

TEORÍA Y CÁLCULO DE LAS CORRIENTES DE DE CORTOCIRCUITO

1.- Introducción, causas y consecuencias de los cortocircuitos.	3
Introducción	3
Origen de los cortocircuitos	6
Tipos de cortocircuitos	6
Consecuencias de los cortocircuitos	7
2.- Comportamiento de un circuito serie RL	9
Comentarios	10
Conclusiones	12
3.- Fuentes y comportamiento transitorio de las corrientes de cortocircuito	14
Fuentes que aportan al cortocircuito	14
Máquinas Síncronas	14
Máquinas Asíncronas	17
Definiciones	18
Comportamiento transitorio de las corrientes de cortocircuito	19
Conclusiones	21
4.- Impedancias equivalentes de los elementos eléctricos	22
Impedancia en %	23
Conversión de impedancias	24
Red de distribución (UTE)	24
Transformadores de potencia	25
Conductores (cables y barras)	26
Generadores y motores síncronos	27
Motores asíncronos	28
Contribución de motores asíncronos al cortocircuito	30
5.- Método de cálculo de las corrientes de cortocircuitos	31
Introducción	31
Procedimiento de cálculo de las corrientes de cortocircuito	33
Ecuaciones para los diferentes tipo de cortocircuitos	37
Observaciones	39
6.- Ejemplo de aplicación	40
7.- Bibliografía	46
Libros de Consulta	46
Normas de Referencia	46

1.- Introducción, causas y consecuencias de los cortocircuitos.

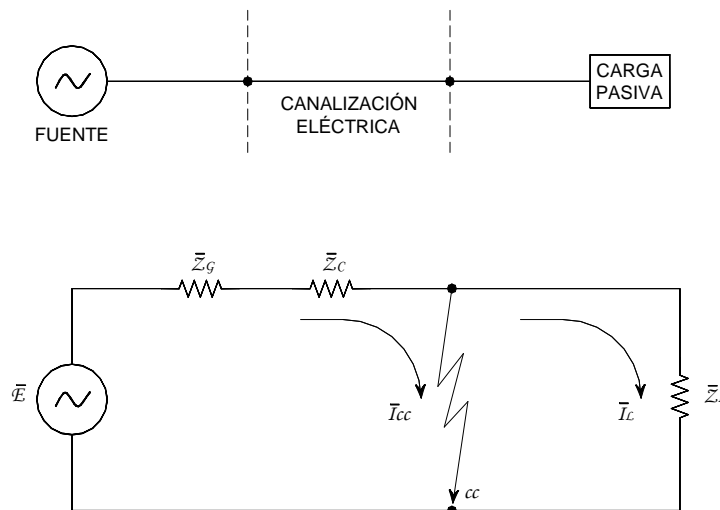
Introducción

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 cortocircuitos 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.

Analizaremos un sistema simple (monofásico o trifásico) compuesto por una fuente, una canalización eléctrica y una carga pasiva, según el diagrama y el modelo equivalente que se representan a continuación:



En régimen:

$$\bar{I}_L = \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_G + \bar{Z}_C + \bar{Z}_L}, \text{ corriente de carga en condiciones normales}$$

\bar{E} , tensión eficaz de fase de la fuente

\bar{Z}_G , impedancia interna de la fuente

\bar{Z}_C , impedancia de la canalización eléctrica (cable o línea)

\bar{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.):

$$\bar{Z}_L \gg \bar{Z}_G + \bar{Z}_C$$

$$\bar{I}_L \cong \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_L}$$

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

En un cortocircuito franco (de impedancia cero):

$$\bar{I}_{CC} = \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_G + \bar{Z}_C}$$

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

$$\bar{I}_{CC} \gg \bar{I}_L$$

Las corrientes de cortocircuito son muy superiores a las corrientes nominales de carga, y producen esfuerzos térmicos y electrodinámicos muy importantes sobre los distintos componentes de las instalaciones, pudiendo provocar daños irreparables sobre los componentes de las instalaciones sino son eliminadas rápidamente.

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

Para el diseño de una instalación y elegir adecuadamente los dispositivos de protección debemos 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 baja tensión 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 baja tensión 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 seleccionar 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 tierra y conductores de protección*".

Origen de los cortocircuitos

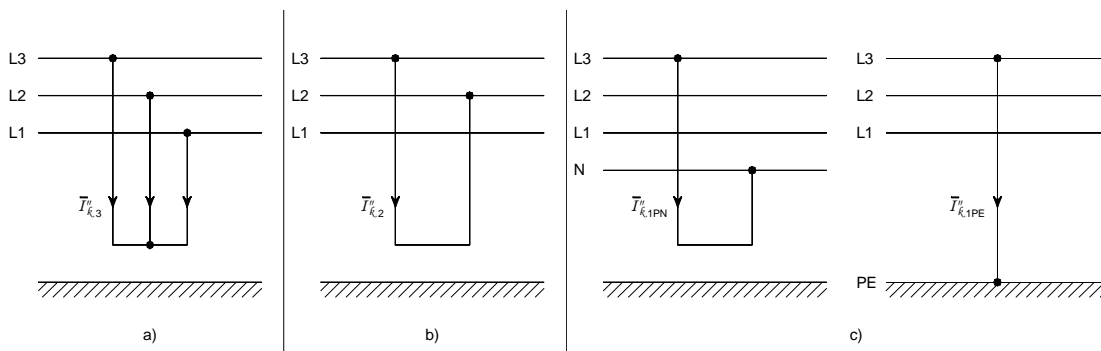
Los cortocircuitos tienen distintos orígenes:

- Por deterioro o perforación del aislamiento: debido a calentamientos excesivos prolongados, ambiente corrosivo o envejecimiento natural.
- Por problemas mecánicos: rotura de conductores o aisladores por objetos extraños o animales, ramas de árboles en líneas aéreas e impactos en cables subterráneos.
- Por sobretensiones debido a maniobras o a defectos.
- Por sobretensiones debido a descargas atmosféricas.
- Por factores humanos: falsas maniobras, sustitución inadecuada de materiales, etc.
- Otras causas: vandalismos, incendios, inundaciones, etc.

Tipos de cortocircuitos

Los tipos de cortocircuitos que estudiaremos 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.



Los porcentajes promedios 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 %

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 podemos 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.
 - Esfuerzo 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 baja tensión 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 Eléctrica*".

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:

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

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

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

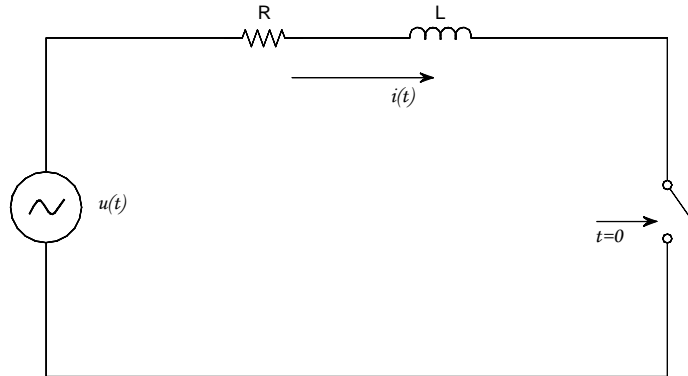
I_S , corriente de cresta máxima

L , longitud entre apoyos del conductor

d , distancia entre conductores

2.- Comportamiento de un circuito serie RL

Vamos a analizar el comportamiento de un circuito serie RL, alimentado por una fuente de tensión sinusoidal pura:



$$u(t) = \sqrt{2} \cdot U \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi)$$

U es el valor eficaz de la tensión sinusoidal

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$i_a(t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi - \theta), \text{ componente de alterna}$$

$$i_c(t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \text{sen}(\theta - \varphi) \cdot e^{-\left(\frac{R}{L}\right)t}, \text{ componente de continua}$$

Comentarios

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

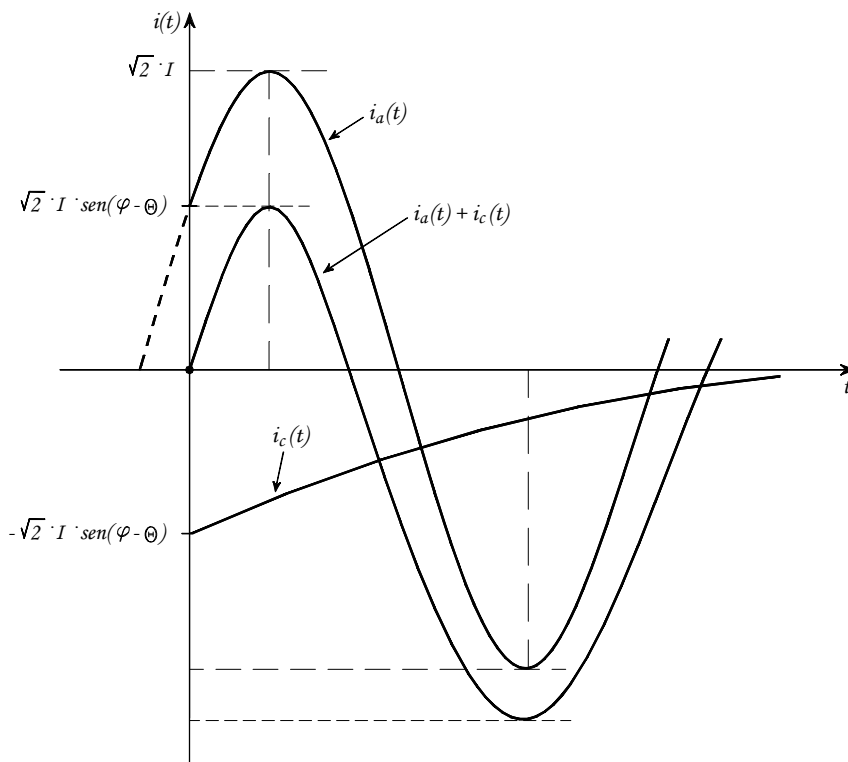
$$u(0) = \sqrt{2} \cdot U \cdot \text{sen} \varphi$$

El ángulo θ queda determinado por la reactancia $X = L\omega$ y la resistencia R del circuito, y es el desfase entre la tensión y la componente de alterna de la corriente.

El valor inicial de la componente de continua queda determinado por φ (valor inicial de la tensión al cerrar el circuito) y θ (determinado por la reactancia y resistencia del circuito):

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

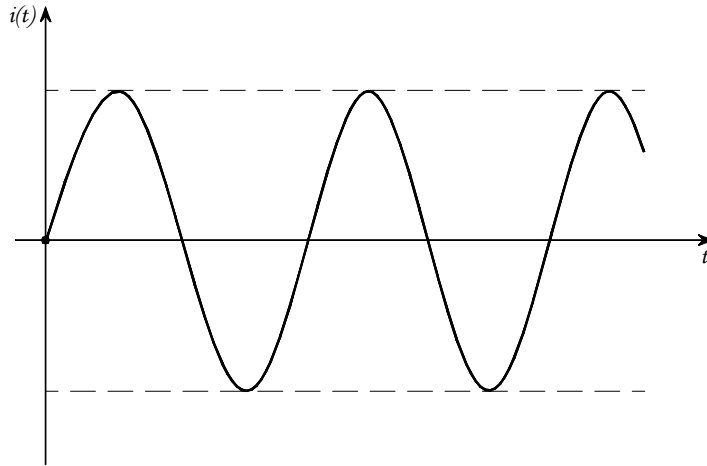
En la figura siguiente se representa un ciclo de la forma de onda de la corriente:



a) Corriente $i(t)$ simétrica pura:

Si el circuito se cierra en un punto de la onda de tensión tal que:

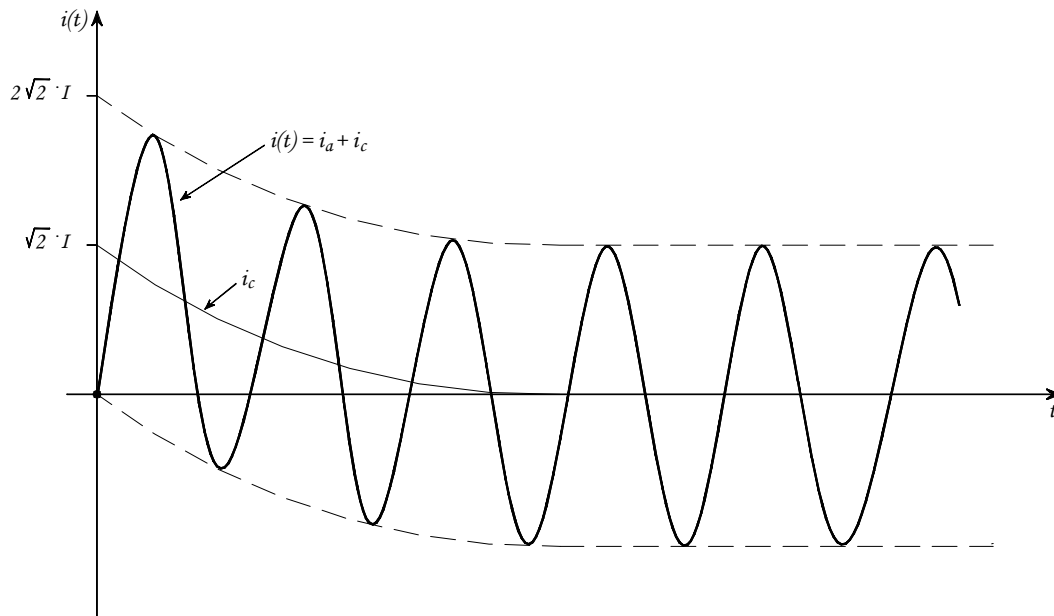
$$\varphi - \theta = 0, \pi \Rightarrow i_c(0) = 0 \Rightarrow i(t) = i_a(t)$$



b) Corriente $i(t)$ con asimetría máxima:

Si el circuito se cierra en un punto de la onda de tensión tal que:

$$\varphi - \theta = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2} \Rightarrow i_c(0) = \mp \sqrt{2}I \Rightarrow i(t) = i_a(t) \mp \sqrt{2} \cdot I \cdot e^{-\left(\frac{R}{L}\right)t}$$



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

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

Ubicación del cortocircuito	R/X	$\tau = L/R$
Media Tensión (MT)	0.1	0,032
Baja Tensión (BT) bornes del transformador	0.2	0,016
Baja Tensión (BT) alejado del transformador	1.0	0,003

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 de MT/BT (media a baja tensión).

Conclusiones

Una instalación de BT, la vamos a modelar para el cálculo de las corrientes de cortocircuito, como una fuente de tensión ideal 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 RL 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 lo 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 $X \gg R \Rightarrow \theta \cong \frac{\pi}{2} \Rightarrow$ 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 la vamos a despreciar frente a la corriente de cortocircuito.

3.- Fuentes y comportamiento transitorio de las corrientes de cortocircuito

Fuentes que aportan al cortocircuito

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

Los elementos activos que consideraremos en este curso son:

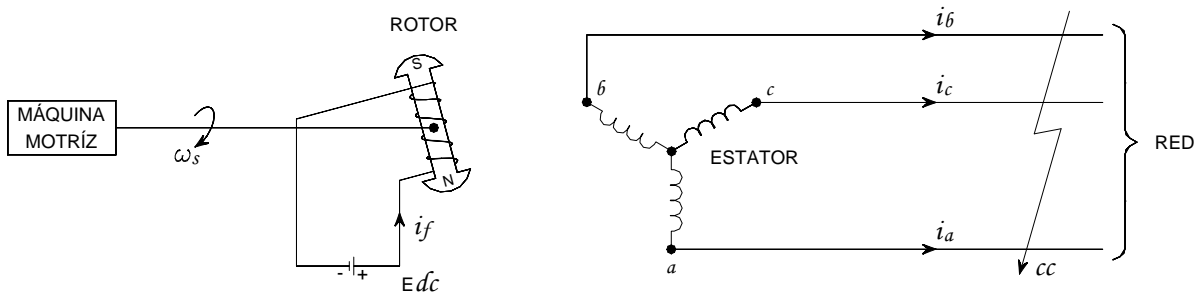
- Red de suministro de energía eléctrica de la distribuidora (UTE).
- Máquinas eléctricas síncronas (generadores y motores).
- Máquinas eléctricas asíncronas (motores).

A continuación analizaremos el aporte de las máquinas eléctricas rotativas y presentaremos algunos diagramas del comportamiento transitorio de las corrientes de cortocircuito en cada caso.

Máquinas Síncronas

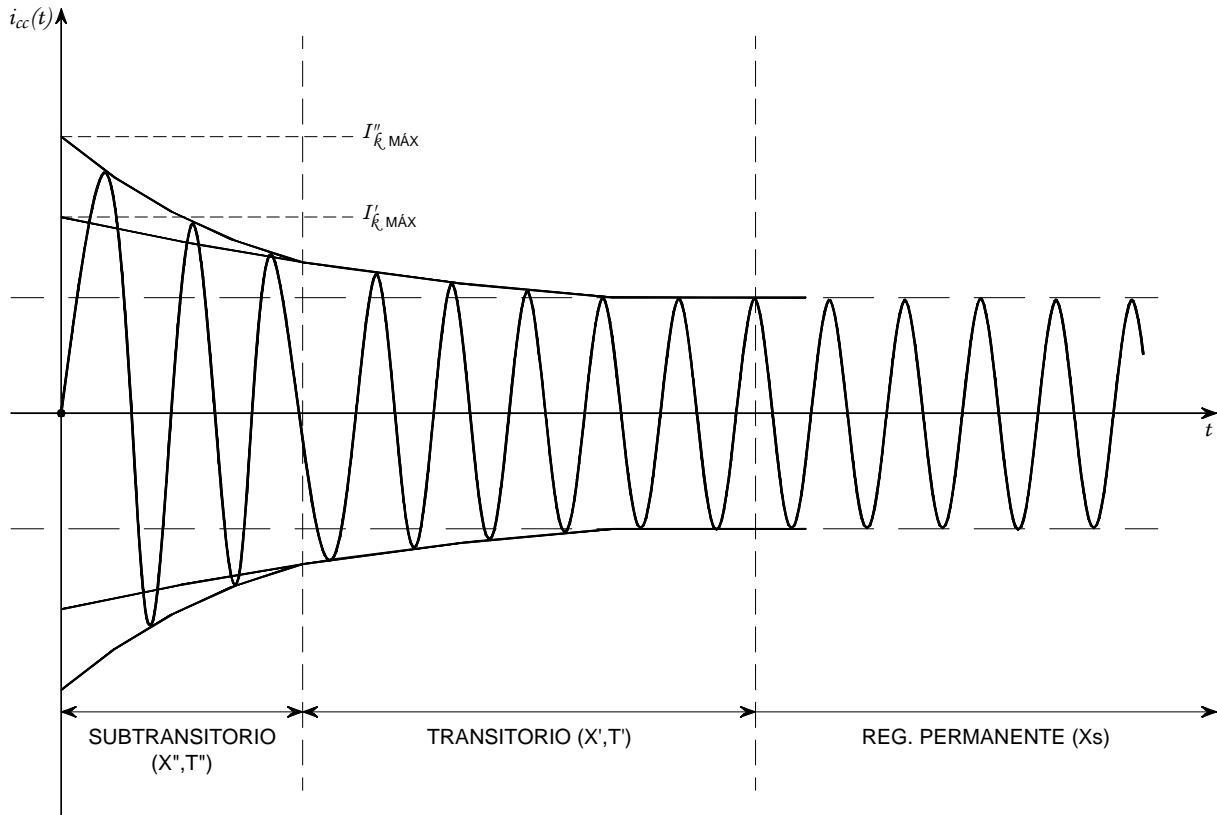
Las fuentes del sistema público de distribución de energía eléctrica son generadores síncronos.

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



Al producirse un cortocircuito en los bornes del estator, el eje de la máquina 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.

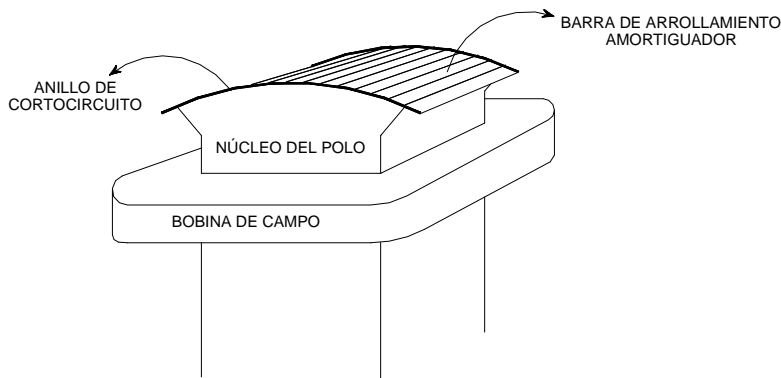
Se produce un transitorio en la corriente, el que se representa en la figura siguiente eliminado la componente de continua:



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 la máquina síncrona.

En régimen permanente el generador gira a la velocidad de sincronismo y no existe inducción sobre este arrollamiento, pero en el 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.

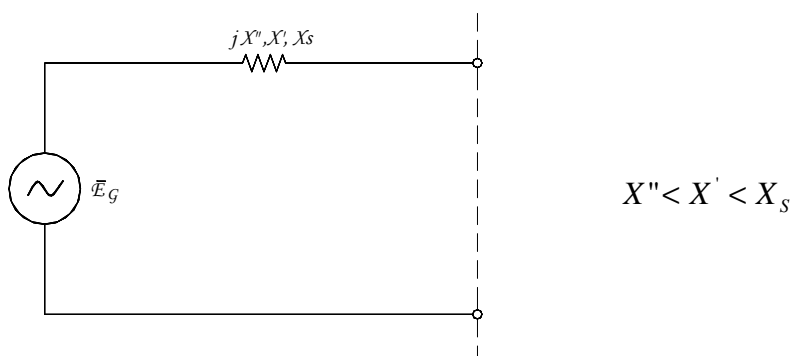
El principal responsable de este período es el campo del rotor. Durante el cortocircuito se induce en el bobinado de campo una corriente alterna comportándose el mismo, frente a la corriente alterna, como un arrollamiento en cortocircuito, generando estas corrientes inducidas un campo magnético que provoca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

□ Régimen permanente:

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

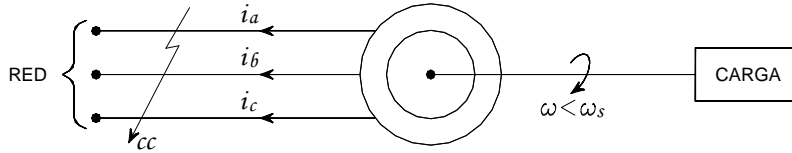
En el caso del generador el transitorio de la corriente es más lento y existe una corriente de régimen permanente mantenida por la máquina motriz y la fuente de excitación del campo. Mientras que en el caso del motor el transitorio es rápido debido a que el eje sólo es mantenido en movimiento por la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

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



Máquinas Asíncronas

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

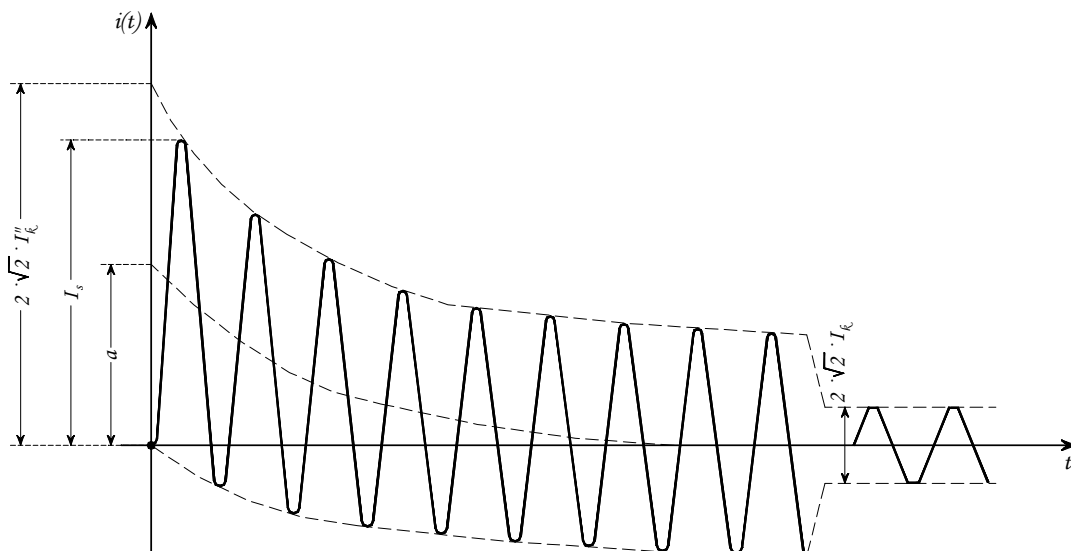


En los motores asíncronos, el estator está alimentado por la red de corriente alterna, que genera un campo magnético giratorio a la frecuencia de sincronismo. El rotor en esta máquina gira a una velocidad menor a la de sincronismo y el campo no está alimentado por una fuente externa, sino que es creado 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 utilizaremos para el cálculo de cortocircuito de los motores asíncronos es una fuente de tensión ideal en serie con una reactancia constante.

Presentamos a continuación un diagrama típico de evolución de la corriente de cortocircuito, con el que vamos a definir las diversas corrientes utilizadas para el diseño de las instalaciones eléctricas de baja tensión.



En este diagrama:

- La componente de alterna tiene una amplitud que va decreciendo con el tiempo debido al comportamiento transitorio de las máquinas eléctricas ($X_s'' < X_s' < X_s$).
- La componente de 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

Definiciones

Corriente de cortocircuito prevista: Corriente que circularía si el cortocircuito fuera remplazado por una conexión ideal de impedancia nula, 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.

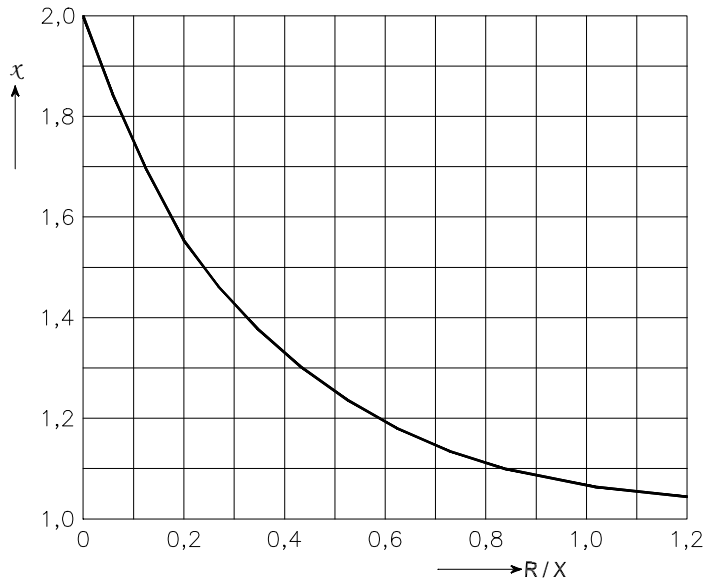
Valor de cresta de la Corriente de Cortocircuito (I_S): Valor instantáneo máximo posible de la corriente de cortocircuito prevista.

Para el cálculo de la corriente de cresta I_S , se considera la máxima asimetría posible 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:

$$I_S = k\sqrt{2} \cdot I''_K$$

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



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

En las redes de baja tensión las peores condiciones de asimetría debida a la componente de 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

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

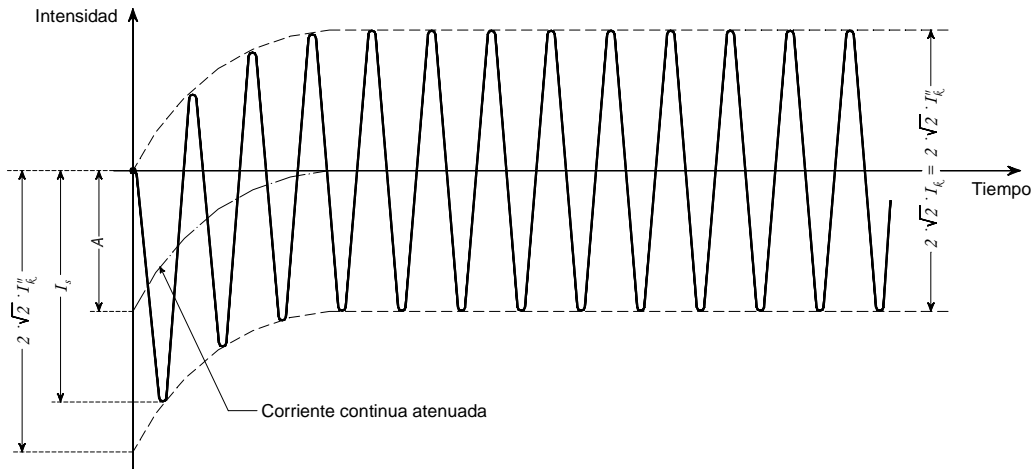
Comportamiento transitorio de las corrientes de cortocircuito

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.

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 que este es el caso en el que 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:



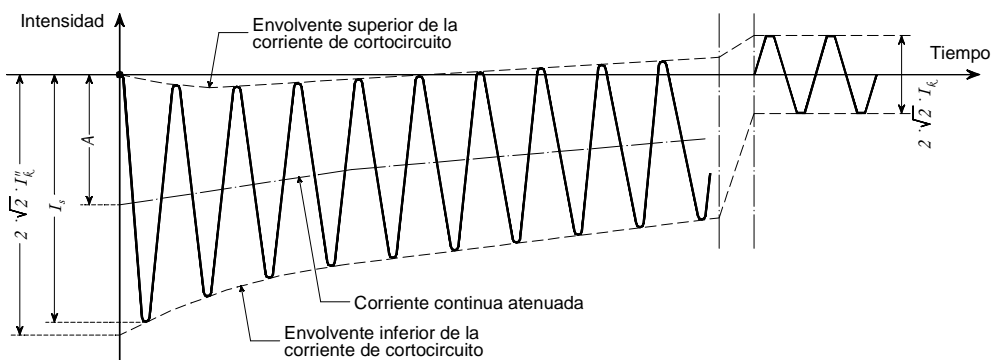
Esta aproximación es válida para las instalaciones de baja tensión que se alimentan de la red de la distribuidora (UTE) y podemos considerar que:

$$I''_k = I_k$$

Defectos próximos a las máquinas eléctricas rotativas:

A continuación se presentan los gráficos de evolución de las corrientes de cortocircuito en bornes de un generador síncrono y en bornes de un motor asíncrono de baja tensión:

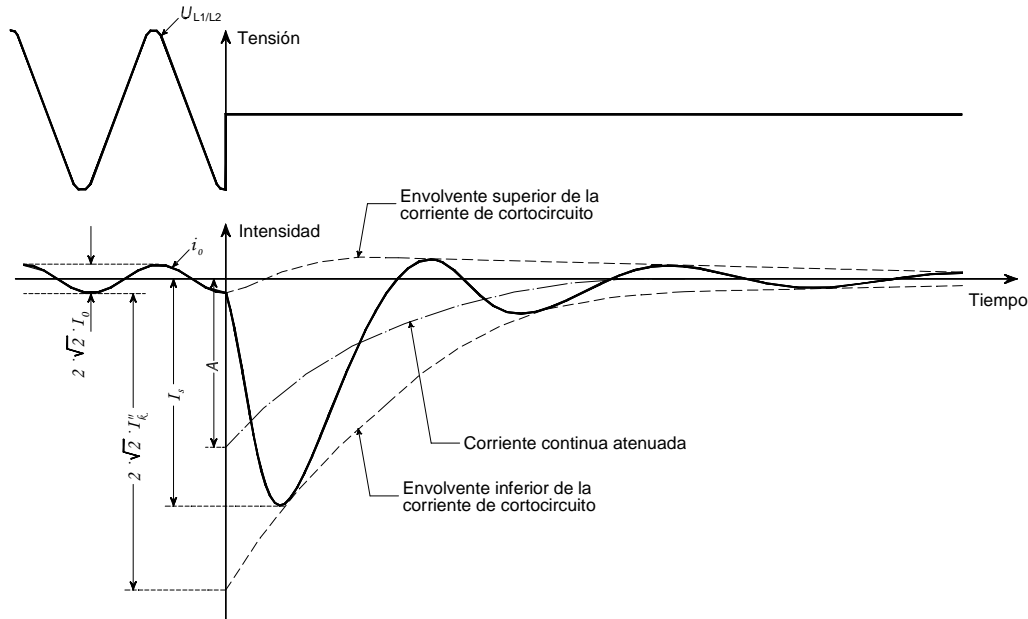
Generador síncrono



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).

En este caso se cumple en general: $I''_k > I_k$

Motor asíncrono de baja tensión



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).

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

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

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 mseg (medio ciclo en 50 Hz).

El aporte de los motores asíncronos de baja tensión al cortocircuito es solamente durante los primeros 2 o 3 ciclos (40 a 60 mseg).

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

En las instalaciones de baja tensión sólo se utiliza para el diseño, las corrientes I''_k y I_s , y se toma como máxima condición de asimetría:

$$I_s = 1,6 \cdot \sqrt{2} \cdot I''_k = 2,26 \cdot I''_k$$

4.- Impedancias equivalentes de los elementos eléctricos

Para el cálculo de las corrientes de cortocircuito, debemos 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 cuales son los elementos que aportan al defecto (elementos activos) y los que no aportan al defecto (elementos pasivos).

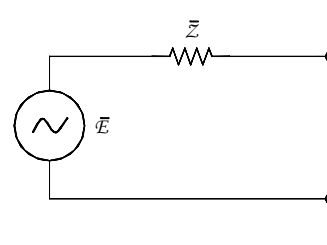
Los elementos activos de la instalación (red de distribuidora, generadores y motores) serán modelados como una fuente de tensión ideal en serie con una impedancia o una reactancia en el caso que se pueda despreciar las pérdidas Joule.

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 baja tensión, 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.

Elementos activos



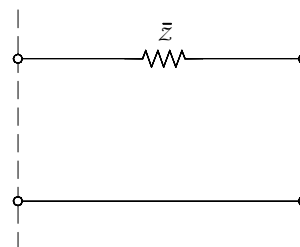
Modelo
Equivalente



Elementos pasivos



Modelo
Equivalente

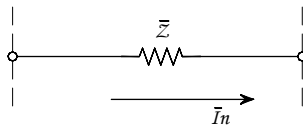


En estos apuntes se dan como ejemplo algunos valores aproximados de impedancias equivalentes. Para un cálculo de cortocircuito en una instalación específica, se deben utilizar los datos característicos reales de los distintos elementos, obtenidos de los catálogos correspondientes.

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:



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

- 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:

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

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

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

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

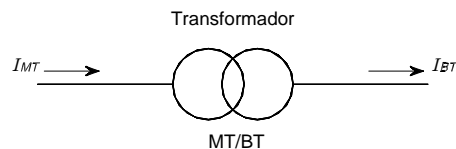
Esta última ecuación nos permite calcular, a partir de las impedancias en % y de las potencias nominales aparentes de los elementos, el valor absoluto $Z(\Omega)$ a la tensión nominal.

Conversión de impedancias

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

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

Recordemos 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:



$$\frac{Un_{MT}}{Un_{BT}} = k, \quad \frac{I_{MT}}{I_{BT}} = \frac{1}{k} \quad \Rightarrow \quad \boxed{Z_{BT} = \frac{1}{k^2} \cdot Z_{MT}}$$

Red de distribución (UTE)

Usualmente la empresa distribuidora (UTE) nos indica 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.

Un_Q Tensión nominal, valor eficaz de línea, de la Red de Distribución.

$S''_{kQ} = \sqrt{3} \cdot Un_Q \cdot I''_{kQ}$ Potencia de cortocircuito trifásica, en el punto de conexión a la Red del Distribuidor.

$Z_Q = \frac{Un_Q}{\sqrt{3} \cdot I''_{kQ}} = \frac{Un_Q^2}{S''_{kQ}}$ Valor absoluto de la impedancia de cortocircuito

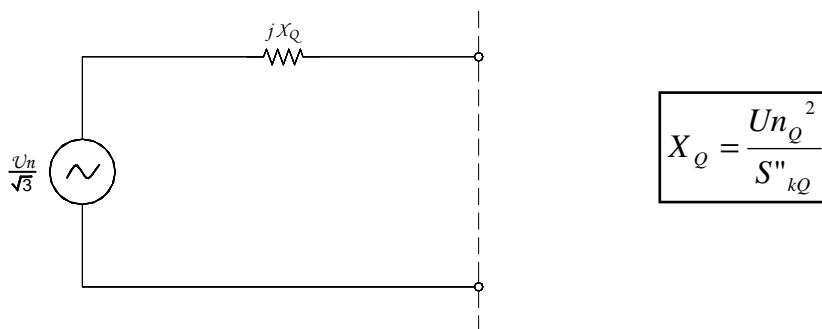
Para los cálculos de la corriente de cortocircuito en instalaciones de baja tensión, se puede despreciar la componente resistiva de la impedancia de cortocircuito de la red:

$$\overline{Z}_Q = R_Q + jX_Q \cong jX_Q$$

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 vamos a utilizar para la Red de Distribución (UTE) es el siguiente:



Transformadores de potencia

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:

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

Z_T Valor absoluto de la impedancia de cortocircuito del transformador

S_n Potencia nominal aparente del transformador

Un 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:

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

P_{cu} Pérdidas en el cobre

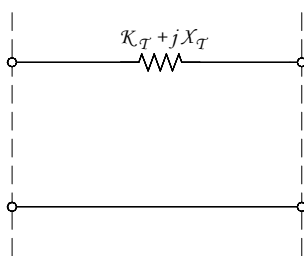
I_n Corriente nominal

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad \overline{Z_T} = R_T + jX_T$$

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

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

El modelo equivalente que vamos a utilizar para los transformadores de potencia es el siguiente:



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

$$R_T = \frac{P_{cu}}{3 \cdot In^2}$$

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

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:

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

$$r_L (\Omega/m) = \frac{\rho}{S}$$

Resistencia por unidad de longitud

$$x_L (\Omega/m)$$

Reactancia por unidad de longitud

$$L(m)$$

Longitud del conductor

$$\rho(\theta) = \rho_0 \cdot [1 + 0.004 \cdot (\theta - 20)]$$

Resistividad del conductor

$$S(\text{mm}^2)$$

Sección del conductor

$$\rho_0(\text{Cu}) = 0.0185 \frac{\Omega \text{mm}^2}{m}$$

Resistividad del cobre a 20°C

$$\rho_0(\text{Al}) = 0.0294 \frac{\Omega \text{mm}^2}{m}$$

Resistividad del aluminio a 20°C

Para el cálculo de las corrientes de cortocircuito máximo y mínimo en las instalaciones de baja tensión, 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.

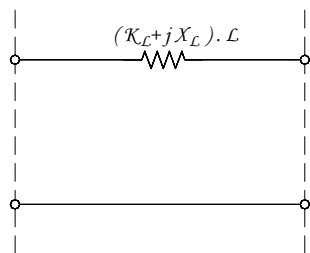
Valores típicos de reactancia por unidad de cables y barras en baja tensión:

$x_L(\Omega/km) = 0.08$ para cables tripolares o unipolares tendidos en trifolio

$x_L(\Omega/km) = 0.09$ para cables unipolares tendidos en plano juntos

$x_L(\Omega/km) = 0.13$ para cables unipolares tendidos en plano separados

El modelo equivalente que vamos a utilizar para los conductores es el siguiente:



$$\overline{Z}_L = \left(\frac{\rho}{S} + j \cdot x_L \right) \cdot L$$

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 baja tensión, es la reactancia subtransitoria en %:

$$X''_g = \frac{x''_d(\%) \cdot Un^2}{100 \cdot Sn}$$

Sn Potencia nominal aparente de la máquina

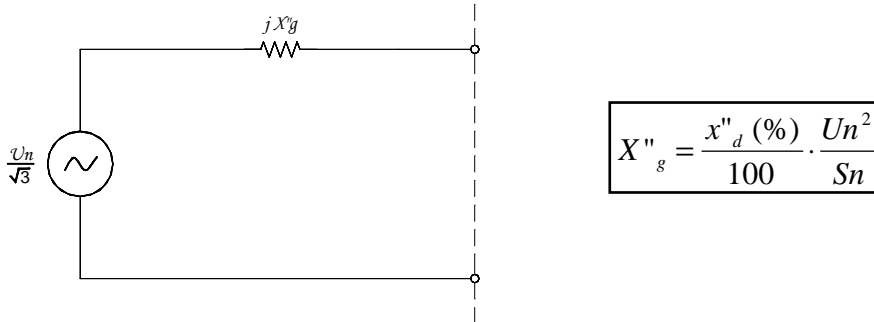
Un Tensión nominal, valor eficaz de línea, del generador o motor

$x''_d(\%)$ Reactancia subtransitoria en %

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

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

El modelo que vamos a utilizar para las máquinas síncronas es el siguiente:



Motores asíncronos

La reactancia que se utiliza para modelar los motores asíncronos, en los cálculos de cortocircuito en las instalaciones de baja tensión, 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:

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

- I_n Corriente nominal de línea del motor
- I_a Corriente de arranque 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:

$$\overline{Z}_m \cong jX_m = j \cdot 0.2 \frac{U_n^2}{S_n}$$

$$S_n = \frac{P_n \cdot 0.745}{\eta \cdot \cos \varphi}$$

- 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 baja tensión, 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:

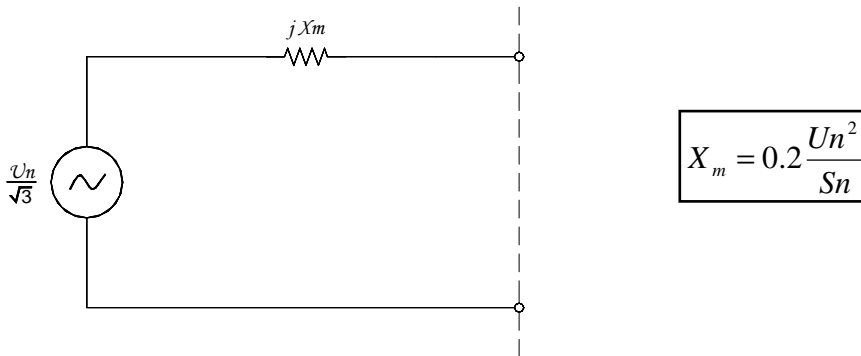
$$I_a \cong 5I_n, \quad \eta \cdot \cos \varphi = 0.8$$

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

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

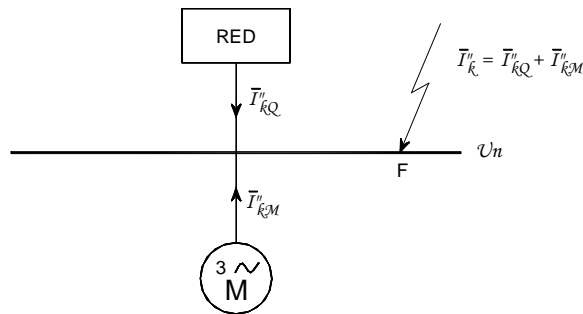
$$\overline{Z}_{mE} = jX_{mE} = j \cdot 0.2 \frac{U_n^2}{\sum S_n}$$

El modelo equivalente que vamos a utilizar para los motores asíncronos es el siguiente:



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:



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

$$I''_{kM} = \frac{Un}{\sqrt{3}X_{mE}} \cong Ia \cong 5 \sum_i In_i$$

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

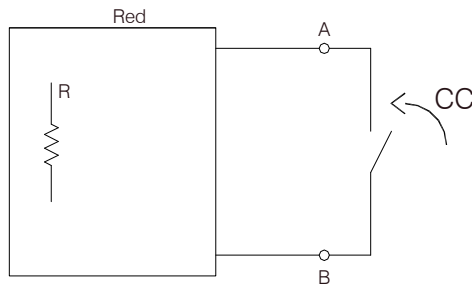
$$\boxed{\sum_i In_i \leq 0.01 \cdot I''_{kQ}}$$

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} .

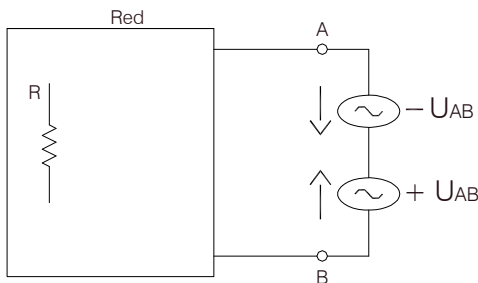
5.- Método de cálculo de las corrientes de cortocircuitos

Introducción

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

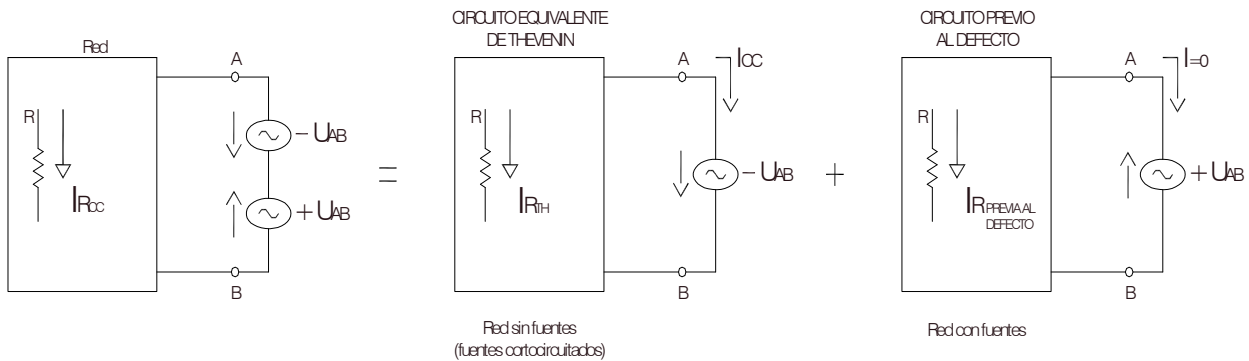


Podemos modelar el cortocircuito con dos fuentes iguales y opuestas conectadas en serie entre los puntos A y B:



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:



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

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

Siendo:

- I_{R_CC} Corriente de cortocircuito en la rama R
- I_{R_TH} Corriente del circuito equivalente Thévenin en la rama R
- I_{R_PREVIA} Corriente previa al defecto en la rama R

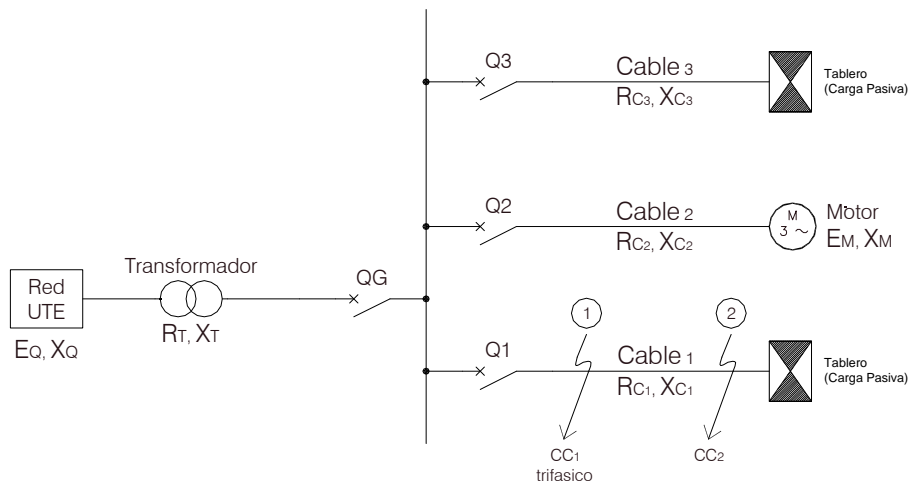
En baja tensión se hacen algunas hipótesis que simplifican los cálculos y son aplicables a la mayoría de las instalaciones:

- El cortocircuito está alejado de cualquier generador y es alimentado en un solo punto por una red de suministro eléctrico.
- La red de baja tensión 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.

Procedimiento de cálculo de las corrientes de cortocircuito

En este punto analizaremos el procedimiento de cálculo de las corrientes de cortocircuito simétricas (cortocircuitos trifásicos equilibrados), en una instalación eléctrica de baja tensión:

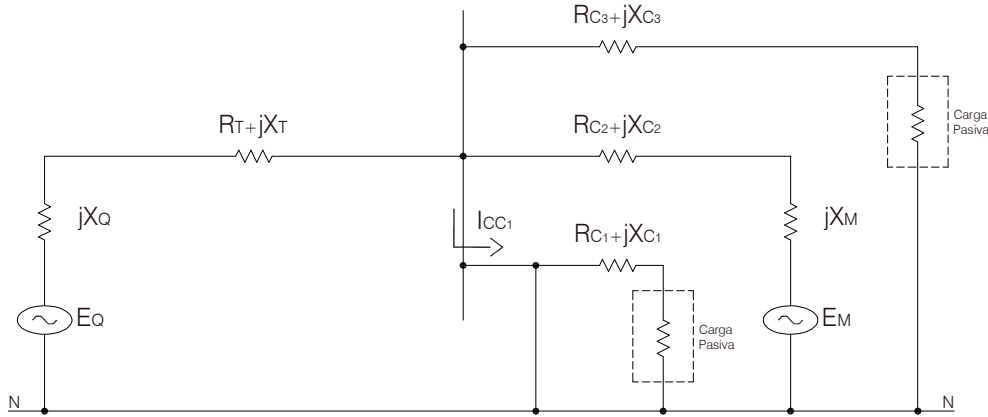
- a) Para comenzar el estudio debemos realizar un diagrama unifilar de la instalación, indicando todos los elementos y sus características:



- b) Representamos el circuito equivalente para el cálculo de las corrientes de cortocircuito, reemplazando cada elemento por su modelo equivalente:

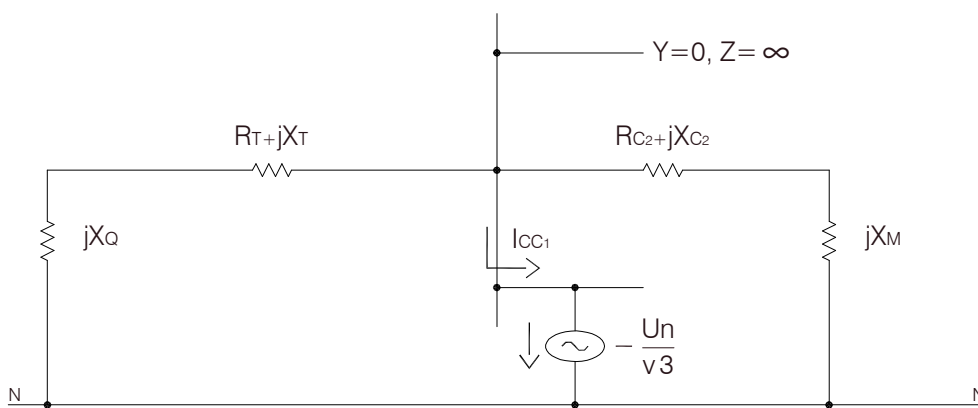
- Trabajamos con un modelo fase-neutro, tensiones fase-neutro y corrientes de línea, considerando que el sistema es equilibrado.
- Los elementos activos son representados por una fuente de tensión ideal en serie con una impedancia y los elementos pasivos por una impedancia serie.

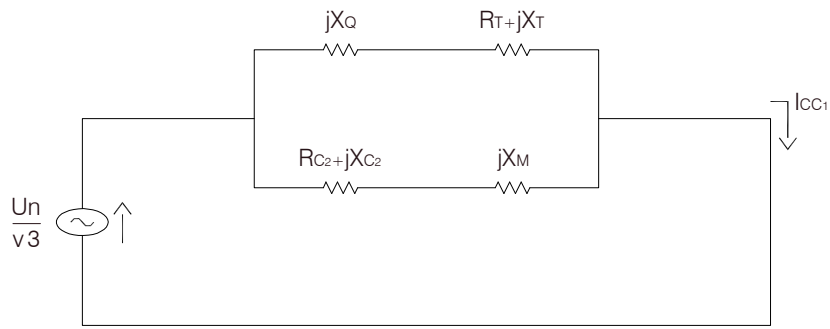
c) Consideremos un cortocircuito trifásico equilibrado en bornes de salida del interruptor Q1 (punto 1), que lo representamos en el circuito con una conexión ideal de impedancia nula entre fase y neutro en el punto 1:



d) Para el cálculo nos quedamos con el modelo equivalente de Thévenin, recordando que:

- Despreciamos las corrientes previas al cortocircuito y consideramos 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.



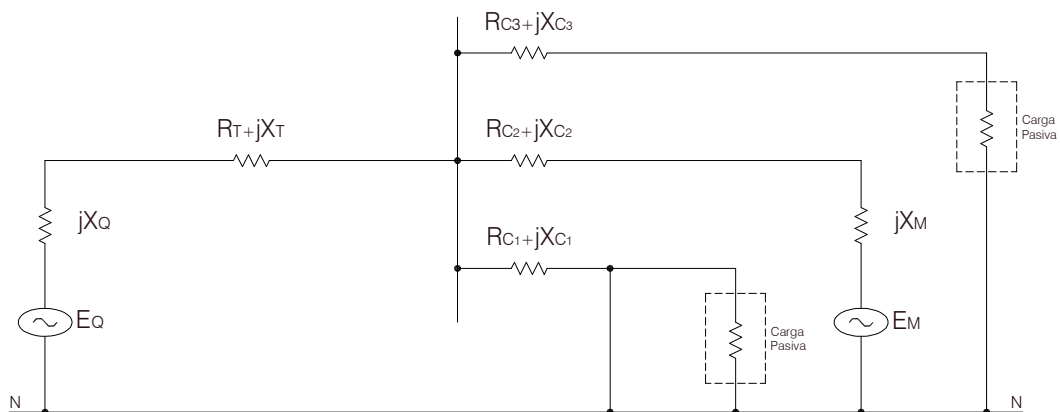


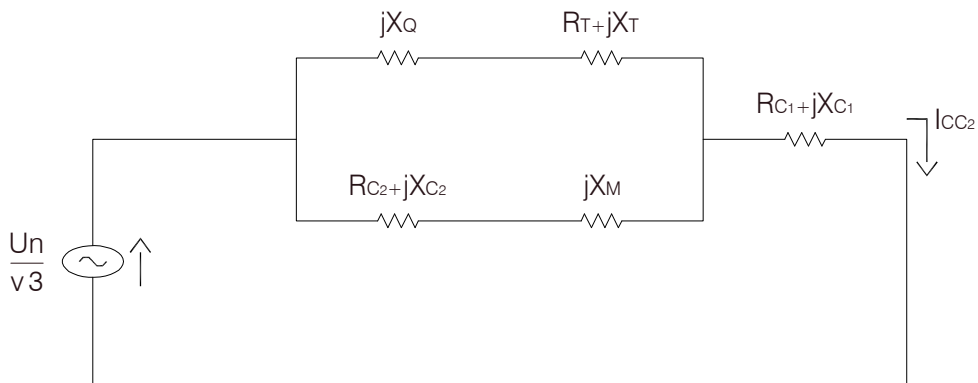
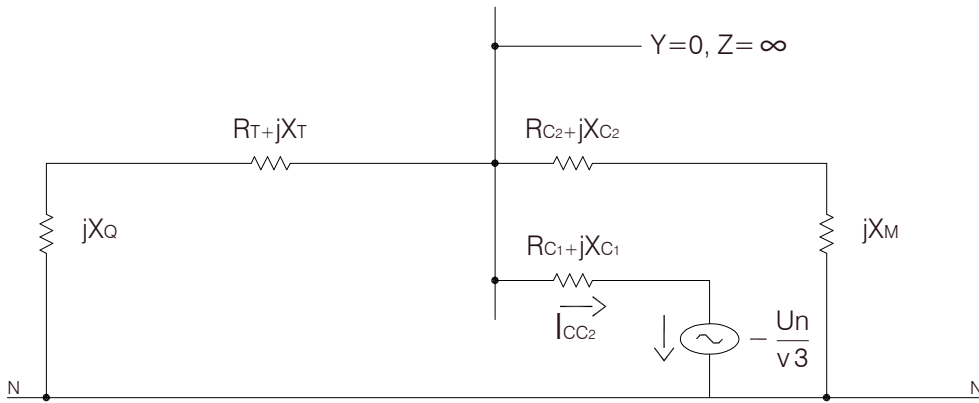
La expresión de la corriente de cortocircuito queda:

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

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

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





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

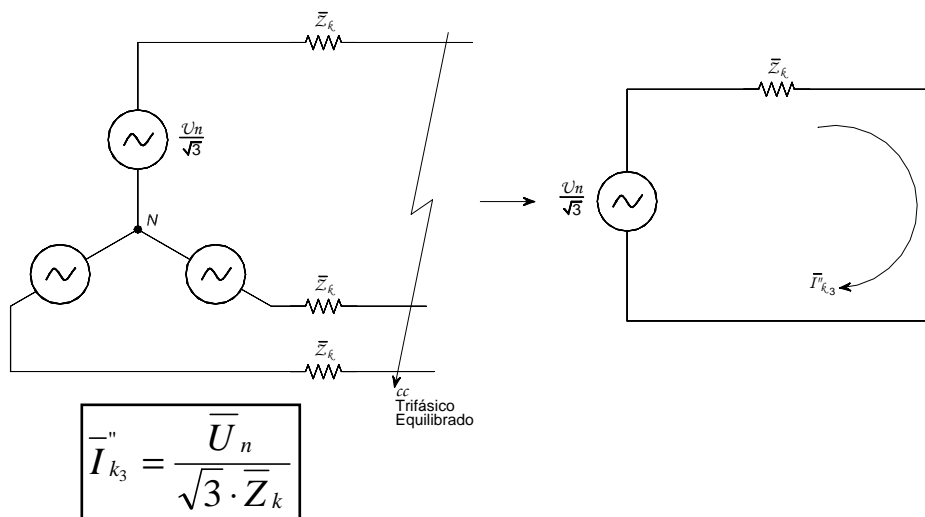
Ecuaciones para los diferentes tipo de cortocircuitos

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 baja tensión.

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.

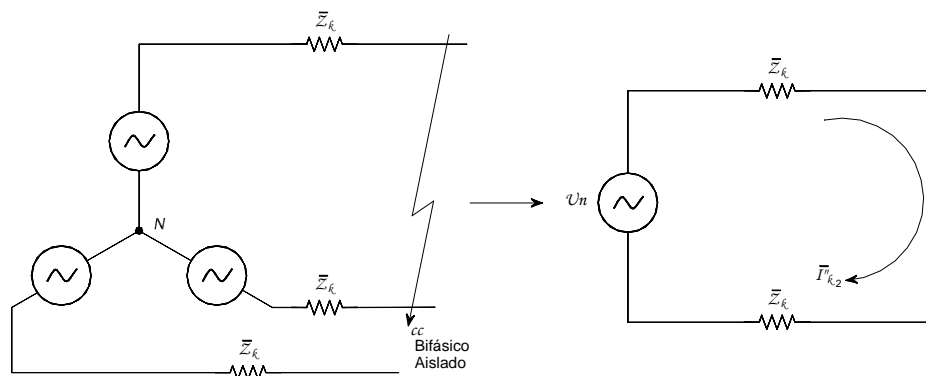
Cortocircuito trifásico equilibrado:

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



- I_{k_3}'' Corriente de cortocircuito trifásica, valor eficaz componente alterna.
- Z_k Impedancia equivalente del circuito de falla.

Cortocircuito entre dos fases (bifásico aislado de tierra):



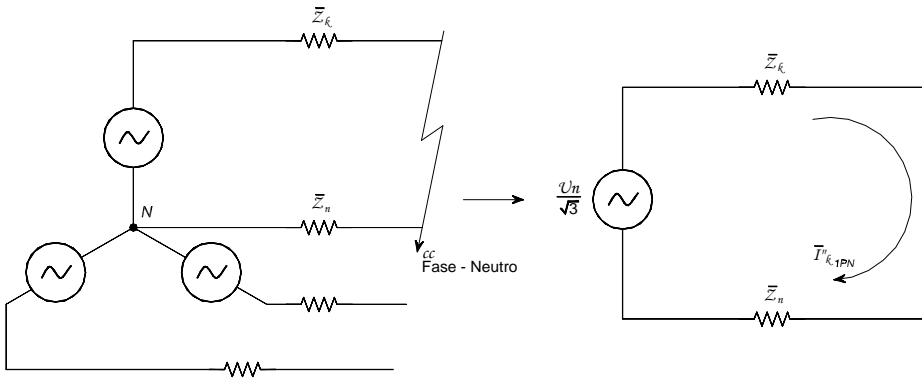
Corresponde a un cortocircuito entre dos fases sin contacto con tierra:

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

I_{k_2}'' Corriente de cortocircuito bifásico aislado de tierra.

Cortocircuito monofásico entre una fase y neutro:

Corresponde a un cortocircuito entre una fase y neutro:



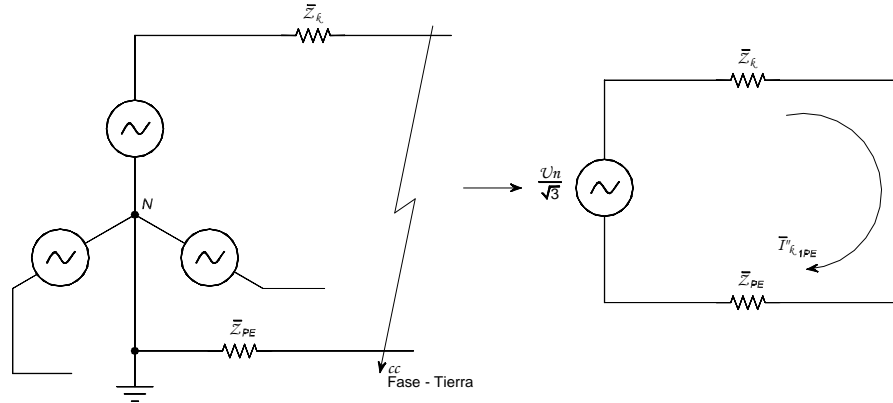
$$\bar{I}_{k_{1N}}'' = \frac{\bar{U}_n}{\sqrt{3}(\bar{Z}_k + \bar{Z}_n)}$$

$I_{k_{1N}}''$ Corriente de cortocircuito entre una fase y neutro.

Z_n Impedancia equivalente del conductor neutro de retorno

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:



$$\bar{I}_{k1PE}'' = \frac{\bar{U}_n}{\sqrt{3}(\bar{Z}_k + \bar{Z}_{PE})}$$

I_{k1PE}'' Corriente de cortocircuito entre fase y tierra.

Z_{PE} Impedancia equivalente del retorno por tierra.

Observaciones

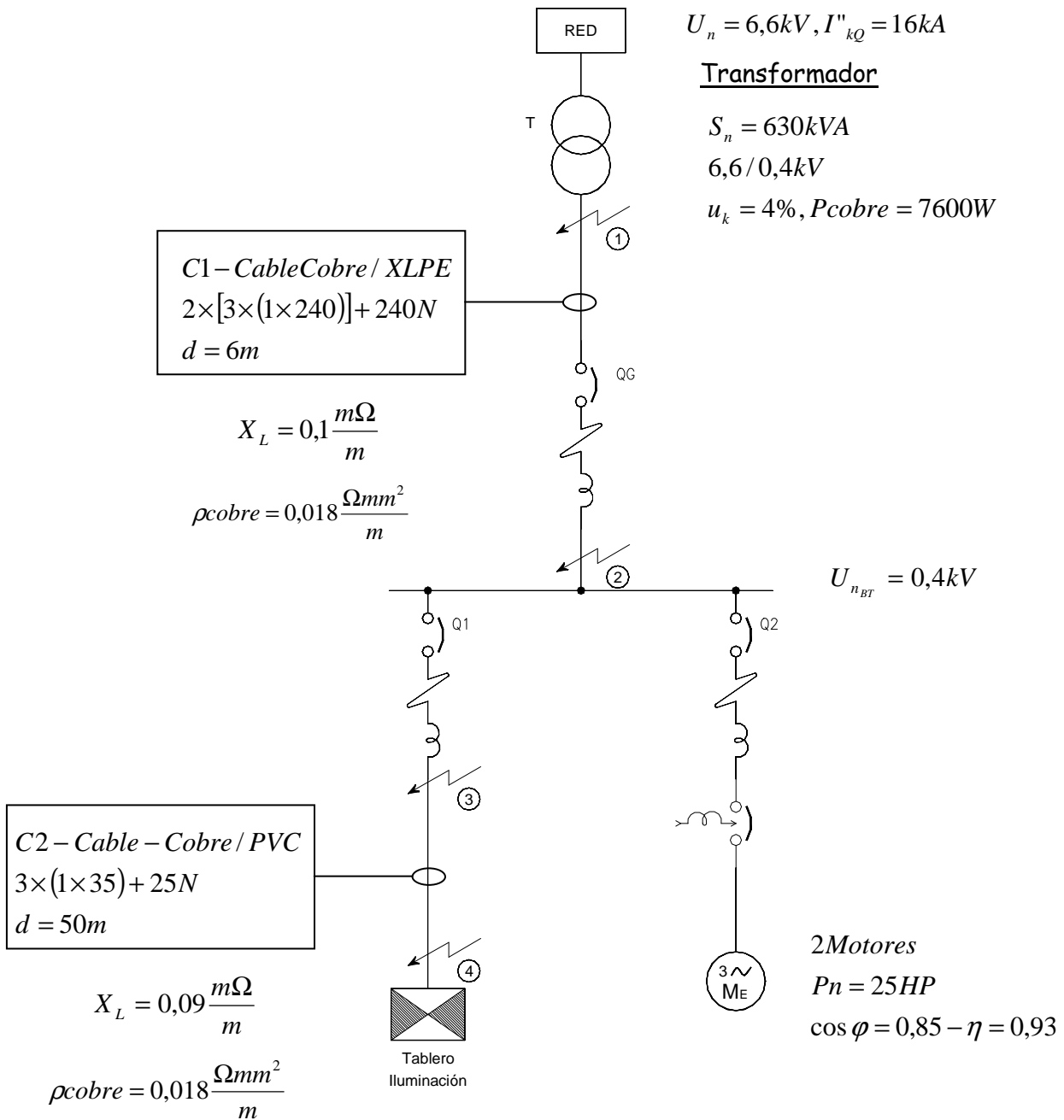
1) De acuerdo con las ecuaciones anteriores:

- El cortocircuito máximo será el trifásico.
- El cortocircuito mínimo será el fase-neutro (circuitos con neutro) o el bifásico (circuitos sin neutro).

2) 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.

3) 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



1) Calculemos las impedancias equivalentes.

Red:

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

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

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

Transformador:

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

$$Z_T \cong 10,16 \text{ m}\Omega$$

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

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

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

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

Conductores:

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

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

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

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

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

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

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 $\cos \varphi$, $S_{nE} = \sum S_n \cong 47 kVA$

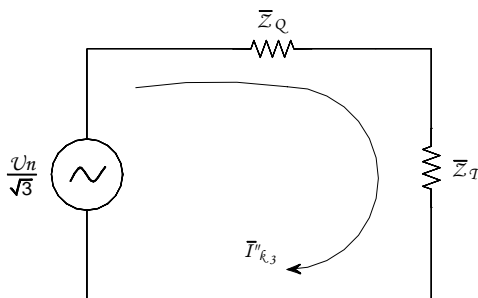
$$X_{ME} = 0,2 \cdot \frac{U_n^2}{S_{nE}} = 0,2 \times \frac{400^2}{47} = 680,85 m\Omega$$

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

2) Calculemos las corrientes de cortocircuito en los distintos puntos de la instalación.

Cortocircuito 1: (En bornes de BT del Transformador).

Circuito equivalente



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

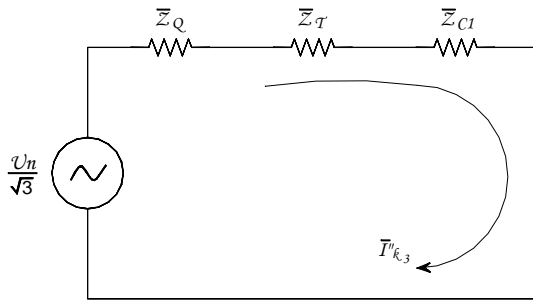
$$|\bar{Z}_k| = \sqrt{3,06^2 + 10,56^2} = 10,99 m\Omega$$

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

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

Cortocircuito 2: (En bornes de salida del QG).

Circuito equivalente



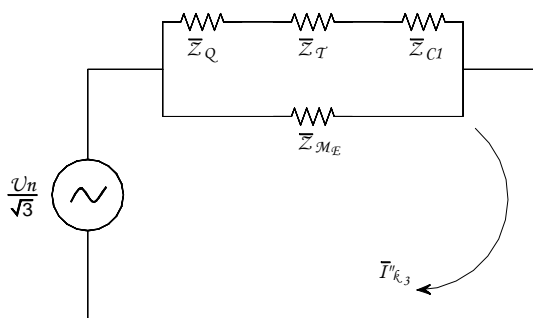
$$\bar{Z}_k = \bar{Z}_Q + \bar{Z}_T + \bar{Z}_{C1} = 3,285 + j10,86m\Omega$$

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

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

Cortocircuito 3: (En bornes de salida de Q1).

Circuito equivalente



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

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

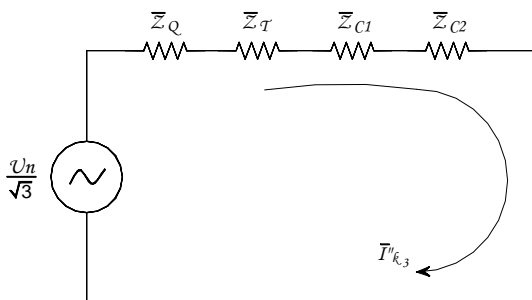
$$|\bar{Z}_k| \cong 11,17m\Omega$$

$$I''_{k_3} = \frac{400}{\sqrt{3} \times 11,17} \cong 20,7kA$$

Cortocircuito 4: (cortocircuito al final del cable C_2).

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



$$\bar{Z}_k = 28,995 + j15,36m\Omega$$

$$|\bar{Z}_k| = 32,81m\Omega$$

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

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

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

Impedancia del neutro $\longrightarrow \bar{Z}_n \cong R_n = \frac{\rho \cdot L}{S_N}$

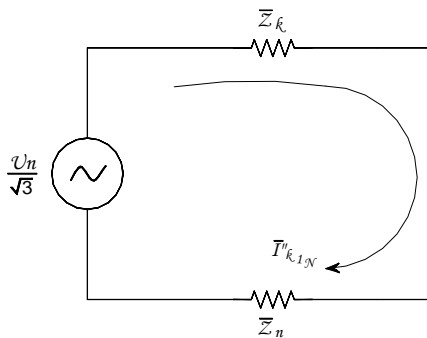
$$\text{Conductor } C_1 : R_{n_{c1}} = \frac{0,018 \times 6}{240} = 0,45 m\Omega$$

$$\text{Conductor } C_2 : R_{N_{c2}} = \frac{0,018 \times 50}{25} = 36 m\Omega$$

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

Cortocircuito 4 - fase-neutro:

Circuito equivalente



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

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

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

Como se puede ver en este caso la corriente del cortocircuito fase-neutro es menor a la del bifásico en el extremo del conductor C_2 :

$$2 \cdot |\bar{Z}_k| < \sqrt{3} \cdot |\bar{Z}_k + \bar{Z}_N| \Rightarrow |I''_{k1N}| < |I''_{k2}|$$

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 baja tensión.