

## TECNOLOGÍA ELÉCTRICA. UNIDAD DIDÁCTICA 6

### CONCEPTOS BÁSICOS A RETENER Y PROBLEMAS RESUELTOS

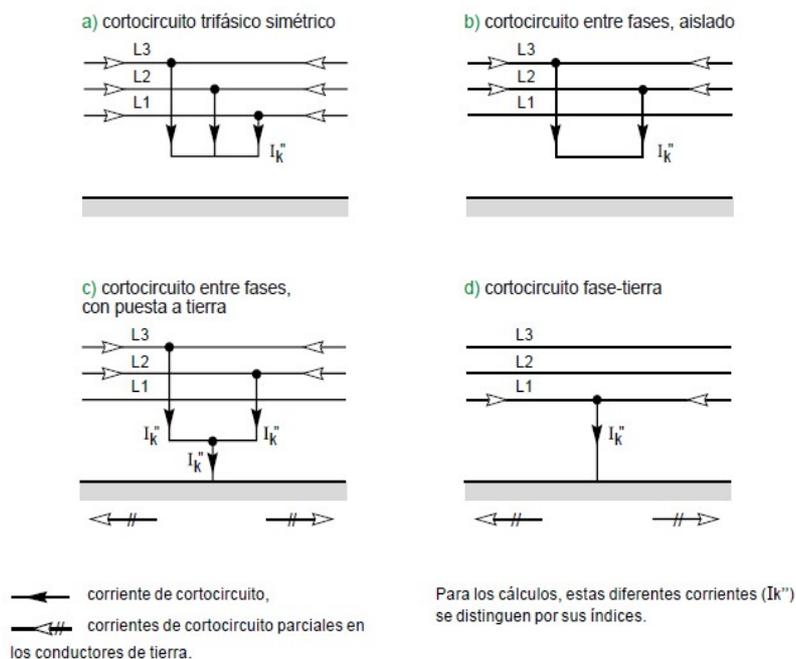
#### 1.- CONCEPTOS GENERALES DE CORTOCIRCUITOS

Las causas más frecuentes de cortocircuitos en instalaciones de BT son:

- Fallos en el aislamiento debido a sobrecargas de las líneas o al envejecimiento de la instalación
- Averías o conexión incorrecta de las cargas (por ejemplo motores y generadores)
- Defectos en las conexiones de la instalación (se producen en la puesta en marcha de instalaciones nuevas)

En el caso de que se produzca un cortocircuito, la intensidad que recorre la línea puede llegar a ser 1000 veces mayor que la intensidad nominal, produciéndose un calentamiento, deterioro y destrucción de los conductores y elementos de conexión. Para evitar esto hay que proteger la instalación mediante dispositivos capaces de cortar la corriente de cortocircuito antes que la instalación sufra ningún daño. Para seleccionar este tipo de elementos es necesario conocer la corriente de cortocircuito que puede circular por la instalación.

En la siguiente figura se representan los diferentes tipos de cortocircuitos.



*Tipos de cortocircuitos. Reproducción del Cuaderno Técnico nº 158 de Schneider Electric*

En esta asignatura estudiaremos únicamente los cortocircuitos trifásicos simétricos en instalaciones en las que la potencia de las máquinas eléctricas existentes es mucho menor que la potencia del transformador.

## 2.- CÁLCULO DE LAS CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO

Para caracterizar la corriente de cortocircuito es útil descomponerla en dos componentes:

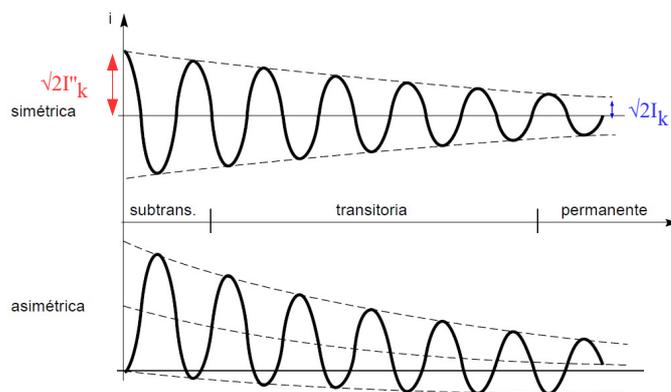
- Corriente simétrica (alterna): varía senoidalmente con una frecuencia igual a la de la red y una amplitud decreciente de forma exponencial hasta estabilizarse en un valor de  $\sqrt{2}I_k^1$
- Corriente asimétrica (continua o unidireccional): tiene una evolución exponencial alcanzando su valor máximo en el instante en que se produce el cortocircuito y tendiendo a 0.

Las magnitudes características de estas corrientes son:

- *Corriente inicial de cortocircuito* ( $\sqrt{2}I_k''$ ): Valor eficaz de la componente simétrica al comienzo del cortocircuito, es el principal parámetro a considerar en el cálculo de cortocircuitos.
- *Corriente de cresta* ( $I_p$ ): valor máximo instantáneo que alcanza la corriente de cortocircuito (la total simétrica+asimétrica).
- *Corriente permanente de cortocircuito* ( $\sqrt{2}I_k$ ): valor eficaz de la corriente de cortocircuito simétrica una vez finalizado el transitorio.

Para representar la amplitud decreciente de la componente simétrica se divide el modelado del circuito en tres fases:

- 1) periodo subtransitorio
- 2) periodo transitorio
- 3) régimen permanente



Representación de las corrientes de cortocircuito

El estudio de los cortocircuitos se limita al cálculo de  $I_k''$  e  $I_p$ .

### Cálculo de $I_k''$

El problema del cálculo de la corriente inicial simétrica se reduce al cálculo de la impedancia de cortocircuito equivalente o impedancia de defecto  $Z_k$  de los elementos recorridos por el cortocircuito, desde el punto en el que se produce el cortocircuito hasta el punto en el que se considera que la tensión se mantiene constante: origen de la línea de media tensión o bornes del primario del transformador para

<sup>1</sup> empleamos el subíndice k en vez de cc para no confundir con los parámetros de cortocircuito del transformador

líneas en las que se considera potencia infinita.

Una vez calculada la impedancia la corriente inicial simétrica viene dada por la siguiente expresión:

$$I''_k = U_{n2} / (\sqrt{3} * Z_k)$$

donde

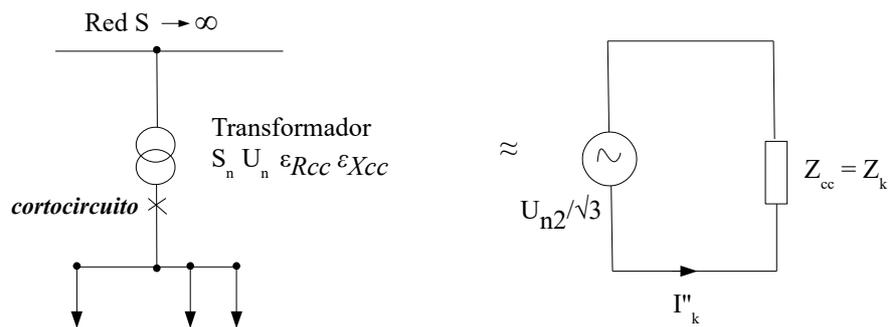
$U_{n2}$  es la tensión nominal secundaria del transformador

$$Z_k = R_k + jX_k$$

Se pueden dar tres casos distintos para el cálculo de la impedancia equivalente:

*CASO1: Cortocircuito en bornes del transformador suponiendo red de media tensión de potencia infinita*

En este caso, como se considera la red de potencia infinita, la tensión en bornes del transformador durante el cortocircuito es constante y la corriente de cortocircuito está limitada únicamente por la impedancia del transformador.



### Datos de partida

Parámetros básicos del transformador: potencia nominal, tensión nominal secundaria, caídas de tensiones relativas en cortocircuito.

### Cálculo de la impedancia de cortocircuito del transformador

De acuerdo con las expresiones de las caídas de tensión en cortocircuito estudiadas en la UD 2 podemos deducir las siguientes relaciones:

$$R_{cc} = (\varepsilon_{R_{cc}} / 100) * (U_n^2 / S_n) \quad (m\Omega)$$

$$X_{cc} = (\varepsilon_{X_{cc}} / 100) * (U_n^2 / S_n) \quad (m\Omega)$$

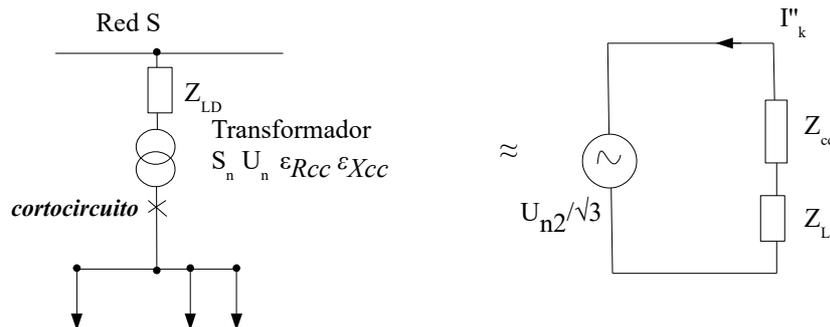
$$Z_{cc} = \sqrt{(R_{cc}^2 + X_{cc}^2)} \quad (m\Omega)$$

### Cálculo de la impedancia de defecto

$$R_k = R_{cc} \quad X_k = X_{cc} \quad Z_k = Z_{cc}$$

**CASO2: Cortocircuito en bornes del transformador considerando la limitación producida por la red de media tensión**

En este caso, al producirse el cortocircuito en bornes del transformador, la corriente que circula por la línea de media tensión que lo alimenta es superior a la corriente que circularía en condiciones normales de utilización, por tanto la caída de tensión en la línea es mayor y la tensión aplicada en el transformador es ligeramente menor que la nominal.



Donde:

$Z_{LD}$  es la impedancia de la línea de distribución y  $Z_L$  la misma impedancia reducida al secundario del transformador

#### Datos de partida

Parámetros básicos del transformador: potencia nominal, tensión nominal secundaria, caídas de tensiones relativas en cortocircuito.

Parámetros de la red: potencia de cortocircuito de la red  $S_k''$  que es un dato que debe proporcionar la compañía suministradora, por ejemplo en redes de distribución muy malladas suele ser del orden de 500 MVA y en zonas rurales del orden de 250 MVA.

#### Cálculo de la impedancia de cortocircuito del transformador

Igual que en el CASO1

#### Cálculo de la impedancia de la línea referida al secundario del transformador

De acuerdo con las siguientes expresiones:

$$Z_L = 1,1 \cdot (U_n^2 / 1000 \cdot S_k'') \quad (m\Omega)$$

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

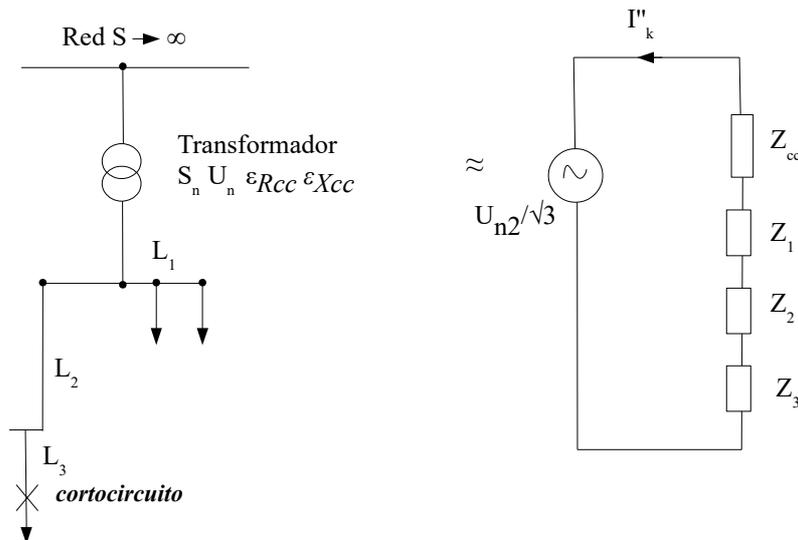
$$R_L = 0,1 \cdot X_L \quad (m\Omega)$$

#### Cálculo de la impedancia de defecto

$$R_k = R_{cc} + R_L \quad X_k = X_{cc} + X_L \quad Z_k = \sqrt{(R_k^2 + X_k^2)} \quad (m\Omega)$$

### CASO3: Cortocircuito en un punto alejado del transformador

En este caso la corriente de cortocircuito estará limitada por la red, el transformador y los elementos de la instalación que recorre, aunque en la práctica sólo se consideran las impedancias del transformador y de los cables, al ser despreciables el resto.



#### Datos de partida

Parámetros básicos del transformador: potencia nominal, tensión nominal secundaria, caídas de tensiones relativas en cortocircuito.

Parámetros de las líneas: sección, longitud, tipo de cable, etc.

#### Cálculo de la impedancia de cortocircuito del transformador

Igual que en el CASO1

#### Cálculo de la impedancia de las líneas

$$R_i = 1000 \cdot \rho \cdot l_i / (n_i \cdot S_i) \quad (m\Omega)$$

donde  $\rho$  es la resistividad del conductor en  $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ ,  $l$  es la longitud de la línea  $i$  en m,  $S$  la sección de un conductor en  $\text{mm}^2$  y  $n$  el número de conductores en paralelo por fase

$$X_i = x'_i \cdot l_i / 1000 \quad (m\Omega)$$

donde  $l$  es la longitud de la línea  $i$  en m y en función del tipo de línea tenemos un valor de  $x'_i$ , por ejemplo:

$x'_i = 80 \text{ m}\Omega/\text{km}$  en cables multiconductores (tripolares) o unipolares y dispuestos en trébol

$x'_i = 130 \text{ m}\Omega/\text{km}$  en ternos de cables unipolares separados y tendidos paralelamente

$x'_i = 90 \text{ m}\Omega/\text{km}$  en ternos de cables unipolares sin separación y tendidos paralelamente

También existen en la bibliografía y en catálogos de fabricantes ábacos que permiten estimar los valores de las resistencias y las reactancias de las líneas en función de sus características (longitud, sección, disposición).

### Cálculo de la impedancia de defecto

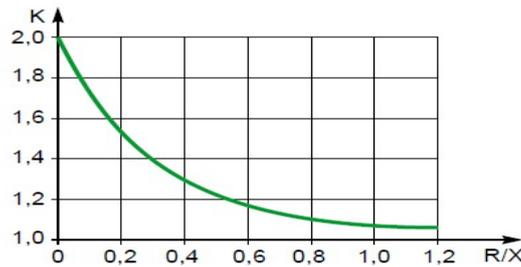
$$R_k = R_{cc} + R_1 + R_2 + R_3 \quad X_k = X_{cc} + X_1 + X_2 + X_3 \quad Z_k = \sqrt{(R_k^2 + X_k^2)} \quad (m\Omega)$$

### Cálculo de $I_p$

El valor de la corriente de cresta viene dado en función de la corriente inicial simétrica mediante la siguiente expresión:

$$I_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I''_k$$

donde el parámetro  $\kappa$  en función del cociente  $R_k/X_k$  se obtiene de la siguiente gráfica (o pág. 161 del manual):



Parámetro  $\kappa$  para el cálculo de la corriente de cresta según norma UNE-EN-60909-0

## 3.- PROBLEMAS RESUELTOS

**P1.-** Calcular las corrientes de cortocircuito en bornes de un transformador de distribución, de potencia 1600 kVA, relación de transformación 20kV/380V y caídas de tensión porcentuales

$$\varepsilon_{Rcc} = 1\%$$

$$\varepsilon_{Xcc} = 6\%$$

Se supone que el transformador está conectado a una red de potencia infinita.

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

$$R_{cc} = (\varepsilon_{RCC}/100) \cdot (U_n^2/S_n) = (1/100) \cdot (380^2/1600) = 0,9025 \text{ m}\Omega$$

$$X_{cc} = (\varepsilon_{XCC}/100) \cdot (U_n^2/S_n) = (6/100) \cdot (380^2/1600) = 5,415 \text{ m}\Omega$$

$$Z_k = Z_{cc} = \sqrt{(R_{cc}^2 + X_{cc}^2)} = 5,49 \text{ m}\Omega$$

por tanto la corriente inicial simétrica de cortocircuito será

$$I''_k = U_{n2}/(\sqrt{3} * Z_k) = 380/(\sqrt{3} * 5,49) = 39,9 \text{ kA}$$

Calculamos la corriente de cresta:

$$R_k/X_k = 0,9025/5,415 = 0,1666 \text{ y entrando en la gráfica anterior con este valor tenemos:}$$

$$\kappa \approx 1,6$$

luego

$$I_p = \kappa * \sqrt{2} * I''_k = 1,6 * \sqrt{2} * 39,9 = 90,28 \text{ kA}$$

**P2.-** Calcular las corrientes de cortocircuito en bornes del transformador del ejercicio anterior suponiendo en este caso que la potencia de la red es de 350 MVA, es decir, considerando la impedancia de la red de distribución de 20 kV.

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

$$R_{cc} = 0,9025 \text{ m}\Omega$$

$$X_{cc} = 5,415 \text{ m}\Omega$$

$$Z_{cc} = 5,49 \text{ m}\Omega$$

Calculamos la impedancia de la línea de 20 kV vista desde el secundario a partir de las siguientes expresiones:

$$Z_L = 1,1 * (U_n^2 / 1000 * S''_k) = 1,1 * (380^2 / (1000 * 350)) = 0,454 \text{ m}\Omega$$

$$X_L = 0,995 * Z_L = 0,995 * 0,454 = 0,451 \text{ m}\Omega$$

$$R_L = 0,1 * X_L = 0,1 * 0,451 = 0,0451 \text{ m}\Omega$$

luego

$$R_k = 0,9025 + 0,0451 = 0,947 \text{ m}\Omega$$

$$X_k = 5,415 + 0,451 = 5,83 \text{ m}\Omega$$

$$Z_k = \sqrt{(0,947^2 + 5,83^2)} = 5,9 \text{ m}\Omega$$

por tanto la corriente inicial simétrica de cortocircuito será

$$I''_k = U_{n2}/(\sqrt{3} * Z_k) = 380/(\sqrt{3} * 5,9) = 37,18 \text{ kA}$$

Calculamos la corriente de cresta:

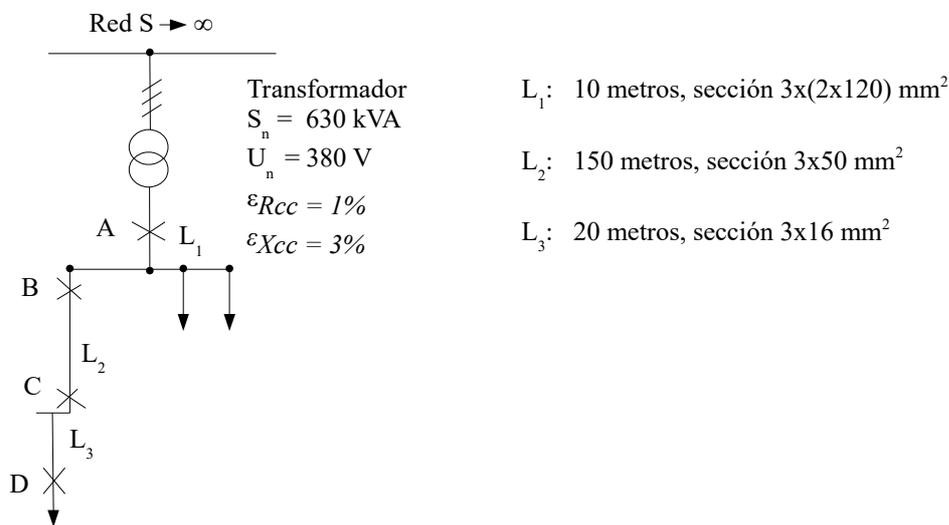
$R_k/X_k = 0,947/5,83 = 0,162$  y entrando en la gráfica anterior con este valor tenemos:

$$\kappa \approx 1,6$$

luego

$$I_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I''_k = 1,6 \cdot \sqrt{2} \cdot 37,18 = 84,12 \text{ kA}$$

**P3.-** Calcular las corrientes iniciales simétricas de cortocircuito en los puntos A, B, C, D de la instalación trifásica cuyo diagrama unifilar se representa en la siguiente figura. Los cables son de cobre con  $\rho_{Cu \text{ a } 20^\circ} = (1/58) \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ .



**PUNTO A**

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

$$X_{cc} = (\varepsilon_{Xcc}/100) \cdot (U_n^2/S_n) = (3/100) \cdot (380^2/630) = 6,87 \text{ m}\Omega$$

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

$$I''_k = U_n/(\sqrt{3} \cdot Z_k) = 380/(\sqrt{3} \cdot 7,24) = 30,3 \text{ kA}$$

Para el resto de líneas se emplean las expresiones:

$$R_i = 1000 \cdot \rho \cdot l_i / (n_i \cdot S_i)$$

$$X_i = x'_i \cdot l_i / 1000$$

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

	$R_i (m\Omega)$	$X_i (m\Omega)$	$\sum R_k (m\Omega)$	$\sum X_k (m\Omega)$	$Z_k (m\Omega)$
Trafo	2,29	6,87	2,29	6,87	7,24
$L_1$	0,72	$0,8/2 = 0,4^*$	3,01	7,27	7,86
$L_2$	51,7	12	54,71	19,27	58
$L_3$	21,5	1,6	76,21	20,87	79,01

\* porque hay dos conductores en paralelo por fase

y las corrientes en cada punto serán:

	$\sum Z_k (m\Omega)$	$I''_k (kA)$
Trafo	7,24	30,3
$L_1$	7,86	27,9
$L_2$	58	3,78
$L_3$	79,01	2,77