



Universidad Nacional
de Mar del Plata

Departamento de Ingeniería Eléctrica
Área Electrotecnia



FACULTAD
DE INGENIERIA

***Corrientes de cortocircuito en sistemas trifásicos
de corriente alterna***

Autor: Ingeniero Gustavo L. Ferro – Profesor Adjunto Electrotecnia
EDICIÓN 2015

Índice

1. Introducción
 2. Corrientes peligrosas de cortocircuito
 3. Origen de los cortocircuitos
 4. Consecuencias de los cortocircuitos
 5. Comportamiento de un circuito serie RL
 6. Fuentes y comportamiento transitorio de las corrientes de cortocircuito
 7. Tipos de cortocircuitos
 8. Parámetros eléctricos a considerar en los cortocircuitos. Conceptos según la norma AEA 90909 – Parte 0.
 9. Impedancias directa, inversa y homopolar
 10. Cálculo de la impedancia de aparatos, dispositivos eléctricos y de la impedancia de cortocircuito de la red
 11. Métodos de cálculo de las corrientes de cortocircuito según la norma AEA 90909 – Parte 0.
 12. Cálculo de las corrientes de cortocircuito.
 13. Ejemplos de cálculo de las corrientes de cortocircuito
- **Bibliografía:**
 - ✓ AEA 90909 – Corrientes de cortocircuito en sistemas trifásicos de corriente alterna.
 - ✓ Análisis de sistemas eléctricos de potencia – Autor: Stevenson W. D.
 - ✓ Corrientes de cortocircuito en redes eléctricas – Autor: Roeper R.
 - ✓ Cálculo de corrientes de cortocircuito – Autor: Funk Gernot

Archivo en sitio web:

http://www3.fi.mdp.edu.ar/dtoelectrica/catedras_3e3.htm

1. Introducción

Con este módulo, se pretende acometer el estudio de los sistemas eléctricos de potencia (SEP) trabajando ante situaciones anómalas como pueden ser las provocadas por los **cortocircuitos u otras fallas eléctricas**.

La definición de Cortocircuito según el Vocabulario Electrotécnico Internacional (VEI 826-14-10 Y 195-04-1 resulta:

Camino conductor accidental o intencional entre dos o más partes conductoras, forzando a que la diferencia de potencial eléctrico entre esas partes conductoras sea igual a cero o cercana a cero.

También según VEI 151-03-04 se define Cortocircuito como:

Conexión accidental o intencionada de dos o más puntos de un circuito con tensiones o potenciales eléctricos diferentes, por intermedio de una resistencia o una impedancia de pequeño valor.

El cálculo de las impedancias de diversos componentes y dispositivos eléctricos delante una falla eléctrica y el cálculo de las corrientes de cortocircuito mediante la aplicación de la **norma de concepto AEA 90909 – Corrientes de Cortocircuito en Sistemas Trifásicos de Corriente Alterna – Parte 0**, completarán este trabajo.

El análisis de situaciones anómalas permite proteger y alargar la vida de los componentes eléctricos que forman una red, y asimismo resultan imprescindibles para dimensionar y seleccionar los sistemas de protección más idóneos para cada fallo y situación en concreto.

Los cortocircuitos no son frecuentes y, cuando se producen, apenas **duran unas décimas de segundo**, pero sus consecuencias son tan graves e imprevisibles que obligan a un constante estudio y mejora de los dispositivos de protección a ellos destinados.

La mayor parte de las **normas de protección de las instalaciones eléctricas** nos indican que no sólo deben considerarse las corrientes y tensiones debidas a las cargas de servicio, sino también las debidas a **sobrecargas producidas por los cortocircuitos**.

Las corrientes de cortocircuito presentan valores mayores a los nominales, provocando **sobrecargas térmicas y electrodinámicas elevadas**, aparte las corrientes de cortocircuito que circulan por tierra pueden ser causa de tensiones e interferencias inadmisibles.

Pero no sólo son importantes las corrientes máximas de cortocircuito, sino también las corrientes mínimas de cortocircuito, ya que éstas, en definitiva, son las que permiten dimensionar los dispositivos de protección de las redes.

Este comportamiento de los cortocircuitos se hace especialmente peligroso en contactos con las personas, pudiendo ocasionar lesiones de gravedad y causar daños en los instrumentos o máquinas de las instalaciones afectadas. Es por tanto de suma importancia conocer los valores que en un punto determinado del circuito puedan adoptar las corrientes máximas y mínimas de cortocircuito, ya que sólo de esta forma será posible proteger eficazmente a las instalaciones de tan graves consecuencias.

El conocimiento de las **sobrecargas máximas debidas a los cortocircuitos** es imprescindible para poder **dimensionar los aparatos y componentes eléctricos** de forma económica y segura.

La corriente de cortocircuito consta de una corriente alterna de frecuencia de servicio, con amplitud variable en el tiempo, y de una corriente continua (aperiódica) superpuesta, que se atenúa hasta hacerse cero.

Los objetivos del cálculo de las corrientes de cortocircuito son:

- a) Definir la capacidad de ruptura de los interruptores necesarios en las diversas partes de un sistema eléctrico de potencia (SEP), para lo que se realiza normalmente un cálculo de **cortocircuito trifásico simétrico**, debido a que este tipo de falla produce las **corrientes de cortocircuito más elevadas** en la mayoría de los casos.
- b) Ayudar a establecer un sistema adecuado de protección para diversas condiciones de falla, para lo que se debe realizar un cálculo de distribución de corrientes en la red del SEP tanto para cortocircuitos simétricos como asimétricos (usualmente el cortocircuito monofásico)

En general, el Cálculo de Cortocircuitos debe proporcionar los siguientes resultados:

1. La corriente en el punto de falla
2. La potencia de cortocircuito en el punto de falla
3. La distribución de corrientes post-falla en todas las líneas del SEP
4. Las tensiones post-falla en todas las barras

2. Corrientes peligrosas de cortocircuito

A efectos de selección y dimensionado de los dispositivos de protección adecuados a cada red, la siguiente tabla clasifica las solicitudes más importantes, así como la forma de calcularlas.

Tabla 1.- Solicitaciones más importantes en las redes eléctricas. Factores de diseño y cálculo (EE, significa cortocircuito doble a tierra)

Solicitaciones	Clase de defecto	Corriente de avería					Red		
		I_k''	I_k	I_s	I_a				
Calentamiento	3 polos	X	X			Máximas corrientes de avería	AT	BT	
	1 polos	X	X				AT	BT	
	EE	X					AT		
Esfuerzos	3 polos			X			AT	BT	
Capacidad de conexión	3 polos			X				AT	BT
	1 polos			X					BT
Capacidad de desconexión	3 polos				X			AT	BT
	1 polos				X				BT
Tensión de puesta a tierra								AT	
Tensión de contacto.	1 polos	X						AT	
Influencia inductiva.	1 polos	X					AT		
	EE	X					AT		
Disparo de relés de protección.	3 polos		X				AT	BT	
Seguridad de actuación de los dispositivos de protección para sistema con línea de protección para puesta a neutro.	2 polos		X			Mínimas corriente de avería		BT	
	1 polos		X					BT	

3. 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 descargas atmosféricas, maniobras o a defectos.
- Por factores humanos:** falsas maniobras, sustitución inadecuada de materiales, etc.
- Otras causas:** vandalismos, incendios, inundaciones, etc.

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 podemos considerar algunos de los siguientes efectos:

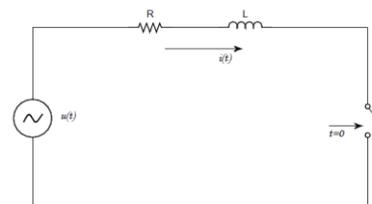
- **En el punto de defecto:** La presencia de arcos con deterioro de los aislantes, fusión de los conductores, principio de incendio y riesgo para las personas.
- **Para el circuito o equipo defectuoso:** Esfuerzos electrodinámicos, con deformación de los juegos de barras, rotura de aisladores, averías 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 BT 10 a 100 ms), puesta fuera de servicio de una parte de la instalación, perturbaciones en los circuitos de control y comunicaciones.

5. Comportamiento de un circuito serie RL

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

$$u(t) = \sqrt{2} U \operatorname{sen}(wt + \varphi)$$

Figura 1



Aplicando la 2ª Ley de Kirchhoff, la ecuación de equilibrio de tensiones resulta:

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

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

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

Donde:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (Lw)^2}}, \quad \theta = \operatorname{arctg} \frac{Lw}{R}$$

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

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

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

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

Donde se pueden identificar dos componentes, a saber:

$$i_a(t) = \sqrt{2} I \left[\text{sen}(wt + \varphi - \theta) \right], \text{ componente de alterna}$$

$$i_c(t) = \sqrt{2} I \left[\text{sen}(\varphi - \theta) e^{-\frac{R}{L}t} \right], \text{ componente aperiódica (exponencial decreciente)}$$

En la figura 2 se representan un ciclo de la forma de onda de la corriente.

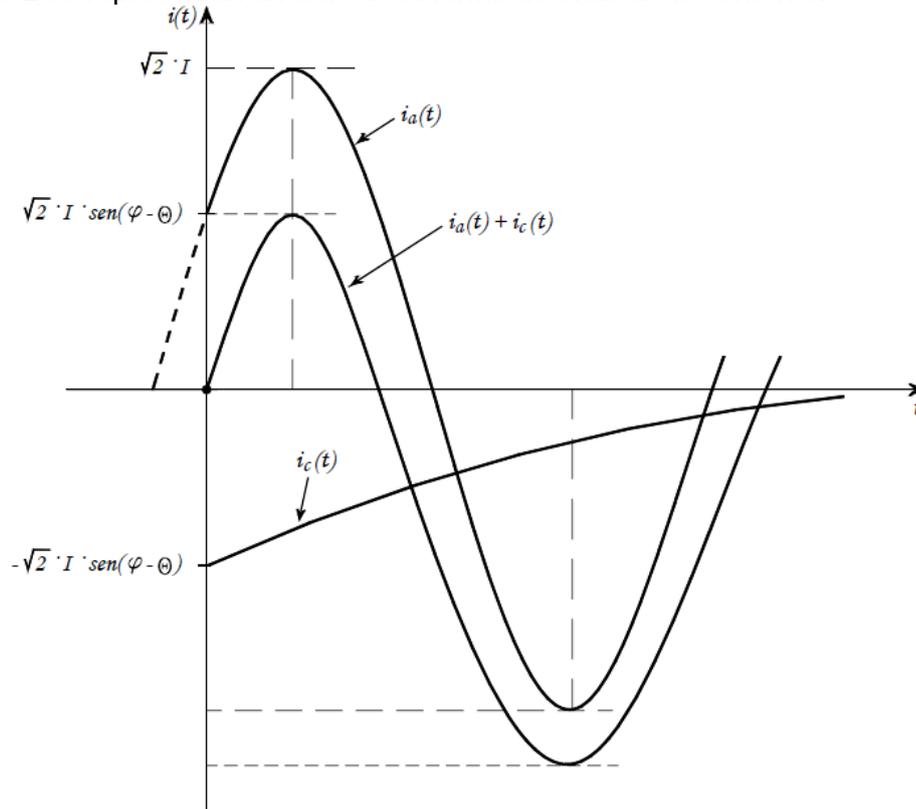


Figura 2

- Comentarios:

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

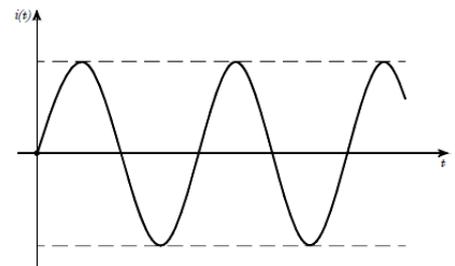
$$u(0) = \sqrt{2} U \text{sen} \varphi$$

- ✓ El ángulo " θ " queda determinado por la reactancia " ωL " y la resistencia " R " del circuito, y es el desfase entre la tensión y la componente de alterna de la corriente (i_a)

Figura 3

- ✓ El valor inicial de la componente aperiódica queda determinado por el valor inicial de la tensión al cerrar el circuito y por la resistencia e inductancia del circuito:

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



Consideremos dos casos particulares, a saber.

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:

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

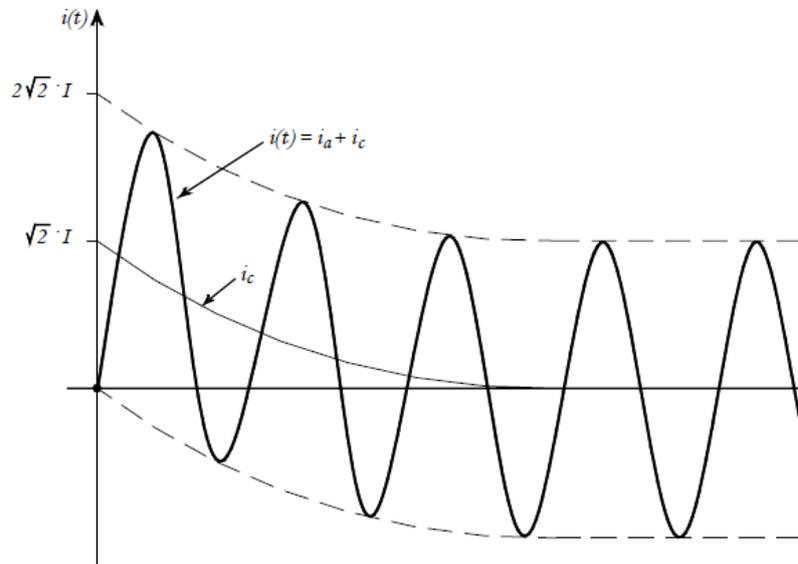


Figura 4

• **Conclusiones:**

Una instalación la vamos a modelar, para el cálculo de las corrientes de cortocircuito, como una **fente 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 los componentes de la red cortocircuitada, 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 $X \gg R$ entonces $\theta \cong \pi/2$, luego la condición de máxima asimetría se da cuando 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 esta corriente la vamos a despreciar frente a la corriente de cortocircuito.**

✓ La constante de tiempo $\tau = L/R$ 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	0.1	0,032
Baja Tensión bornes del transformador	0.2	0,016
Baja Tensión alejado del transformador	1.0	0,003

Como se puede observar en la tabla, en las instalaciones de baja tensión la componente de continua influye sólo cuando el cortocircuito es próximo al transformador.

6. Fuentes de las corrientes de 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 módulo son:

- ✓ **Alimentación de red**
- ✓ **Máquinas eléctricas síncronas (generadores y motores)**
- ✓ **Máquinas eléctricas asíncronas (motores)**

6.1 Alimentación de red

Una alimentación de red es una red vecina con sus propias centrales de abastecimiento, transformadores, líneas y cargas. Para el cálculo de cortocircuitos es determinante la potencia de cortocircuito de la red vecina $S''_{kQ} = \sqrt{3} U_{Nq} I''_{kQ}$ en el punto de acoplamiento con la red averiada.

De la potencia de cortocircuito conocida S''_{kQ} se obtiene la reactancia “ X_Q ” de la alimentación de red.

En la mayoría de los casos las redes vecinas están acopladas mediante transformadores con reactancias X_T . Con la condición de que $X_Q \leq X_T$, la corriente de cortocircuito proporcionada por la alimentación de red se atenúa muy poco. Entonces resulta $I_{kQ} = I''_{kQ}$, es decir, que la tensión eficaz de alimentación de red puede tomarse como invariable en cuanto a valor, ángulo de fase y frecuencia.

Un sistema de alimentación (mejor un punto del sistema) se dirá que es de “**potencia infinita**”, si su tensión permanece prácticamente inalterable al producirse el cortocircuito. Significa que son de poca importancia las caídas de tensión adicionales que las corrientes de cortocircuito originan en el sistema (punto) de alimentación.

6.2 Máquinas Síncronas

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

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

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.

6.3 Máquinas Asíncronas

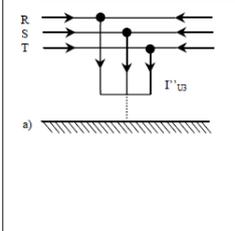
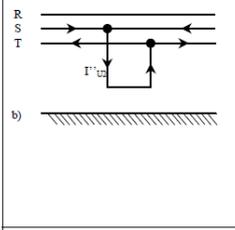
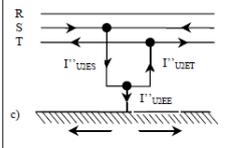
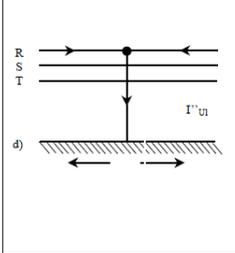
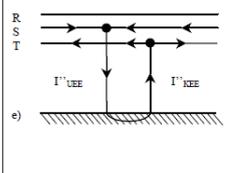
La principal aplicación de este tipo de máquinas eléctricas es como motor en la industria. En los motores asíncronos, el estator está alimentado por la red de corriente alterna, que genera un campo magnético giratorio a la frecuencia de sincronismo. El rotor en esta máquina gira a una velocidad menor 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.

7. Tipos de cortocircuitos

Cinco son los tipos de cortocircuitos más frecuentes que pueden darse en una red eléctrica; por suerte, el doble contacto a tierra es poco frecuente, revistiendo su cálculo una gran complejidad. En las redes trifásicas se distinguen esencialmente los tipos de cortocircuitos representados en la tabla 2, se indican las características de estos cortocircuitos, así como su importancia y repercusiones que ejercen en las instalaciones a las que afectan.

Tabla 2.- Tipos de cortocircuitos. Características más importantes

 <p>a)</p>	<p>Cortocircuito trifásicos</p> <p>Los cortocircuitos trifásicos, son los únicos cortocircuitos que se comportan como sistemas equilibrados, ya que todas las fases están afectadas por igual. Las tensiones en el punto de cortocircuito, tanto si el cortocircuito se cierra a través de tierra como si está aislado de ella, son nulas, presentando las intensidades igual módulo pero con argumentos desfasados 120°. Es uno de los cortocircuitos más violentos y de obligado cálculo. Al ser un sistema equilibrado, para su cálculo sólo será necesario utilizar la red de secuencia directa.</p>
 <p>b)</p>	<p>Cortocircuito bifásicos sin contacto a tierra</p> <p>Generalmente las corrientes iniciales simétricas de cortocircuito son menores que las del fallo trifásico, aunque si el cortocircuito se produce en las inmediaciones de máquinas síncronas o asíncronas de cierta potencia, las corrientes de esta falta pueden llegar a presentar valores incluso mayores que las del cortocircuito trifásico. Al presentarse en dos de las tres fases del sistema, este cortocircuito ya no es equilibrado, obligando su cálculo a la utilización tanto de la red de secuencia directa como a la red de secuencia inversa.</p>
 <p>c)</p>	<p>Cortocircuito bifásico con contacto a tierra</p> <p>Dispone de las mismas características que el cortocircuito bifásico sin contacto a tierra, pero en este caso, con pérdida de energía hacia tierra. Es necesario considerar para este fallo, además de las redes de secuencia directa e inversa, la red de secuencia homopolar debido a la pérdida de energía.</p>
 <p>d)</p>	<p>Cortocircuito monofásico a tierra</p> <p>Este es el cortocircuito más frecuente y violento, produciéndose con mayor frecuencia en redes rígidamente puestas a tierra, o mediante impedancias de bajo valor. Su cálculo es importante, tanto por lo elevado de sus corrientes como por su conexión a tierra, lo que permite calcular las fugas a tierra, las tensiones de contacto o de paso, o valorar las interferencias que estas corrientes puedan provocar. Para su cálculo, al ser desequilibrado y con pérdida de energía, son necesarias las tres redes de secuencia (directa, inversa y homopolar).</p>
 <p>e)</p>	<p>Cortocircuito con doble contacto a tierra</p> <p>En redes con neutro aislado o puesta a tierra con impedancias de gran valor, puede aparecer el doble contacto a tierra. Este cortocircuito presenta valores de corriente inferiores al resto de los cortocircuitos. Si consideramos que es poco frecuente y la complejidad que representa su cálculo, se comprenderá que sea el más escasamente analizado.</p>

8. Parámetros eléctricos a considerar en los cortocircuitos. Conceptos según la norma AEA 90909.

Para el estudio de los cortocircuitos han de considerarse diferentes parámetros y magnitudes como son: **las intensidades, las impedancias, las potencias o los tiempos de retardo en el disparo de los dispositivos de protección.**

La Norma AEA 90909 – Parte 0 aplica las definiciones dadas en IEC 60050 y las que se establecen a continuación.

8.1. Definiciones

- **Cortocircuito:** Contacto, accidental o intencional, entre dos o más partes conductoras, forzando a diferencias de potencial eléctrico entre estas partes a ser iguales o cercanas a cero.
- **Cortocircuito polifásico:** Contacto, accidental o intencional, entre dos a más conductores de fase, con o sin conexión a tierra.
- **Cortocircuito fase a tierra:** Contacto, accidental o intencional, en un sistema de neutro rígido a tierra o un sistema con neutro, puesto a tierra a través de impedancia, entre un conductor de fase y tierra.
- **Corriente de cortocircuito:** Sobrecorriente resultante de un cortocircuito en un sistema eléctrico.
- **Corriente presunta de cortocircuito:** Corriente que circularía si el cortocircuito fuera reemplazado por una conexión ideal de impedancia despreciable sin ningún cambio en la alimentación.
- **Corriente simétrica de cortocircuito:** Valor eficaz de la componente alterna simétrica de una corriente presunta de cortocircuito siendo despreciable, en caso de existir, la componente aperiódica de corriente.
- **Corriente simétrica inicial de cortocircuito I_k'' :** Valor eficaz de la componente alterna simétrica de una corriente presunta de cortocircuito en el instante de aparición del cortocircuito si la impedancia mantiene su valor inicial (figuras 5 y 6)
- **Potencia aparente simétrica inicial de cortocircuito S_k'' :** Valor ficticio definido como el producto de la corriente simétrica inicial de cortocircuito I_k'' , la tensión nominal del sistema U_n y el factor $\sqrt{3}$, resultando: $S_k'' = \sqrt{3} U_n I_k''$.
- **Componente decreciente (aperiódica) de la corriente de cortocircuito ($i_{d.c.}$):** Valor medio entre las envolventes superior e inferior de una corriente de cortocircuito decreciente desde su valor inicial hasta cero, de acuerdo con las figuras 5 y 6.
- **Corriente pico de cortocircuito (i_p):** Posible valor máximo instantáneo de la corriente presunta de cortocircuito (ver figuras 5 y 6).
Nota: la magnitud de la corriente pico de cortocircuito varía de acuerdo con el momento en que ocurre la falla.

- **Corriente simétrica de ruptura de cortocircuito I_b :** Valor eficaz de un ciclo completo de la corriente alterna simétrica de una corriente presunta de cortocircuito, en el instante de la separación del contacto del primer polo en abrir de un dispositivo de maniobra.
- **Corriente permanente de cortocircuito I_k :** Valor eficaz de la corriente de cortocircuito que permanece luego de la extinción del fenómeno transitorio (normalmente el estado permanente aparece a partir de los 5 segundos posteriores al cortocircuito)
- **Corriente simétrica de rotor bloqueado I_{LR} :** Valor eficaz de la máxima corriente simétrica de un motor asíncrono con rotor bloqueado alimentado con la tensión asignada U_{RM} a la frecuencia asignada.

Nota: La corriente de rotor bloqueado es la máxima intensidad que absorbe de la red un motor a sus condiciones nominales de voltaje y frecuencia, cuando el Rotor esta en reposo. Este valor esta normalizado por los fabricantes y se denomina "Letter Code".

- **Tensión nominal del sistema U_n :** Tensión de línea por la cual un sistema es designado, y para el cual están referidas ciertas características operativas.
- **Fuente de tensión equivalente $c U_n / \sqrt{3}$:** Tensión de una fuente ideal aplicada al punto del cortocircuito en el sistema de secuencia directa, para el cálculo de la corriente de cortocircuito de acuerdo con el método de cálculo que se desarrollará más adelante. Esta es la única tensión activa de la red.
- **Factor de tensión c :** Relación entre la tensión equivalente y la tensión nominal del sistema U_n dividido por $\sqrt{3}$. Los valores están dados en la tabla 3.

Tensión nominal U_n	Factor de tensión c para el cálculo de:	
	corrientes máximas de cortocircuito $c_{m\acute{a}x}^{(1)}$	corrientes mínimas de cortocircuito $c_{m\acute{i}n}$
Baja tensión 100 V a 1000 V (IEC 60038, tabla I)	1,05 ⁽³⁾ 1,10 ⁽⁴⁾	0,95
Media tensión > 1 kV a 35 kV (IEC 60038, tabla III)	1,10	1,00
Alta tensión ⁽²⁾ > 35 kV a 380 kV (Norma IEC 60038, tabla IV)		
⁽¹⁾ $c_{m\acute{a}x} U_n$ no debe exceder la máxima tensión U_m para equipamientos de sistemas de potencia. ⁽²⁾ Si no se define una tensión nominal, se debe aplicar $c_{m\acute{a}x} U_n = U_m$ o $c_{m\acute{i}n} U_n = 0,90 U_m$. ⁽³⁾ Para sistemas de baja tensión con una tolerancia de + 6 %, por ejemplo para sistemas renombrados de 380 V a 400 V. ⁽⁴⁾ Para sistemas de baja tensión con una tolerancia de + 10 %.		

Tabla 3.- Factor de tensión c

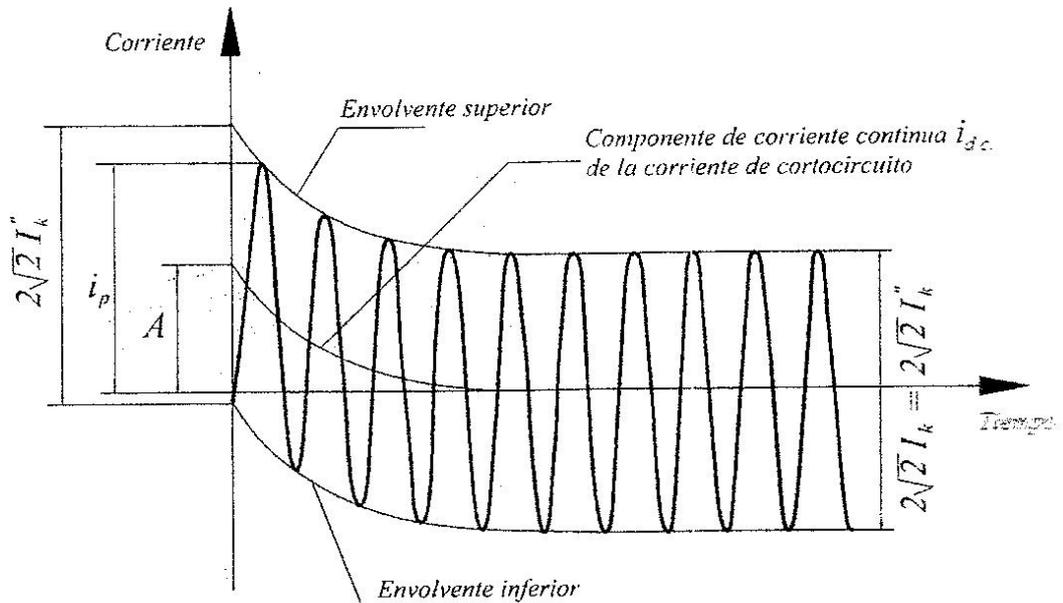
Nota: La introducción de un factor de tensión c es necesaria por varias razones. Estas son:

- ✓ *Variaciones de tensión dependiendo del tiempo y del lugar;*
 - ✓ *Cambio en las tomas del transformador;*
 - ✓ *Cargas y capacidades despreciables según cálculos de acuerdo con el procedimiento descrito más adelante;*
 - ✓ *El comportamiento subtransitorio de generadores y motores.*
- **Tensión subtransitoria E'' de una máquina sincrónica:** Valor eficaz de la tensión simétrica interna de una máquina síncrona activa detrás de la reactancia subtransitoria X_d'' en el momento del cortocircuito.
 - **Cortocircuito alejado del generador:** Cortocircuito durante el cual la magnitud de la componente alterna simétrica de la corriente presunta de cortocircuito permanece prácticamente constante (ver figura 1)
 - **Cortocircuito cercano del generador:** Cortocircuito en el que al menos una máquina sincrónica contribuye a la corriente presunta simétrica inicial de cortocircuito, y es más que dos veces la corriente asignada de la máquina, o un cortocircuito en el cual los motores asíncronos contribuyen en más del 5% de la corriente simétrica inicial de cortocircuito I_k'' sin motores (ver figura 5).
 - **Impedancias de cortocircuito en el punto de falla F**
 - ✓ **Impedancia directa Z_1 :** Impedancia equivalente de la red de secuencia directa vista desde el punto de cortocircuito.
 - ✓ **Impedancia inversa Z_2 :** Impedancia equivalente de la red de secuencia inversa vista desde el punto de cortocircuito.
 - ✓ **Impedancia homopolar Z_0 :** Impedancia equivalente de la red homopolar vista desde el punto de cortocircuito. Esto incluye tres veces la impedancia a tierra de neutro Z_N .
 - ✓ **Impedancia de cortocircuito Z_k :** Expresión abreviada para la impedancia de cortocircuito de secuencia directa $Z_{(1)}$ para el cálculo de las corrientes en un cortocircuito trifásico.
 - ✓ **Reactancia subtransitoria X''_d de una máquina sincrónica:** Reactancia efectiva en el momento del cortocircuito. Para el cálculo de las corrientes de cortocircuito se toma el valor saturado de X''_d .
 - **Tiempo mínimo de retardo t_{min} :** El tiempo más corto entre el inicio de la corriente de cortocircuito y la separación del contacto del primer polo en abrir del dispositivo de maniobra.

9. Características de las corrientes de cortocircuito: método de cálculo.

9.1. General

El cálculo completo de las corrientes de cortocircuito debería suministrar las corrientes en función del tiempo en el punto de defecto, desde la aparición de la falla hasta su extinción, teniendo en cuenta el valor instantáneo de la tensión al inicio del cortocircuito (ver figuras 5 y 6)



- I_k'' = corriente simétrica inicial de cortocircuito
- i_p = corriente pico de cortocircuito
- I_k' = corriente permanente de cortocircuito
- $i_{d.c.}$ = componente continua de la corriente de cortocircuito
- A = valor inicial de la componente de corriente continua $i_{d.c.}$

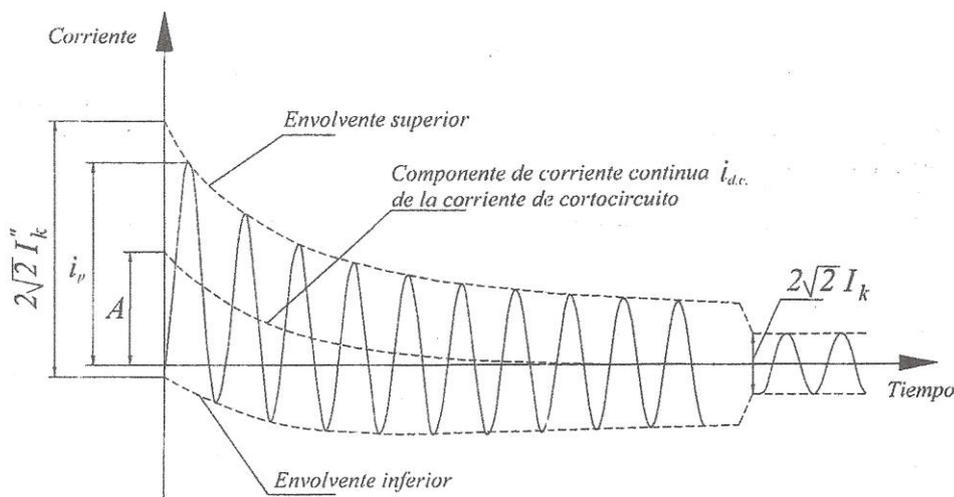
Figura 5.-Corriente relativa a un cortocircuito alejado del generador con componente de corriente alterna constante (diagrama esquemático)

En la mayoría de los casos prácticos, no es necesaria tal determinación.

Dependiendo de la aplicación de los resultados, resulta de interés conocer el valor eficaz de la componente alterna simétrica y el valor pico i_p de la corriente de cortocircuito en el momento de aparición del cortocircuito.

El valor máximo de i_p depende de la constante de tiempo de decrecimiento de la componente aperiódica y la frecuencia f , es decir de la relación R/X o X/R de la impedancia de cortocircuito Z_k , y es alcanzado si el cortocircuito se establece cuando la tensión pasa por cero.

La i_p también depende del decrecimiento de la componente de corriente alterna simétrica de la corriente de cortocircuito.



- I_k'' = corriente simétrica inicial de cortocircuito
- i_p = corriente pico de cortocircuito
- I_k = corriente permanente de cortocircuito
- $i_{d.c.}$ = componente continua de la corriente de cortocircuito
- A = valor inicial de la componente de corriente continua $i_{d.c.}$

Figura 6.- Corriente relativa a un cortocircuito cercano al generador con componente de corriente alterna decreciente (diagrama esquemático)

9.2. Hipótesis de cálculo

El cálculo de las corrientes máximas y mínimas de cortocircuito está basado en las siguientes simplificaciones:

- a) En toda la duración del cortocircuito no hay modificación en el tipo de cortocircuito considerado, es decir un cortocircuito trifásico permanece trifásico y un cortocircuito entre fase y tierra permanece entre fase y tierra durante el tiempo del cortocircuito;
- b) En toda la duración del cortocircuito, no hay cambio en la red considerada;
- c) La impedancia de los transformadores se considera con el conmutador en posición principal. Esto es admisible porque es introducido el factor de corrección de impedancia K_T para transformadores de redes;
- d) Las resistencias del arco eléctrico no se tienen en cuenta;
- e) Todas las capacitancias de línea, admitancias en paralelo y cargas no rotativas, excepto las del sistema homopolar, son despreciables.

9.3. Método de cálculo

9.3.1. Fuente de tensión equivalente en el punto de defecto

El método usado para el cálculo está basado en la introducción de una fuente de tensión equivalente en el punto de defecto. La fuente de tensión equivalente es la única tensión activa del circuito. Todas las redes de alimentación, máquinas sincrónicas y asíncronas se sustituyen por sus impedancias internas.

En todos los casos es posible determinar la corriente de cortocircuito en el punto de falla F con la ayuda de una fuente de tensión equivalente.

No es indispensable obtener datos de explotación sobre las cargas de los consumidores, la posición de los conmutadores de tomas de los transformadores, excitación de los generadores, etc.; los cálculos adicionales acerca de los diferentes flujos de cargas posibles en el momento del cortocircuito son despreciados.

9.3.2. Aplicación de componentes simétricas.

En sistemas trifásicos de corriente alterna el cálculo de los valores de corrientes resultantes de cortocircuitos equilibrados y desequilibrados se simplifica mediante el uso del método de las componentes simétricas.

9.3.3 Corrientes máximas de cortocircuito.

Para el cálculo de las corrientes máximas de cortocircuito, es necesario tener en cuenta las siguientes condiciones:

- ✓ El factor de tensión $c_{m\acute{a}x}$ de acuerdo a la tabla 3 debe ser aplicado para el cálculo de las corrientes máximas de cortocircuito;
- ✓ Elegir la configuración del sistema y la máxima contribución de las centrales eléctricas, lo que conduce al máximo valor de la corriente de cortocircuito en el punto de falla;
- ✓ Los motores, si corresponde, deben ser incluidos.
- ✓ La resistencia R_L de las líneas (aéreas y cables) debe ser introducida a una temperatura de 20 °C.

9.3.4 Corrientes mínimas de cortocircuito.

Para el cálculo de las corrientes mínimas de cortocircuito, es necesario tener en cuenta las siguientes condiciones:

- ✓ El factor de tensión $c_{m\acute{i}n}$ de acuerdo a la tabla 1 debe ser aplicado para el cálculo de las corrientes mínimas de cortocircuito;
- ✓ Elegir la configuración del sistema y la mínima contribución de las centrales eléctricas, lo que conduce al mínimo valor de la corriente de cortocircuito en el punto de falla;
- ✓ Los motores deben ser despreciados
- ✓ La resistencia R_L de las líneas (aéreas y cables) debe ser introducida a una temperatura mayor (según IEC 60885-1)

10. Impedancias directa, inversa y homopolar

La siguiente tabla, muestra de forma aproximada los valores que debemos adoptar al realizar los cálculos de las impedancias de los diversos dispositivos eléctricos. Recordar que las impedancias homopolares deben hallarse de forma experimental si se desean calcular con exactitud.

Dispositivo	Componente directa	Componente inversa	Componente homopolar
Transformador	X_1	$X_2 = X_1$	$X_0 = X_1 \cdot 0,9$
Bobina (L)	X_1	$X_2 = X_1$	$X_0 = X_1$
Condensador (C)	X_1	$X_2 = X_1$	$X_0 = X_1$
Resistencia (R)	X_1	$X_2 = X_1$	$X_0 = X_1$
Línea (L)	X_1	$X_2 = X_1$	$X_0 = 2,5 \cdot X_1$
Máquina Síncrona	X_1	Turbogenerador $X_2 = X_1$ Hidroturbinas $X_2 = 1,2 \cdot X_1$	$X_0 = 0,4 \cdot X_1$ $X_0 = (1/6 \text{ a } 3/4)X_1$ (Sólo con máquinas dinámicas)
Máquina Asíncrona	X_1	$X_2 = X_1$	

Tabla 4.- Valores de las impedancias directa, inversa y homopolar para diversas máquinas y dispositivos eléctricos

11. Impedancias de cortocircuito de los equipos eléctricos

Al contrario de lo que ocurre con las líneas aéreas y los cables, las impedancias o reactancias de los generadores, transformadores y bobinas de **compensación no se expresan en general como valores absolutos en ohmios/fase, sino en forma de valores relativos (por unidad).**

Los datos expresados en ohmios/fase corresponden a los valores por fase de las impedancias en estrella o de las impedancias en triángulo adecuadamente transformadas en impedancias en estrella, dándose como la relación entre la tensión nominal y la corriente o la potencia nominales.

$$Z_k = z_N (pu) \frac{U_N}{\sqrt{3} I_N} = z_N (pu) \frac{U_N^2}{S_N}$$

Donde:

Z_k = Impedancia absoluta de cortocircuito (en ohm/fase)

z_N = Módulo de la impedancia de cortocircuito referida a la tensión nominal y a la corriente o potencia nominales (en pu)

U_N = Tensión nominal (en kV)

I_N = Corriente nominal (en A)

S_N = Potencia aparente nominal (en MVA)

Las impedancias de los generadores (G) y los transformadores de redes (T) deben multiplicarse por los factores de corrección de impedancias K_G y K_T para el cálculo de las corrientes de cortocircuito con la fuente de tensión equivalente en el punto de falla, de acuerdo a lo establecido en la norma AEA 90909.

11.1 Redes de alimentación (Acometidas)

Si un cortocircuito trifásico de acuerdo con la figura 7a) está alimentado desde una red en la cual solo se conoce la corriente simétrica inicial de cortocircuito I''_k en el punto de conexión de la alimentación Q, entonces la impedancia equivalente Z_Q de la red (impedancia de cortocircuito de secuencia directa) en el punto de conexión de la alimentación Q puede ser determinada:

$$Z_Q = R_Q + j X_Q \qquad Z_Q = c \frac{U_{nQ}}{\sqrt{3} I''_{kQ}} = c \frac{U_{nQ}^2}{S''_{kQ}}$$

Donde:

U_{nQ} = Tensión nominal de la red en el punto de acometida Q

S_{kQ} = Potencia de cortocircuito para la corriente inicial simétrica en el punto de acometida Q (en MVA)

I''_{kQ} = Intensidad inicial simétrica de cortocircuito en el punto de acometida Q (en A)

Si no se conocen otros valores, puede tomarse para la resistencia efectiva $R_Q = 0.1 X_Q$ con $X_Q = 0.995 Z_Q$

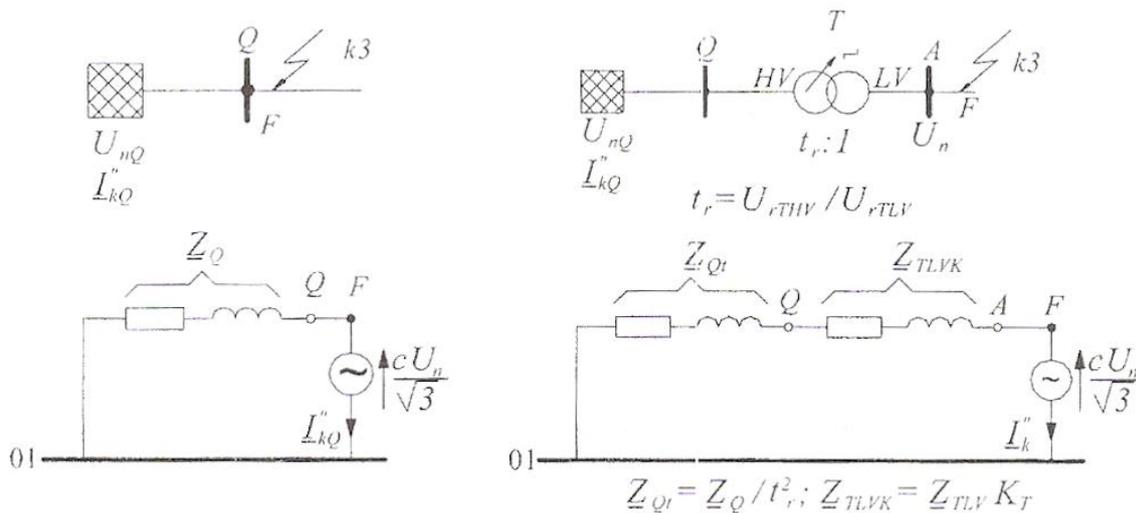


Figura 7 a) – sin transformador | **Figura 7b) – con transformador**

Figura 7.- Diagrama del sistema y circuito equivalente de la red de alimentación

Si un cortocircuito de acuerdo con la figura 7b) está alimentado mediante un transformador desde una red de media o alta tensión en la cual se conoce la corriente simétrica inicial de cortocircuito I''_Q en el punto de conexión de la alimentación Q, entonces la impedancia de cortocircuito de secuencia directa equivalente Z_{Qt} referida al lado de baja tensión del transformador se determina mediante:

$$Z_{Qt} = c \frac{U_{nQ}}{\sqrt{3} I''_{kQ}} \frac{1}{t_r^2}$$

Donde:

U_{nQ} = Tensión nominal de la red en el punto de acometida Q

I''_{kQ} = corriente inicial simétrica de cortocircuito en el punto de acometida Q (en A)

c = es el factor de tensión (ver tabla 3) para la tensión U_{nQ} ;

t_r^2 = es la relación de transformación asignada con el conmutador bajo carga en posición principal. Las corrientes simétricas iniciales de cortocircuito del lado de alta tensión del transformador deben ser dadas por la compañía distribuidora.

11.2 Transformadores

Los esquemas equivalentes correspondientes a los sistemas directo, inverso y homopolar de los transformadores, dependen del número y conexión de los bobinados que los forman. El módulo de la impedancia inversa suele coincidir con el módulo de la impedancia directa.

La impedancia directa de un transformador trifásico coincide con su impedancia de cortocircuito.

Ésta puede **medirse o calcularse** a partir de la **tensión de cortocircuito** y de la impedancia nominal, refiriéndose tanto al lado de alta tensión, como al de baja, o bien expresada en por unidad.

11.2.1 Transformadores con dos bobinados

Se cumple, en este caso que: $Z_T = R_T + jX_T$

La **impedancia directa** viene determinada esencialmente por el flujo de dispersión entre los bobinados primario y secundario.

La impedancia total “ Z_T ” se calcula a partir de la tensión de cortocircuito “ u_{kN} ” del transformador:

$$Z_T = u_{kN} \frac{U_{NT}^2}{100\% S_{NT}} = \sqrt{R_T^2 + X_T^2}$$

Siendo la resistencia óhmica:

$$R_T = u_{RN} \frac{U_{NT}^2}{100\% S_{NT}} = \frac{P_{CuN}}{3 I_{NT}^2}$$

Y la reactancia inductiva:

$$X_T = u_{XN} \frac{U_{NT}^2}{100\% S_{NT}} = \frac{U_{NT}^2}{S_{NT}} \sqrt{u_{kN}^2 - u_{RN}^2}$$

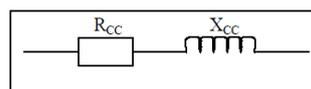
Donde:

- U_{NT} Tensión nominal del transformador (tensión de línea en kV)
- S_{NT} Potencia nominal aparente del transformador (en MVA)
- u_{kN} Tensión de cortocircuito para la corriente nominal (en %)
- u_{XN} Tensión reactiva de cortocircuito para la corriente nominal (en %)
- P_{CuN} Pérdidas en el cobre para la potencia nominal (en MW)
- I_{NT} Intensidad nominal del transformador (en A)

En los cálculos en los que el transformador no se analiza internamente, sino que constituye un componente más dentro de un sistema de potencia, podemos sustituir su circuito equivalente por una resistencia y una reactancia colocadas en serie, como muestra la figura. Si realizamos aún otra simplificación, despreciamos el valor de la resistencia frente al valor de la reactancia del transformador (normalmente el valor de la resistencia es varias veces menor al valor de la reactancia), el circuito equivalente queda simplificado y formado solamente por una reactancia.

11.2.2 Transformador de tres arrollamientos

Para transformadores de tres arrollamientos, las impedancias de cortocircuito de secuencia directa Z_A , Z_B y Z_C correspondientes a la figura 8, pueden calcularse a partir de las tres impedancias de cortocircuito (referidas al lado A del transformador):



$$Z_{AB} = \left(\frac{u_{RrAB}}{100\%} + j \frac{u_{XrAB}}{100\%} \right) \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAB}} \quad (\text{lado C abierto}) \quad Z_{AC} = \left(\frac{u_{RrAC}}{100\%} + j \frac{u_{XrAC}}{100\%} \right) \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAC}} \quad (\text{lado B abierto})$$

$$Z_{BC} = \left(\frac{u_{RrBC}}{100\%} + j \frac{u_{XrBC}}{100\%} \right) \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTBC}} \quad (\text{lado A abierto}) \quad u_{Xr} = \sqrt{u_{kr}^2 - u_{Rr}^2}$$

Mediante las ecuaciones:

$$Z_A = \frac{1}{2} (Z_{AB} + Z_{AC} - Z_{BC}) \quad Z_B = \frac{1}{2} (Z_{BC} + Z_{AB} - Z_{AC}) \quad Z_C = \frac{1}{2} (Z_{AC} + Z_{BC} - Z_{AB})$$

Donde:

- U_{rTA} es la tensión asignada al lado A
- S_{rTAB} es la potencia aparente asignada entre los terminales A y B
- S_{rTAC} es la potencia aparente asignada entre los terminales A y C
- S_{rTBC} es la potencia aparente asignada entre los terminales B y C
- u_{RrAB}, u_{XrAB} son las componentes resistiva y reactiva asignadas de la tensión de cortocircuito, dadas en porcentaje entre los terminales A y B
- u_{RrAC}, u_{XrAC} son las componentes resistiva y reactiva asignadas de la tensión de cortocircuito, dadas en porcentaje entre los terminales A y C
- u_{RrBC}, u_{XrBC} son las componentes resistiva y reactiva asignadas de la tensión de cortocircuito, dadas en porcentaje entre los terminales B y C

Las impedancias homopolares de los transformadores de tres arrollamientos se pueden obtener del fabricante.

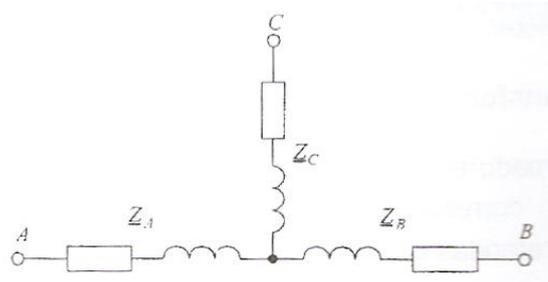
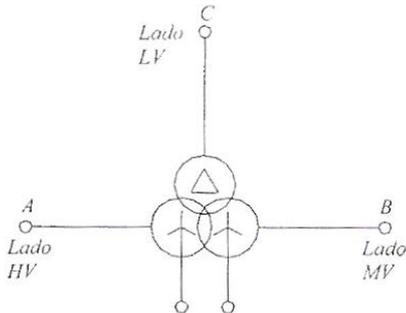


Figura 8a) – Designación de las conexiones de los arrollamientos

Figura 8b) – Diagrama de circuito equivalente (sistema de secuencia directa)

Figura 8.- Transformadores de tres arrollamientos (ejemplo)

11.2.3 Factores de corrección de impedancia para transformadores de redes de dos y tres arrollamientos

Un transformador de red es un transformador conectado a dos o más redes de tensiones diferentes. Para transformadores de dos arrollamientos con o sin conmutador bajo carga, se introduce un factor de corrección de impedancia K_T en adición a la impedancia evaluada de acuerdo a las ecuaciones vistas anteriormente.

$$Z_{TK} = K_T Z_T \quad \text{donde} \quad Z_T = R_T + j X_T \quad K_T = 0,95 \frac{c_{max}}{1 + 0,6 x_T}$$

Donde x_T es la reactancia del transformador: $x_T = X_T / (U_{rT}^2 / S_{rT})$ y $C_{m\acute{a}x}$ de la tabla 3 corresponde a la tensión nominal del sistema en el extremo del lado de baja tensión del transformador de red.

Para el cálculo de corrientes de cortocircuito desequilibradas, también puede ser aplicado este factor a las impedancias de secuencia inversa y homopolar del transformador.

Las impedancias de neutro deben ser introducidas por triplicado y sin factor de corrección.

11.3 Líneas aéreas

Para los sistemas directo e inverso correspondientes a una línea aérea se cumple: $Z_1 = Z_2 = Z_L = R_L + j X_L$

El sistema homopolar es semejante difiriendo únicamente en la capacidad respecto a tierra.

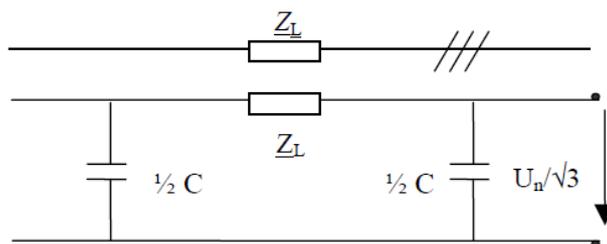


Figura 9.-Símbolo eléctrico y circuito monofásico equivalente de una línea aérea trifásica

El circuito monofásico equivalente para una línea aérea puede ser representado como indica la figura anterior (figura 9 – Circuito Equivalente “ π ”), o bien mediante el circuito equivalente en (T). En este último caso, es la impedancia longitudinal la que se divide en dos mitades, quedando la impedancia transversal agrupada formando una unidad.

11.4 Cables

No es posible dar para los cables fórmulas que permitan calcular con una precisión suficiente la resistencia óhmica y la reactancia inductiva. Los valores de la impedancia deberán ser indicados por el fabricante o determinados efectuando medidas. Esto rige sobre todo para las impedancias homopolares.

11.5 Reactores limitadores de la corriente de cortocircuito

Las impedancias de las redes directa, inversa y homopolar de una bobina limitadora de la corriente de cortocircuito son iguales y su valor coincide con el de la impedancia longitudinal o directa ($Z_1=Z_2=Z_0=Z_D$). Como ($R_D = 0,03 \cdot X_D$), puede despreciarse (R_D) frente a (X_D)

Por tanto se cumple:

$$Z_D \cong X_D = \frac{u_{ND} U_{ND}}{100\% \sqrt{3} I_{ND}} = \frac{u_{NQ} U_{ND}^2}{100\% Q_{NQ}}$$

Donde:

u_{ND} = Caída de tensión para la corriente nominal (en %)

U_{ND} = Tensión nominal (en kV)

I_{ND} = Corriente nominal (en A)

Q_{ND} = Potencia reactiva nominal (en MVAR)

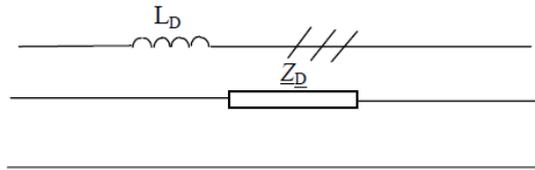


Figura 10.- Símbolo eléctrico y circuito monofásico equivalente de una bobina limitadora

11.6 Capacitores en serie

Las impedancias de las redes directa, inversa y homopolar de un condensador en serie coinciden con el valor de su impedancia longitudinal o directa ($Z_1=Z_2=Z_0=Z_D$)

Como las pérdidas óhmicas representan del 0.2% al 0.45% de la potencia del condensador, puede despreciarse " R_C " frente a " X_C ", cumpliéndose:

$$Z_C \equiv X_C = Q_{NC} / 3 I_{NC}^2$$

Donde:

Q_{NC} = Potencia reactiva nominal (potencia trifásica en MVAR)

I_{NC} = Corriente nominal (en A)

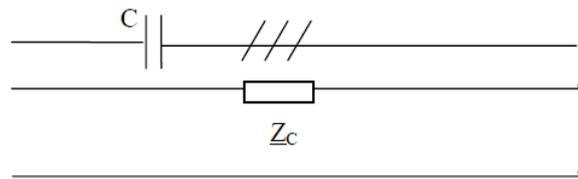


Figura 11.- Símbolo eléctrico y circuito monofásico equivalente de un condensador

11.7 Máquinas síncronas

Para el cálculo de corrientes simétricas iniciales de cortocircuito en sistemas alimentados directamente de generadores sin unidades transformadoras, por ejemplo, en redes industriales o de baja tensión, deberá utilizarse la siguiente impedancia en el sistema de secuencia directa (ver figura 12).

Figura 12.- Diagrama fasorial de un generador sincrónico en condiciones asignadas

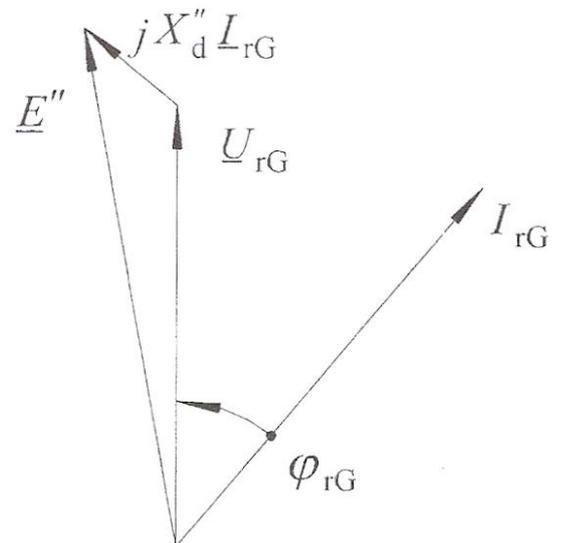
$$Z_{GK} = K_G Z_G = K_G (R_G + j X''_d)$$

Con el factor de corrección:

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \frac{c_{max}}{1 + x''_d \text{sen } \varphi_{rG}}$$

Donde:

$C_{m\acute{a}x}$	es el factor de tensión de acuerdo a la tabla 3
U_n	es la tensión nominal del sistema
U_{rG}	es la tensión asignada del generador
Z_{GK}	es la impedancia subtransitoria corregida del generador



Z_G es la impedancia subtransitoria del generador en el sistema de secuencia directa: $Z_G = R_G + j X''_d$

φ_{rG} es el ángulo de fase entre I_{rG} y $U_{rG}/\sqrt{3}$

X''_d es la reactancia subtransitoria relativa del generador relativa a la impedancia

asignada: $x_d = \frac{X''_d}{Z_{rG}}$ donde $Z_{rG} = \frac{U^2_{rG}}{S_{rG}}$

Debe ser introducido el factor de corrección K_G para el cálculo de la impedancia subtransitoria corregida Z_{GK} , debido a que la fuente de tensión equivalente se utiliza en lugar de la tensión subtransitoria E'' detrás de la reactancia subtransitoria del generador sincrónico.

Normalmente, el valor de la reactancia inicial porcentual x''_d nos puede orientar sobre el tipo de máquina eléctrica que estamos calculando. Esta información es especialmente importante a la hora de calcular las impedancias de secuencia inversa, cumpliéndose en general:

$x''_d > 18\%$ Máquinas con rotor de polos salientes: $X_2 = 1,2 X_1$

$x''_d < 18\%$ Máquinas con rotor liso: $X_2 = X_1$

Para la resistencia de los bobinados del generador " R_G " pueden tomarse con suficiente precisión los siguientes valores:

$R_G = 0.05 X''_d$ para generadores con $U_{rG} > 1kV$ y $S_{rG} \geq 100MVA$

$R_G = 0.07 X''_d$ para generadores con $U_{rG} > 1kV$ y $S_{rG} < 100MVA$

$R_G = 0.15 X''_d$ para generadores con $U_{rG} \leq 1000V$

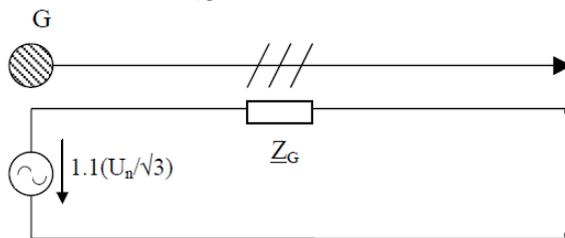


Figura 13.- Símbolo eléctrico y circuito monofásico equivalente de una máquina síncrona

Los generadores acoplados en paralelo con distinta potencia pero igual reactancia inicial pueden sustituirse por un generador equivalente, cuya potencia será la suma de las potencias de cada uno de los generadores.

Los motores y los compensadores síncronos (motores síncronos trabajando en vacío) pueden tratarse como generadores síncronos para el cálculo de las corrientes de cortocircuito.

11.8 Motores asíncronos

Los motores de media y baja tensión contribuyen a la corriente simétrica inicial de cortocircuito I''_k , a la corriente pico de cortocircuito i_p , a la corriente simétrica de ruptura I_b y, en el caso de cortocircuitos desequilibrados, también a la corriente permanente de cortocircuito I_k .

Los motores de media tensión deben ser considerados para el cálculo de la corriente máxima de cortocircuito. Los motores de baja tensión deben ser tomados en cuenta en servicios auxiliares de grupos de generación, en instalaciones industriales y similares, por ejemplo en redes de industrias químicas y siderúrgicas y estaciones de bombeo.

La contribución de los motores asíncronos en sistemas de suministro de energía de baja tensión a la corriente de cortocircuito I''_k puede ser despreciada, si su aporte no es mayor al 5% de la corriente inicial de cortocircuito calculada sin motores.

Se cumple entonces: $I''_{kM} \leq 0,05 I''_{kM \text{ sin motores}}$

Por otra parte se puede estimar que: $I''_{kM} \cong I_{LR} \cong 5 \sum I_{rM}$

$$\sum I_{rM} \leq 0,01 I''_{kM \text{ sin motores}}$$

Donde:

$\sum I_{rM}$ es la suma de las corrientes asignadas de los motores conectados directamente (sin transformadores) a la red donde ocurre el cortocircuito;

$I''_{kM \text{ sin motores}}$ es la corriente simétrica inicial de cortocircuito sin la influencia de los motores

La impedancia $Z_M = R_M + j X_M$ de los motores asíncronos en los sistemas de secuencia directa e inversa, a aplicar en el cálculo de I''_k , puede ser determinada mediante:

$$Z_M = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \frac{U_{rM}}{\sqrt{3} I_{rM}} = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}}$$

Donde:

U_{rM} es la tensión asignada del motor

I_{rM} es la corriente asignada del motor

S_{rM} es la potencia aparente asignada del motor ($S_{rM} = \frac{P_{rM}}{\eta_{rM} \cos \varphi_{rM}}$)

I_{LR}/I_{rM} es la relación entre la corriente a rotor bloqueado y la corriente asignada al motor

Para la resistencia de los bobinados del motor " R_M " pueden tomarse con suficiente precisión: $R_M/X_M = 0,10$ con $X_M = 0,995 Z_M$, para motores de media tensión y con la relación potencia/par de polos ≥ 1 MW;

$R_M/X_M = 0,15$ con $X_M = 0,989 Z_M$, para motores de media tensión y con la relación potencia/par de polos < 1 MW;

$R_M/X_M = 0,42$ con $X_M = 0,922 Z_M$, para grupos de motores de baja tensión alimentados por cables ($U < 1$ kV).

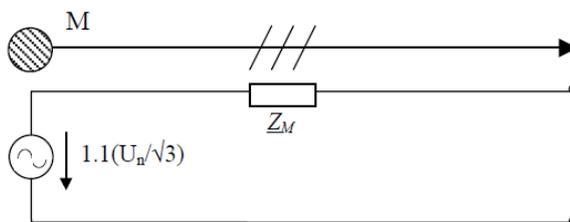


Figura 14.- Símbolo eléctrico y circuito monofásico equivalente de una máquina asíncrona

11.8.1 Contribución de los motores asincrónicos a las corrientes de cortocircuito

Los motores de media y baja tensión, conectados mediante transformadores de dos arrollamientos a la red en la cual ocurre la falla, pueden ser despreciados en el cálculo de las corrientes de cortocircuito para un defecto en el punto de conexión de la alimentación Q (ver figura 15), si:

$$\frac{\sum P_{rM}}{\sum S_{rT}} \leq \frac{0,8}{\frac{c \cdot 100 \sum S_{rT}}{\sqrt{3} U_{nQ} I''_{kQ}} - 0,3}$$

Donde:

$\sum P_{rM}$ es la suma de las potencias activas asignadas a los motores de media y baja tensión a ser considerados;

$\sum S_{rT}$ es la suma de las potencias aparentes asignadas de todos los transformadores, a través de los cuales los motores son alimentados directamente;

I''_k es la corriente simétrica inicial de cortocircuito en el punto de conexión de la alimentación Q sin considerar el aporte de los motores;

U_{nQ} es la tensión nominal del sistema en el punto de conexión de la alimentación Q.

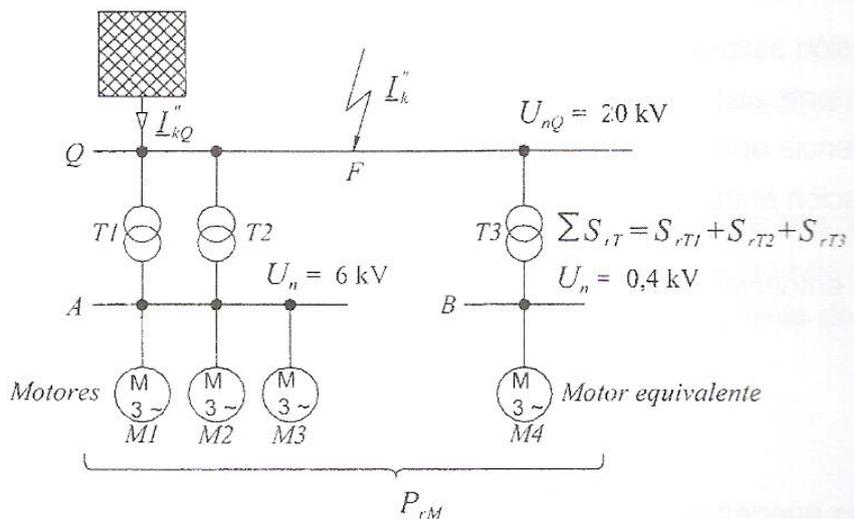


Figura 15.- Ejemplo para estimar el aporte de los motores asincrónicos en relación a la corriente total de cortocircuito

Los motores de baja tensión están generalmente conectados al juego de barras mediante cables con diferentes longitudes y secciones. Con el fin de simplificar los cálculos los grupos de motores, incluyendo sus cables de conexión, pueden combinarse en un motor único equivalente (ver motor M₄ en la figura 15).

Para estos motores asincrónicos equivalentes, incluyendo sus cables de conexión, se podrá tomar:

Z_M es la impedancia de acuerdo a la ecuación del punto 11.8

I_{rM} es la suma de las corrientes asignadas de todos los motores en un grupo de motores (motor equivalente)

I_{LR}/I_{rM} es la igual a 5

R_M/X_M es igual a 0,42, corresponde a $\chi_M = 1,3$

P_{rM}/p es igual a 0,05 MW a falta de un valor conocido, donde p es el número de pares de polos.

Para un cortocircuito en el juego de barras B en la figura 15, puede ser despreciada la corriente parcial de cortocircuito del grupo de motores de baja tensión M_4 , si permanece la condición $I_{rM4} \leq 0,01 I''_{kT3}$.

Donde: I_{rM4} es la corriente asignada del motor equivalente M_4 y I_{kT3} es la corriente simétrica inicial de cortocircuito del lado de baja tensión del transformador T_3 durante la falla en B sin contribución del motor equivalente M_4 .

En el caso de un cortocircuito en el lado de media tensión (por ejemplo, punto de defecto Q o A en la figura 15), es posible simplificar el cálculo de Z_M de acuerdo a la ecuación del punto 11.8 con, por ejemplo, la corriente asignada I_{rM4} del motor equivalente M_4 .

La estimación de acuerdo a la ecuación citada anteriormente no está permitida en el caso de transformadores de tres arrollamientos.

12. **Calculo de las corrientes de cortocircuito**

12.1 **General**

En el **caso de un cortocircuito alejado del generador**, la corriente de falla puede ser considerada como la suma de las siguientes dos componentes:

- La componente alterna con amplitud constante durante todo el cortocircuito,
- La componente aperiódica de valor inicial A y decreciendo hasta cero.

La figura 5 representa esquemáticamente el curso general de la corriente de cortocircuito en el caso de una falla alejada del generador.

Las corrientes I''_k , I_b e I_k están expresadas en valores eficaces y son prácticamente iguales en magnitud.

Los cortocircuitos con alimentación única a través de un transformador pueden ser considerados como cortocircuitos alejados del generador si se cumple que la reactancia del transformador es mayor que el doble de la reactancia de la acometida Q.

En el **caso de un cortocircuito cercano al generador**, la corriente de falla puede ser considerada como la suma de las siguientes dos componentes:

- La componente alterna con amplitud decreciente durante el cortocircuito,
- La componente aperiódica de valor inicial A y decreciendo hasta cero.

La figura 6 representa esquemáticamente el curso general de la corriente de cortocircuito en el caso de una falla cercana al generador.

En el cálculo de las corrientes de cortocircuito en sistemas alimentados mediante generadores, subestaciones transformadoras y motores (fallas cercanas al generador y/o cercanas al motor) es de interés no solo conocer **la corriente simétrica inicial de cortocircuito I''_k y la corriente pico de cortocircuito i_p** , sino también **la corriente de ruptura de cortocircuito I_b y la corriente permanente de cortocircuito I_k** .

En este caso, la corriente simétrica de ruptura de cortocircuito I_b es menor que la I''_k . Normalmente la corriente de cortocircuito I_k es menor que la corriente simétrica de ruptura de cortocircuito I_b .

Para el cálculo de la corriente simétrica inicial de cortocircuito I''_k , la corriente de ruptura de cortocircuito I_b y la corriente permanente de cortocircuito I_k en el punto de falla, el sistema puede ser convertido por medio de transformaciones en una impedancia de cortocircuito equivalente Z_k en el punto de defecto.

Este procedimiento no es aplicable al cálculo de la corriente pico de cortocircuito i_p .

12.2 Corriente simétrica inicial de cortocircuito I''_k

Para el caso habitual cuando la Z_0 es mayor que $Z_1 = Z_2$, la corriente inicial de cortocircuito más elevada estará dada por el defecto trifásico.

Sin embargo, para cortocircuitos cercanos a transformadores con baja impedancia homopolar, Z_0 puede ser menor que Z_1 . En este caso, la corriente inicial de cortocircuito más elevada I''_{kE2E} (cortocircuito bifásico con contacto a tierra) ocurrirá para un cortocircuito entre fases con conexión a tierra.

12.3 Cortocircuitos trifásicos

En general, la corriente simétrica inicial de cortocircuito I''_k debería ser calculada usando la ecuación:

$$I''_k = \frac{c U_n}{\sqrt{3} Z_k} = \frac{c U_n}{\sqrt{3} \sqrt{R_k^2 + X_k^2}}$$

La fuente de tensión equivalente $c U_n / \sqrt{3}$ debe ser introducida en el punto de falla, con el factor c de acuerdo a la tabla.

12.3.1 Cortocircuitos alimentados desde redes no malladas

Cuando hay más de una fuente contribuyendo a la corriente de cortocircuito, y las fuentes no están interconectadas como se muestra en la figura 16, la corriente simétrica inicial de cortocircuito I''_k en el punto de falla es la suma de las corrientes de cortocircuito de cada rama.

La corriente de defecto en cada rama puede ser calculada en forma individual como una corriente trifásica de cortocircuito de alimentación única.

La corriente inicial de cortocircuito en el punto de falla F es la suma fasorial de cada una de las corrientes parciales de cortocircuito (ver figura 16)

$$I''_k = \sum I''_{ki}$$

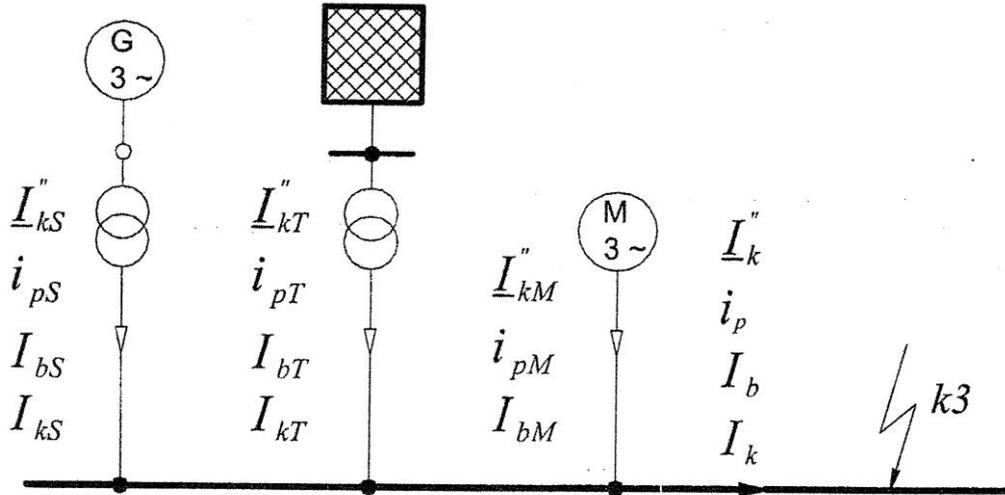


Figura 16.- Ejemplo de una red no mallada

12.4 Cálculo de las corrientes de cortocircuito i_p , I_b e I_k

Las corrientes de cortocircuito i_p , I_b e I_k se calculan a partir de la corriente inicial simétrica de cortocircuito I_k'' y de los factores indicados en la norma AEA 90909.

En el caso de que el punto de cortocircuito esté alimentado directamente por las distintas fuentes de corriente de cortocircuito, se cumple para i_p , I_b e I_k las siguientes relaciones.

12.4.1 Corriente pico de cortocircuito [i_p]

Esta es la máxima corriente que aparece en el punto de cortocircuito. Su cálculo es fundamental para la determinación del poder de cierre de los dispositivos de protección.

La expresión para determinarla resulta: $i_p = \kappa \sqrt{2} I_k''$

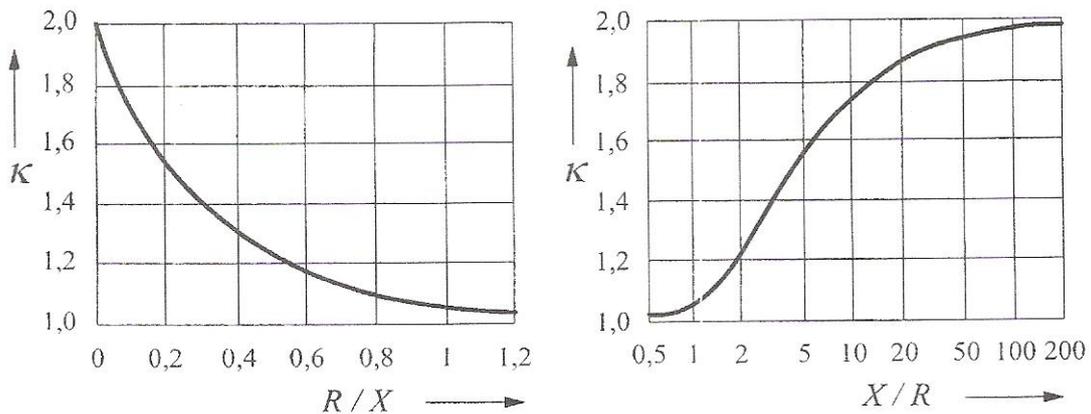


Figura 17.- Factor κ para circuitos serie como una función de la relación R/X o X/R

El factor (κ) depende de la relación (R_k/X_k) correspondiente a los distintos aparatos o componentes implicados en el cortocircuito y tiene en cuenta el amortiguamiento temporal de la componente aperiódica, así como el de la componente simétrica en el caso de cortocircuitos próximos al generador.

En figura puede verse la representación del factor (κ) en función de la relación R/X , o bien calculado mediante la siguiente expresión: $\kappa = 1,02 + 0,98 e^{-3R/X}$.

La corriente pico de cortocircuito i_p en el punto de falla F, alimentada desde fuentes independientes las unas de las otras, de acuerdo con la figura 16, es la suma de las corrientes parciales de cortocircuito.

Para el cálculo de la corriente pico de cortocircuito i_p en redes malladas, la ecuación indicada anteriormente debe ser utilizada con κ determinada conforme con alguno de los siguientes métodos:

- Relación uniforme R/X: para este método el factor κ es determinado de la figura 17 tomando la menor relación R/X de todas las ramas de la red. Solo es necesario elegir las ramas que lleven corrientes parciales de cortocircuito a la tensión nominal correspondiente al punto de falla y ramas con transformadores adyacentes al punto de defecto.
- Relación R/X en el punto de defecto: Para este método el factor κ es multiplicado por un factor 1,15 para cubrir imprecisiones causadas por usar la relación R/X de una red reducida con impedancias complejas. En tanto R/X permanezca inferior a 0,30 en todas las ramas, no es necesario usar el factor 1,15. Tampoco que el producto 1,15 κ sea superior a 1,8 en redes de baja tensión o a 2,0 en redes de media y alta tensión.
- Frecuencia equivalente: una impedancia equivalente Z_c del sistema tal como se ve desde el punto de defecto es calculada considerando una frecuencia $f_c = 20$ Hz (para una frecuencia nominal de 50 Hz) o $f_c = 24$ Hz (para una frecuencia nominal de 60 Hz). Las relaciones R/X o X/R son determinadas de acuerdo a la ecuación:

$$\frac{R}{X} = \frac{R_c}{X_c} \cdot \frac{f_c}{f}$$

12.4.2 Corriente simétrica de ruptura de cortocircuito [I_b]

Es la corriente que existe en los bornes de los dispositivos de corte y protección en el momento de abrir sus contactos. Su cálculo reviste gran interés, ya que de la magnitud de esta intensidad saldrá el valor del poder de corte que deberá disponer el dispositivo de protección.

La expresión para su determinación resulta: $I_b = \mu q I''_k$

No todas las máquinas eléctricas dispondrán de los dos factores (μ y q). En máquinas asíncronas sí deberemos considerar los dos factores, pero en las máquinas síncronas sólo se considerará el factor (μ) ya que el factor (q), en todos los casos, tomara el valor de la unidad ($q=1$)

El factor (μ) depende de la relación ($I''_k / I_{nominal}$) de las distintas fuentes de corriente de cortocircuito y del retardo mínimo de desconexión (t_v). Su valor se obtiene a partir de la gráfica siguiente.

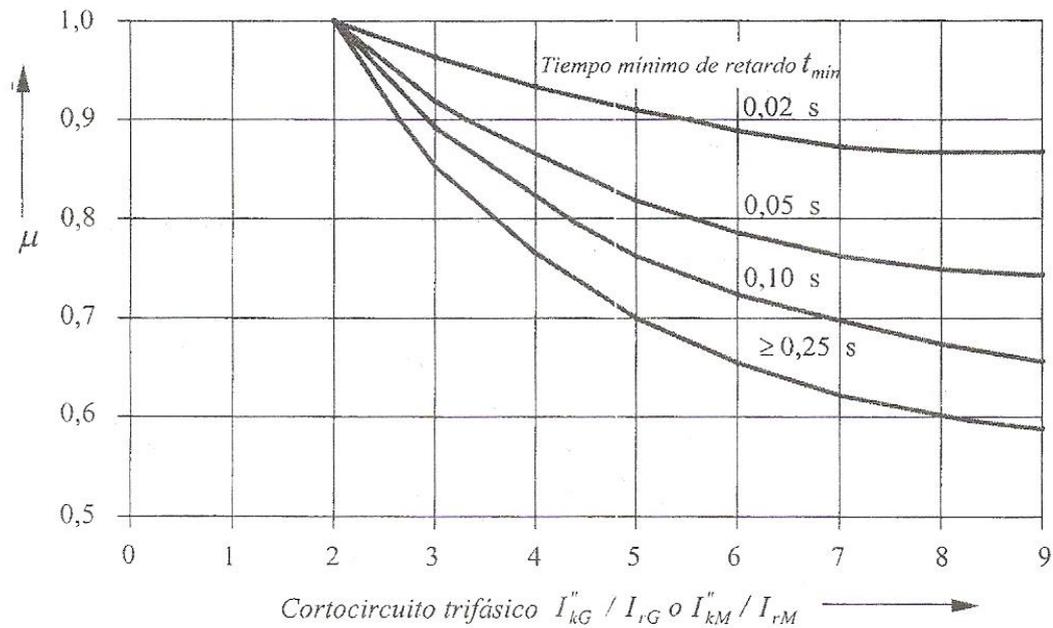


Figura 18 .- Factor μ para calcular la corriente simétrica de ruptura (I_b)

El factor (q) depende de la relación entre la potencia del motor (en MW) y su número de pares de polos.

Con este valor y con el retardo mínimo de desconexión (t_v) se entra al gráfico siguiente y se obtiene el valor final del coeficiente (q).

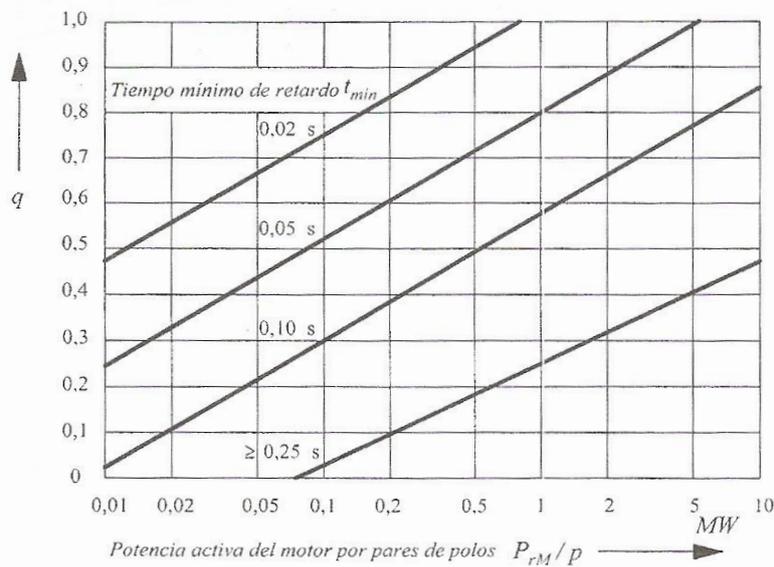


Figura 19.- Factor q para calcular la corriente simétrica de ruptura de cortocircuito de motores asíncronos

12.4.3 Corriente permanente de cortocircuito [I_k]

La corriente permanente de cortocircuito es la corriente que permanecerá en la red después de producirse la falta. Normalmente, el circuito pasa a régimen permanente transcurrido unos 10 s después del cortocircuito.

Esta corriente es menor que las corrientes subtransitoria y transitoria en la mayor parte de los cortocircuitos. Si las fuentes generadoras de energía se hallan situadas lejos del punto de falta, las intensidades subtransitoria, transitoria y permanente coinciden en su valor. La expresión para su determinación resulta: $I_k = \lambda I_N$

El factor (λ) depende de la relación entre (I_k''/ I_N), de las condiciones de excitación (con regímenes saturados o poco saturados) y del tipo de máquina síncrona afectada por la falta (generadores con rotor de polos salientes, o turbogeneradores). Para el cálculo del factor (λ) se utilizarán las siguientes gráficas.

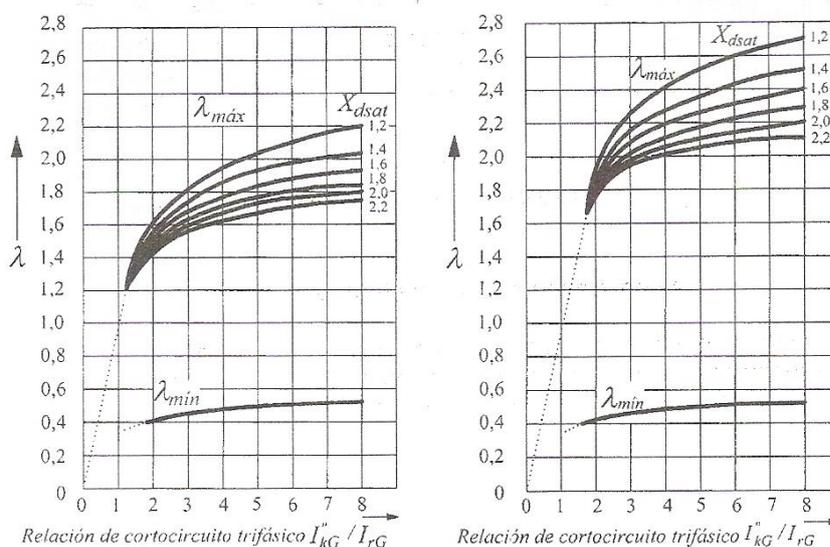


Figura 20.- Factores λ_{\min} y λ_{\max} para turboalternadores

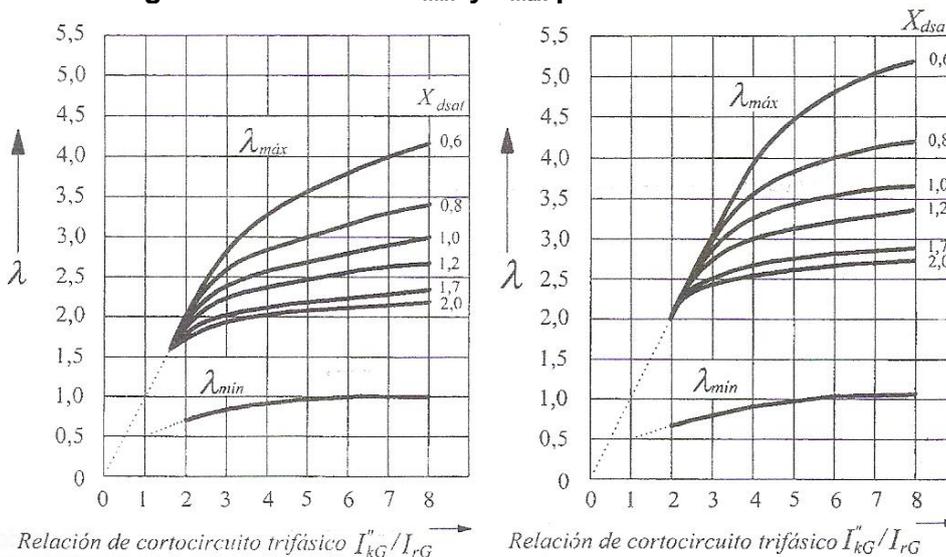


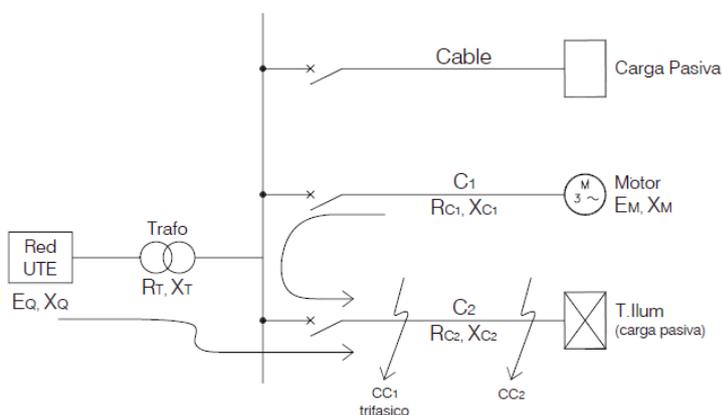
Figura 21.- Factores λ_{\min} y λ_{\max} para generadores de polos salientes

13. Ejemplos de cálculo de las corrientes de cortocircuito

13.1. Cálculo de las corrientes de cortocircuito trifásico I''_{k3} en redes de BT

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

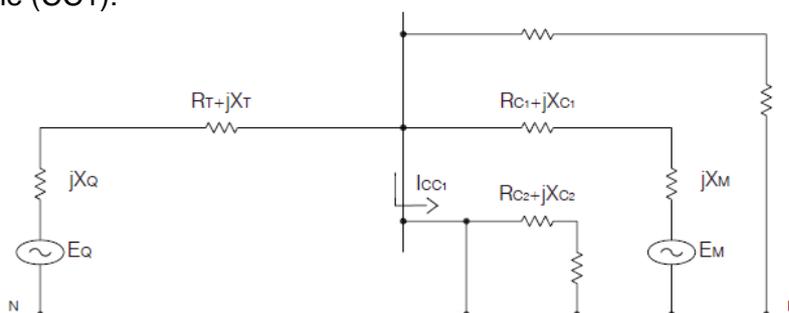
a) Para comenzar el estudio se realiza el diagrama unifilar de la instalación, indicando todos los elementos y sus características:



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.
- El cortocircuito trifásico equilibrado lo representamos en el circuito con una conexión ideal de impedancia nula entre el punto de cortocircuito y el neutro.

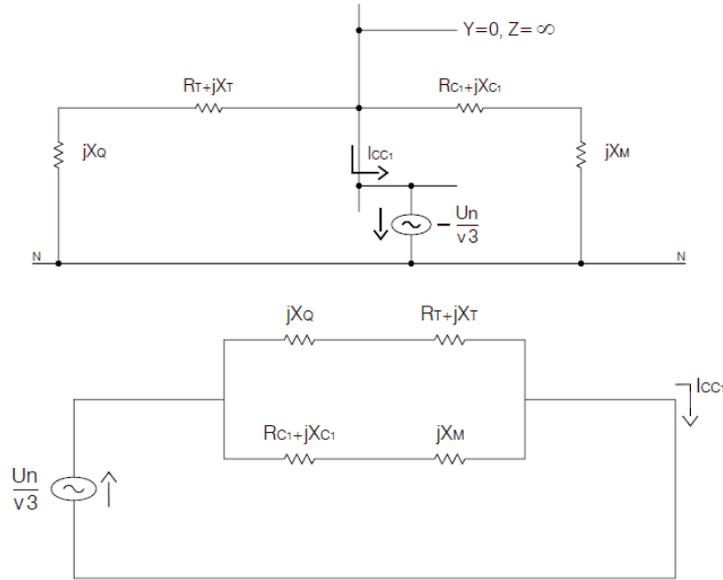
En la figura siguiente representamos el circuito equivalente correspondiente al cortocircuito al inicio del cable (CC1):



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

- ✓ Despreciamos las corrientes previas al cortocircuito.
- ✓ Consideramos la tensión vista en el punto de cortocircuito, previo al mismo, igual a la tensión nominal de la instalación $U_n / \sqrt{3}$.

- ✓ Consideramos las $Y = 0$ o las $Z = \infty$ de las ramas en paralelo que alimentan cargas pasivas.

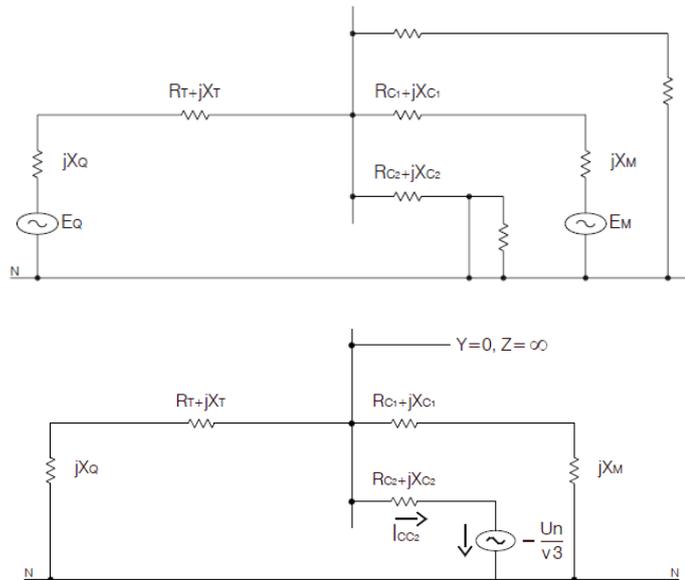


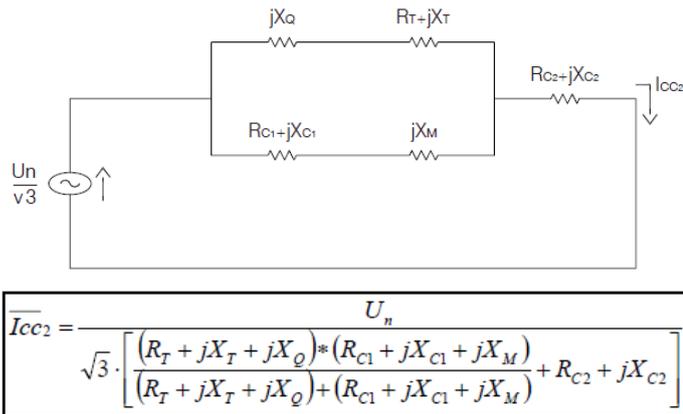
La expresión de la corriente de cortocircuito queda:

$$\overline{I_{cc1}} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot [R_T + j(X_Q + X_T)]} + \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot [R_{C1} + j(X_{C1} + X_M)]} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k}$$

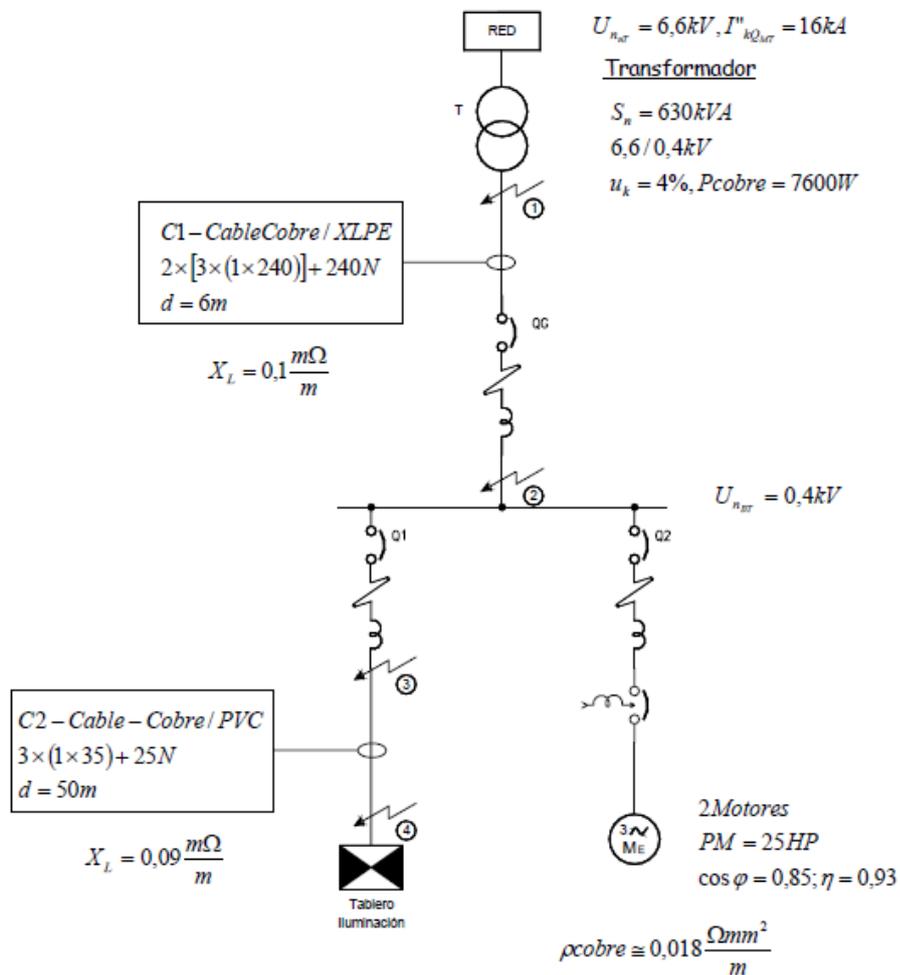
$$Z_k = \frac{[R_T + j(X_Q + X_T)] * [R_{C1} + j(X_{C1} + X_M)]}{[R_T + j(X_Q + X_T)] + [R_{C1} + j(X_{C1} + X_M)]}$$

Si el cortocircuito se plantea al final del cable (CC2), el circuito equivalente y la expresión de la corriente queda:





13.1.1. Ejemplo numérico: cálculo de la corriente inicial de cortocircuito trifásica I''_{k3} en una red de B.T.



1) Calculemos las impedancias equivalentes

Red: $X_Q = U_n^2 / S''_{kQ} = 0,4^2 / 182,9 = j 0,87 m\Omega$, donde:
 $S''_{kQ} = \sqrt{3} U_n I''_{kQ} = \sqrt{3} \times 6,6 \times 16 = 182,9 MVA$
 $Z_Q = j 0,87 m\Omega$

Transformador: $Z_T = u_k U_n^2 / S_n = 0,04 \times 400^2 / 630 = 10,16 m\Omega$
 $I_n = S_n / \sqrt{3} U_n = 630 / \sqrt{3} \times 0,4 = 909 A$

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

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

$$Z_T = 3,06 + j 9,69 \text{ m}\Omega$$

Conductores:

C1 $R_{C1} = \rho L/S = 0,018 \times 6 / 2 \times 240 = 0,225 \text{ m}\Omega$

$$X_{C1} = 0,1 \cdot L/2 = 0,1 \times 6 / 2 = 0,3 \text{ m}\Omega$$

$$Z_{C1} = 0,225 + j 0,3 \text{ m}\Omega$$

C2 $R_{C2} = \rho L/S = 0,018 \times 50 / 35 = 25,71 \text{ m}\Omega$

$$X_{C2} = 0,09 \cdot L = 0,09 \times 50 = 4,5 \text{ m}\Omega$$

$$Z_{C2} = 25,71 + j 4,5 \text{ m}\Omega$$

Motores:

$$S_n = P_n \cdot 0,745 / \eta \cos \varphi = 0,018 \times 0,745 / 0,93 \times 0,85 = 23,56 \text{ kVA}$$

$$S_{nE} = \Sigma S_n = 47 \text{ kVA}$$

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

$$Z_{ME} = j 680,85 \text{ m}\Omega$$

Nota: se consideró $I_{ar}/I_n = 5$ para el calculo de X_{ME}

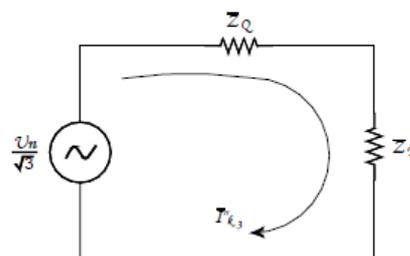
2) Calculemos las corrientes de cortocircuito en los distintos puntos de la instalación

Cortocircuito 1: en bornes de BT del transformador

$$Z_k = Z_Q + Z_T = 3,06 + j 10,65 \text{ m}\Omega, |Z_k| = 10,99 \text{ m}\Omega$$

$$I''_{k3} = U_n / \sqrt{3} Z_k = 400 / \sqrt{3} \times 10,99 = 21 \text{ kA}$$

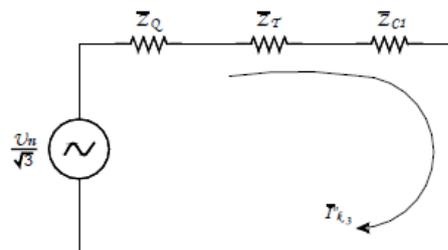
$$I''_{k2} = \sqrt{3}/2 I''_{k3} = 18 \text{ kA}$$



Cortocircuito 2: en bornes de salida del QG

$$Z_k = Z_Q + Z_T + Z_{C1} = 3,285 + j 10,86 \text{ m}\Omega, |Z_k| = 11,35 \text{ m}\Omega$$

$$I''_{k3} = U_n / \sqrt{3} Z_k = 400 / \sqrt{3} \times 11,35 = 20 \text{ kA}$$



Cortocircuito 3: en bornes de salida del Q1

Estudiemus si podemos despreciar el aporte de los motores al cortocircuito.

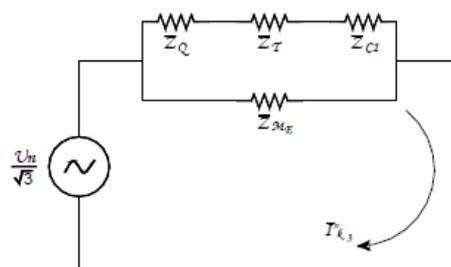
La corriente nominal tomada por los motores valdrá:

$$\Sigma I_{nM} = S_{nM} / \sqrt{3} U_n = 47 / \sqrt{3} \times 0,4 = 68 \text{ A}$$

Calculemos la I''_{k3} sin considerar el aporte de los motores:

$$I''_k = 20 \text{ kA (idem cortocircuito en 2)}$$

La condición para despreciar el aporte de los motores es: $\Sigma I_{nM} \leq 0,01 I''_{k3}$, $68 \leq 200A$



Despreciar el aporte de los motores implica que se cumple que:

$$Z_{ME} \gg Z_Q + Z_T + Z_{C1} \quad |Z_{ME}| = 680,85 \text{ m}\Omega \quad Z_Q + Z_T + Z_{C1} = 11,35 \text{ m}\Omega$$

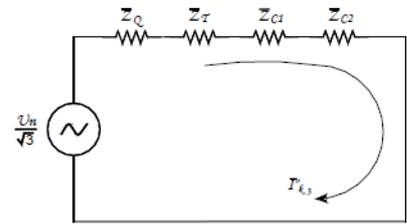
Cortocircuito 4: cortocircuito al final del cable C₂

La impedancia Z_k del circuito equivalente valdrá:

$$Z_k = Z_Q + Z_T + Z_{C1} + Z_{C2} = 28,995 + j 15,36 \text{ m}\Omega, |Z_k| = 32,81 \text{ m}\Omega$$

$$I''_{k3} = 7 \text{ kA}$$

$$I''_{k2} = \sqrt{3}/2 \times I''_{k3} = 6 \text{ kA}$$



Calculemos ahora el cortocircuito fase – neutro en el punto 4.

La impedancia de neutro valdrá: $Z_N = R_N = \rho L / S$

$$\text{Conductor } C_1 : R_{NC1} = 0,018 \times 6 / 240 = 0,45 \text{ m}\Omega$$

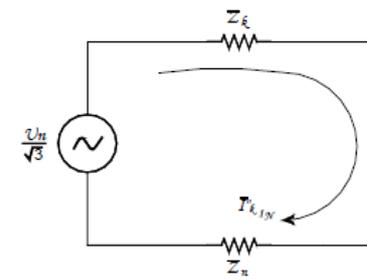
$$\text{Conductor } C_2 : R_{NC2} = 0,018 \times 50 / 25 = 36 \text{ m}\Omega$$

$$Z_N = R_N = 36,45 \text{ m}\Omega$$

$$Z_k + Z_N = 65,445 + j 15,36 \text{ m}\Omega$$

$$|Z_k + Z_N| = 67,22 \text{ m}\Omega$$

$$I''_{k1N} = 400 / \sqrt{3} \times 67,22 = 3,4 \text{ kA}$$



Como se puede ver en este caso la corriente del cortocircuito fase – neutro es menor a la del bifásico en el extremo del conductor C₂.

13.2. Cortocircuito tripolar en una red sin ramales.

En caso de un cortocircuito tripolar, el valor de las corrientes alternas es igual en los tres conductores R, S y T de la red trifásica. Por ello, el cortocircuito es simétrico.

Debido a esto, basta calcular con ayuda de un circuito monofásico equivalente una sola de las tres corrientes, por ejemplo la de la fase R. En la figura que sigue se presenta un ejemplo.

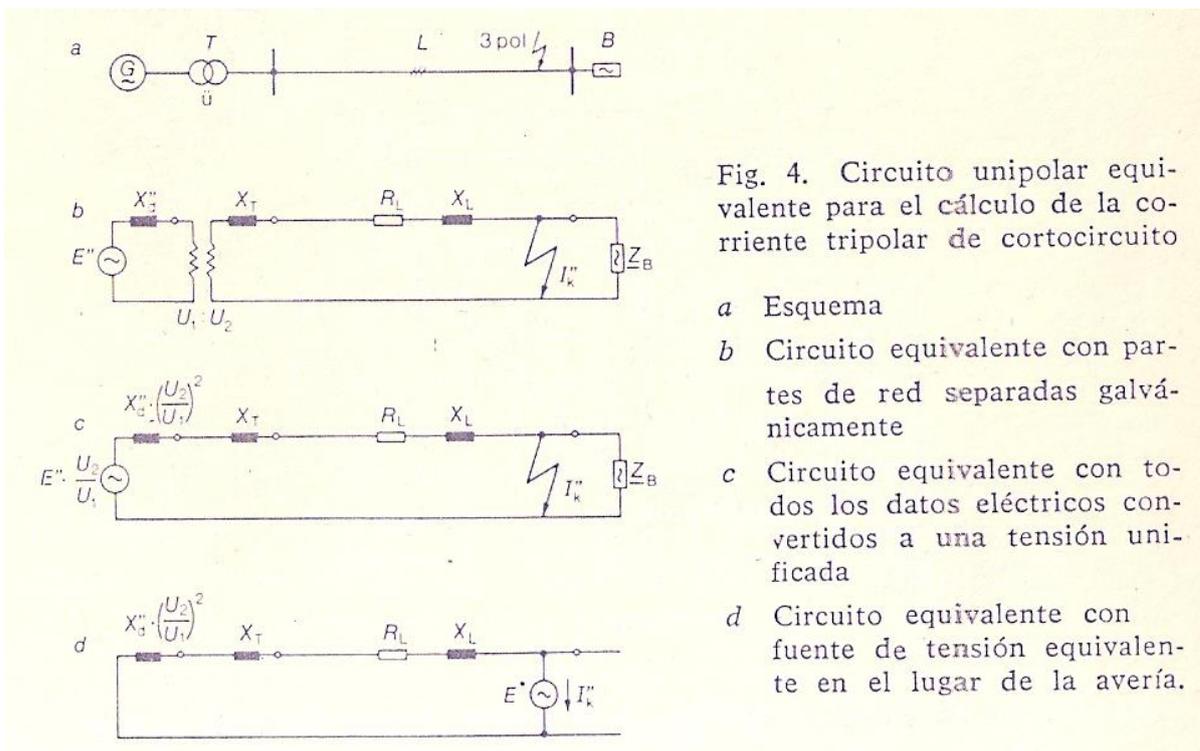


Fig. 4. Circuito unipolar equivalente para el cálculo de la corriente tripolar de cortocircuito

- a Esquema
- b Circuito equivalente con partes de red separadas galvánicamente
- c Circuito equivalente con todos los datos eléctricos convertidos a una tensión unificada
- d Circuito equivalente con fuente de tensión equivalente en el lugar de la avería.

Un generador sincrónico G alimenta, a través de un transformador T de relación de transformación $u = U_1/U_2$ y una línea aérea L, un consumidor B. Al final de la línea se produce un cortocircuito tripolar (figura 4a)

Por medio del transformador el sistema total se divide en dos redes parciales. En el circuito unipolar equivalente (fig. 4b) se tiene en cuenta la separación de potencial de ambas redes parciales.

Las características eléctricas de los aparatos se reproducen mediante resistencias y reactancias ($R + j X$) y la máquina síncrona, además, por su tensión eficaz E'' . Para simplificar la representación, en los circuitos equivalentes de la figura 4 – con excepción de la línea aérea – no se han dibujado las resistencias de los aparatos.

Si las tensiones, intensidades e impedancias se transforman con relación a una misma tensión de referencia, se podrá suprimir en el circuito equivalente la separación de potenciales de las redes parciales (fig. 4c). Como tensión de referencia se ha tomado la tensión de la parte de la red averiada.

Las corrientes de cortocircuito pueden calcularse también con el método de las fuentes equivalentes de tensión (fig. 4 d). Para ello se hacen cero todas las tensiones eficaces de los generadores.

En el correspondiente punto de avería se tiene el generador equivalente con tensión E'' , como única tensión eficaz de la red. En este método de cálculo ya no se incluyen en el circuito equivalente los ramales transversales, tales como la impedancia de carga Z_B .

➤ **Corriente alterna inicial de cortocircuito**

Para el cálculo de I''_k , el generador síncrono (fig.4) se representa por la tensión inicial E'' (tensión de fase) y la reactancia inicial X''_d (reactancia longitudinal subtransitoria).

De este modo resulta: $I_k'' = E'' / Z_k$

Para el cálculo, la impedancia de red Z_k , también llamada impedancia de la línea de cortocircuito: $Z_k = \sqrt{R_k^2 + j X_k^2}$, es la impedancia de la red trifásica completa vista desde el punto de falla.

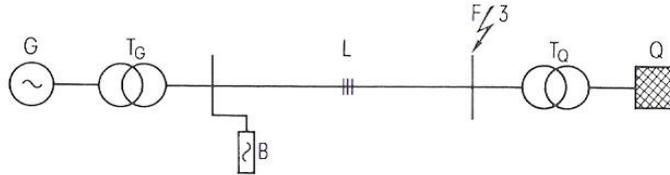
En redes de alta tensión, las resistencias activas de los aparatos suelen ser pequeñas en comparación con sus reactivas. En caso de que $R_k < 0.3 X_k$ pueden despreciarse en el cálculo de I_k'' las resistencias eficaces.

En baja tensión las resistencias tienen una influencia apreciable sobre el valor de I_k'' y por ello han de ser tenidas en cuenta en el cálculo de I_k'' .

Como tensión eficaz del generador equivalente puede tomarse con suficiente exactitud $E = 1,1 U_N / \sqrt{3}$, donde U_N es la tensión nominal de la red en la que se produce el cortocircuito.

13.3. Cálculo de la corriente inicial simétrica de cortocircuito I_k'' en el caso de un cortocircuito trifásico alimentado por varias fuentes de corriente de cortocircuito

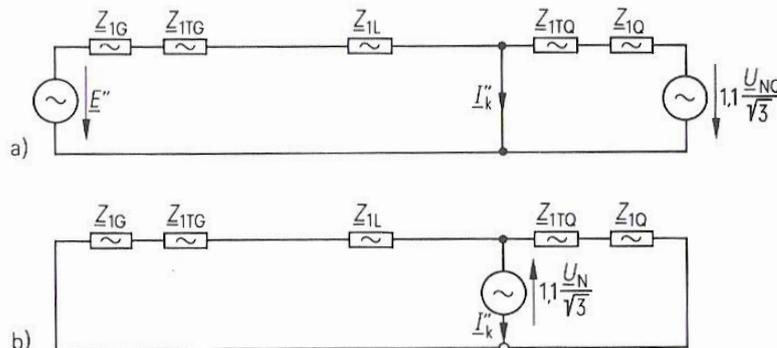
El procedimiento de cálculo se expondrá tomando como ejemplo una red alimentada por los dos extremos, tal como la representada en la figura que sigue.



Se considerará el método simplificado sin consideración de la carga de la red.

Las corrientes iniciales simétricas de cortocircuito pueden calcularse empleando las tensiones de los generadores y de las acometidas o considerando **una fuente equivalente de tensión (AEA 90909)**

De acuerdo con lo supuesto no se tienen en cuenta las impedancias transversales (cargas y capacitancias de líneas), con excepción de los motores que se considerarán como generadores según lo ya visto. Se obtienen los circuitos indicados en las figuras que siguen.



En la variante correspondiente al esquema equivalente de la figura a) se consideran la fuerza electromotriz del generador E'' (fuerza electromotriz inicial) y la tensión de la acometida $1,1 U_{NQ} / \sqrt{3}$.

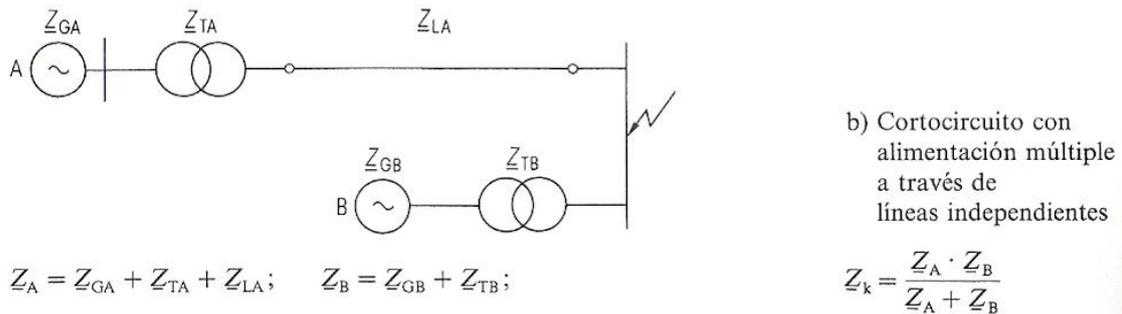
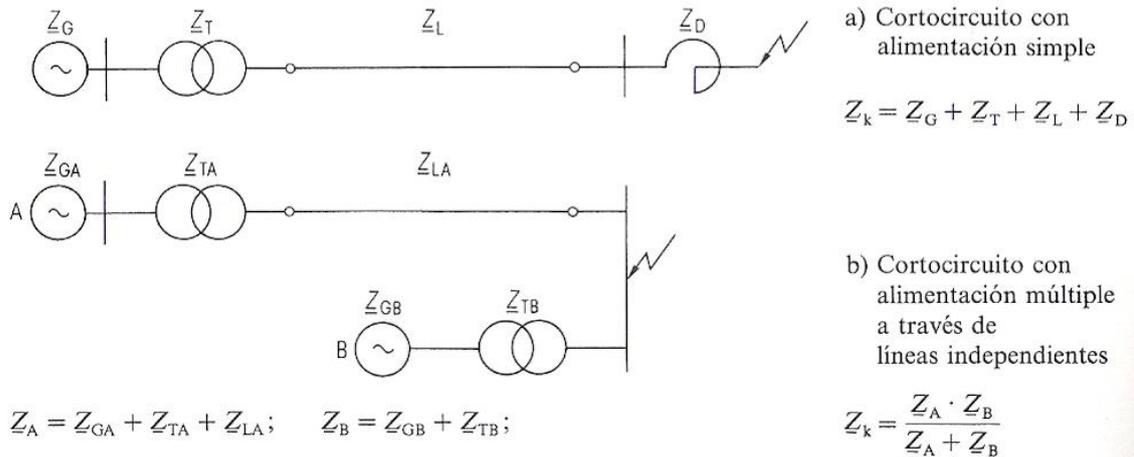
En la variante correspondiente al esquema equivalente de la figura b), la fuerza electromotriz $1,1 U_N / \sqrt{3}$ de la fuente equivalente de tensión dispuesta en el punto de defecto es la única que actúa en toda la red.

Para poder calcular también las corrientes parciales de cortocircuito en el caso de cortocircuitos asimétricos empleando el método de la fuente equivalente de tensión, se desprecian las impedancias transversales (cargas no debidas a motores y capacitancias de línea) en los sistemas directo e inverso, tal como se hace en el caso de cortocircuitos simétricos.

A menudo deben calcularse las corrientes de cortocircuito para puntos alimentados por varias fuentes de corriente de cortocircuito, estas corrientes pueden circular a través de conductores independientes, de conductores con tramos comunes o de conductores dispuestos en malla.

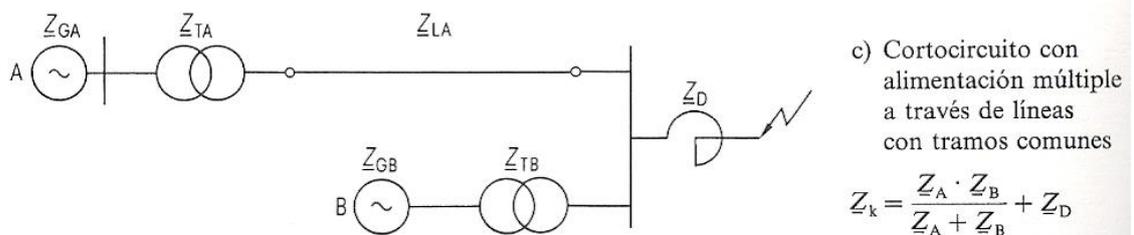
En la figura que sigue se indican para distintos tipos de redes las fórmulas que permiten calcular la impedancia de cortocircuito de la red Z_k .

En el caso de un cortocircuito con alimentación simple, la impedancia de cortocircuito de la red Z_k equivale a la suma de las impedancias de los distintos aparatos o componentes (figura a)

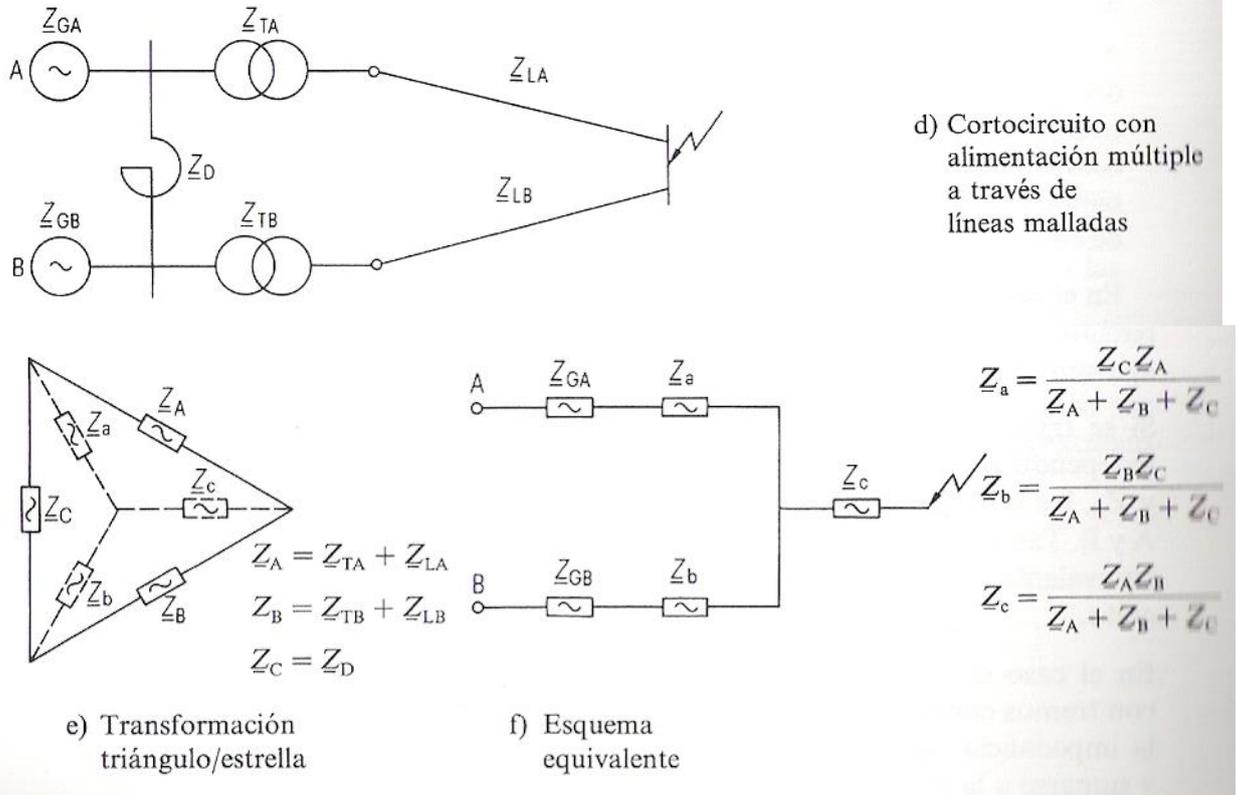


Si se trata de un cortocircuito con alimentación múltiple a través de líneas independientes (figura b), es posible calcular, a partir de las impedancias Z_A y Z_B , las porciones de la corriente de cortocircuito que circulan por las ramas A y B. También puede determinarse la impedancia resultante Z_k y calcular la corriente de cortocircuito.

En el caso de un cortocircuito con alimentación de un cortocircuito con alimentación múltiple a través de líneas con tramos comunes (figura c), deberá determinarse la impedancia equivalente Z_{AB} de las líneas independientes hasta el punto C y sumarse a la impedancia Z_D del tramo común.

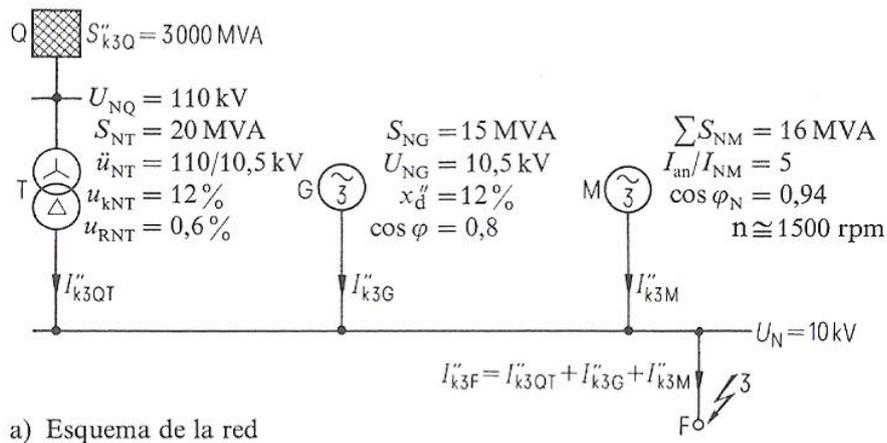


Si se trata de un cortocircuito con alimentación múltiple a través de líneas dispuestas en malla (figura d), se deshace dicha estructura mediante una transformación triángulo – estrella (figura e). El esquema equivalente correspondiente (figura f) se sigue trabajando de la forma indicada en la figura c)



13.3.1. Ejemplo numérico: Cortocircuito tripolar alimentado por varias fuentes de corriente de cortocircuito.

De acuerdo con el esquema de la red de la figura, tres fuentes de corriente de cortocircuito independiente entre sí (la acometida Q a través del transformador T, el generador G y el grupo de motores asíncronos M) alimentan el cortocircuito tripolar en el punto F. Los datos característicos de los aparatos y componentes se dan en el esquema unifilar.



Las corrientes de cortocircuito se determinan por separado para cada fuente. La corriente inicial simétrica de cortocircuito I''_k se calcula empleando la tensión equivalente $c U_h / \sqrt{3}$ como fuerza electromotriz.

Las corrientes de cortocircuito I''_k , i_p , I_b e I_k para el punto de cortocircuito F se obtienen sumando las porciones correspondientes a las distintas fuentes de corriente de cortocircuito.

➤ **Cálculo de las porciones de corriente inicial simétrica de cortocircuito I''_{k3} y de las corrientes de cortocircuito i_p , I_b e I_k**

Aplicaremos el método por unidad y referiremos las impedancias a los valores bases adoptadas:

1º Paso: Adoptamos $S_B = 100$ MVA y $U_{B1} = 10$ kV (tensión punto F de cortocircuito)

2º Paso: calculamos la tensión en el sector de Q

$$U_{B2} = U_{B1} \times 110 / 10,5 = 10 \text{ kV} \times 110 / 10,5 = 104,76 \text{ kV}$$

3º Paso: Referimos las impedancias a los valores bases adoptados

a) Acometida Q a través del transformador T

$$Z_Q = R_Q + j X_Q \qquad Z_Q = 1,1 U_{N_Q}^2 / S''_{kQ}$$

Numéricamente:

$$Z_Q = 1,1 \times 110^2 / 3000 = 4,44 \Omega, \text{ en por unidad}$$

$$Z_Q \text{ pu} = Z_Q / Z_B = 4,44 \cdot 100 \text{ MVA} / (104,76 \text{ kV})^2 = 0,04 \text{ pu}$$

Para obtener la parte real e imaginaria será: $R_{1Q} = 0,1 X_{1Q}$; $X_{1Q} = 0,995 Z_Q$

$$Z_Q = 0,004 + j 0,04$$

✓ **Transformador T**

$$Z_{1T} = 0,12 \times (100/20) \times (10,5/10)^2 = 0,662$$

$$R_{1T} = 0,006 \times (100/20) \times (10,5/10)^2 = 0,033 \qquad X_{1T} = 0,661$$

$$Z_{1T} = 0,033 + j 0,661 \text{ pu}$$

✓ **Acometida + transformador**

$$Z_{1QT} = \sqrt{(0,037^2 + 0,701^2)} = 0,702 \text{ pu}$$

✓ **Determinación de la corriente inicial simétrica de cortocircuito:**

$$I''_{kQT} (\text{pu}) = 1,1 U_N / Z_{1QT} = 1,1 \times 1 \text{ pu} / 0,702 = 1,567 \text{ pu}$$

$$I''_{kQT} (\text{A}) = 1,567 \text{ pu} \times 100 \text{ MVA} / \sqrt{3} \times 10 \text{ kV} = 9,05 \text{ kA} \qquad \varphi_{kQT} = 87^\circ$$

✓ **La corriente pico de cortocircuito:**

$$i_{pQT} = \chi \sqrt{2} I''_{kQT} = 1,85 \times \sqrt{2} \times 9,05 = 23,68 \text{ kA}, \text{ donde } \chi = 1,85 \text{ para } R_{QT}/X_{QT} = 0,05$$

✓ La corriente simétrica de corte:

$$I_{bQT} = I''_{kQT} = 9,05 \text{ kA}$$

✓ La corriente permanente de cortocircuito:

$$I_{kQT} = I''_{kQT} = 9,05 \text{ kA}$$

b) Generador G

$$X''_d = 0,12 \times (100/15) (10,5/10)^2 = 0,882 \text{ pu}$$

$$R_G = 0,07 \quad X''_d = 0,062 \text{ pu}$$

$$Z_{1G} = 0,884 \text{ pu}$$

✓ **Determinación de la corriente inicial simétrica de cortocircuito:**

$$I''_{kG} (\text{pu}) = 1,1 U_N / Z_{1G} = 1,1 \times 1 \text{ pu} / 0,884 = 1,244 \text{ pu}$$

$$I''_{kQT} (\text{A}) = 1,244 \text{ pu} \times 100 \text{ MVA} / \sqrt{3} 10 \text{ kV} = 7,18 \text{ kA} \quad \varphi_{kG} = 85,97^\circ$$

✓ La corriente asimétrica de cortocircuito:

$$I_{pQT} = \chi \sqrt{2} I''_{kQT} = 1,8 \times \sqrt{2} \times 7,18 = 18,28 \text{ kA}, \text{ donde } \chi = 1,80 \text{ para } R_{QT}/X_{QT} = 0,07$$

✓ La corriente simétrica de corte:

$$I_{bQT} = \mu I''_{kG} = 0,66 \times 7,18 = 4,74 \text{ kA}$$

De acuerdo a figura $\mu = 0,66$ para $I''_{k3G} / I_{NG} = 8,76$ y $t_v = 0,1 \text{ s}$

✓ La corriente permanente de cortocircuito:

$$I_{kQT} = \lambda_{\max} I_{NG} = 1,8 \times 0,82 = 1,48 \text{ kA}$$

De acuerdo a figura $\lambda_{\max} = 1,8$ para $I''_{k3G} / I_{NG} = 8,76$ y X_d saturada = 2,0

c) Grupo de motores asincrónicos M

$$Z_{1M} = 1 / (I_{an}/I_{NM}) \cdot (U^2_{NM}) / S_{NM} = 1/5 \cdot 10^2 / 16 = 1,25 \Omega$$

En por unidad será:

$$Z_{1M} \text{ pu} = Z_{1M} [\Omega] / Z_{\text{BASE}} = 1,25 \Omega \cdot 100 \text{ MVA} / 10^2 \text{ kV} = 1,25 \text{ pu}$$

$$R_M / X_M = 0,10 \text{ y } X_M = 0,995 \quad Z_M \text{ para MW/par de polos } \geq 1 \text{ MW}$$

$$Z_{1M} = 0,124 + j 1,244 \text{ pu}$$

$$I''_{kM} (\text{pu}) = 1,1 U_N / Z_{1G} = 1,1 \times 1 \text{ pu} / 1,25 = 0,88 \text{ pu}$$

$$I''_{kM} (\text{A}) = 0,88 \text{ pu} \times 100 \text{ MVA} / \sqrt{3} 10 \text{ kV} = 5,08 \text{ kA} \quad \varphi_{kG} = 84,30^\circ$$

✓ La corriente asimétrica de cortocircuito:

$$I_{pM} = \chi \sqrt{2} I''_{kM} = 1,75 \times \sqrt{2} \times 5,08 = 12,57 \text{ kA}, \text{ donde } \chi = 1,75 \text{ para } R_{1M}/X_{1M} = 0,10$$

✓ La corriente simétrica de corte:

$$I_{bM} = \mu \cdot q \cdot I''_{kM} = 0,75 \times 0,55 \times 5,08 = 2,10 \text{ kA}$$

De acuerdo a figura $\mu = 0,75$ para $I''_{k3M} / I_{NM} = 5,5$ y $t_v = 0,1$ s

De acuerdo a figura $q = 0,55$ para $1 \text{ MW } P_{NM} / \text{ par de polos}$ y $t_v = 0,1$ s

d) Corrientes de cortocircuito en el punto de cortocircuito F

Corriente inicial simétrica de cortocircuito: $I''_{kF} = I''_{kQT} + I''_{kG} + I''_{kM} = 21,31 \text{ kA}$

Corriente máxima asimétrica de cortocircuito: $i_{pF} = i_{pQT} + i_{pG} + i_{pM} = 54,53 \text{ kA}$

Corriente simétrica de corte: $I_{bF} = I_{bQT} + I_{bG} + I_{bM} = 15,89 \text{ kA}$

Corriente permanente de cortocircuito: $I_{kF} = I_{kQT} + I_{kG} + I_{kM} = 10,53 \text{ kA}$

13.4. Cálculo de la corriente inicial simétrica de cortocircuito I''_k en el caso de un cortocircuito trifásico en una red con distintos niveles de tensión.

A menudo deben calcularse las corrientes de cortocircuito en redes con sistemas que presentan distintos niveles de tensión y que están interconectados mediante transformadores.

Su resolución se realizará mediante la aplicación del **método por unidad**, donde las impedancias serán adimensionales, referidas a los valores bases adoptadas (S_B y U_B), utilizando la fórmula de cambio de base para referir todas las impedancias a los valores base adoptados.

La corriente inicial simétrica de cortocircuito y la correspondiente potencia de cortocircuito se obtienen a partir de las ecuaciones:

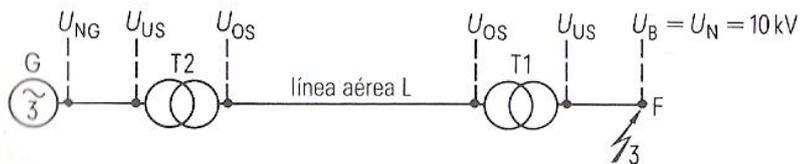
$I''_{k3} \text{ (pu)} = U_G \text{ (pu)} / Z_k \text{ (pu)}$, donde es U_G es la tensión del generador expresada en por unidad.

La corriente en valores normales (A) se obtendrá multiplicando el valor por unidad por el correspondiente valor base en el lugar donde se produce el cortocircuito. Es decir:

$$I''_{k3} \text{ [A]} = I''_{k3} \text{ (pu)} \cdot I_B \quad \text{donde } I_B = S_B / \sqrt{3} U_B$$

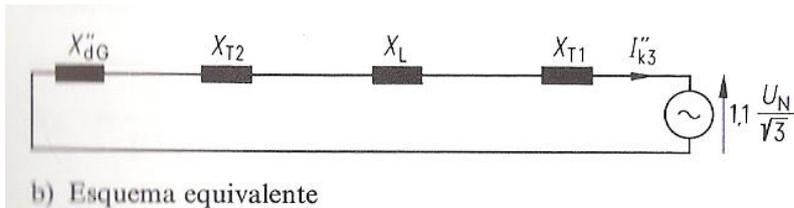
13.4.1. Ejemplo 2: corriente inicial simétrica de cortocircuito I''_{k3} en el caso de un cortocircuito tripolar en una red con distintos niveles de tensión.

Un generador alimenta a través de un transformador una línea aérea simple, en cuyo extremo se ha conectado otro transformador. El punto de cortocircuito está situado en el secundario de dicho transformador.



$S_{NG} = 60 \text{ MVA};$	$S_{NT2} = 40 \text{ MVA};$	$l = 22 \text{ km};$	$S_{NT1} = 12 \text{ MVA}$
$U_{NG} = 10,5 \text{ kV};$	$\dot{u}_{NT2} = 10,5/63 \text{ kV};$	$U_{NL} = 60 \text{ kV};$	$\dot{u}_{NT1} = 60/10,5 \text{ kV}$
$x_{dG}'' = 12\%;$	$u_{kNT2} = 10\%$	$X_L' = 0,4 \Omega/\text{km};$	$u_{kNT1} = 8\%$

a) Esquema de la red con los datos característicos de los aparatos y componentes



b) Esquema equivalente

La corriente inicial simétrica de cortocircuito se calculará por aplicación del método por unidad.

Como primer paso adoptamos los siguientes valores base: $S_b = 100 \text{ MVA}$ y $U_{B1} = 10 \text{ kV}$ (tensión en el punto de falla)

Como segundo paso encontramos las tensiones base en los otros dos sectores del circuito (en la línea y en el generador) utilizando las relaciones de transformación dadas. Es decir:

$$U_{B2} = U_{B1} \times \text{relación de transformación T1} = 10 \text{ kV} \times 60/10,5 = 57,14 \text{ kV}$$

$$U_{B3} = U_{B2} \times \text{relación de transformación T2} = 57,14 \text{ kV} \times 10,5/63 = 9,52 \text{ kV}$$

A continuación como tercer paso referimos todas las impedancias de los aparatos a los valores bases adoptadas:

- ✓ Generador de 60 MVA: $X_{1G}'' = 0,12 \times (100/60) \times (10,5/9,52)^2 = 0,24$
- ✓ Transformador 2 de 40 MVA: $X_{1T2} = 0,10 \times (100/40) \times (10,5/9,52)^2 = 0,30$
- ✓ Línea de 22 km: $X_{1L} = 0,4 \times 22 \times (100/57,14)^2 = 0,27$
- ✓ Transformador 1 de 12 MVA: $X_{1T1} = 0,08 \times (100/12) \times (10,5/10)^2 = 0,74$

Como cuarto paso obtenemos el circuito equivalente en por unidad, del cual resulta que la impedancia de cortocircuito $Z_k = \sum Z_i = 1,55 \text{ pu}$.

La corriente de cortocircuito I_{k3}'' resulta igual a:

$$I_{k3}'' (\text{pu}) = U_g (\text{pu}) / Z_k = (10,5 / 9,52) / 1,55 = 0,71 \text{ pu}$$

En valores normales será: $I_{k3}'' [\text{A}] = I_{k3}'' (\text{pu}) \cdot I_{B1}$, donde la corriente base en el sector del cortocircuito valdrá:

$$I_{B1} = S_B / \sqrt{3} U_{B1} = 100 \text{ MVA} / \sqrt{3} \times 10 \text{ kV} = 5773,5 \text{ A}$$

$$I_{k3}'' = 4108 \text{ A}$$

Glf/2015