</sub>
50	6,0	2.800	5,6	2,2	6,0	2.900	5,8	1,5
100	6,0	3.800	4,6	6,0	4.000	4,0	4,5	
160	6,0	5.500	4,9	6,0	5.700	3,6	4,8	
250	6,0	7.800	5,1	6,0	8.000	3,2	5,1	
630	6,0	11.000	5,7	6,5	11.500	1,8	6,2	
1.250	6,0	16.000	5,9	7,0	17.000	1,4	6,9	
2.000	6,0	23.000	5,9	7,0	25.000	1,3	6,9	

BOE (2002). Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión.

BOE (2008). Real Decreto 223/2008, de 15 de febrero, por el que se aprueba el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión y sus instrucciones técnicas complementarias ITC-LAT 01 a 09.

Guirado Torres Rafael, Asensi Orosa, Rafael, Jurado Melguizo Francisco, Carpio Ibáñez José (2006). *Tecnología eléctrica*. McGraw-Hill, Interamericana de España. Madrid. ISBN: 84-841-4807-X.

IEC (2001). IEC 60909, 2001-07. Short-circuit currents in tree-phase ac systems. Part 0: Calculations of currents. International Electrotechnical Commission.

IEC (2004). IEC 60781: 2004 Ed 1.0. (Project) Application guide for calculations of short-circuit currents in low-voltage radial systems. International Electrotechnical Commission.

Metz-Noblat B de Dumes F, Tomasset G (2000). Cuaderno Técnico 158: *Cálculo de corrientes de cortocircuito*. Schneider Electric España.

Ras Oliva Enrique (1998). *Transformadores de potencia, de medida y de protección*. Marcombo, Barcelona. ISBN 8426706908.

Rodríguez Espantoso J. L. (2007). *Càlcul del corrent de curtcircuit trifàsic I. Elecció del poder de tall de les proteccions elèctriques en B.T.* Colegio de Ingenieros Técnicos Industriales de Barcelona (CETIB). Barcelona.

**José Luis Rodríguez Espantoso**  
 jose.luis.rodriguez.espantoso@upc.edu  
 Ingeniero técnico industrial. Profesor de la asignatura de proyectos de ingeniería, Departamento de Expresión Gráfica, en la EUETIB de Universidad Politécnica de Cataluña.

**Pablo Zapico Gutiérrez**  
 pablo.zapico@unileon.es  
 Jefe de la Sección de Industria y Energía de la Junta de Castilla y León, en León. Profesor del Departamento de Ingeniería Eléctrica y de Sistemas y de Automática de la Universidad de León.