

CAPÍTULO 6

Análisis de cortocircuitos

Objetivos del capítulo

El objetivo de este capítulo es analizar los efectos que produce un cortocircuito en una instalación eléctrica en general y de baja tensión en particular, estudiando la metodología de cálculo de las impedancias de defecto, para determinar la corriente circulante por la instalación en caso de fallo, cuyo conocimiento es imprescindible para la selección de los equipos de protección de la instalación y sus usuarios, tal y como se verá en capítulos posteriores.

Los objetivos específicos de aprendizaje son:

- Identificar las causas más frecuentes que producen un fallo por cortocircuito y sus consecuencias.
- Estudiar los tipos básicos de cortocircuito en las instalaciones monofásicas y trifásicas.
- Calcular las impedancias de defecto para diferentes tipos de instalación en baja tensión.
- Calcular las componentes de la corriente de cortocircuito mediante el método de la impedancia de defecto.
- Conocer las directrices del REBT respecto al cálculo de corrientes de cortocircuito.

1. Introducción

En el diseño de una instalación eléctrica se debe prever la posibilidad de que la instalación trabaje en rangos de tensión e intensidad diferentes a los de diseño, lo que puede dar lugar al deterioro de la red o a situaciones peligrosas para sus usuarios. Estas circunstancias deben ser analizadas por el proyectista para seleccionar los equipos adecuados para la protección de los circuitos y de las personas. Un cortocircuito es una de las fallas eléctricas más frecuentes en una instalación. Se produce cuando se conectan accidentalmente dos o más puntos del circuito entre sí, disminuyendo la impedancia e incrementándose la corriente circulante. En las instalaciones de baja tensión, las causas más frecuentes de cortocircuito son las siguientes:

- Los fallos en el aislamiento de los cables debidos a sobrecargas de las líneas, al envejecimiento de la instalación o a atmósferas de trabajo corrosivas o con elevada temperatura y/o humedad.
- Las conexiones incorrectas de las cargas, por ejemplo, motores.
- Las averías en las cargas alimentadas por el circuito.
- Los defectos en las conexiones de la instalación, por ejemplo, en la puesta en marcha de instalaciones nuevas.
- Los fallos mecánicos que conectan dos conductores, por ejemplo, su rotura o su conexión a través de un elemento externo (herramientas, animales, etc.).
- Las sobre tensiones eléctricas de origen atmosférico o interno.

Cuando se produce un cortocircuito en una instalación, la intensidad circulante puede llegar a ser mil veces superior a la intensidad nominal de las líneas, lo que genera calentamientos o sobreesfuerzos mecánicos en los componentes de la instalación, llegando hasta el deterioro y la destrucción de los conductores y de los elementos de conexión. Para evitar esto, hay que proteger la instalación eléctrica mediante dispositivos que sean capaces de cortar la corriente de cortocircuito antes de que la instalación sufra daños. El estudio del cálculo de las corrientes de cortocircuito es fundamental para la selección de este tipo de elementos, principalmente interruptores automáticos o fusibles, como veremos en el próximo capítulo, y también para la selección del resto de componentes de la instalación (cables, embarrados, elementos de medida, etc.). En general, una instalación eléctrica de baja tensión deberá estar protegida frente a cortocircuitos en todos los puntos donde se produzca una discontinuidad eléctrica, esto es, un cambio de sección en las líneas. La intensidad de cortocircuito se calculará en todos estos puntos, teniendo en cuenta las características de los elementos que deberán soportar esta corriente.

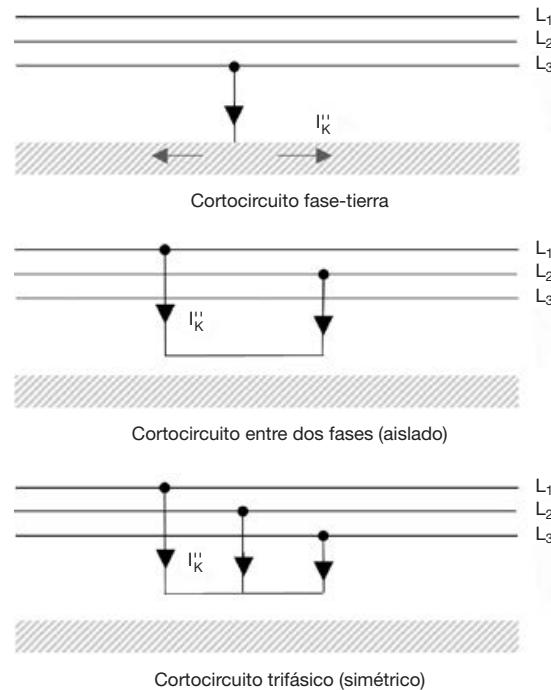
2. Tipos de cortocircuitos

En las instalaciones eléctricas se pueden producir tres tipos de cortocircuitos (figura 1):

- Cortocircuitos monofásicos entre fase y neutro o tierra, que suelen ser los más frecuentes.

- Cortocircuitos entre dos fases, que suelen degenerar en trifásicos.
- Cortocircuitos trifásicos entre las tres fases de la instalación, que son los menos frecuentes pero los que pueden generar corrientes más elevadas.

Figura 1. Tipos de cortocircuitos



En este manual estudiaremos únicamente los cortocircuitos trifásicos simétricos en instalaciones de baja tensión en las que la potencia de las máquinas eléctricas existentes es mucho menor que la potencia del transformador. Debido a que las corrientes producidas en los cortocircuitos trifásicos son las más elevadas, si se protege la instalación frente a ellos se puede decir que el dimensionado de las protecciones del circuito sigue un criterio conservador. Además, los cortocircuitos trifásicos equilibrados son sencillos de calcular, porque se puede resolver el circuito monofásico equivalente, como analizaremos en epígrafes posteriores.

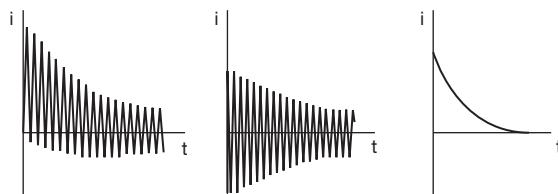
3. Magnitudes que caracterizan a la corriente de cortocircuito

Cuando se produce un cortocircuito en una instalación, se produce un cambio brusco en el funcionamiento de esta, generando un fenómeno transitorio. El análisis de los cir-

cuitos en régimen transitorio ya ha sido estudiado anteriormente, tanto la evolución de las diferentes magnitudes en función de las características del circuito como su duración. En el transitorio de un cortocircuito se produce la superposición de dos componentes de la intensidad: la componente alterna y senoidal, que se denomina *corriente simétrica*, y una componente de corriente continua o unidireccional asociada al transitorio, que se amortigua exponencialmente y se denomina *corriente asimétrica*. La suma de ambas corrientes es la corriente de cortocircuito que circula por la instalación afectada y que también es asimétrica (figura 2).

En la notación de la corriente de cortocircuito empleamos el subíndice k , en lugar del subíndice cc para evitar confusiones con los parámetros de cortocircuito del transformador.

Figura 2. Componentes de la corriente de cortocircuito

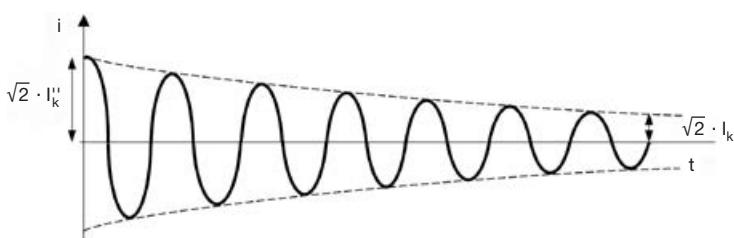


$$\text{Corriente de cortocircuito} = \text{Corriente simétrica} + \text{Corriente asimétrica}$$

3.1. Corriente simétrica de cortocircuito

La corriente simétrica de cortocircuito varía de forma senoidal con una frecuencia igual a la de la red y tiene una amplitud decreciente de forma exponencial que se estabiliza transcurrido el transitorio.

Figura 3. Corriente simétrica de cortocircuito



Esta corriente se caracteriza por los siguientes valores (figura 3):

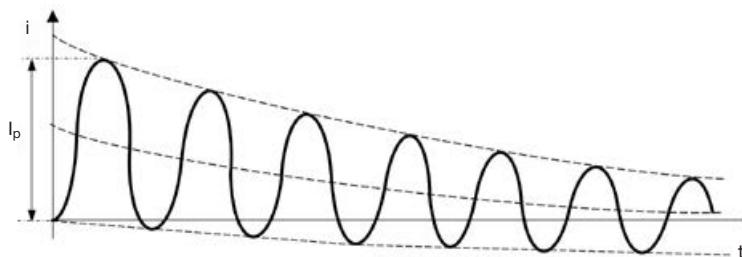
- *Corriente inicial simétrica de cortocircuito ($\sqrt{2}I_k^{\text{in}}$)*. Es el valor eficaz de la componente simétrica al comienzo del cortocircuito. Es el principal parámetro que se considera en el cálculo de cortocircuitos y también se denomina corriente subtransitoria de cortocircuito.
- *Corriente permanente de cortocircuito ($\sqrt{2}I_k$)*. Es el valor eficaz de la corriente de cortocircuito simétrica, una vez finalizado el transitorio.

3.2. Corriente asimétrica de cortocircuito

La corriente de cortocircuito total, figura 4, es asimétrica porque su componente continua presenta una evolución exponencial, desde su valor máximo en el instante en que se produce el cortocircuito, hasta 0.

Se define la *corriente de cresta (I_p)* como el valor máximo instantáneo que alcanza la corriente de cortocircuito.

Figura 4. Corriente asimétrica de cortocircuito (total)



El valor de la corriente de cresta depende del valor de la corriente inicial simétrica de cortocircuito (I_k^{in}) y del cociente entre la resistencia (R_k) y la reactancia (X_k) de la instalación en cortocircuito, que determina la evolución exponencial de la componente continua. Su cálculo se realiza mediante la siguiente expresión:

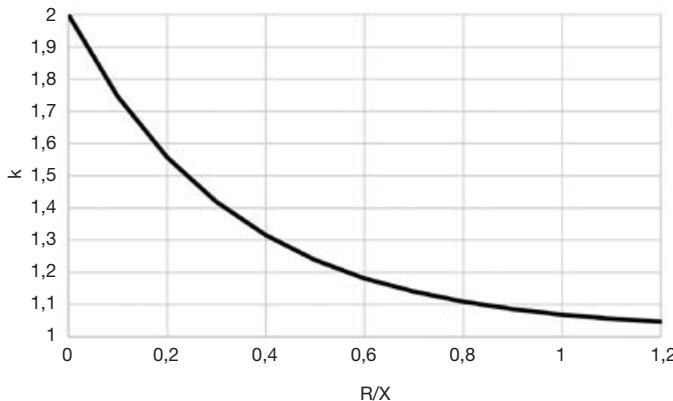
$$I_p = k \cdot \sqrt{2} \cdot I_k^{\text{in}} \quad (6.1)$$

Siendo:

$$k = 1,02 + 0,98 e^{-3 \frac{R_k}{X_k}} \quad (6.2)$$

De la expresión 6.1 se deduce que el factor k es el cociente entre la corriente de cresta y la corriente inicial simétrica de cortocircuito (en valor eficaz). Hay que indicar que este cálculo de la corriente de cresta es un cálculo aproximado, cuya metodología se describe en la norma UNE-EN 60909-0, corrientes de cortocircuito en sistemas trifásicos de corriente alterna. Parte 0: cálculo de corrientes.

Figura 5. Parámetro k para el cálculo de la corriente de cresta



4. Análisis de cortocircuitos trifásicos simétricos

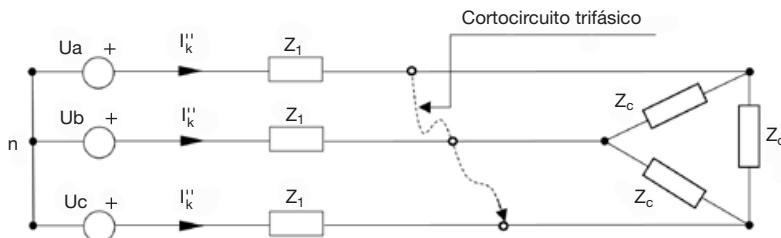
Cuando se produce un cortocircuito, la corriente circula por el recorrido de menor impedancia porque ofrece poca oposición a su paso, alcanzándose valores de intensidad muy elevados al mantenerse la tensión.

En un sistema trifásico equilibrado (figura 6), el análisis de la corriente de cortocircuito se puede realizar mediante el circuito monofásico equivalente, del mismo modo que se ha explicado en el capítulo 1, siendo el valor de la corriente inicial simétrica de cortocircuito el siguiente:

$$I_k^i = \frac{\frac{U}{\sqrt{3}}}{Z_k} \quad (6.3)$$

Donde U es la tensión nominal de la red y Z_k la impedancia del conjunto de elementos del circuito recorridos por el cortocircuito. A esta impedancia se le denomina *impedancia de cortocircuito* o *impedancia de defecto*.

Figura 6. Cortocircuito trifásico



La metodología más sencilla de análisis de cortocircuitos en instalaciones eléctricas de baja tensión consiste en calcular la impedancia de defecto para poder determinar las corrientes de cortocircuito: corriente inicial simétrica, empleando la expresión 6.3 y corriente de cresta, empleando la expresión 6.1. Esta impedancia se calcula como la suma por separado de las resistencias y las reactancias de los elementos recorridos por el cortocircuito (ecuación 6.4), desde el punto en el que se produce hasta el punto en el que se considera que la tensión no queda afectada, que puede ser el origen de la línea de media tensión o los bornes del primario del transformador en las líneas en las que se supone potencia infinita.

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} \quad (6.4)$$

Con $R_k = \sum R_i$ y $X_k = \sum X_i$.

En función del punto donde se produce el cortocircuito, se deben considerar los valores de resistencia y reactancia de diferentes elementos del circuito, como se explica en los siguientes epígrafes.

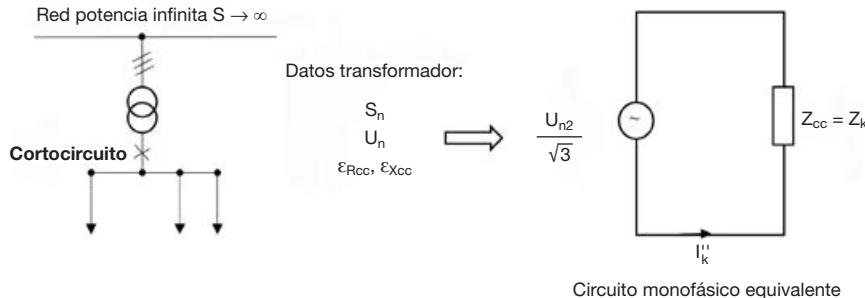
4.1. Cortocircuito en bornes del transformador

Este tipo de cortocircuito se puede calcular de dos formas distintas, en función de si se considera o no el efecto del cortocircuito en la línea de alimentación de media tensión.

4.1.1. Cortocircuito en bornes del transformador sin considerar la línea de alimentación de media tensión

Este caso se calcula bajo la hipótesis de que la potencia en la red de distribución es infinita, por lo que la corriente de cortocircuito está limitada únicamente por la impedancia del transformador (figura 7).

Figura 7. Esquema unifilar y circuito equivalente del cortocircuito en bornes del transformador, suponiendo la red de distribución de potencia infinita



Para obtener el valor de la corriente inicial simétrica de cortocircuito se resuelve el circuito monofásico equivalente de la figura 7, cuyos valores de tensión e impedancia se obtienen de los datos del transformador de la instalación: potencia nominal (S_n), tensión nominal secundaria (U_n) y caídas de tensión relativas obtenidas en el ensayo de cortocircuito del transformador (ε_{Rcc} , ε_{Xcc}). La impedancia de cortocircuito del transformador se determinará empleando las siguientes expresiones:

$$R_{cc} = \left(\frac{\varepsilon_{Rcc}}{100} \right) \cdot \left(\frac{U_n^2}{S_n} \right) \quad (6.5)$$

$$X_{cc} = \left(\frac{\varepsilon_{Xcc}}{100} \right) \cdot \left(\frac{U_n^2}{S_n} \right) \quad (6.6)$$

En las ecuaciones anteriores, si la tensión nominal se expresa en V y la potencia nominal en kVA, los resultados de la resistencia y la reactancia se obtienen en mΩ.

En este caso la impedancia de defecto coincide con la impedancia de cortocircuito del transformador:

$$Z_k = Z_{cc} = \sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2} \quad (6.7)$$

EJEMPLO 1

Calcular las corrientes de cortocircuito en bornes de un transformador de potencia nominal 1.000 kVA, relación de transformación 20 kV/380 V, que está conectado a una red de potencia infinita.

Datos: $\varepsilon_{Rcc} = 1\%$ y $\varepsilon_{Xcc} = 4\%$.

En este caso, la impedancia de defecto coincidirá con la impedancia de cortocircuito del transformador, que podemos determinar mediante las expresiones siguientes:

$$R_{cc} = \left(\frac{\varepsilon_{R_{cc}}}{100} \right) \cdot \left(\frac{U_n^2}{S_n} \right) = \frac{1}{100} \cdot \frac{380^2}{1.000} = 1,44 \text{ m}\Omega$$

$$X_{cc} = \left(\frac{\varepsilon_{X_{cc}}}{100} \right) \cdot \left(\frac{U_n^2}{S_n} \right) = \frac{4}{100} \cdot \frac{380^2}{1.000} = 5,77 \text{ m}\Omega$$

$$Z_k = Z_{cc} = \sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2} = 5,95 \text{ m}\Omega$$

La corriente inicial simétrica de cortocircuito será:

$$I_k'' = \frac{U}{\sqrt{3}Z_k} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 5,95} = 36,87 \text{ kA}$$

Calculamos la corriente de cresta:

$$\frac{R_k}{X_k} = \frac{1,44}{5,77} = 0,25$$

Entrando en la gráfica de la figura 5, con este valor tenemos $k = 1,48$, luego,

$$I_p = k \cdot \sqrt{2} \cdot I_k'' = 1,48 \cdot \sqrt{2} \cdot 36,87 = 77,17 \text{ kA}$$

4.1.2. Cortocircuito en bornes del transformador considerando la impedancia de la línea de distribución de media tensión

Para el cálculo de la impedancia de la línea de distribución de media tensión, es necesario que la compañía distribuidora proporcione el dato de la potencia de cortocircuito de la red (S_k''), valor que generalmente varía entre los 500 MVA y los 250 MVA. Este dato permite determinar la impedancia aguas arriba del punto de conexión del transformador, Z_{Red} siendo su valor:

$$Z_{Red} = \frac{U_n^2}{S_k''} \quad (6.8)$$

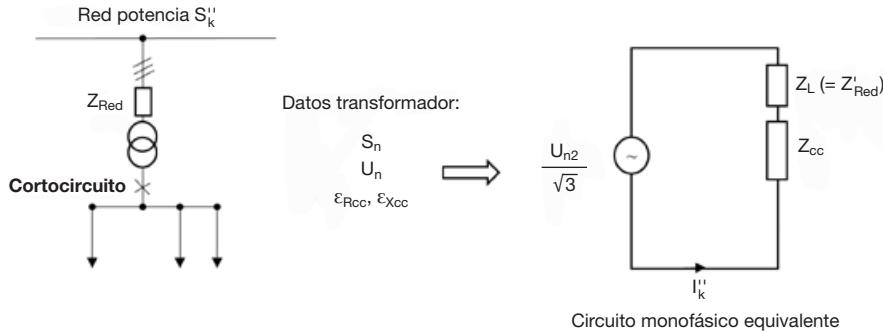
Donde U_n es la tensión nominal de la red analizada.

Para obtener las componentes de esta impedancia, resistencia y reactancia, se supone que el ángulo de la impedancia de la red de distribución es 85° , luego:

$$R_{Red} = Z_{Red} \cos 85 = 0,1 \cdot Z_{Red} \quad (6.9)$$

$$X_{Red} = Z_{Red} \sin 85 = 0,995 \cdot Z_{Red} \quad (6.10)$$

Figura 8. Esquema unifilar y circuito equivalente del cortocircuito en bornes del transformador, considerando la impedancia de la línea de distribución de media tensión



En el análisis del circuito monofásico equivalente, figura 8, se debe considerar la impedancia de la línea de distribución reducida al secundario del transformador, que denotamos mediante Z_L . Este valor se puede estimar mediante la expresión 6.11, aunque para un cálculo exacto se debería pasar la impedancia del primario del transformador al secundario mediante la relación de transformación, como se estudió en el capítulo 2:

$$Z_L = 1,1 \cdot \left(\frac{U_n^2}{1.000 \cdot S_k''} \right) \quad (6.11)$$

Donde el valor de Z_L se obtiene en $m\Omega$, cuando la tensión nominal se expresa en V y la potencia de cortocircuito en MVA.

Aplicando las ecuaciones 6.9 y 6.10:

$$R_L = 0,1 \cdot Z_L \quad (6.12)$$

$$X_L = 0,995 \cdot Z_L \quad (6.13)$$

La impedancia de cortocircuito del monofásico equivalente se determinará empleando la expresión 6.4.

EJEMPLO 2

Calcular las corrientes de cortocircuito en bornes del transformador del ejemplo anterior, considerando la impedancia de la red de distribución de 20 kV, si la potencia de cortocircuito de esta red es de 275 MVA.

La impedancia del transformador es la misma que la calculada anteriormente:

$$R_{cc} = 0,144 \text{ m}\Omega \quad X_{cc} = 5,77 \text{ m}\Omega$$

Calculamos la impedancia de la línea de 20 kV vista desde el secundario, a partir de las expresiones 6.11, 6.12 y 6.13:

$$Z_L = 1,1 \cdot \left(\frac{U_n^2}{1.000 \cdot S_k''} \right) = 1,1 \cdot \left(\frac{380^2}{1.000 \cdot 275} \right) = 0,577 \text{ m}\Omega$$

$$R_L = 0,1 \cdot Z_L = 0,0577 \text{ m}\Omega$$

$$X_L = 0,995 \cdot Z_L = 0,574 \text{ m}\Omega$$

La impedancia de cortocircuito será:

$$R_k = \sum R_i = R_{cc} + R_L = 1,44 + 0,0577 = 1,4977 \text{ m}\Omega$$

$$X_k = \sum X_i = X_{cc} + X_L = 5,77 + 0,574 = 6,344 \text{ m}\Omega$$

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} = 6,52 \text{ m}\Omega$$

La corriente inicial simétrica de cortocircuito será:

$$I_k'' = \frac{U}{\sqrt{3}Z_k} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 6,52} = 33,65 \text{ kA}$$

Calculamos la corriente de cresta:

$$\frac{R_k}{X_k} = \frac{1,4977}{6,344} = 0,236$$

Entrando en la gráfica de la figura.5 con este valor o resolviendo la ecuación 6.2, $\kappa = 1,5$, y la corriente de cresta:

$$I_p = \kappa \sqrt{2} \cdot I_k'' = 1,5 \cdot \sqrt{2} \cdot 33,65 = 71,38 \text{ kA}$$

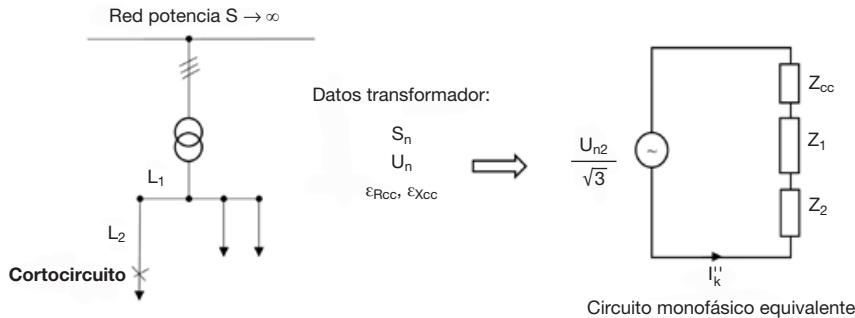
4.2. Cortocircuito en un punto distanciado del transformador

Cuando se da un cortocircuito en un punto ubicado a cierta distancia del transformador que alimenta a la instalación, deben considerarse en la impedancia de defecto las impedancias de las líneas aguas arriba del punto donde se ha producido el fallo, por ejemplo, en la figura 9, la impedancia de las líneas L_1 y L_2 , porque el fallo se produce al final de esta última línea.

La impedancia de la línea i se calcula a partir de sus componentes (R_i, X_i). En el capítulo 5 (ecuación 5.1) se repasó el concepto de resistencia, cuya expresión en mΩ es la siguiente:

$$R_i = 1.000 \cdot \rho \frac{l_i}{(n_i S_i)} \quad (6.14)$$

Figura 9. Esquema unifilar y circuito equivalente del cortocircuito en un punto distanciado del transformador



En la ecuación anterior se introduce el parámetro n_i , que es el número de conductores en paralelo por fase.

Si no se dispone de información de los fabricantes de los cables, la reactancia de la línea puede estimarse, en $\text{m}\Omega$, mediante la siguiente expresión:

$$X_i = x_i' \frac{l_i}{1.000} \quad (6.15)$$

Donde x_i' depende de las características de la línea. Algunos de los valores más usuales son:

- $x_i' = 80 \text{ m}\Omega/\text{km}$, para cables multiconductores (tripolares) o unipolares y dispuestos en trébol.
- $x_i' = 90 \text{ m}\Omega/\text{km}$, para ternos de cables unipolares sin separación y tendidos paralelamente.
- $x_i' = 130 \text{ m}\Omega/\text{km}$, para ternos de cables unipolares separados y tendidos paralelamente.

La impedancia total de defecto de la figura 9 se calcula empleando la expresión 6.4, con:

$$R_k = \sum R_i = R_{cc} + R_1 + R_2$$

$$X_k = \sum X_i = X_{cc} + X_1 + X_2$$

En este caso no se ha considerado la impedancia de la línea de distribución, porque se asume que la red tiene una potencia infinita.

5. Cálculo de la corriente de cortocircuito según el REBT

El REBT, en el anexo 3 de su guía de aplicación, establece una metodología simplificada para el cálculo de la intensidad de cortocircuito en instalaciones de edificios cuyo uso es válido si el centro de transformación está situado fuera del lugar del suministro afectado por la falta, ya que solo se considera la impedancia de la instalación. La simplificación realizada se basa en suponer que, en caso de cortocircuito, la tensión en la cabecera de la instalación tiene un valor de 0,8 veces la tensión de suministro. Se considera que el cortocircuito más desfavorable es el de fase-tierra y se desprecia la reactancia de los cables. La expresión de la intensidad de cortocircuito máxima I_{cc} en el punto considerado es:

$$I_{cc} = \frac{0,8 \cdot U}{R} \quad (6.16)$$

Donde U es la tensión de alimentación fase neutro (230 V) y R , la suma de las resistencias entre el punto donde se produce el cortocircuito y la caja general de protección a una temperatura de 20 °C.

EJEMPLO 3

Aplicando los criterios del REBT, determinar la intensidad de cortocircuito máxima en el cuadro general de una vivienda que tiene la siguiente instalación:

- Una línea general de alimentación de 95 mm² de sección y 12 m de longitud.
- Una derivación individual de 16 mm² de sección y 20 m de longitud.

Datos: $\rho_{Cu}(20\text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,017\text{ }\Omega\text{mm}^2/\text{m}$.

En primer lugar, calculamos la resistencia de las líneas:

$$R_{LGA} = 1.000 \cdot 0,017 \cdot \frac{12 \cdot 2}{(1 \cdot 95)} = 4,29\text{ m}\Omega$$

$$R_{DI} = 1.000 \cdot 0,017 \cdot \frac{20 \cdot 2}{(1 \cdot 16)} = 42,5\text{ m}\Omega$$

Donde se ha considerado la longitud de ida y retorno de las líneas.

Aplicando la expresión para la corriente de cortocircuito máxima indicada en el REBT:

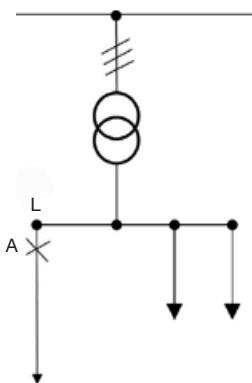
$$I_{cc} = \frac{0,8 \cdot U}{R} = \frac{0,8 \cdot 230}{(4,29 + 42,5)} = 3,93\text{ kA}$$

Conceptos básicos

- Las corrientes de cortocircuito producidas por el deterioro de la instalación, por el funcionamiento en condiciones inadecuadas o por una conexión incorrecta, alcanzan unos valores muy elevados respecto a los que deberían circular por la red en condiciones normales, por lo que las instalaciones deben protegerse para evitar su propagación.
- Como el cortocircuito es un fenómeno brusco, que se inicia con un transitorio, la corriente circulante se caracteriza por ser la suma de dos corrientes, una componente simétrica, de corriente alterna senoidal y otra componente asimétrica, de corriente continua que se amortigua exponencialmente. Las magnitudes que deben considerarse en el cálculo de la protección de las instalaciones son el valor inicial de la componente simétrica y valor máximo instantáneo de la corriente total (corriente de cresta).
- Para el cálculo de estas corrientes de cortocircuito en instalaciones trifásicas equilibradas de baja tensión, se puede emplear el método de la impedancia de defecto, consistente en determinar el valor de la impedancia de los elementos recorridos por el cortocircuito (línea de media tensión, transformador, líneas eléctricas que alimentan a las cargas) y resolver el circuito monofásico equivalente.
- Existen otras metodologías aplicables en la normativa y reglamentación para el cálculo de las corrientes de cortocircuito en las instalaciones eléctricas como, por ejemplo, la metodología indicada en el REBT.

Actividades de autocomprobación

- 1 Determinar las corrientes de cortocircuito en el punto A de la instalación representada por el diagrama unifilar de la figura siguiente.



Características de la red de media tensión	Potencia infinita, tensión 20 kV
Características del transformador	$S_n = 1.000 \text{ kVA}$, 20 kV/380 V $\varepsilon_{R_{CC}} = 1\%$, $\varepsilon_{X_{CC}} = 5\%$
Características de la línea L	Cable tripolar de Cu $3 \times 25 \text{ mm}^2$ aislamiento PVC, tensión nominal de aislamiento 450/750 V. Longitud 200 m. Conductores instalados empotados en obra. Temperatura de trabajo 40°C $\rho_{Cu}(40^\circ\text{C}) = 0,018 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$

Solución

Calculamos las componentes de la impedancia de cortocircuito del transformador:

$$R_{cc} = \left(\frac{\varepsilon_{R_{cc}}}{100} \right) \cdot \left(\frac{U_n^2}{S_n} \right) = \frac{1}{100} \cdot \frac{380^2}{1.000} = 1,44 \text{ m}\Omega$$

$$X_{cc} = \left(\frac{\varepsilon_{X_{cc}}}{100} \right) \cdot \left(\frac{U_n^2}{S_n} \right) = \frac{5}{100} \cdot \frac{380^2}{1.000} = 7,22 \text{ m}\Omega$$

Como podemos considerar la red de distribución de potencia infinita, despreciamos su impedancia y solo debemos calcular la impedancia de la línea L:

$$R_{Línea\ L} = 1.000 \cdot \rho \frac{l_L}{(n_L \ S_L)} = 1.000 \cdot 0,018 \cdot \frac{200}{(1 \cdot 25)} = 144 \text{ m}\Omega$$

$$X_{Línea\ L} = x_L' \frac{l_L}{1.000} = 80 \frac{200}{1.000} = 16 \text{ m}\Omega$$

Donde $n_L = 1$ y $x_L' = 80 \frac{\text{m}\Omega}{\text{km}}$, porque el cable es tripolar.

La impedancia total de defecto en el cortocircuito en el punto A será la suma de la impedancia de la línea L y de la impedancia del transformador:

$$R_k = \sum R_i = R_{cc} + R_{Línea\ L} = 1,44 + 144 = 145,44 \text{ m}\Omega$$

$$X_k = \sum X_i = X_{cc} + X_{Línea\ L} = 7,22 + 16 = 23,22 \text{ m}\Omega$$

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} = 147,28 \text{ m}\Omega$$

La corriente inicial simétrica de cortocircuito será:

$$I_k'' = \frac{U}{\sqrt{3}Z_k} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 147,28} = 1,49 \text{ kA}$$

Calculamos la corriente de cresta:

$$\frac{R_k}{X_k} = \frac{145,44}{23,22} = 6,26$$

Resolviendo la ecuación 6.2 con el valor anterior, $\kappa = 1,02$, y la corriente de cresta:

$$I_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_k'' = 1,02 \cdot \sqrt{2} \cdot 1,49 = 2,15 \text{ kA}$$

- 2** El transformador de un centro de transformación de una industria tiene las siguientes características: potencia nominal 800 kVA, relación de tensiones 20 kV/400 V, caída de tensión total $\varepsilon_{cc} = 6\%$ y caída de tensión en la parte resistiva $\varepsilon_{R_{cc}} = 1,5\%$. Determinar los valores de las corrientes de cortocircuito, sabiendo que la potencia de cortocircuito de la red de 20 kV es de 250 MVA.

Solución

Calculamos las impedancias de defecto:

- Transformador:

$$R_{cc} = \left(\frac{\varepsilon_{R_{cc}}}{100} \right) \cdot \left(\frac{U_n^2}{S_n} \right) = \frac{1,5}{100} \cdot \frac{400^2}{800} = 3 \text{ m}\Omega$$

$$X_{cc} = \left(\frac{\varepsilon_{X_{cc}}}{100} \right) \cdot \left(\frac{U_n^2}{S_n} \right) = \frac{5,8}{100} \cdot \frac{400^2}{800} = 11,6 \text{ m}\Omega$$

Siendo:

$$\varepsilon_{X_{cc}} = \sqrt{\varepsilon_{cc}^2 - \varepsilon_{R_{cc}}^2} = \sqrt{36 - 2,25} = 5,8 \text{ m}\Omega$$

- Impedancia de la línea de distribución de 20 kV vista desde el secundario:

$$Z_L = 1,1 \cdot \left(\frac{U_n^2}{1.000 \cdot S_k''} \right) = 1,1 \cdot \left(\frac{400^2}{1.000 \cdot 250} \right) = 0,704 \text{ m}\Omega$$

$$R_L = 0,1 \cdot Z_L = 0,07 \text{ m}\Omega$$

$$X_L = 0,995 \cdot Z_L = 0,7005 \text{ m}\Omega$$

Luego, la impedancia total de defecto:

$$R_k = \sum R_i = R_{cc} + R_L = 3,07 \text{ m}\Omega$$

$$X_k = \sum X_i = X_{cc} + X_L = 12,3 \text{ m}\Omega$$

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} = 12,7 \text{ m}\Omega$$

La corriente inicial simétrica de cortocircuito será:

$$I_k'' = \frac{U}{\sqrt{3}Z_k} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 12,7} = 18,18 \text{ kA}$$

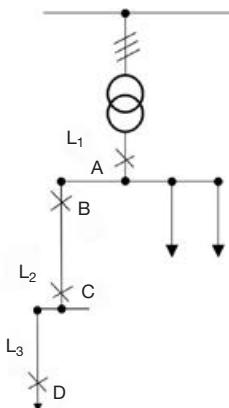
Calculamos la corriente de cresta:

$$\frac{R_k}{X_k} = \frac{3,07}{12,3} \approx 0,25$$

Resolviendo la ecuación 6.2 para R/X igual a 0,25, $\kappa = 1,48$, y la corriente de cresta:

$$I_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_k'' = 1,48 \cdot \sqrt{2} \cdot 18,18 = 38,45 \text{ kA}$$

- 3** Calcular las corrientes iniciales simétricas de cortocircuito en los puntos A, B, C y D de la instalación trifásica de uso industrial, cuyo diagrama unifilar se representa en la figura que reproducimos a continuación. Se puede considerar la red de distribución de potencia infinita.



Características del transformador	$S_n = 630 \text{ kVA}$, $U_{n2} = 380 \text{ V}$ $\varepsilon_{R_{CC}} = 1\%$, $\varepsilon_{X_{CC}} = 3\%$		
Características de las líneas	L_1	L_2	L_3
Longitud	7 m	30 m	12 m
Sección	$3 \times (2 \times 95) \text{ mm}^2$	$3 \times 35 \text{ mm}^2$	$3 \times 16 \text{ mm}^2$
Material	Cu/PVC	Cu/PVC	Cu/PVC

Datos: $\rho_{Cu} (20^\circ \text{C}) = 0,017 \Omega \text{mm}^2/\text{m}$.

Solución

Punto A

$$R_{cc} = \left(\frac{\varepsilon_{R_{CC}}}{100} \right) \cdot \left(\frac{U_n^2}{S_n} \right) = \frac{1}{100} \cdot \frac{380^2}{630} = 2,29 \text{ m}\Omega$$

$$X_{cc} = \left(\frac{\varepsilon X_{cc}}{100} \right) \cdot \left(\frac{U_n^2}{S_n} \right) = \frac{3}{100} \cdot \frac{380^2}{630} = 6,87 \text{ m}\Omega$$

$$Z_{kA} = \sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2} = 7,24 \text{ m}\Omega$$

$$I''_{kA} = \frac{U}{\sqrt{3}Z_k} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 7,24} = 30,3 \text{ kA}$$

Para las líneas se emplean las expresiones:

$$R_i = 1.000 \cdot \rho \frac{l_i}{(n_i S_i)}$$

$$X_i = x_i \frac{l_i}{1.000}$$

Con $x'_i = 80 \text{ m}\Omega/\text{km}$ (cables tripolares) y $n_i = 2$ para la línea 1 y $n_i = 1$ para las líneas 2 y 3. Los cálculos se resumen en la siguiente tabla:

	$R_i (\text{m}\Omega)$	$X_i (\text{m}\Omega)$
L ₁	0,63	0,56/2 = 0,28
L ₂	14,57	2,40
L ₃	12,75	0,96

Donde en la línea 1 se ha repartido el valor de la reactancia entre los dos conductores en paralelo por fase (2x).

La impedancia de defecto y las corrientes iniciales simétricas de cortocircuito en los puntos B, C y D serán:

Punto B

$$R_k = \sum R_i = R_{cc} + R_{L1} = 2,29 + 0,63 = 2,92 \text{ m}\Omega$$

$$X_k = \sum X_i = X_{cc} + X_{L1} = 6,87 + 0,28 = 7,15 \text{ m}\Omega$$

$$Z_{kB} = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} = 7,72 \text{ m}\Omega$$

$$I''_{kB} = \frac{U}{\sqrt{3}Z_k} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 7,72} = 28,41 \text{ kA}$$

Punto C

$$R_k = \sum R_i = R_{cc} + R_{L1} + R_{L2} = 2,29 + 0,63 + 14,57 = 17,49 \text{ m}\Omega$$

$$X_k = \sum X_i = X_{cc} + X_{L1} + X_{L2} = 6,87 + 0,28 + 2,40 = 9,55 \text{ m}\Omega$$

$$Z_{kC} = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} = 19,93 \text{ m}\Omega$$

$$I''_{kC} = \frac{U}{\sqrt{3}Z_k} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 19,93} = 11,01 \text{ kA}$$

Punto D

$$R_k = \sum R_i = R_{cc} + R_{L1} + R_{L2} + R_{L3} = 2,29 + 0,63 + 14,57 + 12,75 = 30,24 \text{ m}\Omega$$

$$X_k = \sum X_i = X_{cc} + X_{L1} + X_{L2} + X_{L3} = 6,87 + 0,28 + 2,40 + 0,96 = 10,51 \text{ m}\Omega$$

$$Z_{kD} = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} = 32,01 \text{ m}\Omega$$

$$I''_{kD} = \frac{U}{\sqrt{3}Z_k} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 19,93} = 6,85 \text{ kA}$$

Se observa que el valor de la corriente de cortocircuito disminuye a lo largo de la línea que alimenta a la instalación, porque aumenta la impedancia de defecto.

- 4** Aplicando los criterios del REBT, determinar la intensidad de cortocircuito máxima en el cuadro general de una vivienda que tiene una instalación de cables de aluminio aislados en XLPE, formada por una línea general de alimentación de 50 mm^2 de sección y 5 m de longitud y una derivación individual de 10 mm^2 de sección y 12 m de longitud.

Datos: $\rho_{AL}(20^\circ\text{C}) = 0,029 \text{ }\Omega\text{mm}^2/\text{m}$.

Solución

Según el REBT, la intensidad de cortocircuito máxima puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$I_{cc} = \frac{0,8 \cdot U}{R}$$

Donde $U = 230 \text{ V}$ (fase – neutro) y la resistencia de las líneas:

$$R_{LGA} = 1.000 \cdot 0,029 \frac{5 \cdot 2}{(1 \cdot 50)} = 5,8 \text{ m}\Omega$$

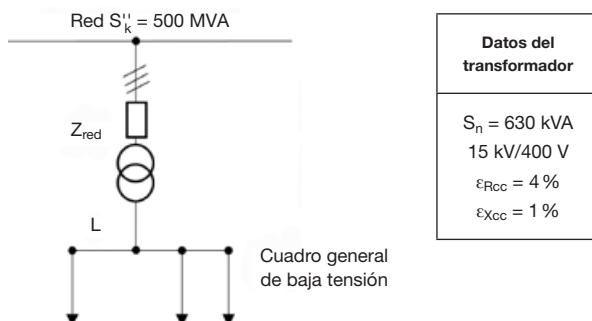
$$R_{DI} = 1.000 \cdot 0,029 \frac{12 \cdot 2}{(1 \cdot 10)} = 69,6 \text{ m}\Omega$$

Donde se ha considerado la longitud de ida y retorno de las líneas.

$$I_{cc} = \frac{0,8 \cdot U}{R} = \frac{0,8 \cdot 230}{(5,8 + 69,6)} = 2,44 \text{ kA}$$

- 5** El transformador, representado en el esquema unifilar que reproducimos en la siguiente figura, en el que se indican sus características, se conecta a una red de distribución de 15 kV y potencia S_k'' de 500 MVA, en su lado de alta tensión y a una línea de salida en baja tensión al cuadro general de baja tensión de 8 m de longitud, formada por conductores unipolares de cobre (tres fases y un neutro) de 180 mm² de sección y aislamiento de PVC. Determinar la corriente inicial simétrica de cortocircuito en el cuadro general de baja tensión.

Datos: $\rho_{Cu} (20^\circ\text{C}) = 0,017 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$.



Solución

Calculamos las impedancias de defecto:

- Línea de distribución de 15 kV vista desde el secundario:

$$Z_L = 1,1 \cdot \left(\frac{U_n^2}{1.000 \cdot S_k''} \right) = 1,1 \cdot \left(\frac{400^2}{1.000 \cdot 500} \right) = 0,352 \text{ m}\Omega$$

$$R_L = 0,1 \cdot Z_L = 0,0352 \text{ m}\Omega$$

$$X_L = 0,995 \cdot Z_L = 0,3502 \text{ m}\Omega$$

- Transformador:

$$R_{cc} = \left(\frac{\varepsilon_{R_{cc}}}{100} \right) \cdot \left(\frac{U_n^2}{S_n} \right) = \frac{4}{100} \cdot \frac{400^2}{630} = 10,16 \text{ m}\Omega$$

$$X_{cc} = \left(\frac{\varepsilon_{X_{cc}}}{100} \right) \cdot \left(\frac{U_n^2}{S_n} \right) = \frac{1}{100} \cdot \frac{400^2}{630} = 2,54 \text{ m}\Omega$$

- Línea de alimentación del cuadro general de baja tensión (CGBT):

$$R_{\text{Línea CGBT}} = 1.000 \cdot \rho \frac{l_L}{(n_L S_L)} = 1.000 \cdot 0,017 \cdot \frac{8}{(1 \cdot 180)} = 0,756 \text{ m}\Omega$$

$$X_{\text{Línea CGBT}} = x_L^l = \frac{l_L}{1.000} = 90 \frac{8}{1.000} = 0,72 \text{ m}\Omega$$

Donde $n_L = 1$ y $x_L^l = 90 \text{ m}\Omega/\text{km}$, porque el cable es unipolar y se supone sin separación entre ellos.

La impedancia total de defecto será:

$$R_k = \sum R_i = R_L + R_{cc} + R_{\text{Línea CGBT}} = 0,0352 + 10,16 + 0,756 = 10,95 \text{ m}\Omega$$

$$X_k = \sum X_i = X_L + X_{cc} + X_{\text{Línea CGBT}} = 0,3502 + 2,54 + 0,72 = 3,61 \text{ m}\Omega$$

$$Z_{kC} = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} = 11,53 \text{ m}\Omega$$

$$I_{kC}'' = \frac{U}{\sqrt{3} Z_k} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 11,53} = 20,03 \text{ kA}$$

Bibliografía

- Bayod Rújula, Á. (2008). *Fundamentos de sistemas eléctricos*. Prensas de la Universidad de Zaragoza.
- Guía de aplicación del Reglamento electrotécnico para baja tensión. (2003). Ministerio de Ciencia y Tecnología.
- Roger Folch, J., Riera Guasp, M. y Roldán Porta, C. (2002). *Tecnología eléctrica*. Editorial Síntesis.

