



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE INGENIERÍA



Instalaciones Eléctricas

Teoría y Cálculo de las Corrientes de Cortocircuito

Contenido

1.	INTRODUCCIÓN, CAUSAS Y CONSECUENCIAS DE LOS CORTOCIRCUITOS.....	4
1.1.	Introducción	4
1.2.	Origen de los cortocircuitos	6
1.3.	Tipos de cortocircuitos	7
1.4.	Consecuencias de los cortocircuitos	7
2.	COMPORTAMIENTO DE UN CIRCUITO SERIE R-L	9
2.1.	Transitorio de la corriente.....	9
2.2.	Casos particulares y comentarios.....	10
2.3.	Conclusiones.....	13
3.	FUENTES Y COMPORTAMIENTO TRANSITORIO DE LAS CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO	14
3.1.	Fuentes que aportan al defecto	14
3.1.1.	Máquinas Síncronas	14
3.1.2.	Máquinas Asíncronas	17
3.2.	Forma de onda típica de la corriente de CC.....	18
3.3.	Definiciones.....	18
3.4.	Comportamiento transitorio de las corrientes de cortocircuito.....	20
3.4.1.	Cortocircuito alejado de los generadores	20
3.4.2.	Defectos próximos a las máquinas eléctricas rotativas	20
3.5.	Conclusiones.....	22
4.	IMPEDANCIAS EQUIVALENTES DE LOS ELEMENTOS ELÉCTRICOS.....	23
4.1.	Modelado	23
4.2.	Impedancia en %	24
4.3.	Conversión de impedancias	24
4.4.	Red de distribución (UTE).....	25
4.5.	Transformadores.....	26
4.6.	Conductores (cables y barras).....	27
4.7.	Generadores y Motores Síncronos.....	29
4.8.	Motores Asíncronos	29
4.8.1.	Contribución de motores asíncronos al cortocircuito.....	31
5.	CÁLCULO DE LAS CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO	32
5.1.	Introducción	32

5.2.	Procedimiento de cálculo de las corrientes de cortocircuito.....	34
5.3.	Ecuaciones para los diferentes tipos de cortocircuitos.....	37
5.3.1.	Cortocircuito trifásico equilibrado	38
5.3.2.	Cortocircuito entre dos fases (bifásico aislado de tierra)	38
5.3.3.	Cortocircuito monofásico entre una fase y neutro	39
5.3.4.	Cortocircuito monofásico entre una fase y tierra	39
5.3.5.	Observaciones	40
6.	EJEMPLO DE APLICACIÓN.....	41
6.1.	Cálculo de las impedancias equivalentes	42
6.2.	Cálculo de las corrientes de cortocircuito en los distintos puntos de la instalación ..	43
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	47

1. INTRODUCCIÓN, CAUSAS Y CONSECUENCIAS DE LOS CORTOCIRCUITOS

1.1. Introducción

En el diseño de las instalaciones eléctricas, se deben considerar no sólo las corrientes nominales de servicio, sino también las sobrecorrientes debidas a las sobrecargas y a los cortocircuitos.

El cortocircuito se define como una conexión de relativamente baja resistencia o impedancia, entre dos o más puntos de un circuito que están normalmente a tensiones diferentes.

Las corrientes de cortocircuito se caracterizan por un incremento prácticamente instantáneo y varias veces superior a la corriente nominal, en contraste con las de una sobrecarga, que se caracteriza por un incremento mantenido en un intervalo de tiempo, y algo mayor a la corriente nominal.

Se analizará a continuación un sistema simple compuesto por una fuente, una canalización eléctrica y una carga pasiva, según el diagrama y el modelo equivalente que se representan a continuación:



Figura 1: Sistema elemental.

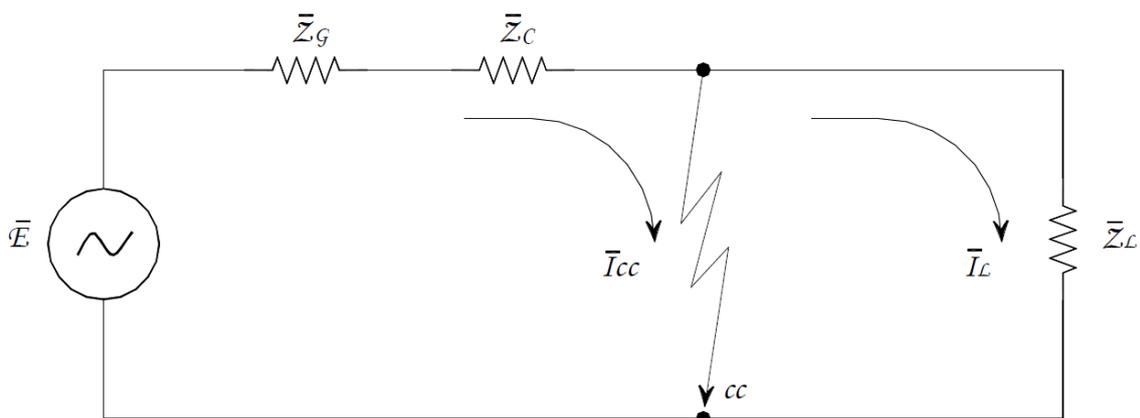


Figura 2: Circuito equivalente del sistema de la Figura 1.

En régimen de operación normal:

- $\overline{I_L} = \frac{\overline{E}}{\overline{Z_G} + \overline{Z_C} + \overline{Z_L}}$, corriente de carga
- \overline{E} , tensión eficaz de fase de la fuente
- $\overline{Z_G}$, impedancia interna de la fuente
- $\overline{Z_C}$, impedancia de la línea
- $\overline{Z_L}$, impedancia de la carga

La impedancia de la carga en un sistema siempre es muy superior a la de los componentes (cables, fuentes, transformadores, etc.):

$$\overline{Z_L} \gg \overline{Z_G} + \overline{Z_C}$$

$$\overline{I_L} \cong \frac{\overline{E}}{\overline{Z_L}}$$

La corriente de carga queda limitada esencialmente por la impedancia de carga.

En un cortocircuito franco (de impedancia cero):

$$\overline{I_{CC}} = \frac{\overline{E}}{\overline{Z_G} + \overline{Z_C}}$$

La corriente de cortocircuito queda limitada por las impedancias de los componentes del sistema.

$$\Rightarrow \overline{I_{CC}} \gg \overline{I_L}$$

Las corrientes de cortocircuito son muy superiores a las corrientes nominales de carga, producen esfuerzos térmicos y electrodinámicos muy importantes sobre los distintos componentes de las instalaciones, y pueden provocar daños irreparables sobre los componentes de las instalaciones si no son eliminadas rápidamente.

Por lo tanto, el conocimiento de las mismas en los distintos puntos de la instalación resulta indispensable para el diseño de los distintos componentes, como ser: barras, cables, dispositivos de maniobra y protección, etc.

Para diseñar una instalación y elegir adecuadamente los dispositivos de protección, se debe conocer las corrientes de cortocircuito máximas y mínimas en los distintos niveles.

- **Corrientes de cortocircuito máximas:** Estas corrientes corresponden a un cortocircuito en los bornes de salida del dispositivo de protección, considerando la configuración de la red y al tipo de cortocircuito de mayor aporte. En general, en las instalaciones de BT el tipo de cortocircuito de mayor aporte es el trifásico.

Estas corrientes se utilizan para determinar:

- El Poder de Corte y de Cierre de los Interruptores.
- Los esfuerzos térmicos y electrodinámicos en los componentes.

- **Corrientes de cortocircuito mínimas:** Estas corrientes corresponden a un cortocircuito en el extremo del circuito protegido, considerando la configuración de la red y al tipo de cortocircuito de menor aporte. En las instalaciones de BT los tipos de cortocircuito de menor aporte son el fase-neutro (circuitos con neutro) o entre dos fases (circuitos sin neutro).

Estas corrientes se utilizan para determinar:

- El ajuste de los dispositivos de protección para la protección de los conductores frente a cortocircuito.

Por último, las corrientes de cortocircuito fase-tierra se utilizan para elegir los dispositivos de protección contra los contactos eléctricos indirectos, y para diseñar los conductores de tierra de protección. Este punto se estudiará en los temas “Protección contra contactos eléctricos” y “Puesta a tierra y conductores de protección”.

1.2. Origen de los cortocircuitos

Los cortocircuitos se producen por distintas causas:

- Deterioro o perforación del aislamiento debido a calentamientos excesivos prolongados, humedad, ambientes corrosivos o envejecimiento natural.
- Problemas mecánicos: rotura de conductores o aisladores por objetos extraños o animales, ramas de árboles en líneas aéreas e impactos en cables subterráneos.
- Sobretensiones de origen interno debido a maniobras o defectos.
- Sobretensiones de origen externo debido a descargas atmosféricas.
- Factores humanos: falsas maniobras, sustitución inadecuada de materiales, etc.
- Otras causas: vandalismos, incendios, inundaciones, etc.

1.3. Tipos de cortocircuitos

Los tipos de cortocircuitos que se estudiarán en este curso son los siguientes:

- Cortocircuito trifásico equilibrado.
- Cortocircuito entre dos fases aislado (sin conexión a tierra).
- Cortocircuito monofásico fase-tierra y fase-neutro.

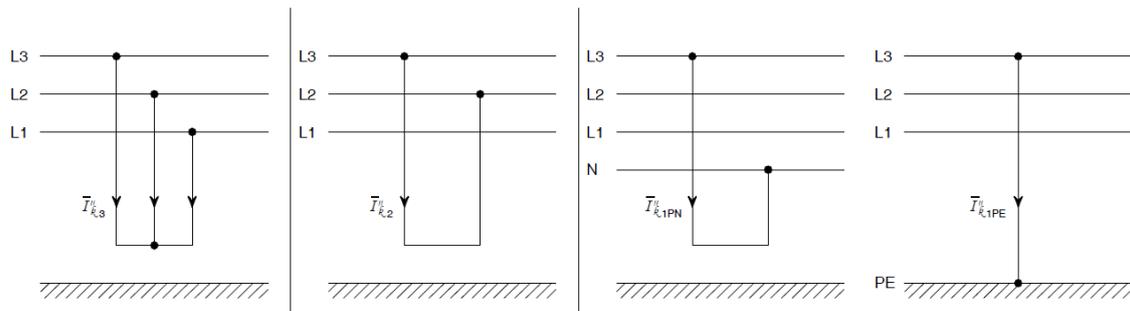


Figura 3: Tipos de CC, de izquierda a derecha: trifásico, entre dos fases, fase-neutro/ fase-tierra.

Los porcentajes promedio de ocurrencia de cada tipo de cortocircuito en una instalación, se indican en la tabla siguiente:

Tipos de cortocircuitos	Incidencia (%)
Monofásicos	80 %
Bifásicos	15 %
Trifásicos	5 %

Tabla 1: Incidencia de CC, en %.

1.4. Consecuencias de los cortocircuitos

Las consecuencias de los cortocircuitos son variables dependiendo de la naturaleza y duración de los defectos, el punto de la instalación afectado y la magnitud de las corrientes.

En general se puede considerar algunos de los siguientes efectos:

- **En el punto de defecto:** la presencia de arcos con deterioro de los aislantes, fusión de los conductores, principio de incendio y riesgo para las personas.
- **Para el circuito o equipo defectuoso:**
 - Esfuerzos electrodinámicos, con deformación de los juegos de barras, deslambamiento de los cables, rotura de aisladores, averías en bobinados de transformadores o máquinas eléctricas rotativas.

- Esfuerzos térmicos, con sobrecalentamientos con riesgo de deterioros de los aislantes.
- **Para el resto de la instalación:** disminución de la tensión durante el tiempo de eliminación del defecto (en BT, 10 a 100 ms), puesta fuera de servicio de una parte de la instalación, perturbaciones en los circuitos de control y comunicaciones.

Los cortocircuitos presentan fundamentalmente efectos térmicos y electrodinámicos.

Los efectos térmicos dependen de la energía liberada por efecto Joule y vienen determinados por la expresión:

$$E_T = \int R \cdot i^2 dt$$

Este punto se estudiará en el tema “Canalizaciones Eléctricas”.

El esfuerzo electrodinámico, entre conductores paralelos y rectilíneos separados una distancia d y recorridos por una corriente I , viene determinado por la Ley de Biot y Savart:

$$F = \mu\mu_0 \frac{I^2}{2\pi d} L$$

En el caso de una corriente alterna, la fuerza máxima entre conductores será proporcional al cuadrado de la corriente máxima de cortocircuito:

$$F_{MAX} \propto (I_S)^2 \cdot \frac{L}{d}$$

Donde:

- I_S , corriente de cresta máxima
- L , longitud entre apoyos del conductor
- d , distancia entre conductores

2. COMPORTAMIENTO DE UN CIRCUITO SERIE R-L

2.1. Transitorio de la corriente

Se analizará a continuación el comportamiento de un circuito serie R-L y una fuente de tensión ideal sinusoidal pura:

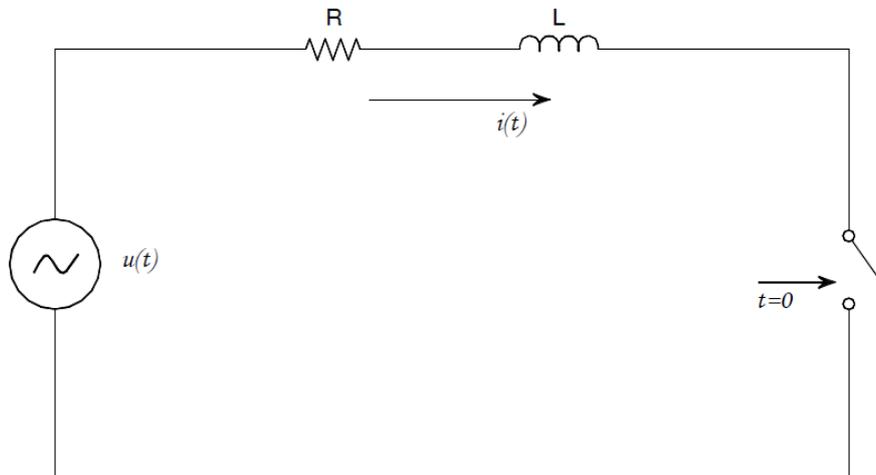


Figura 4: Ejemplo de circuito R-L.

La fuente presenta tensión $u(t) = \sqrt{2} \cdot U \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi)$, donde U es el valor eficaz de la tensión sinusoidal.

Resolviendo el circuito:

$$u(t) = R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt}$$

La solución a esta ecuación diferencial, viene dada por la siguiente expresión:

$$i(t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi - \theta) + K \cdot e^{-\left(\frac{R}{L}\right)t}$$

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2}} \quad , \quad \theta = \text{Arctg}\left(\frac{\omega \cdot L}{R}\right)$$

El valor de la constante K se determina, con la condición inicial de corriente nula:

$$i(0) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \text{sen}(\varphi - \theta) + K = 0$$

$$\Rightarrow K = -\sqrt{2} \cdot I \cdot \text{sen}(\varphi - \theta)$$

Por lo tanto, la expresión de la evolución de la corriente con el tiempo resulta:

$$i(t) = \sqrt{2} \cdot I \left[\text{sen}(\omega t + \varphi - \theta) - \text{sen}(\varphi - \theta) \cdot e^{-\left(\frac{R}{L}\right)t} \right]$$

La cual a su vez puede descomponerse en:

- componente alterna: $i_a(t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi - \theta)$
- componente continua: $i_c(t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \text{sen}(\theta - \varphi) \cdot e^{-\left(\frac{R}{L}\right)t}$

2.2. Casos particulares y comentarios

- El ángulo φ determina el valor de la tensión cuando se cierra el circuito:

$$u(0) = \sqrt{2} \cdot U \cdot \text{sen} \varphi$$

$$\varphi = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2} \quad \Rightarrow \quad \text{tensión inicial máxima } \sqrt{2}U$$

$$\varphi = 0, \pi \quad \Rightarrow \quad \text{tensión inicial nula}$$

- El ángulo θ está determinado por la reactancia (ωL) y la resistencia (R) del circuito cortocircuitado, y es el desfase entre la tensión y la componente alterna de la corriente (i_a).
- El valor inicial de la componente continua queda determinado por φ (valor inicial de la tensión al cerrar el circuito) y θ (determinado por la reactancia y resistencia del circuito):

$$i_c(0) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \text{sen}(\theta - \varphi)$$

- En la figura siguiente se representa la forma de onda de la corriente:

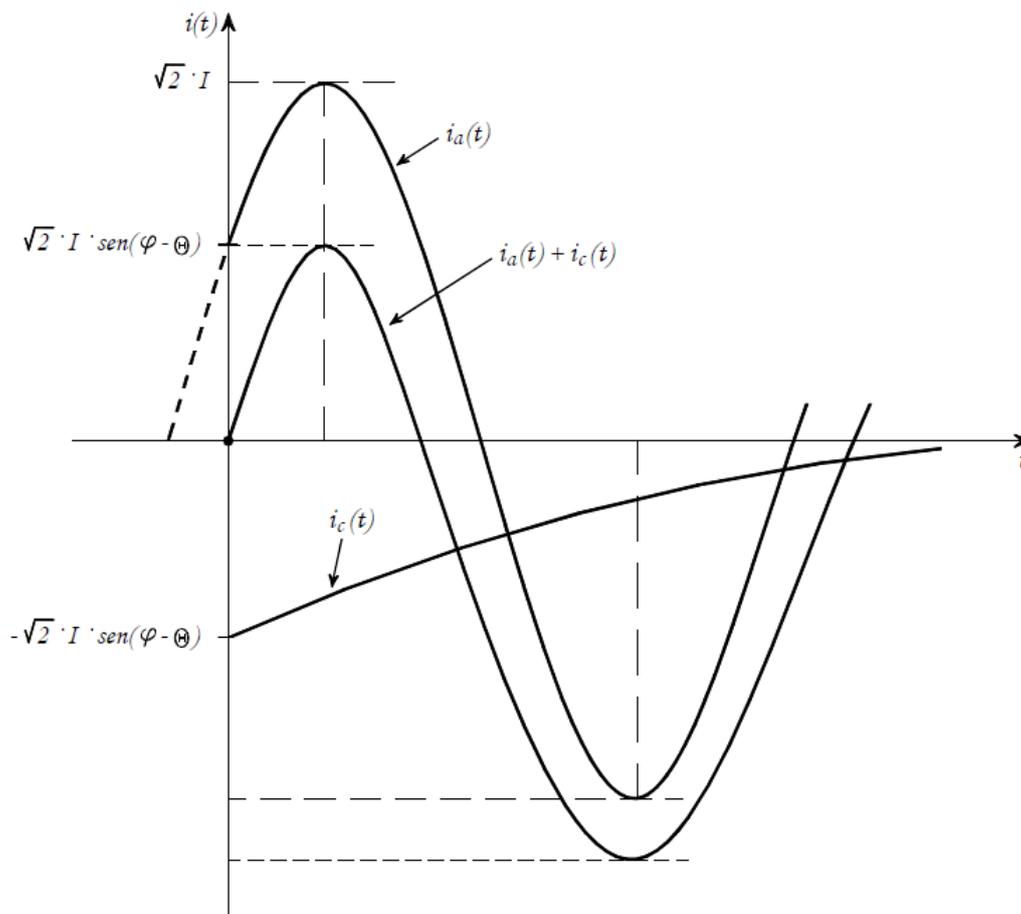


Figura 5: Forma de onda de la corriente de CC, caso general.

- **Corriente $i(t)$ simétrica pura:**

Si el circuito se cierra en un punto de la onda de tensión tal que $\varphi - \theta = \begin{cases} 0 \\ \pi \end{cases}$

$$\Rightarrow i_c(0) = 0 \Rightarrow i(t) = i_a(t)$$

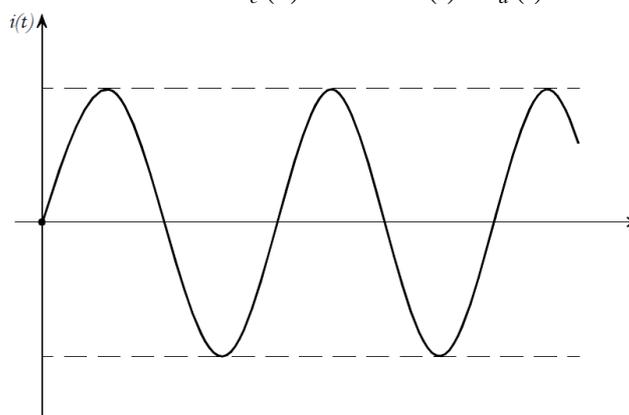


Figura 6: Corriente simétrica pura.

• **Corriente $i(t)$ con asimetría máxima:**

Si el circuito cierra en un punto de la onda de tensión tal que: $\varphi - \theta = \begin{cases} \pi/2 \\ 3\pi/2 \end{cases} \Rightarrow$

$$i_c(0) = \mp \sqrt{2}I \Rightarrow i(t) = i_a(t) \mp \sqrt{2} \cdot I \cdot e^{-\left(\frac{R}{L}\right)t}$$

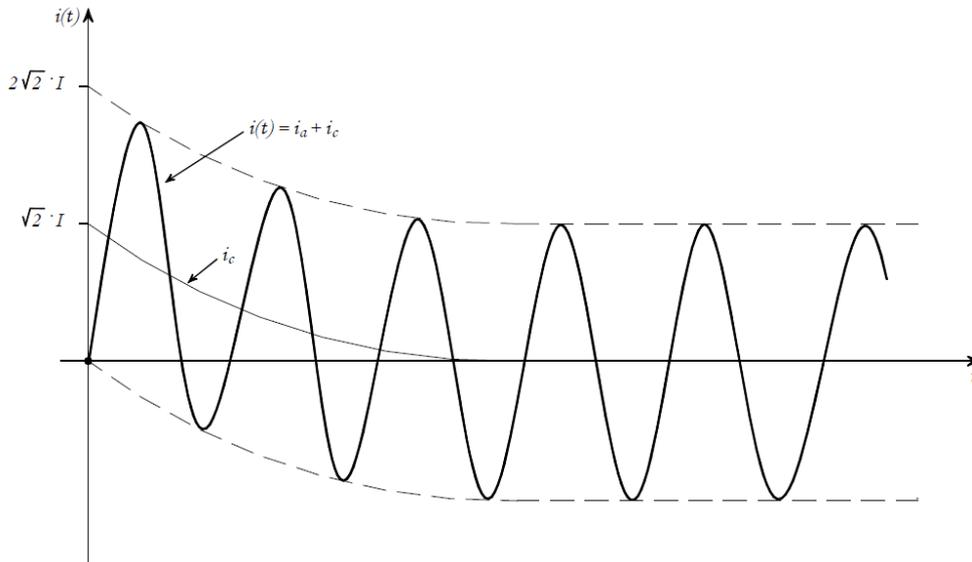


Figura 7: Corriente con asimetría máxima.

La constante de tiempo $\tau = \frac{L}{R}$ determina la tasa de decrecimiento de la componente continua. Valores extremos:

- $R = 0$ (circuito inductivo puro)

$$i_c(t) = -\sqrt{2} \cdot I \cdot \text{sen}(\varphi - \theta) \quad \text{Componente continua constante.}$$

- $L = 0$ (circuito resistivo puro)

$$i_c(t) \rightarrow 0 \quad \text{Componente continua tiende a cero instantáneamente.}$$

Los valores típicos de la constante de tiempo de la componente continua son los siguientes:

Ubicación del cortocircuito	R/X	$\tau = L/R$ (s)
MT	0.1	0.032
BT en bornes del transformador	0.2	0.016
BT alejado del transformador	1.0	0.003

Figura 8: Valores típicos de constante de tiempo τ .

La relación R/X es la relación entre la componente resistiva y la reactancia de la impedancia de cortocircuito del circuito equivalente de falla. En las instalaciones de BT, si el cortocircuito es próximo a los bornes de BT del transformador de potencia (barras del Tablero General) $R \ll X$, y cuando el cortocircuito es en circuitos terminales de la instalación $R \cong X$.

Como se puede observar en la tabla, en las instalaciones de BT la componente de continua influye sólo cuando el cortocircuito es próximo a los bornes de BT del transformador de potencia MT/BT.

2.3. Conclusiones

Una instalación real se puede representar para el cálculo de cortocircuito como una fuente de tensión ideal equivalente, en serie con la impedancia de cortocircuito de la red.

Por lo tanto, el estudio del comportamiento de la corriente de cortocircuito en una instalación real es similar al estudio del circuito serie R-L, con las siguientes consideraciones:

- Los valores de la resistencia R y la reactancia X son conocidos y están determinados por la componente resistiva y la reactancia de la impedancia de cortocircuito del circuito equivalente de falla, por tanto, la mayor o menor asimetría dependerá del valor de la tensión en el instante del cortocircuito, que no es un dato conocido. Para el diseño se consideran las condiciones de máxima asimetría.

Si $X \gg R \Rightarrow \theta \cong \pi/2$ la condición de máxima asimetría se dará si el cortocircuito se produce en el instante que la tensión pasa por cero.

- La corriente inicial en una instalación real no es nula, es la corriente previa al defecto determinada por la carga. De todas formas, en las instalaciones de BT esta corriente se despreciará frente a la corriente de cortocircuito.

Las fuentes de tensión en una instalación real no son de amplitud constante, debido a la variación de la fuerza magnetomotriz resultante en las máquinas eléctricas rotativas durante el transitorio del cortocircuito. Debido a esto la amplitud de la componente alterna de la corriente no es constante, sino que existe un transitorio que se estudiará a continuación.

3. FUENTES Y COMPORTAMIENTO TRANSITORIO DE LAS CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO

3.1. Fuentes que aportan al defecto

Las fuentes que aportan al cortocircuito y se denominan elementos activos, son esencialmente las máquinas eléctricas rotativas.

Los elementos activos que se considerarán en este curso son:

- Red de suministro de energía eléctrica de la distribuidora (UTE).
- Máquinas eléctricas síncronas (generadores y motores).
- Máquinas eléctricas asíncronas (motores).

A continuación, se analizará el aporte de las máquinas eléctricas rotativas y se presentará algunos diagramas del comportamiento transitorio de las corrientes de cortocircuito en cada caso.

3.1.1. Máquinas Síncronas

Los Generadores Síncronos conforman una parte importante del sistema público de distribución de energía eléctrica.

En la figura siguiente se representa un diagrama de una máquina síncrona funcionando como generador:

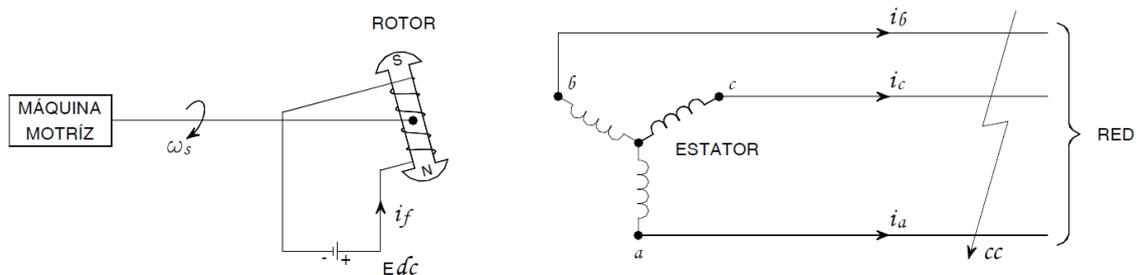


Figura 9: Representación esquemática de una máquina síncrona.

Al producirse un cortocircuito en los bornes del estator, su eje continúa girando accionado por su máquina motriz (generador) o debido a la inercia de la carga (motor), el campo del rotor excitado por la fuente externa de corriente continua, y en ambos casos la máquina se comporta como una fuente aportando al cortocircuito.

Se produce un transitorio en la corriente, el que se representa en la figura siguiente eliminando la componente continua:

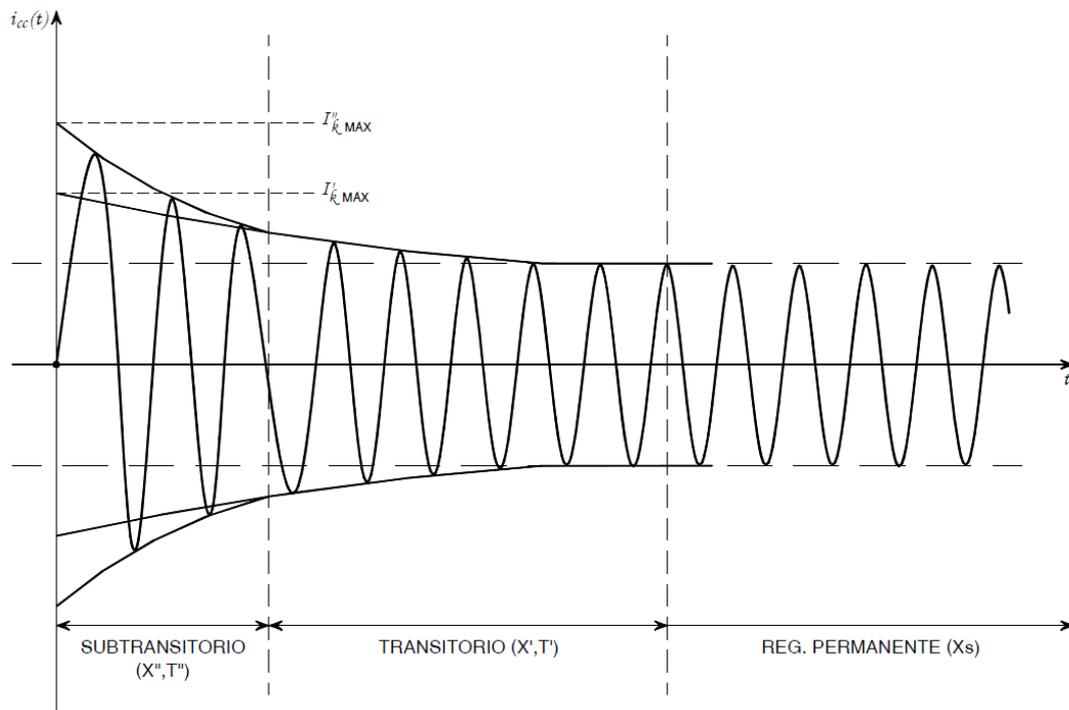


Figura 10: Forma de onda de la corriente de CC en bornes de una MS.

En este transitorio se distinguen tres períodos: subtransitorio, transitorio y régimen permanente.

- **Período subtransitorio:**

Este es el período inicial de la corriente de cortocircuito. El principal responsable de este período es el arrollamiento amortiguador que se instala en la cabeza de los polos del rotor de los generadores síncronos.

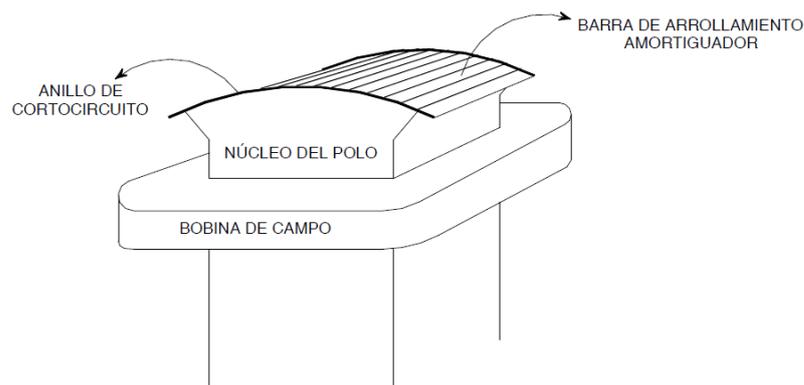


Figura 11: Bobinados amortiguadores en cabeza de polo de una MS.

En régimen permanente el generador gira a la velocidad de sincronismo y no existe inducción sobre este arrollamiento, pero en cortocircuito debido a las variaciones entre el campo rotor y el del estator, se inducen corrientes sobre

este arrollamiento, generándose un campo que actúa como freno dando mayor estabilidad al generador y como contrapartida produce el incremento de la corriente de cortocircuito.

- **Período transitorio:**

Este período se caracteriza por un decrecimiento más lento de la corriente y durante un intervalo mayor.

El principal responsable de este período es el campo del rotor. Durante el cortocircuito se induce en el bobinado de campo una corriente alterna comportándose el mismo frente a la corriente alterna como un arrollamiento en cortocircuito, generando estas corrientes inducidas un campo magnético que provoca este período transitorio.

- **Régimen permanente:**

Por último, el régimen permanente permanece hasta que sea eliminado el cortocircuito por las protecciones.

En el caso del generador el transitorio de la corriente es más lento y existe una corriente de régimen permanente mantenida por la máquina motriz y la fuente de excitación del campo. Mientras que en el caso del motor el transitorio es rápido debido a que el eje sólo es mantenido en movimiento por la inercia de la carga y la corriente de régimen será nula.

A los efectos del cálculo de cortocircuito se modelarán las máquinas síncronas como una fuente de tensión ideal en serie con una reactancia interna correspondiente al período que se quiera estudiar:

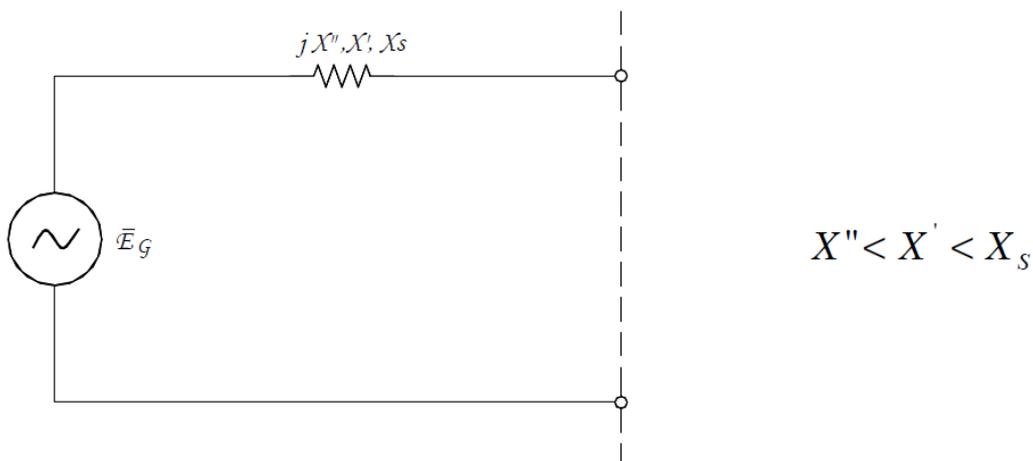


Figura 12: Modelo monofásico estrella equivalente de la máquina síncrona en CC.

Donde:

- E_G , valor eficaz de la tensión fase neutro en vacío del generador.
- $X'' = \frac{E_G}{I''}$ con $I'' = \frac{I''_{MAX}}{\sqrt{2}}$, reactancia subtransitoria.

- $X' = \frac{E_G}{I'}$ con $I' = \frac{I'_{MAX}}{\sqrt{2}}$, reactancia transitoria.
- X_s , reactancia de régimen permanente.

En la tabla siguiente se dan algunos valores típicos para las constantes de tiempo y las reactancias:

Reactancias	Constantes de tiempo
$X'' = 10$ a 20 %	$T'' = 0.02$ a 0.05 seg
$X' = 20$ a 40 %	$T' = 0.5$ a 2 seg
$X_s = 120$ a 200 %	

Tabla 2: Valores típicos de reactancias de máquinas síncronas.

3.1.2. Máquinas Asíncronas

La principal aplicación de este tipo de máquinas eléctricas es como motor en la industria.

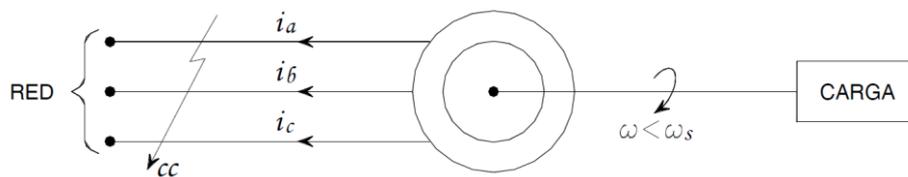


Figura 13: Representación esquemática del motor asíncrono.

En los motores asíncronos (o de inducción), el estator está alimentado por la red de corriente alterna, que genera un campo magnético giratorio a la frecuencia de sincronismo. El rotor en esta máquina gira a una velocidad menor a la de sincronismo y el campo no está alimentado por una fuente externa, sino que es creado por inducción del estator sobre el arrollamiento o jaula del rotor.

En el caso de un cortocircuito, la tensión de alimentación del campo del estator deja de existir y por lo tanto también la excitación del campo del rotor. El transitorio en este caso sólo se debe al campo magnético residual existente en el rotor y a la inercia de la carga, y la corriente de cortocircuito tenderá a cero rápidamente en un período de 2 a 3 ciclos.

El modelo que se utilizará para el cálculo de cortocircuito de los motores asíncronos es una fuente de tensión ideal en serie con una reactancia constante.

3.2. Forma de onda típica de la corriente de CC

En la Figura 14 se presenta un diagrama típico de evolución de la corriente de cortocircuito, con el que se definen las diversas corrientes utilizadas para el diseño de las instalaciones eléctricas de BT.

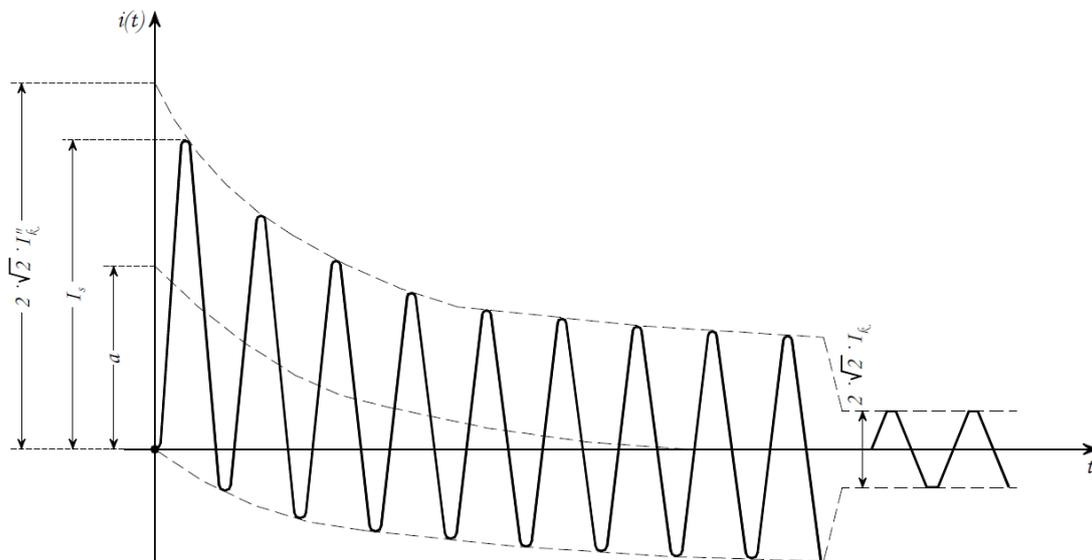


Figura 14: Parámetros asociados a la corriente de CC.

En este diagrama:

- La componente alterna tiene una amplitud que decrece con el tiempo debido al comportamiento transitorio de las máquinas eléctricas ($X'' < X' < X$).
- La componente continua produce una asimetría en los primeros ciclos, dicha componente depende la tensión inicial, y de la relación entre la reactancia y la resistencia de la impedancia de cortocircuito del circuito equivalente de falla.

3.3. Definiciones

- **Corriente de cortocircuito prevista:** Corriente que circularía si el cortocircuito fuera remplazado por una conexión ideal de impedancia despreciable, sin ninguna modificación de la alimentación.
- **Corriente de cortocircuito simétrica inicial (I''_k):** Valor eficaz de la componente de alterna de la corriente de cortocircuito prevista, en el instante de la aparición del cortocircuito, si la impedancia conserva su valor inicial.

- **Valor de cresta de la Corriente de Cortocircuito (I_s):** Valor instantáneo máximo posible de la corriente de cortocircuito prevista.

Para el cálculo de la corriente de cresta I_s , se considera la máxima asimetría de la corriente debido a la componente de continua. Como ya fue analizado, esta asimetría dependen de la relación R/X del circuito cortocircuitado y del valor de la tensión en el instante de la falta.

A los efectos del diseño se trabaja con el valor máximo posible y se puede calcular como:

$$I_s = k\sqrt{2} \cdot I''_k$$

$$k \cong 1.02 + 0.98 \cdot e^{-\left(\frac{3R}{X}\right)}$$

El factor k se puede obtener del gráfico de la figura siguiente:

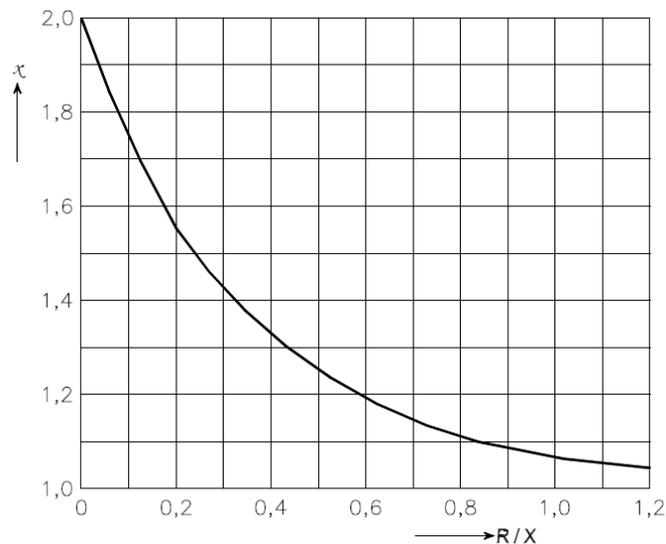


Figura 15: Factor de asimetría k .

En las redes de BT las peores condiciones de asimetría debida a la componente continua, se dan en el caso de un cortocircuito en bornes del transformador, siendo los valores típicos a utilizar para estos casos:

R/X	k	I_s
0.2	1.6	$2.26 I''_k$

Tabla 3: Valores de asimetría típicos en BT.

- **Corriente de cortocircuito permanente (I_k):** Valor eficaz de la corriente de cortocircuito que se mantiene tras la extinción de los fenómenos transitorios.

3.4. Comportamiento transitorio de las corrientes de cortocircuito

Por lo visto anteriormente, la evolución de las corrientes de cortocircuito depende del tipo de fuentes y de su ubicación respecto al punto de falla.

3.4.1. Cortocircuito alejado de los generadores

Se define como un cortocircuito durante el cual la magnitud de la componente de alterna de la corriente de cortocircuito prevista permanece prácticamente constante. Por lo tanto, en este caso se puede despreciar los efectos transitorios en la componente alterna de la corriente.

A continuación se presenta el gráfico de evolución de la corriente en el caso más desfavorable de asimetría:

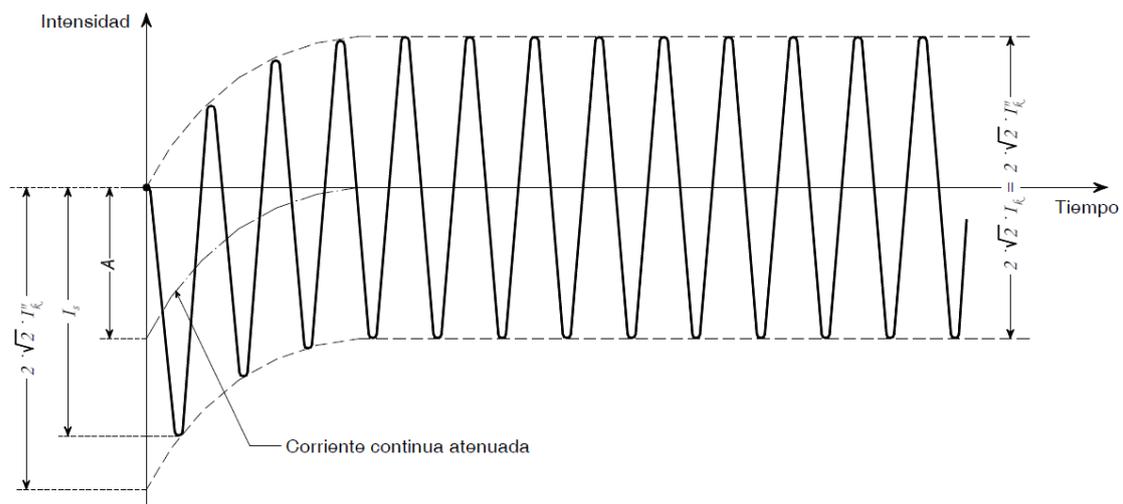


Figura 16: Corriente en CC alejado de generadores.

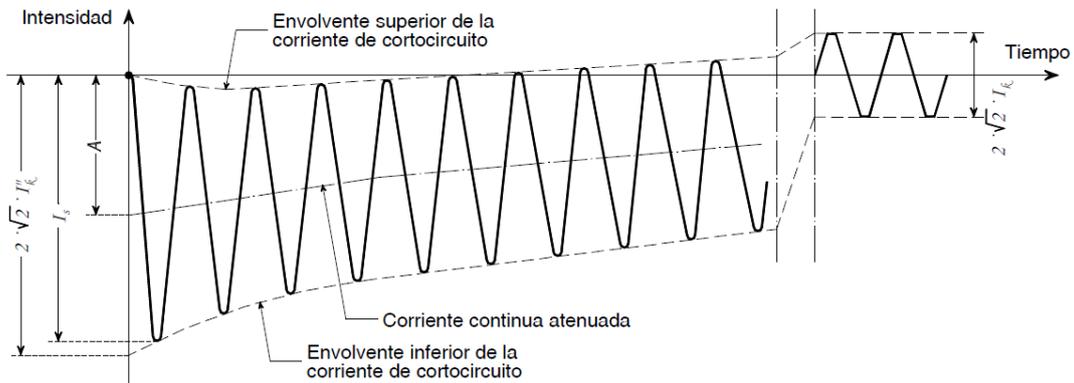
Esta aproximación es válida para las instalaciones de BT que se alimentan de la red de la distribuidora (UTE) y se puede considerar que:

$$I_k'' = I_k$$

3.4.2. Defectos próximos a las máquinas eléctricas rotativas

A continuación, se presentan los gráficos de evolución de las corrientes de cortocircuito para un generador síncrono y para un motor asíncrono de BT.

• **Generador Síncrono:**



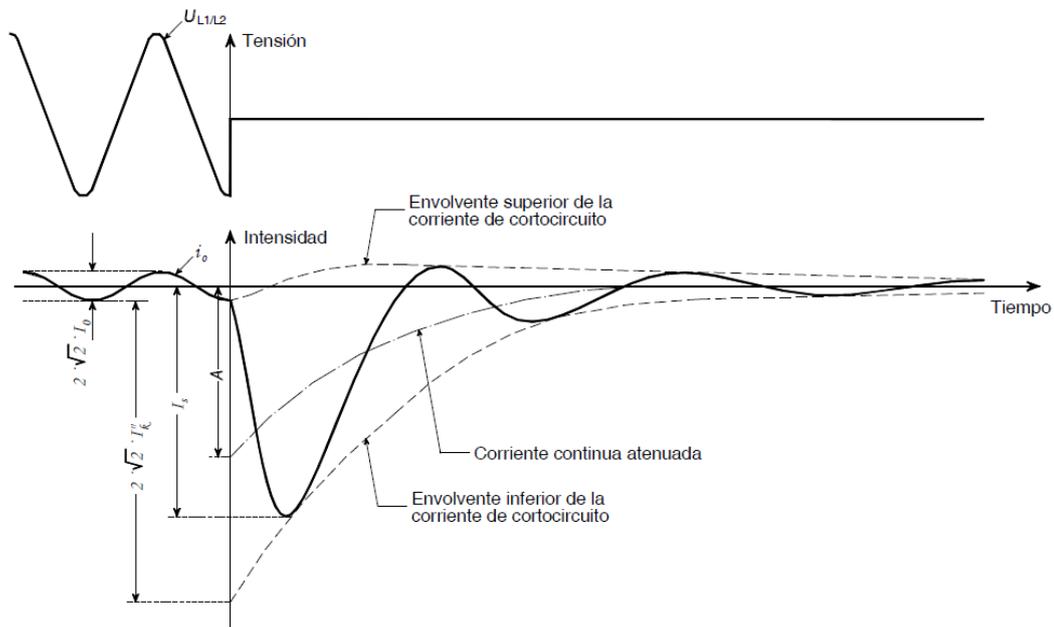
Evolución de la corriente de cortocircuito, en caso de producirse éste próximo al generador, para la fase en el instante más desfavorable de la maniobra (oscilograma tomado en caso de cortocircuito en los bornes de un generador síncrono después de la marcha en vacío).

Figura 17: Corriente de CC en bornes de un generador síncrono.

En este caso se cumple en general:

$$I''_k > I_k$$

• **Motor asíncrono de BT:**



Evolución de la corriente de cortocircuito de un motor asíncrono de baja tensión para la fase en el instante más desfavorable de maniobra; i_0 es la intensidad en vacío (oscilograma tomado en caso de cortocircuito en los bornes después de la marcha en vacío).

Figura 18: Corriente de CC en bornes de un motor asíncrono.

En este caso la corriente de cortocircuito se amortigua en un tiempo de 2 o 3 ciclos y se cumple en general:

$$I''_k \gg I_k = 0$$

3.5. Conclusiones

La evolución de la corriente de cortocircuito en todos los casos presentados tiene una característica común: el valor de cresta máximo se alcanza luego de un tiempo de ≈ 10 ms (medio ciclo en 50 Hz).

El aporte de los motores asíncronos de BT al cortocircuito ocurre solamente durante los primeros 2 o 3 ciclos (40 a 60 ms).

Los interruptores automáticos de BT operan frente a cortocircuitos en tiempos de decenas de ms, por lo que la apertura será durante el transitorio de la componente continua si el defecto es próximo al transformador de potencia.

En las instalaciones de BT sólo utilizaremos para el diseño, las corrientes I''_k e I_S y se toma como máxima condición de asimetría:

$$I_S = 1.6\sqrt{2}I''_k = 2.26I''_k$$

4. IMPEDANCIAS EQUIVALENTES DE LOS ELEMENTOS ELÉCTRICOS

4.1. Modelado

Para el cálculo de las corrientes de cortocircuito se debe disponer de un diagrama unifilar de la instalación, indicando todos los elementos y sus características. Los principales elementos para el cálculo son: la conexión a la red de distribución (UTE), generadores y motores, transformadores, conductores, y dispositivos de protección contra sobrecorrientes.

Cada elemento de la instalación será modelado por un circuito equivalente para el cálculo de cortocircuito, definiendo cuáles son los elementos que aportan al defecto (elementos activos) y los que no aportan al defecto (elementos pasivos).

Los elementos activos de la instalación (red de distribuidora, generadores y motores) serán modelados como una fuente de tensión ideal en serie con una impedancia o una reactancia en el caso que se pueda despreciar las pérdidas Joule.

Los elementos pasivos de la instalación (transformadores y cables) serán modelados por una impedancia de fase.

En el cálculo de las corrientes de cortocircuito de BT se desprecian las capacidades a tierra de los cables, y los valores de las fuentes de tensión y las impedancias de todos los equipos eléctricos se suponen constantes.

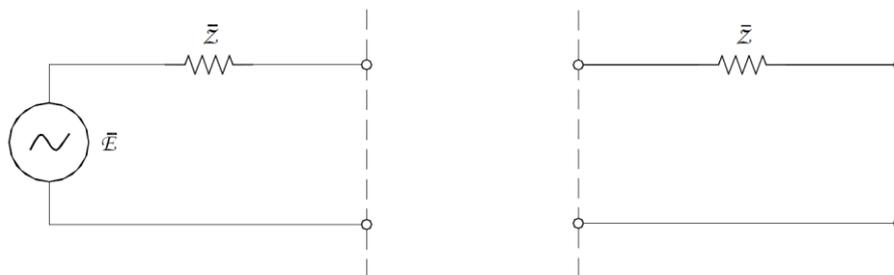


Figura 19: Modelos monofásicos estrella equivalente de elementos activos (izquierda) y pasivos (derecha).

En este documento se dan como ejemplo algunos valores aproximados de impedancias equivalentes. Para un cálculo de cortocircuito en una instalación específica, se deben utilizar los datos característicos reales de los distintos elementos, obtenidos de los catálogos correspondientes.

4.2. Impedancia en %

La impedancia $z(\%)$ se utiliza para los transformadores y las máquinas eléctricas.

La impedancia $z(\%)$ se define como el valor de la diferencia de tensión en la impedancia debido al pasaje de la corriente nominal, expresada en porcentaje de la tensión nominal:

$$z(\%) = 100 \cdot \frac{Z(\Omega) \cdot I_n(A)}{V_n(V)}$$

Donde:

- I_n corriente nominal
- V_n tensión nominal fase-neutro
- Z valor absoluto de la impedancia

La fórmula anterior puede ser modificada introduciendo la potencia nominal aparente del elemento, considerando que el sistema es trifásico equilibrado:

$$S_n(\text{VA}) = \sqrt{3} \cdot U_n(V) \cdot I_n(A) \quad \text{Potencia nominal aparente}$$

$$U_n = \sqrt{3} \cdot V_n \quad \text{Tensión nominal compuesta}$$

$$z(\%) = 100 \cdot \frac{Z(\Omega) \cdot S_n(\text{VA})}{U_n^2(V)}$$

$$Z(\Omega) = \frac{z(\%)}{100} \cdot \frac{U_n^2(V)}{S_n(\text{VA})}$$

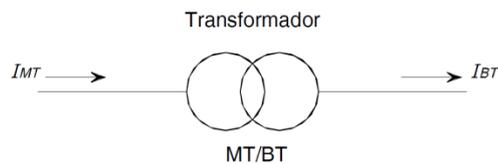
Esta última ecuación permite calcular, a partir de las impedancias en % y de las potencias nominales aparentes de los elementos, el valor absoluto Z a la tensión nominal.

4.3. Conversión de impedancias

El trabajar con los valores en % permite en el cálculo de cortocircuitos en una instalación compleja con transformadores y diferentes niveles de tensión, referir todos los elementos a una única tensión.

Para el cálculo de las corrientes de cortocircuito en BT, las impedancias del lado de MT de la red deben ser convertidas a ese nivel de tensión.

Recordando las fórmulas que vinculan las tensiones, corrientes e impedancias con la relación de transformación, considerando la hipótesis de que el tap del transformador permanece en la posición principal:



$$\frac{U_{nMT}}{U_{nBT}} = k, \quad \frac{I_{MT}}{I_{BT}} = \frac{1}{k} \Rightarrow Z_{BT} = \frac{1}{k^2} \cdot Z_{MT}$$

4.4. Red de distribución (UTE)

Usualmente la empresa Distribuidora (UTE) informa la Potencia de cortocircuito o la Corriente de cortocircuito simétrica inicial en el punto de conexión:

- I''_{kQ} Corriente de cortocircuito trifásica, valor eficaz, en el punto de conexión a la Red del Distribuidor.
- U_{nQ} Tensión nominal, valor eficaz de línea, de la Red de Distribución.
- $S''_{kQ} = \sqrt{3} \cdot U_{nQ} \cdot I''_{kQ}$ Potencia de cortocircuito trifásica, en el punto de conexión a la Red del Distribuidor.
- $Z_Q = \frac{U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I''_{kQ}} = \frac{U_{nQ}^2}{S''_{kQ}}$ Valor absoluto de la impedancia de cortocircuito.

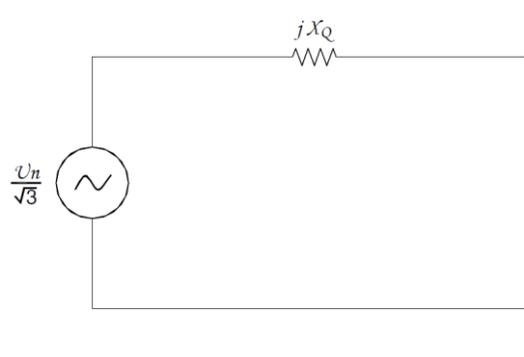
Para los cálculos de la corriente de cortocircuito en instalaciones de BT, se puede despreciar la componente resistiva de la impedancia de cortocircuito de la red:

$$\overline{Z_Q} = R_Q + jX_Q \cong jX_Q$$

Para un cálculo más exacto se puede considerar con buena aproximación:

$$R_Q = 0.1 \cdot X_Q, \quad X_Q = 0.995 \cdot Z_Q$$

El modelo equivalente que se utilizará para la Red de Distribución (UTE) es el siguiente:



$$X_Q = \frac{U_{nQ}^2}{S_{kQ}''}$$

Figura 20: Red de UTE, modelo monofásico estrella equivalente utilizado en cálculos de CC.

4.5. Transformadores

La impedancia de cortocircuito de los transformadores de potencia de dos arrollamientos se determina a partir de la tensión o impedancia de cortocircuito en %, obtenida del ensayo de cortocircuito del transformador a corriente nominal:

$$Z_T = \frac{u_{kT}(\%)}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \sqrt{R_T^2 + X_T^2}$$

Donde:

- Z_T Valor absoluto de la impedancia de cortocircuito del transformador.
- S_n Potencia nominal aparente del transformador.
- U_n Tensión nominal, valor eficaz de línea, del lado de BT.
- $u_{kT}(\%)$ Tensión o impedancia de cortocircuito en %.

La componente resistiva de la impedancia de cortocircuito se calcula a partir de las pérdidas en el cobre del transformador y de la corriente nominal:

$$R_T = \frac{P_{cu}}{3 \cdot I_n^2}, \text{ siendo } I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n}$$

Donde:

- P_{cu} Pérdidas en el cobre
- I_n Corriente nominal

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}$$

Valores normalizados de tensión o impedancia de cortocircuito en % para los transformadores de potencia de MT/BT, son los siguientes:

Potencia nominal (kVA)	u_{kT} (%)
$S_n \leq 630$	4 %
$800 \leq S_n \leq 2500$	6 %

Tabla 4: Valores de impedancia de CC típicas en transformadores MT/BT.

El modelo equivalente que se utilizará para el transformador de potencia es el siguiente:

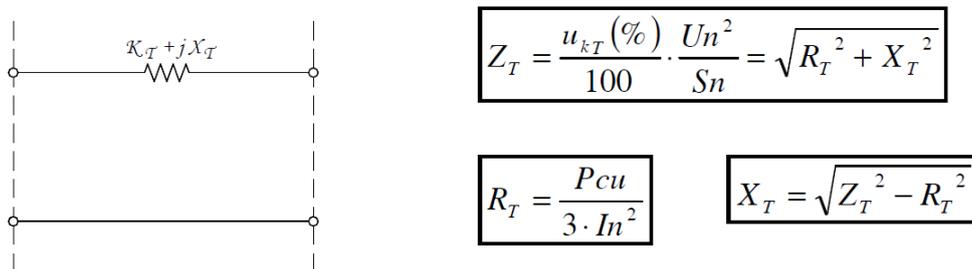


Figura 21: Transformador, modelo monofásico estrella equivalente utilizado en cálculos de CC.

4.6. Conductores (cables y barras)

Los valores absolutos de las reactancias y resistencias de los conductores dependen de las técnicas y de las normas de fabricación, y se determinan a partir de los valores por unidad obtenidos de los manuales o de los datos de los fabricantes:

$$\overline{Z}_L = (r_L + j \cdot x_L) \cdot L$$

- $r_L (\Omega / mm^2) = \frac{\rho}{S}$ resistencia por unidad de longitud
- $x_L (\Omega / mm^2)$ reactancia por unidad de longitud

- $L(m)$ longitud del conductor
- $\rho(\theta) = \rho_0 \cdot [1 + 0.004 \cdot (\theta - 20)]$ resistividad del conductor
- $S(mm^2)$ sección del conductor
- $\rho_0(cobre) = 0.018 \frac{\Omega mm^2}{m}$ resistividad del cobre a 20°C
- $\rho_0(alum) = 0.029 \frac{\Omega mm^2}{m}$ resistividad del aluminio a 20°C

Para el cálculo de las corrientes de cortocircuito máximo y mínimo en las instalaciones de BT, las normas IEC recomiendan utilizar:

- Cortocircuito máximo : $r_L(20^\circ C) = \frac{\rho_0}{S}$
- Cortocircuito mínimo: $r_L(\theta_f) = \frac{\rho_0 [1 + 0.004(\theta_f - 20^\circ C)]}{S}$

Donde θ_f es la temperatura del conductor al final del cortocircuito, considerando en general la máxima admisible según el tipo de aislamiento.

Valores típicos de reactancia por unidad de cables y barras en BT:

- $x_L = 0.08 \Omega/km$ para cables tripolares o unipolares tendidos en trifolio.
- $x_L = 0.09 \Omega/km$ para cables unipolares tendidos en plano juntos.
- $x_L = 0.15 \Omega/km$ para cables unipolares tendidos en plano separados.

El modelo equivalente que se utilizará para los conductores es el siguiente:

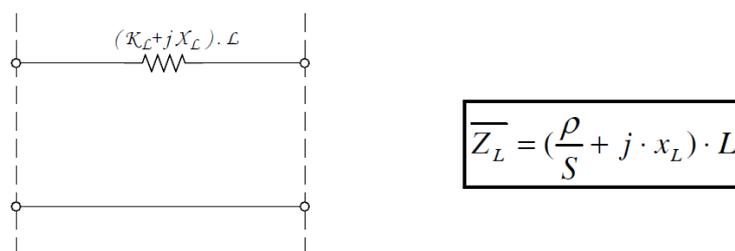


Figura 22: Conductor, modelo monofásico estrella equivalente utilizado en cálculos de CC.

4.7. Generadores y Motores Síncronos

La reactancia que se utiliza para modelar los generadores y motores síncronos en los cálculos de cortocircuito en las instalaciones de BT, es la reactancia subtransitoria en %:

$$X''_g = \frac{x''_d (\%) \cdot U_n}{100 \cdot S_n}$$

Donde:

- S_n Potencia Nominal Aparente de la máquina
- U_n Tensión Nominal, valor eficaz de línea, del generador o motor
- x''_d Reactancia Subtransitoria en %

La componente resistiva de la impedancia de cortocircuito de las máquinas eléctricas se puede despreciar:

$$\bar{Z}_g \cong jX''_g$$

El modelo que se utilizará para las máquinas síncronas es el siguiente:

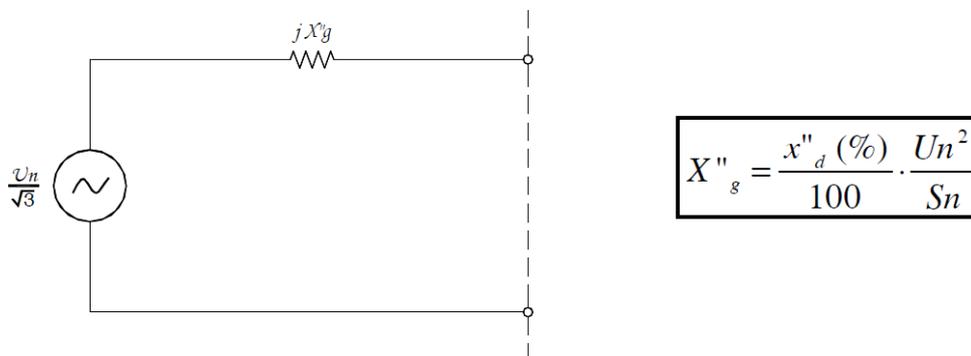


Figura 23: Máquina síncrona, modelo monofásico estrella equivalente utilizado en cálculos de CC.

4.8. Motores Asíncronos

La reactancia que se utiliza para modelar los motores asíncronos, en los cálculos de cortocircuito en las instalaciones de BT, se determina a partir de la corriente de arranque del motor o la corriente de rotor bloqueado. Se considera la hipótesis de que la corriente que entrega al motor al cortocircuito es la misma que consume en el arranque:

$$X_m = \frac{U_n}{\sqrt{3}I_a} = \frac{I_n}{I_a} \frac{U_n}{\sqrt{3}I_n} = \frac{I_n}{I_a} \frac{U_n^2}{S_n}$$

Donde:

- I_a Corriente de arranque del motor
- I_n Corriente nominal del motor
- S_n Potencia nominal aparente del motor
- U_n Tensión nominal, valor eficaz de línea, del motor

Para los cálculos se considera $I_a \cong 5I_n$ y se desprecia la componente resistiva de la impedancia de cortocircuito del motor:

$$\overline{Z}_m \cong jX_m = j \cdot 0.2 \frac{Un^2}{Sn} \quad S_n = \frac{P_n \cdot 0.745}{\eta \cdot \cos \varphi}$$

Donde:

- P_n Potencia en el eje del motor en HP
- η Rendimiento del motor
- $\cos \varphi$ Factor de potencia del motor

Debido al gran número de motores asíncronos en las instalaciones de BT, y a la falta de datos necesarios para cada uno de los motores, en general un grupo de motores se puede modelar por un motor equivalente, despreciando los cables de conexión, con las hipótesis de cálculo:

$$I_a \cong 5I_n, \eta \cdot \cos \varphi = 0.8$$

En ese caso la impedancia equivalente del grupo de motores será:

$$X_{mE} = 0.2 \cdot \frac{Un^2}{\sum S_n}$$

$$\overline{Z}_{mE} = jX_{mE} = j \cdot 0.2 \frac{Un^2}{\sum S_n}$$

El modelo que se utilizará para los motores asíncronos es el siguiente:

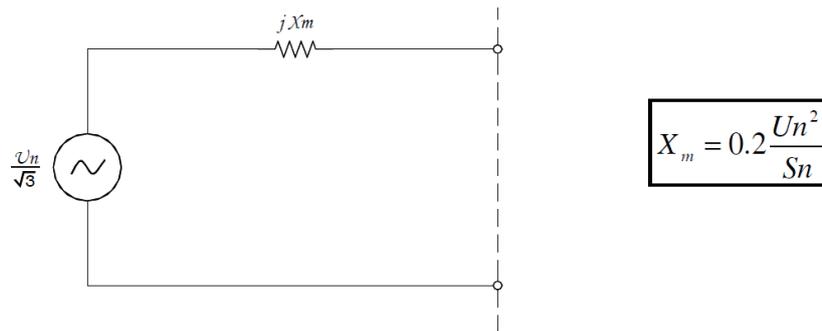


Figura 24: Motor asíncrono, modelo monofásico estrella equivalente utilizado en cálculos de CC.

4.8.1. Contribución de motores asíncronos al cortocircuito

La norma IEC 60909 establece que la contribución de un motor o de un grupo de motores asíncronos, con conexión directa al punto de cortocircuito (sin transformadores intermedios), puede ser despreciada en los casos que se cumpla:

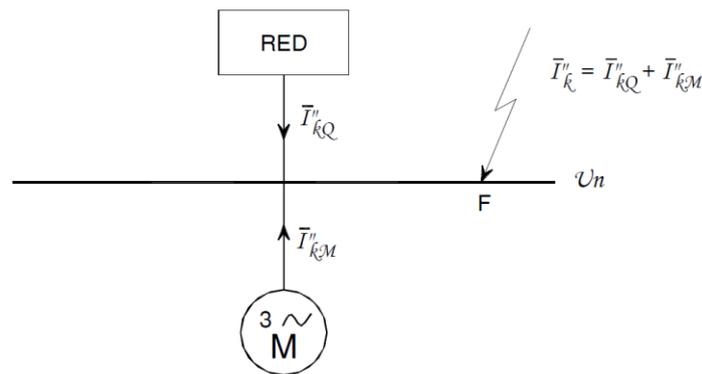


Figura 25: Contribución de motor asíncrono al CC.

$$I''_{kM} \leq 0.05 \cdot I''_{kQ}$$

$$I''_{kM} = \frac{U_n}{\sqrt{3} X_{mE}} \cong I_a \cong 5 \sum_i I_{n_i}$$

Por lo anterior la contribución de los motores asíncronos con conexión directa al cortocircuito (sin transformadores intermedios) se podrá despreciar si se cumple:

$$\sum_i I_{n_i} \leq 0.01 \cdot I''_{kQ}$$

Que equivale a decir que la contribución de un grupo de motores asíncronos, se podrá despreciar, si la suma de las corrientes nominales de los mismos, es inferior o igual al 1% de la corriente de cortocircuito considerando sólo el aporte de la red I''_{kQ} .

5. CÁLCULO DE LAS CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO

5.1. Introducción

Sea una red cualquiera donde se consideran dos puntos A y B que están en condiciones normales a diferente potencial y se produce un cortocircuito de impedancia nula entre esos puntos:

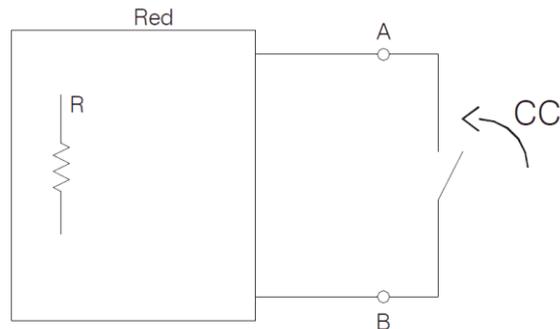


Figura 26: Modelo genérico de red con CC.

Se puede modelar el cortocircuito con dos fuentes iguales y opuestas conectadas en serie entre los puntos A y B:

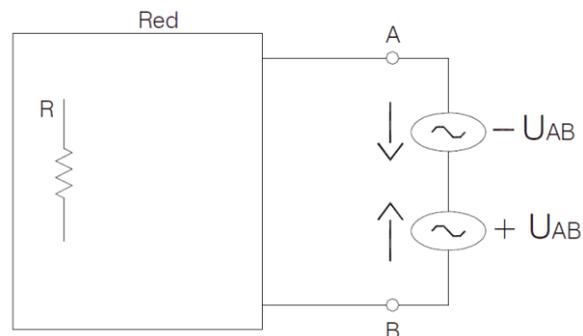


Figura 27: Representación equivalente del CC.

Siendo U_{AB} la tensión vista entre los puntos A y B antes del cortocircuito.

Aplicando el Teorema de Superposición, podemos descomponer el circuito anterior en dos circuitos:

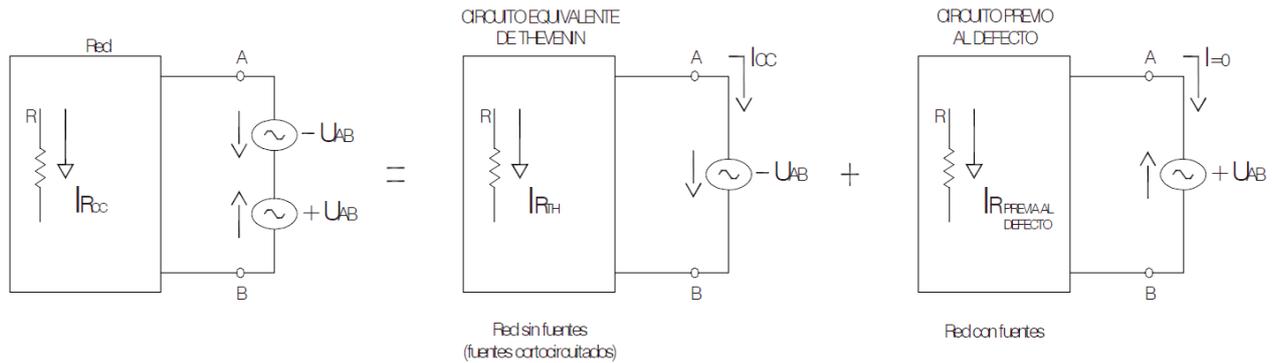


Figura 28: Descomposición del circuito en CC.

La corriente debida al cortocircuito en la rama R de la Red, se calcula como:

$$\bar{I}_{R_CC} = \bar{I}_{R_TH} + \bar{I}_{R_PREVIA}$$

Dónde:

- \bar{I}_{R_CC} : Corriente de cortocircuito en la rama R.
- \bar{I}_{R_TH} : Corriente del circuito equivalente Thévenin en la rama R.
- \bar{I}_{R_PREVIA} : Corriente previa al defecto en la rama R.

En BT se hacen algunas hipótesis que simplifican los cálculos y son aplicables a la mayoría de las instalaciones:

- El cortocircuito está alejado de cualquier generador y es alimentado en un solo punto por una red de suministro eléctrico.
- La red de BT considerada no es mallada, es radial.
- Los valores de la fuente de tensión y las impedancias de todos los equipos eléctricos se suponen constantes.
- Se desprecian las capacidades a tierra de los cables.
- Se desprecian las admitancias en paralelo de los elementos pasivos. Esto es equivalente a considerar que las impedancias de las cargas pasivas que están conectadas en paralelo con la rama en cortocircuito, son mucho mayores y que por lo tanto se pueden despreciar las corrientes que circularán por las ramas que alimentan elementos pasivos.
- No se consideran resistencias de contacto ni impedancias de falta.
- Se desprecian las corrientes previas al cortocircuito y se considera que la tensión vista previa al cortocircuito es la tensión nominal de la instalación.
- El cortocircuito es simultáneo en todos los polos, si es polifásico.
- No hay cambios en los circuitos implicados durante el defecto.
- Se supone que los taps de los transformadores se encuentran en la posición principal.

5.2. Procedimiento de cálculo de las corrientes de cortocircuito

En este punto se analizará el procedimiento de cálculo de las corrientes de cortocircuito simétricas (cortocircuitos trifásicos equilibrados), en una instalación eléctrica de BT:

1. Para comenzar el estudio se debe realizar un diagrama unifilar de la instalación, indicando todos los elementos y sus características:

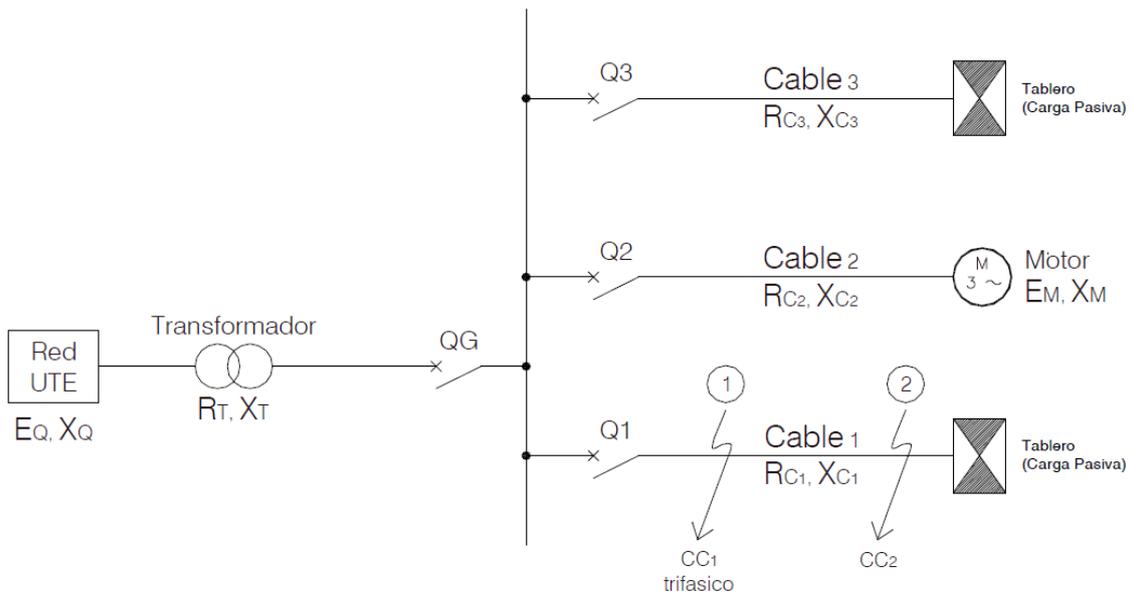


Figura 29: Ejemplo de esquema unifilar para cálculo de CC.

2. Se representa el circuito equivalente para el cálculo de las corrientes de cortocircuito, reemplazando cada elemento por su modelo equivalente:
 - Se trabaja con un modelo fase-neutro, tensiones fase-neutro y corrientes de línea, considerando que el sistema es equilibrado.
 - Los elementos activos son representados por una fuente de tensión ideal en serie con una impedancia y los elementos pasivos por una impedancia serie.
3. Por ejemplo, se considera un cortocircuito trifásico equilibrado en bornes de salida del interruptor Q1 (punto 1), que es representado en el circuito con una conexión ideal de impedancia nula entre fase y neutro en el punto 1:

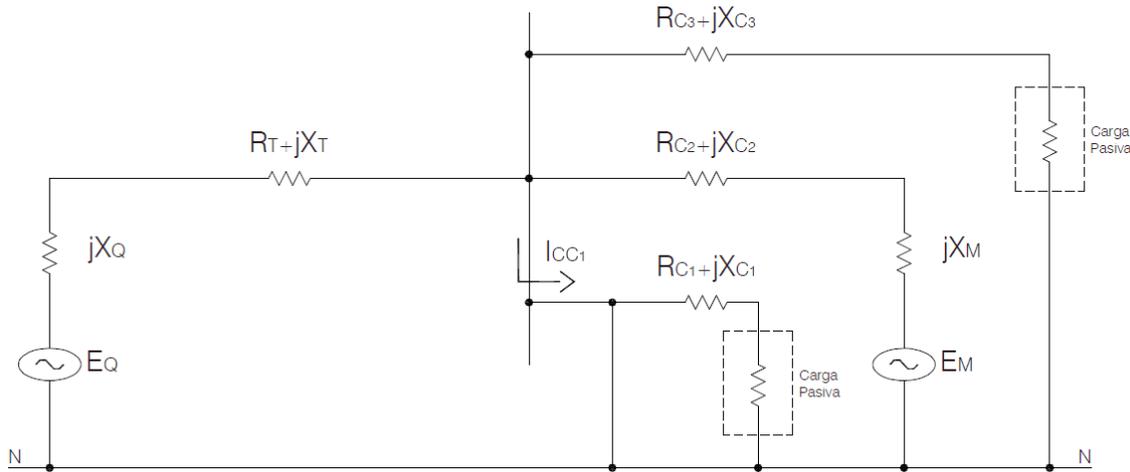


Figura 30: Ejemplo: CC a la salida de interruptor Q1.

4. Para el cálculo se considera el modelo equivalente de Thévenin, recordando que:

- Se desprecian las corrientes previas al cortocircuito y se considera la tensión vista en el punto 1, previa al cortocircuito, igual a la tensión nominal de la instalación $U_{FN_PREVIA} = \frac{U_n}{\sqrt{3}}$
- Consideramos las $Y = 0$ o las $Z = \infty$ de las ramas en paralelo que alimentan cargas pasivas.

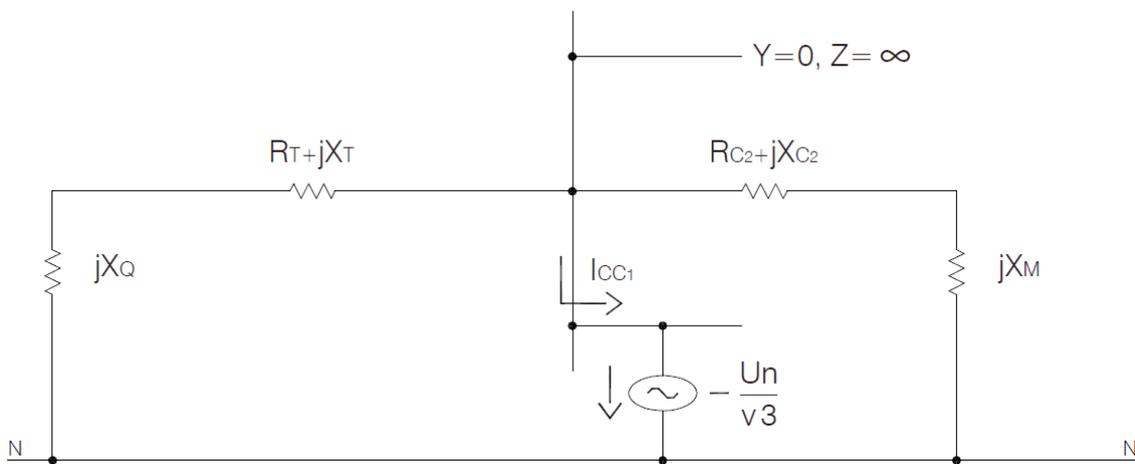


Figura 31: Ejemplo: CC a la salida de interruptor Q1, equivalente Thévenin.

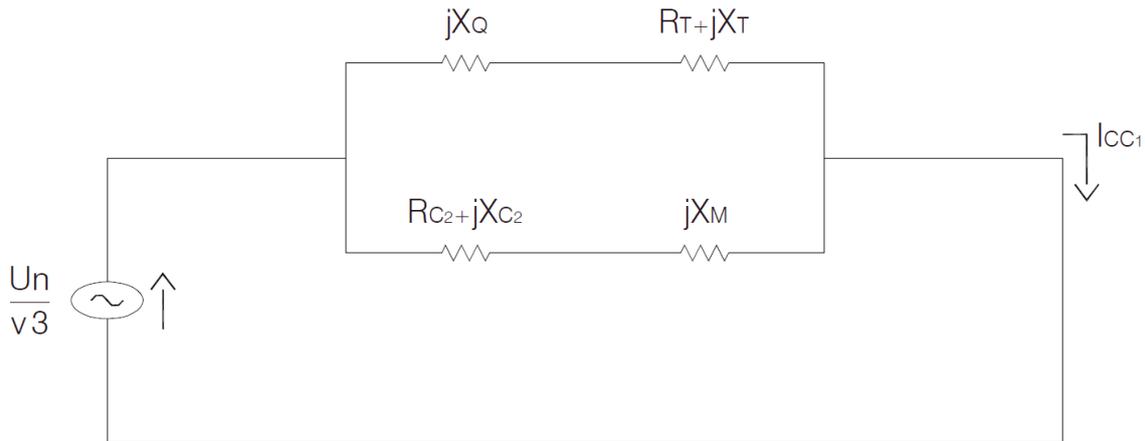


Figura 32: Ejemplo: CC a la salida de interruptor Q1, equivalente Thévenin simplificado.

La expresión de la corriente de cortocircuito queda:

$$I_{CC1} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot [R_T + j(X_Q + X_T)]} + \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot [R_{C2} + j(X_{C2} + X_M)]} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k}$$

$$Z_k = \frac{1}{[R_T + j(X_Q + X_T)]} + \frac{1}{[R_{C2} + j(X_{C2} + X_M)]}$$

5. Si el cortocircuito trifásico se plantea al final del cable (punto 2), el circuito equivalente y la expresión de la corriente queda:

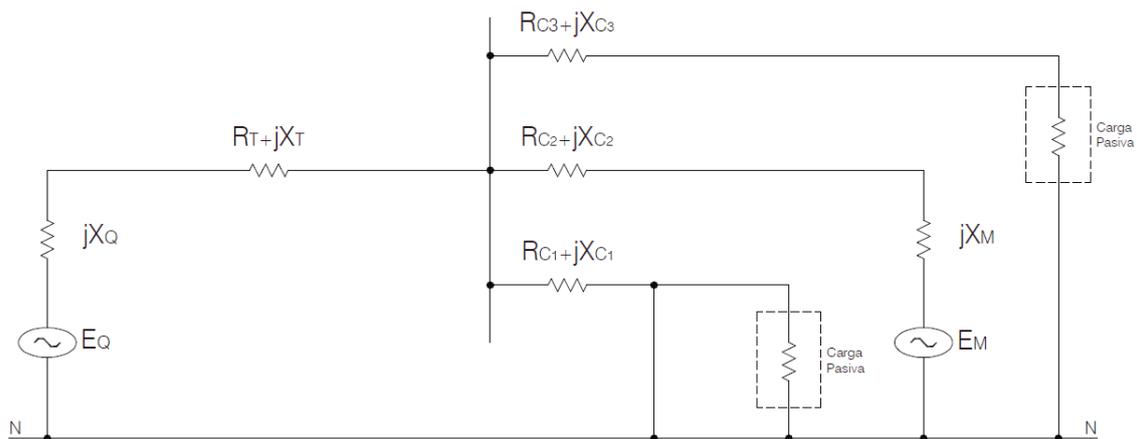


Figura 33: Ejemplo: CC en el extremo del cable 1.

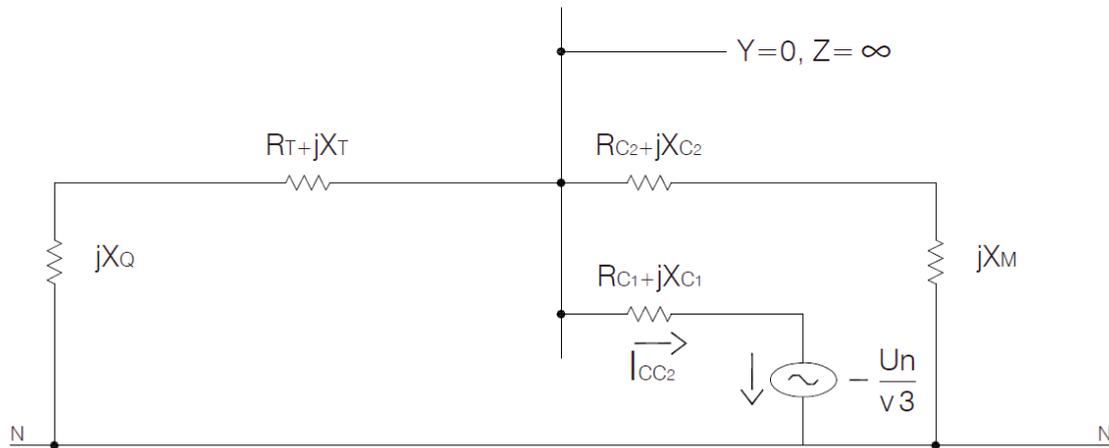


Figura 34: Ejemplo: CC en el extremo del cable 1, equivalente Thévenin.

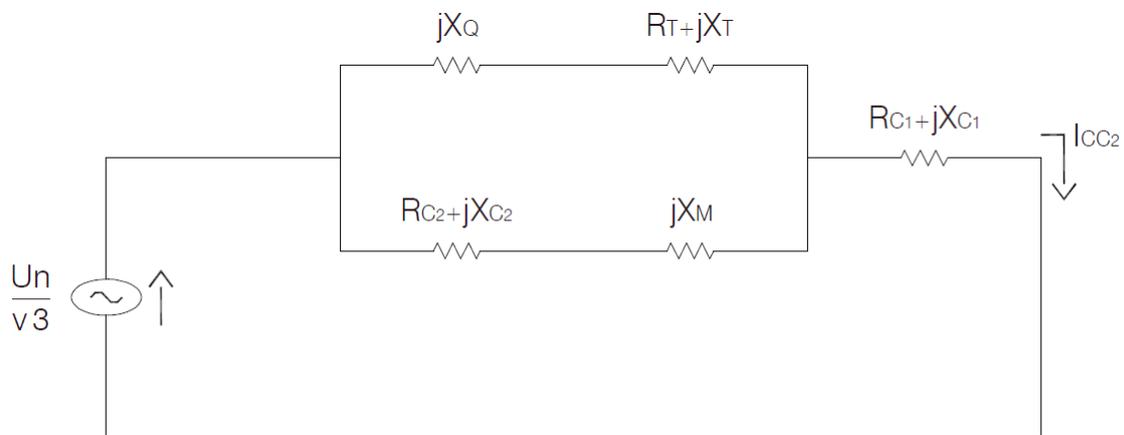


Figura 35: Ejemplo: CC en el extremo del cable 1, equivalente Thévenin simplificado.

$$I_{CC_2} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot \left[\frac{(R_T + jX_T + jX_Q) * (R_{C_2} + jX_{C_2} + jX_M)}{(R_T + jX_T + jX_Q) + (R_{C_2} + jX_{C_2} + jX_M)} + R_{C_1} + jX_{C_1} \right]}$$

5.3. Ecuaciones para los diferentes tipos de cortocircuitos

Las ecuaciones establecidas en esta asignatura, para el cálculo de las corrientes de cortocircuito en sistemas trifásicos de corriente alterna, permiten realizar un cálculo aproximado y suficiente para la mayoría de las instalaciones de BT.

Para un estudio más riguroso del cálculo de cortocircuito se utiliza el “Método de las Componentes Simétricas”, el que se desarrolla en la asignatura Redes Eléctricas.

5.3.1. Cortocircuito trifásico equilibrado

Corresponde a un cortocircuito entre las tres fases en forma simultánea:

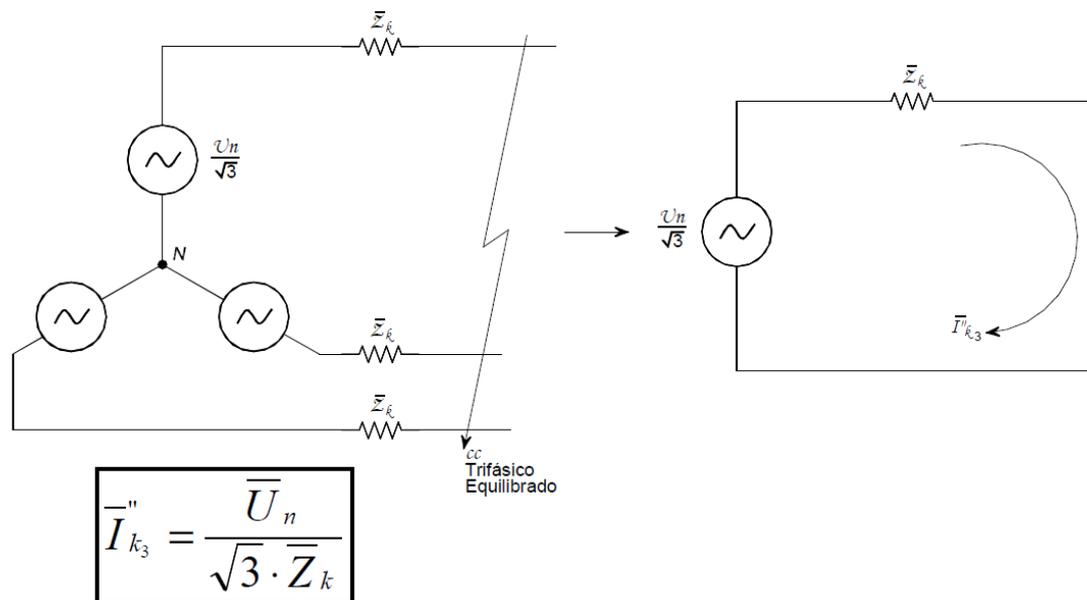


Figura 36: CC trifásico, circuito equivalente.

Donde:

- \bar{I}_{k_3}'' : Corriente de cortocircuito trifásica, valor eficaz componente alterna.
- \bar{Z}_k : Impedancia equivalente del circuito de falla.

5.3.2. Cortocircuito entre dos fases (bifásico aislado de tierra)

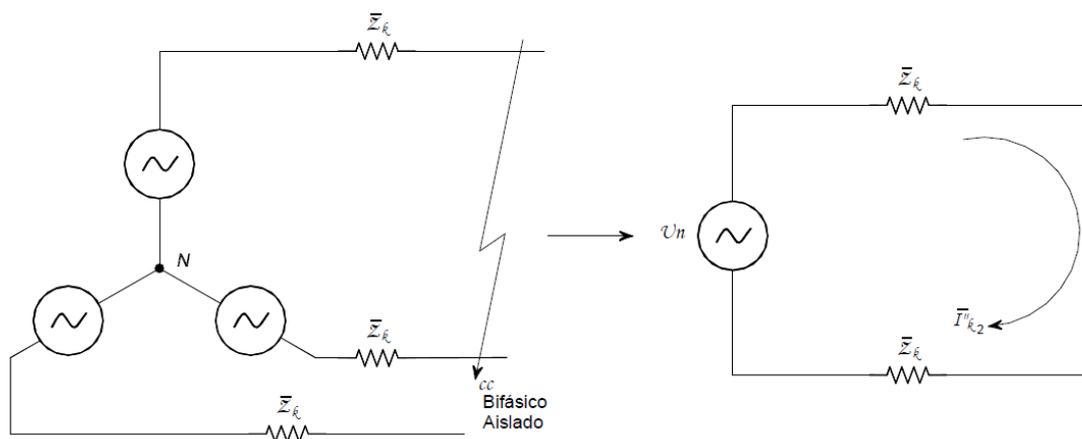


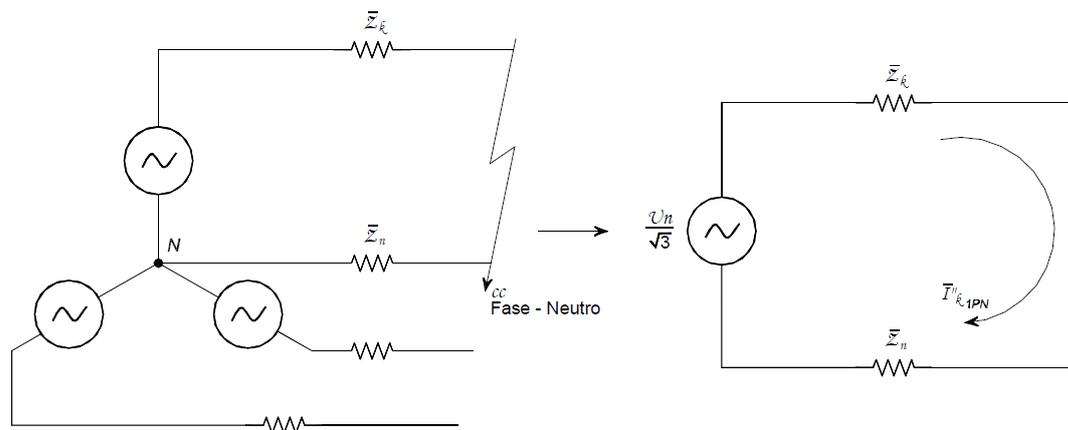
Figura 37: CC entre dos fases aislado de tierra, circuito equivalente.

$$\bar{I}_{k_2}'' = \frac{\bar{U}_n}{2 \cdot \bar{Z}_k} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \bar{I}_{k_3}''$$

Donde:

- \bar{I}_{k_2}'' : Corriente de cortocircuito bifásico aislado de tierra.

5.3.3. Cortocircuito monofásico entre una fase y neutro



$$\bar{I}_{k_{1N}}'' = \frac{\bar{U}_n}{\sqrt{3}(\bar{Z}_k + \bar{Z}_n)}$$

Figura 38: CC F-N, circuito equivalente.

Donde:

- $\bar{I}_{k_{1N}}''$: Corriente de cortocircuito entre una fase y neutro.
- \bar{Z}_n : Impedancia equivalente del conductor neutro de retorno.

5.3.4. Cortocircuito monofásico entre una fase y tierra

Corresponde a un cortocircuito entre una fase y tierra. En este caso dependerá del sistema de distribución (neutro aterrado o neutro aislado), pero en general podemos considerar como Z_{PE} la impedancia del retorno por tierra:

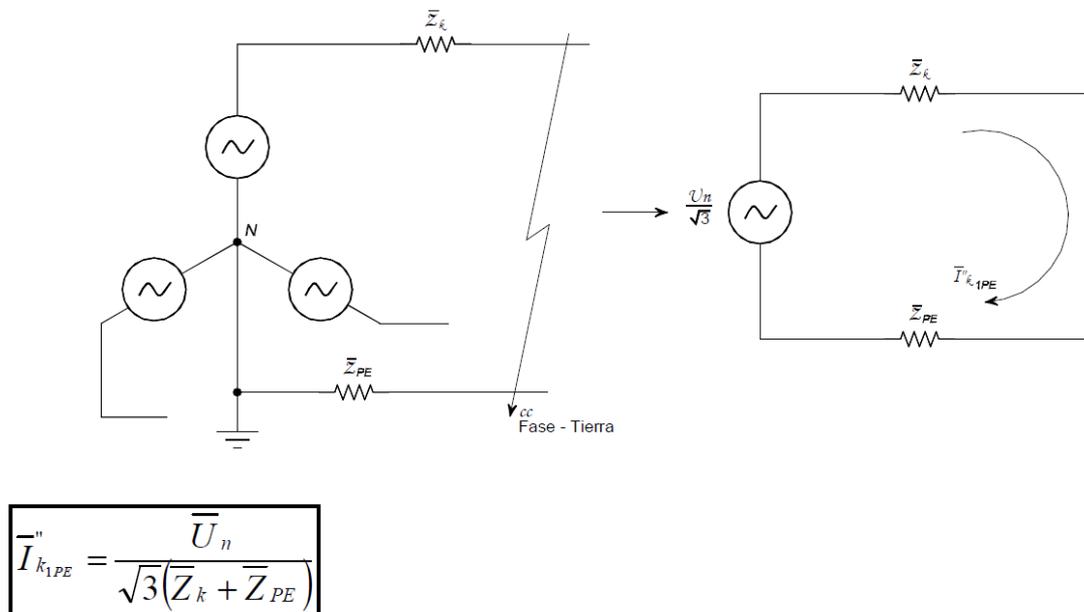


Figura 39: CC F-T, circuito equivalente.

Donde:

- \bar{I}_{1PE}'' : Corriente de cortocircuito entre una fase y tierra.
- \bar{Z}_{PE} : Impedancia equivalente del retorno por tierra.

5.3.5. Observaciones

- De acuerdo con las ecuaciones anteriores:
 - El cortocircuito máximo será el trifásico.
 - El cortocircuito mínimo será el fase-neutro (circuitos con neutro) o el bifásico (circuitos sin neutro).
- La corriente de cortocircuito máxima se utiliza para seleccionar los Poderes de Corte y Cierre de los interruptores y verificar el esfuerzo térmico y dinámico en barras, cables, etc. La corriente de cortocircuito mínima se utiliza para verificar la apertura de las protecciones en el extremo de los circuitos protegidos.
- La corriente de cortocircuito entre fase y tierra depende del sistema de distribución y se utiliza para elegir la protección adecuada de las personas contra los contactos eléctricos y diseñar los conductores de protección del sistema de puesta a tierra. Estos aspectos se verán en los temas “Protección contra contactos eléctricos” y “Puesta tierra y conductores de protección” del curso.

6. EJEMPLO DE APLICACIÓN

Se presenta a continuación el unifilar de un ejemplo de circuito en el cual se exponen las técnicas de cálculo indicadas anteriormente.

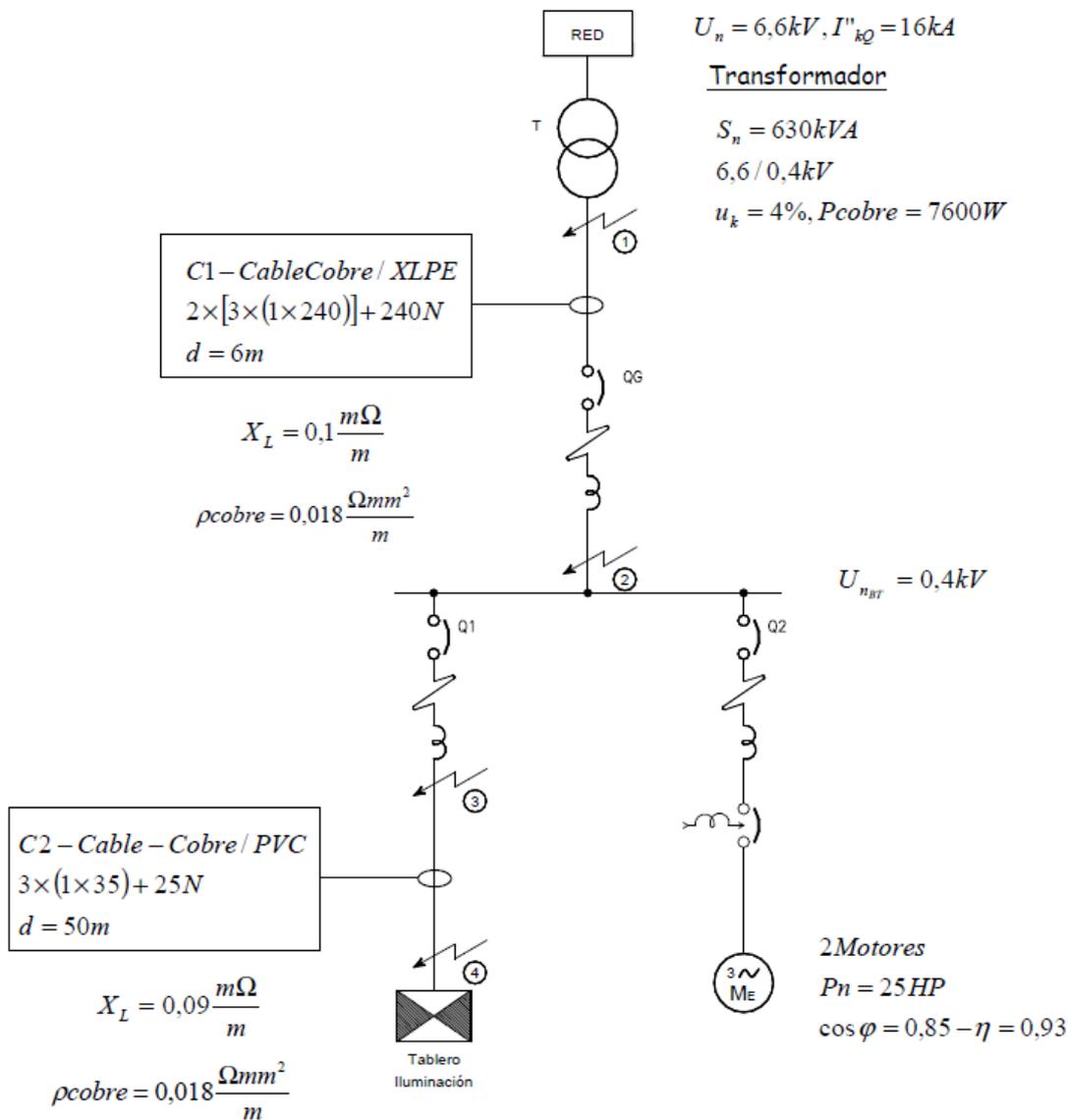


Figura 40: Ejemplo de aplicación: esquema unifilar.

6.1. Cálculo de las impedancias equivalentes

- Red:

$$X_Q = \frac{(U_n)^2}{S''_{kQ}} = \frac{0,4^2}{182,9}$$

$$S''_{kQ} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I''_{kQ} = \sqrt{3} \times 6,6 \times 16 = 182,9 MVA$$

$$\bar{Z}_Q \cong j0,87 m\Omega$$

- Transformador:

$$Z_T = \frac{\mu_k \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n} = 0,04 \times \frac{400^2}{630}$$

$$Z_T \cong 10,16 m\Omega$$

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{630}{\sqrt{3} \cdot 0,4} \cong 909 A$$

$$R_T = \frac{P_{cobre}}{3 \cdot I_n^2} = \frac{7600}{3 \cdot 909^2} = 3,06 m\Omega$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{10,16^2 - 3,06^2} = 9,69 m\Omega$$

$$\bar{Z}_T = 3,06 + j9,69 m\Omega$$

- Conductores:

- C1:

$$R_{C_1} = \frac{\rho \cdot L}{S} = \frac{0,018 \times 6}{2 \times 240} = 0,225 m\Omega$$

$$X_{C_1} = \frac{0,1 \cdot L}{2} = \frac{0,1 \times 6}{2} = 0,3 m\Omega$$

$$\bar{Z}_{C_1} = 0,225 + j0,3 m\Omega$$

- C2:

$$R_{C_2} = \frac{\rho \cdot L}{S} = \frac{0,018 \times 50}{35} = 25,71 m\Omega$$

$$X_{C_2} = 0,09 \cdot L = 0,09 \times 50 = 4,5 m\Omega$$

$$\bar{Z}_{C_2} = 25,71 + j4,5 m\Omega$$

- Motores:

$$S_n = \frac{P_n \cdot 0,745}{\eta \cdot \cos \varphi} = \frac{25 \times 0,745}{0,93 \times 0,85} = 23,56 kVA$$

Como tienen el mismo $\cos \varphi$, $S_{n_E} = \sum S_n \cong 47 kVA$

$$X_{ME} = 0,2 \cdot \frac{U_n^2}{S_{n_E}} = 0,2 \times \frac{400^2}{47} = 680,85 m\Omega$$

$$\bar{Z}_{ME} = j680,85 m\Omega$$

6.2. Cálculo de las corrientes de cortocircuito en los distintos puntos de la instalación

- Cortocircuito 1 (en bornes de BT del Transformador):

Circuito equivalente:

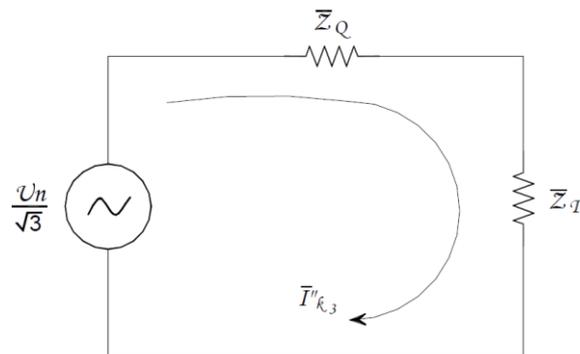


Figura 41: Circuito equivalente, CC 1.

$$\bar{Z}_k = \bar{Z}_Q + \bar{Z}_T = 3,06 + j10,56 m\Omega$$

$$|\bar{Z}_k| = \sqrt{3,06^2 + 10,56^2} = 10,99 m\Omega$$

$$I''_{k_3} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} = \frac{400}{\sqrt{3} \times 10,99} \cong 21 kA$$

$$I''_{k_3} = 21 kA$$

- **Cortocircuito 2 (en bornes de salida del QG):**

Circuito equivalente:

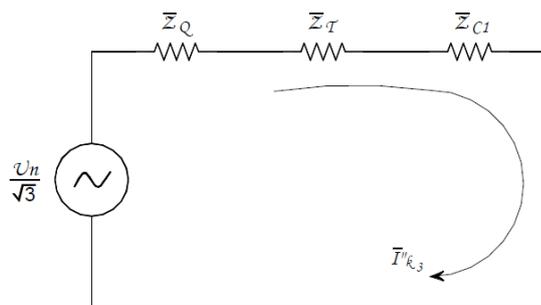


Figura 42: Circuito equivalente, CC 2.

$$\bar{Z}_k = \bar{Z}_Q + \bar{Z}_T + \bar{Z}_{C_1} = 3,285 + j10,86 m\Omega$$

$$|\bar{Z}_k| \cong 11,35 m\Omega$$

$$I''_{k_3} = \frac{400}{\sqrt{3} \times 11,35} \cong 20,35 kA$$

- **Cortocircuito 3: (en bornes de salida de Q1):**

Circuito equivalente:

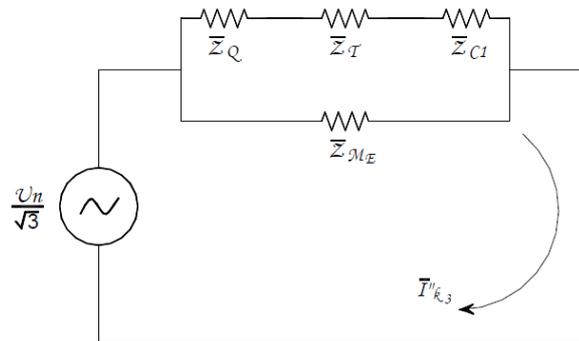


Figura 43: Circuito equivalente, CC 3.

$$\bar{Z}_Q + \bar{Z}_T + \bar{Z}_{C1} = 3,285 + j10,86m\Omega$$

$$\bar{Z}_{ME} = j680,85m\Omega$$

$$|\bar{Z}_k| \cong 11,17m\Omega$$

$$I''_{k,3} = \frac{400}{\sqrt{3} \times 11,17} \cong 20,7kA$$

- **Cortocircuito 4 (al final del cable C2):**

Como el cálculo de cortocircuito al final del cable es para determinar el cortocircuito mínimo, no se considera la contribución de motores (configuración de la Red de menor aporte):

Circuito equivalente:

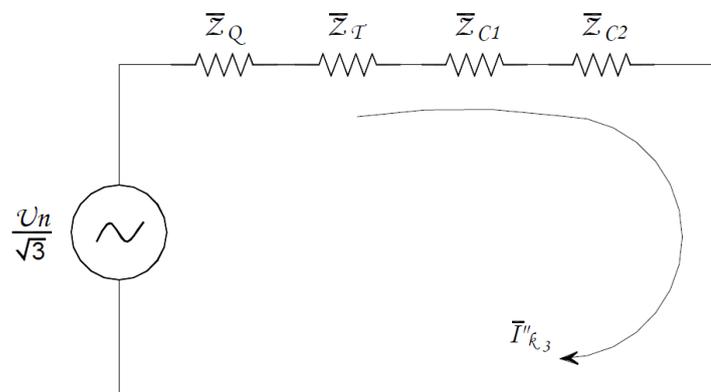


Figura 44: Circuito equivalente, CC 4.

$$\bar{Z}_k = 28,995 + j15,36m\Omega \quad \left| \bar{Z}_k \right| = 32,81m\Omega$$

$$I''_{k_3} \cong 7,04kA$$

$$I''_{k_2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I''_{k_3} \cong 6,10kA$$

Calculando ahora el cortocircuito fase-neutro en el punto 4:

- Impedancia del neutro:

$$\bar{Z}_n \cong R_n = \frac{\rho \cdot L}{S_N}$$

- Conductores C1 y C2:

$$R_{nC1} = \frac{0,018 \times 6}{240} = 0,45m\Omega \quad R_{nC2} = \frac{0,018 \times 50}{25} = 36m\Omega$$

$$\bar{Z}_N \cong R_n = 36,45m\Omega$$

Circuito equivalente (cortocircuito 4, fase-neutro):

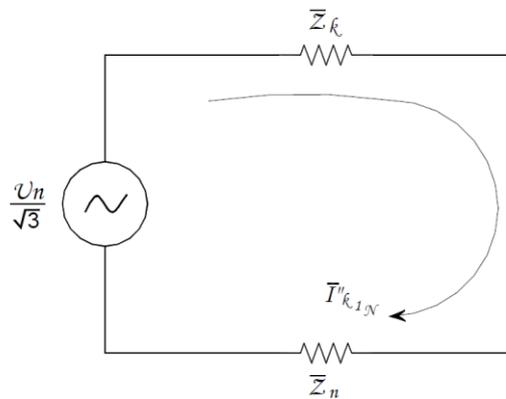


Figura 45: Circuito equivalente, CC 4, F-N.

$$\bar{Z}_k + \bar{Z}_N = 65,445 + j15,36m\Omega$$

$$\left| \bar{Z}_k + \bar{Z}_N \right| = 67,22m\Omega$$

$$I''_{k1N} = \frac{400}{\sqrt{3} \times 67,22} \cong 3,44kA$$

Como se puede observar en este caso la corriente del cortocircuito fase-neutro es menor a la del bifásico en el extremo del conductor C2:

$$2 \cdot |\bar{Z}_k| < \sqrt{3} \cdot |\bar{Z}_k + \bar{Z}_n| \Rightarrow |\bar{I}''_{k_{1N}}| < |\bar{I}''_{k_2}|$$

7. BIBLIOGRAFÍA

- Libros de Consulta
 - Instalaciones Eléctricas. Autor: Ademaro Cotrim (3ª Edición). Editorial Mc Graw Hill.
 - Tecnología eléctrica. Autores: José Roger Folch, Martín Riera Guasp y Carlos Roldán Porta. Editorial Síntesis.
- Normas de Referencia
 - IEC 60781. Guía de aplicación para el cálculo de corrientes de cortocircuito en sistemas radiales de BT.