

TEMA 6. FALTAS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS

Índice

1. Introducción
2. Valores por unidad
3. Componentes simétricas
4. Circuitos de secuencia
5. Redes de secuencia
6. Aplicación de las componentes simétricas
 - 6.1. Falta trifásica
 - 6.2. Falta monofásica
 - 6.3. Falta bifásica
 - 6.4. Falta bifásica a tierra
7. Norma IEC 60.909:2.001

1. Introducción

- **Falta:** fallos o formas de operación no deseada del sistema eléctrico.
 - ♦ Cortocircuitos: conexión accidental a través de una impedancia relativamente baja, de dos o más puntos del sistema que normalmente tienen tensiones diferentes. La mayoría.
 - ♦ Falta serie: ocasionados por desequilibrios de impedancias debidos por ejemplo a la apertura de una o dos fases.
- No son frecuentes y, cuando se producen, duran unas décimas de segundo, pero tienen consecuencias tan graves e imprevisibles que obligan a un constante estudio y mejora de los dispositivos de protección.
- Las normas de protección de las instalaciones eléctricas indican que no sólo deben considerarse las corrientes y tensiones debidas a las cargas de servicio, sino tb las debidas a sobrecargas producidas por los cortocircuitos.
- **Efectos:** provocan sobrecargas térmicas y esfuerzos electrodinámicos elevados, así como variaciones de tensión.
- Es muy importante conocer los valores que en un punto determinado del circuito pueden adoptar las corrientes máximas y mínimas de cortocircuito (permiten dimensionar los dispositivos de protección de las redes).

1. Introducción

Situaciones que derivan en falta:

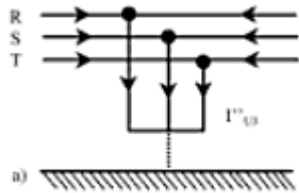
- Caída de las tres fases al suelo por destrucción de la torre de alta tensión.
- Rotura de uno o varios conductores de fase por la acción de la carga de hielo, cayendo sobre otras fases o sobre el terreno.
- Caída de un objeto sobre la línea, cortocircuitando dos o tres fases.
- Contacto entre uno o dos de los conductores de fase y el terreno por la caída de un árbol sobre la línea.
- Caída de un rayo sobre la línea.
- Contacto de dos conductores de fase por la acción del viento.
- Perforación de un cable subterráneo.

Parámetros que influyen en los cortocircuitos:

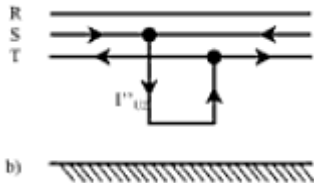
- Tipo de cortocircuito
- Fuentes de cortocircuito (generadores, motores y red).
- Situación de carga previa.
- Duración de cortocircuito: dependerá de los ajustes de las protecciones.
- Topología de la red.
- Aparamenta y cargas.
- Instante en el que produce el cortocircuito respecto de la tensión (desfase): determinará el valor máximo que alcanzará el cortocircuito.
- Situación de la corriente de cortocircuito: cerca/lejos de los generadores.

1. Introducción

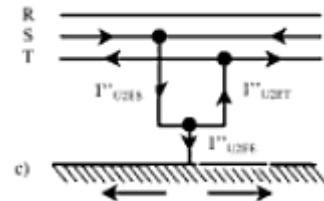
Tipos de cortocircuitos (faltas):



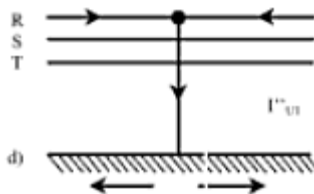
- **Falta trifásica (simétrica)**: se produce el cortocircuito entre las tres fases. Debidas a caídas de objetos sobre la línea,... Representan del orden del 5 % de las faltas, pero por lo general producen las mayores intensidades de cortocircuito. Sistema equilibrado: todas las fases están afectadas por igual.



- **Falta bifásica (asimétrica)**: se produce el contacto entre dos fases distintas de la línea. Debidas al viento, choques de pájaros, rotura de cables.... Representan del orden del 15 % de las faltas.



- **Falta bifásica a tierra (asimétrica)**: se originan por las mismas causas que las monofásicas, pero están implicadas dos fases. Representan del orden del 10 % de las faltas.



- **Falta monofásica (asimétrica)**: se produce un cortocircuito entre una fase y la tierra. Debido a que cae un árbol sobre la fase, o que se cae por el viento, hielo,... Representan del orden del 70 % de las faltas.
Se calculan para dimensionar el sistema de puesta a tierra⁴.

1. Introducción

Método de cálculo: a la hora de dimensionar cualquier instalación es necesario estudiar cómo se comporta el sistema en régimen de falta para ver cómo le afecta, con el fin de protegerla de sus efectos.

- Tradicional basado en la teoría de circuitos:
 - ◆ Faltas simétricas: circuito monofásico equivalente, aplicación de nudos y mallas.
 - ◆ Faltas asimétricas: sistema trifásico, aplicación de nudos y mallas.
 - ◆ Problema complejo y tedioso de resolver.
- Método de las componentes simétricas:
 - ◆ Reducción a valores p.u.
 - ◆ Construcción de las redes de secuencia.
 - ◆ Reducción de las redes de secuencia al punto de falta.
 - ◆ Conexión de las redes de secuencia según la falta.
 - ◆ Cálculo de las componentes simétricas en el punto de falta.
 - ◆ Cálculo de la tensión y la corriente en el punto de falta.

2. Valores por unidad (pu)

Los valores por unidad corresponden simplemente a un cambio de escala de las magnitudes principales.

- Si se elige S y V como valores base, S_{base} , V_{base} (nominales):

$$I_{baseF} = \frac{S_{baseF}}{V_{base}} \quad Z_{baseF} = \frac{V_{base}}{I_{baseF}} = \frac{V_{base}^2}{S_{baseF}}$$

$$S = 3 \cdot V \cdot I$$

$$S_F = V \cdot I$$

$$V = Z \cdot I$$

$$U = \sqrt{3} \cdot V$$

- Si se elige S y V como valores base, S_{base} , U_{base} (nominales):

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} \cdot U_{base}} \quad Z_{base} = \frac{U_{base}}{\sqrt{3} \cdot I_{base}} = \frac{U_{base}^2}{S_{base}}$$

- Dada una magnitud X en unidades físicas (V, Ω , kA) se define x en p.u. como:

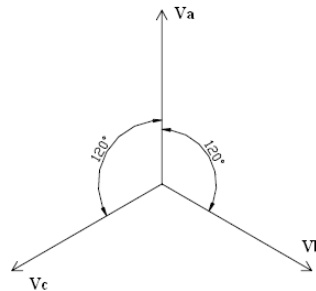
$$x = \frac{X}{X_{base}} (pu)$$

- Si hay valores referidos a bases diferentes hay que hacer un cambio de base:

$$\left. \begin{aligned} I'_B, Z'_B, U'_B, S'_B &\rightarrow z'_{pu} = \frac{Z}{Z'_B} = Z \frac{S'_B}{(U'_B)^2} \\ I''_B, Z''_B, U''_B, S''_B &\rightarrow z''_{pu} = \frac{Z}{Z''_B} = Z \frac{S''_B}{(U''_B)^2} \end{aligned} \right\} \rightarrow z''_{pu} = z'_{pu} \frac{S''_B (U'_B)^2}{S'_B (U''_B)^2}$$

3. Componentes simétricas

En un sistema trifásico equilibrado las tensiones e intensidades de las tres fases tienen el mismo módulo y están desfasadas 120° .

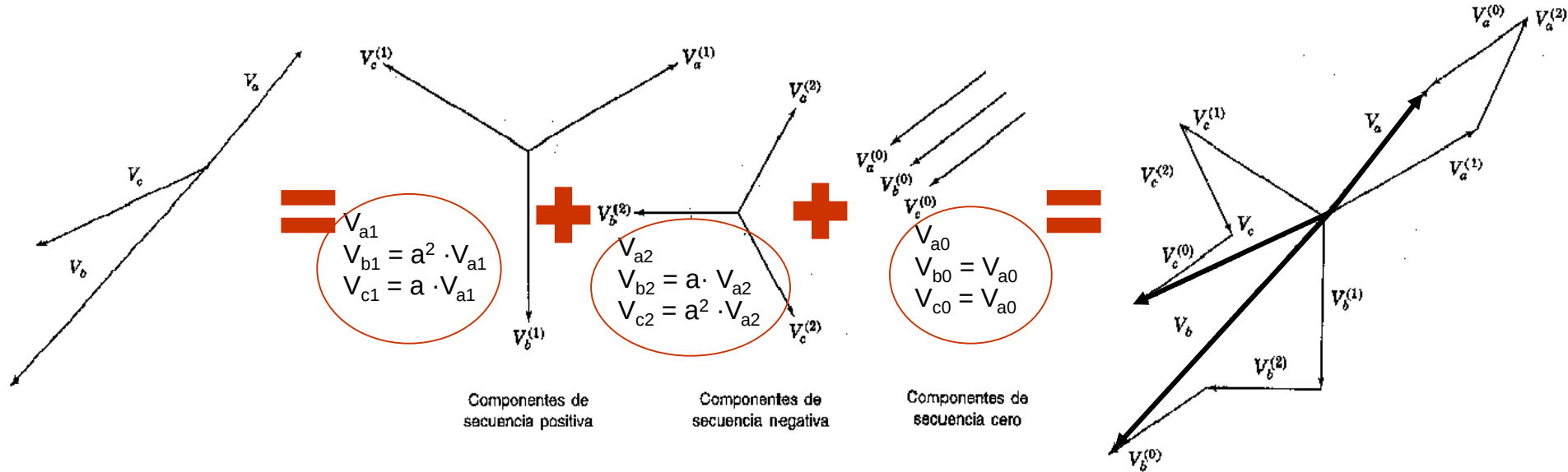


Al producirse una falta, las tensiones e intensidades forman un sistema desequilibrado.

Un sistema de fasores desequilibrado puede descomponerse en tres sistemas equilibrados denominados componentes de secuencia positiva o directa, negativa o inversa y cero u homopolar:

- Las componentes de secuencia positiva o directa consisten en tres fasores de igual magnitud desfasados entre sí 120° , con la misma secuencia de fases que el sistema original.
- Las componentes de secuencia negativa o inversa consisten en tres fasores iguales en magnitud, desfasados también 120° entre sí, pero con una secuencia de fases opuesta a la de los fasores originales.
- Las componentes de secuencia cero u homopolar consisten en tres fasores iguales en magnitud pero con un ángulo de desfase entre ellos de 0° .

3. Componentes simétricas



$$\left. \begin{aligned} V_a &= V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} \\ V_b &= V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} = V_{a0} + a^2 \cdot V_{a1} + a \cdot V_{a2} \\ V_c &= V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} = V_{a0} + a \cdot V_{a1} + a^2 \cdot V_{a2} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} &a = 1 \angle 120^\circ \\ &\longleftrightarrow \end{aligned} \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{pmatrix}$$

$$\boxed{V_{abc} = A \cdot V_{012}}$$

Vector de los fasores iniciales

Vector de los componentes simétricos

$$V_{012} = A^{-1} \cdot V_{abc} \longleftrightarrow \begin{pmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} \longleftrightarrow \begin{cases} V_0 = \frac{1}{3} \cdot (V_a + V_b + V_c) \\ V_1 = \frac{1}{3} \cdot (V_a + a \cdot V_b + a^2 \cdot V_c) \\ V_2 = \frac{1}{3} \cdot (V_a + a^2 \cdot V_b + a \cdot V_c) \end{cases}$$

3. Componentes simétricas

La transformación de componentes simétricas también se puede aplicar a las corrientes.

$$I_{abc} = A \cdot I_{012}$$

Las corrientes de fase son:

$$I_a = I_0 + I_1 + I_2$$

$$I_b = I_0 + a^2 \cdot I_1 + a \cdot I_2$$

$$I_c = I_0 + a \cdot I_1 + a^2 \cdot I_2$$

Las corrientes de secuencia son:

$$I_0 = \frac{1}{3} \cdot (I_a + I_b + I_c)$$

$$I_1 = \frac{1}{3} \cdot (I_a + a \cdot I_b + a^2 \cdot I_c)$$

$$I_2 = \frac{1}{3} \cdot (I_a + a^2 \cdot I_b + a \cdot I_c)$$



$$\begin{pmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix}$$

En un sistema trifásico conectado en Y, la corriente neutra I_n es la suma de las corrientes de línea: $I_n = I_a + I_b + I_c$

$$I_n = 3 \cdot I_0$$

La corriente de neutro es tres veces la corriente de secuencia cero.

3. Componentes simétricas

1. Una línea trifásica que alimenta una carga equilibrada conectada en Y tiene abierta una de sus fases (fase b). El neutro de la carga está puesto a tierra y las corrientes de línea desequilibradas son:

$$\begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 10_{0^\circ} \\ 0 \\ 10_{120^\circ} \end{pmatrix} A$$

Calcular las corrientes de secuencia y la corriente al neutro.

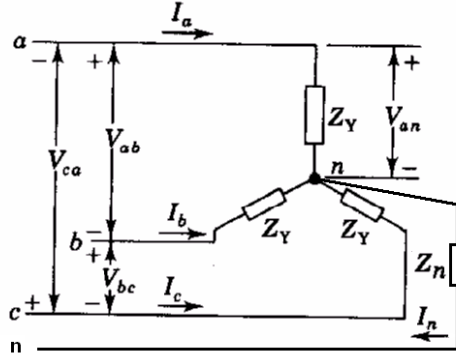
2. Dado un sistema desequilibrado, donde las tensiones simples de la carga son:

$$\begin{pmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 425_{45^\circ} \\ 220_{60^\circ} \\ 425_{75^\circ} \end{pmatrix} V$$

Calcular las componentes simétricas de las tensiones simples anteriores y las componentes simétricas de las tensiones de línea.

4. Circuitos de secuencia. Circuitos en estrella

Cada elemento se puede representar por tres modelos correspondientes a su comportamiento ante excitaciones de secuencia directa, inversa y homopolar.



$$I_n = I_a + I_b + I_c = (I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}) + (I_{b0} + I_{b1} + I_{b2}) + (I_{c0} + I_{c1} + I_{c2}) =$$

$$= (I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}) + (I_{a0} + a^2 I_{a1} + a I_{a2}) + (I_{a0} + a I_{a1} + a^2 I_{a2}) = 3I_{a0}$$

Para que aparezca componente homopolar debe existir conexión a tierra. Si la impedancia de conexión es Z_n :

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_n \\ V_n \\ V_n \end{pmatrix} = Z_Y \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} + 3I_{a0}Z_n \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

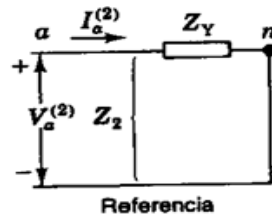
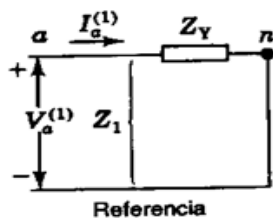
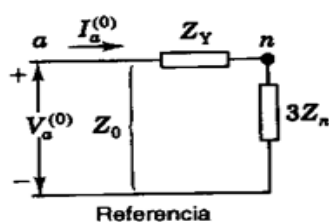
Transformando en
componentes
simétricas



$$\begin{pmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{pmatrix} = Z_Y \begin{pmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{pmatrix} + 3I_{a0}Z_n \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

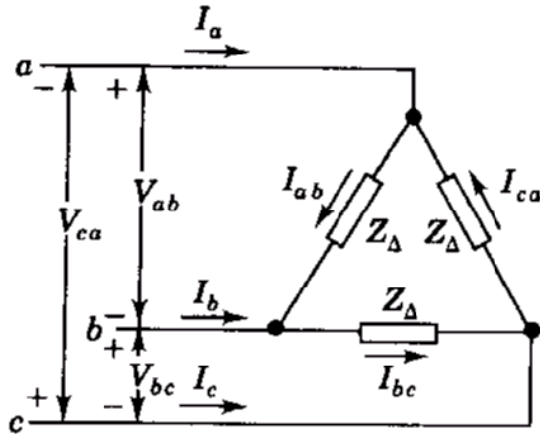
Las ecuaciones de secuencia están desacopladas:

- La circulación de intensidades de secuencia positiva origina únicamente caídas de tensión de secuencia positiva.
- La circulación de intensidades de secuencia negativa origina únicamente caídas de tensión de secuencia negativa.
- La circulación de intensidades de secuencia homopolar origina únicamente caídas de tensión de secuencia homopolar.



Se puede tratar el sistema desequilibrado como tres sistemas de secuencia en los cuales se puede aplicar el monofásico equivalente.

4. Circuitos de secuencia. Circuitos en triángulo

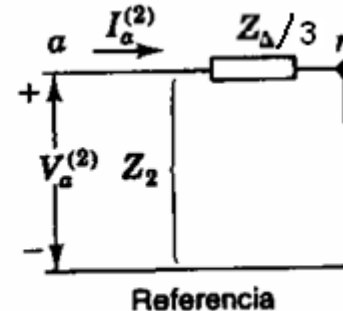
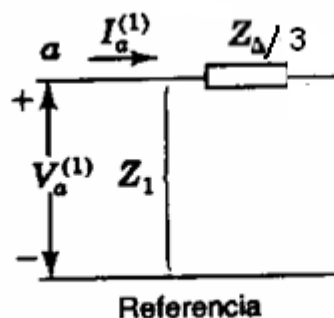
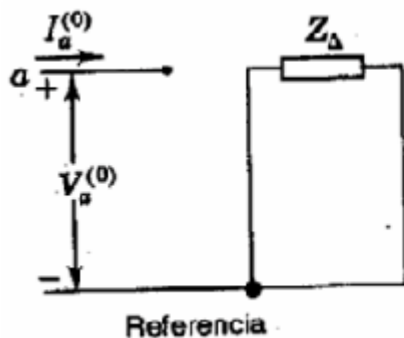


$$I_a = I_{ab} - I_{ca}$$

$$I_b = I_{bc} - I_{ab} \quad \longrightarrow \quad I_a + I_b + I_c = 0 \rightarrow I_{a0} = 0$$

$$I_c = I_{ca} - I_{bc}$$

- No puede existir componente homopolar en las intensidades de línea.
- Sí dentro del triángulo.



4. Circuitos de secuencia. Líneas

Las líneas de transporte presentan idéntico valor de impedancia y de admitancia frente a la circulación de corrientes de **secuencia positiva y negativa**, $Z_1=Z_2$ y $Y_1=Y_2$ (elemento estático).

Los valores de secuencia positiva y negativa se corresponden con los valores de las impedancias y admitancias obtenidos mediante los procedimientos vistos en el tema de cálculo de líneas aéreas y subterráneas.

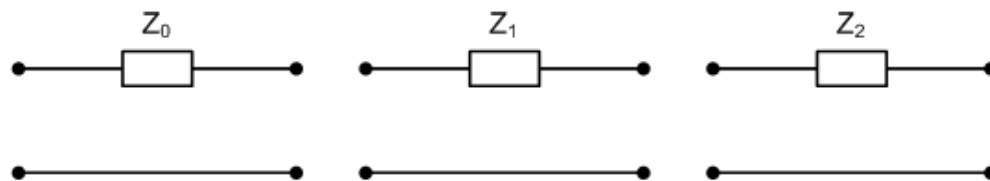
Para la circulación de intensidades de **secuencia homopolar**:

- Z_0 es mayor. Entre 2,5 y 3,5 veces el valor de Z_1 .
- Y_0 es menor.

El cálculo de estos valores requiere un análisis del circuito de retorno (cables de guarda, pantallas de los cables,...) que queda fuera del temario.

NOTA: consultar la norma UNE-IEC/TR 60909-2 IN 2010 para las fórmulas de cálculo de secuencia homopolar.

Normalmente en el cálculo de cortos se desprecia la rama de vacío (C, G) → Modelo de línea corta.

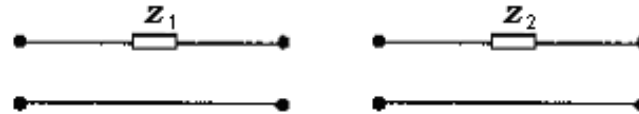


Modelos de líneas de transporte para cálculo de cortocircuitos en cada una de las secuencias.

4. Circuitos de secuencia. Transformadores

Para la circulación de corrientes de **secuencia positiva** y **negativa** el transformador presenta idéntico valor de impedancia (elemento estático): la impedancia de cortocircuito del transformador ($Z_1 = Z_2 = Z_T$)

Para el cálculo de cortos se desprecia la rama de vacío, por tanto:



El cálculo de la impedancia de secuencia directa de transformadores de dos devanados se realiza a partir de su placa de características mediante las siguientes expresiones:

$$Z_1 = \frac{u_z}{100} \cdot \frac{U_N^2}{S_N} \Rightarrow X_1 = \sqrt{Z_1^2 - R_1^2}$$
$$R_1 = \frac{u_R}{100} \cdot \frac{U_N^2}{S_N}$$

Donde,

u_z =tensión de cortocircuito de cortocircuito

u_R =componente resistiva de la tensión de cortocircuito

4. Circuitos de secuencia. Transformadores

La circulación de corrientes de **secuencia homopolar** dependerá de la conexión de los devanados del transformador y, por tanto, la impedancia de secuencia homopolar valdrá:

$Z_0 = \infty$ si no hay circulación.

$Z_0 = Z_T + 3 \cdot Z_N + 3 \cdot Z_n$ si hay circulación.

- Por los arrollamientos conectados en estrella circulan corrientes homopolares si el neutro está conectado a tierra ya que proporciona la trayectoria de retorno necesaria.

- No pueden circular corrientes homopolares por las líneas externas de unos arrollamientos conectados en triángulo, ya que no existe camino de retorno. Sí pueden fluir por las ramas del triángulo.

CASO	SÍMBOLOS	DIAGRAMAS DE CONEXIÓN	CIRCUITOS EQUIV. DE SECUENCIA CERO
1			
2			
3			
4			
5			

4. Circuitos de secuencia. Motores asíncronos

La impedancia $\underline{Z}_M = R_M + jX_M$ de los motores asíncronos en los sistemas de secuencia directa e inversa se puede determinar por:

$$Z_M = \frac{1}{I_{LR} / I_M} \cdot \frac{U_M}{\sqrt{3} I_M} = \frac{1}{I_{LR} / I_M} \cdot \frac{U_M^2}{S_M}$$

donde

U_M es la tensión asignada del motor;

I_M es la corriente asignada del motor;

S_M es la potencia aparente asignada del motor ($S_M = P_M / (\eta_M \cos \varphi_M)$);

I_{LR}/I_M es la relación de la corriente a rotor bloqueado a la corriente asignada del motor.

Si R_M/X_M es conocida, entonces X_M se calculará como sigue:

$$X_M = \frac{Z_M}{\sqrt{1 + (R_M / X_M)^2}}$$

Se pueden utilizar las siguientes relaciones con suficiente precisión:

$R_M/X_M = 0,10$, con $X_M = 0,995 Z_M$ para motores de media tensión con potencias P_{rM} por par de polos ≥ 1 MW

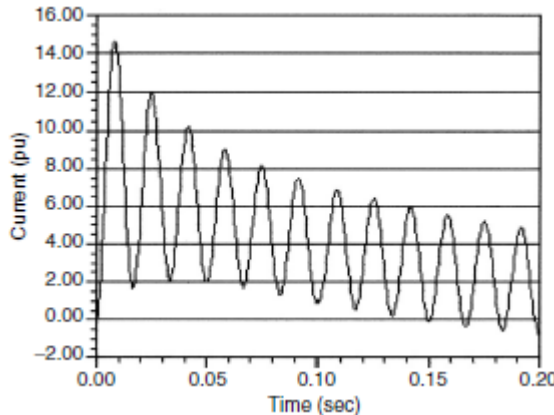
$R_M/X_M = 0,15$, con $X_M = 0,989 Z_M$ para motores de media tensión con potencias P_{rM} por par de polos < 1 MW

$R_M/X_M = 0,42$, con $X_M = 0,922 Z_M$ para grupos de motores de baja tensión con cables de conexión.

La impedancia homopolar $Z_{(0)M}$ del motor, si es necesaria, deberá ser facilitada por el fabricante.

4. Circuitos de secuencia. Generadores síncr.

Los generadores síncronos presentan un comportamiento transitorio frente a cortocircuitos tal como se muestra en la siguiente figura:

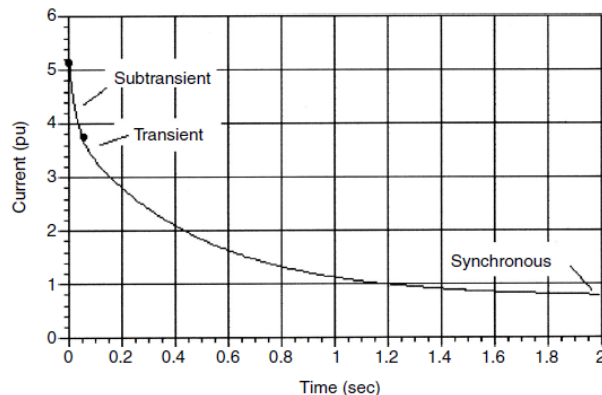


La forma de onda se encuentra inicialmente desplazada respecto al eje $x=0$ debido a un componente de corriente continua, que desaparece en unos pocos ciclos.

También se produce una amortiguación de la componente de corriente alterna, el cual puede pasar desde un valor inicial de hasta unas 11 p.u. que normalmente bajará a un valor estacionario entre 0.4 y 1.2 p.u. en unos 2 a 5 segundos, suponiendo que la excitación del campo se mantenga constante.

La caracterización de los generadores frente a cortocircuitos se hace en términos de intensidades e impedancias “subtransitorias”, “transitorias” y “síncronas”.

Estos términos se refieren a los distintos periodos durante la amortiguación de la componente de corriente alterna de la intensidad. En la siguiente figura se muestra la envolvente de la componente alterna de un generador típico:



- La componente subtransitoria caracteriza al generador desde el instante en que se produce la falta hasta los siguientes uno o dos ciclos. Esta es la intensidad de cortocircuito máxima proporcionada por el generador.
- La componente síncrona caracteriza la intensidad final o de estado estacionario.
- La componente transitoria caracteriza la zona intermedia.

NOTA: consultar el capítulo 2 del libro *Protective Relaying for Power Generation Systems* para una descripción detallada del comportamiento de los generadores durante faltas.

4. Circuitos de secuencia. Generadores síncr.

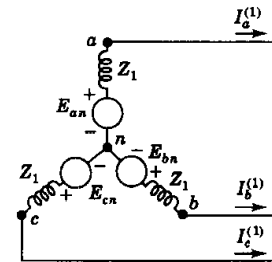
En los generadores síncronos los valores de la secuencia positiva y negativa son distintos, así como el de secuencia homopolar. La impedancia depende del sentido de giro de las intensidades de secuencia:

- **Secuencia directa:** es la que presenta la máquina en un sistema trifásico equilibrado.
- **Secuencia inversa:** la intensidades de secuencia negativa crean fmms que giran en sentido inverso en el estator → se reduce el flujo que pasa del rotor al estator por aparición de corrientes inducida en el devanado amortiguador y en el de campo.

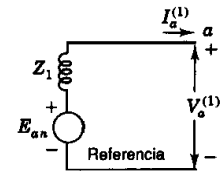
$$Z_2 \neq Z_1$$

- **Secuencia homopolar:** no se crean fmms en el entrehierro, no hay reacción de inducido (sólo hay reactancia de dispersión).

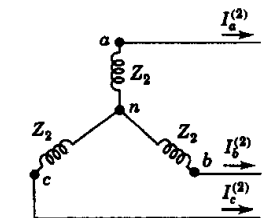
$$Z_0 < Z_1 \text{ y } Z_2$$



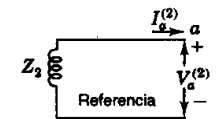
Trayectorias de la corriente de secuencia positiva



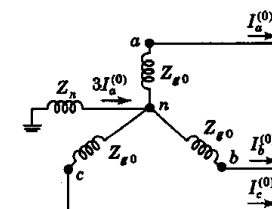
Red de secuencia positiva



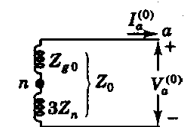
Trayectorias de la corriente de secuencia negativa



Red de secuencia negativa



Trayectorias de la corriente de secuencia cero



Red de secuencia cero

4. Circuitos de secuencia. Generadores síncr.

Para el cálculo de faltas, los valores de impedancias de secuencia los debe proporcionar el fabricante en la hoja de datos del generador ya que no es posible determinarlas a partir de los datos de la placa de características.

Para la impedancia de secuencia directa, se toma el valor de la reactancia subtransitoria directa (X_d'') de la hoja de datos, siendo habitual no considerar el valor de la resistencia.

No obstante, si se quiere calcular el valor de cresta de la corriente de cortocircuitos, se pueden tomar con suficiente precisión los siguientes valores:

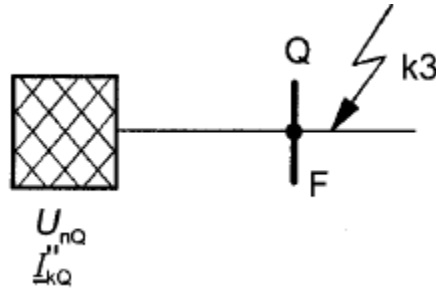
$$R=0,05 \cdot X_d'' \text{ para generadores con } U>1\text{kV y } S \geq 100\text{MVA}$$

$$R=0,07 \cdot X_d'' \text{ para generadores con } U>1\text{kV y } S < 100\text{MVA}$$

$$R=0,15 \cdot X_d'' \text{ para generadores con } U \leq 1\text{kV y } S \geq 100\text{MVA}$$

4. Circuitos de secuencia. Fuente

Si un cortocircuito trifásico, según se ilustra en la figura 6.a, es alimentado por una red de la que sólo se conoce la corriente de cortocircuito simétrica inicial I_{kQ}'' en el punto Q, entonces la impedancia equivalente Z_Q de la red (impedancia de cortocircuito de secuencia directa) en el punto de conexión Q viene dada por:



$$Z_Q = \frac{c U_{nQ}}{\sqrt{3} I_{kQ}''}$$

Si se conoce R_Q / X_Q , entonces X_Q se calculará como sigue:

$$X_Q = \frac{Z_Q}{\sqrt{1 + (R_Q / X_Q)^2}}$$

En el caso de redes de alimentación de alta tensión con tensiones nominales por encima de 35 kV alimentadas por líneas aéreas, la impedancia equivalente Z_Q se puede considerar en muchos casos como una reactancia; es decir $Z_Q = 0 + jX_Q$.

En otros casos, si no se conoce con precisión el valor de la resistencia R_Q de las redes de alimentación, se puede sustituir $R_Q = 0,1 X_Q$ donde $X_Q = 0,995 Z_Q$.

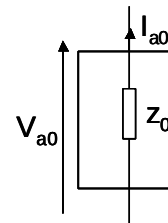
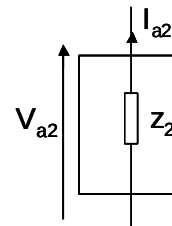
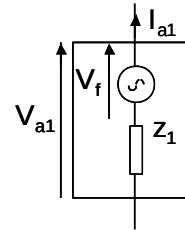
NOTA: la fuente equivalente es un dato que tiene que proporcionar la compañía eléctrica, teniendo que proporcionar dato de falta trifásica y monofásica. A veces los proporciona como potencia en lugar de intensidad, y también suele dar valores máximos y mínimos. En cuanto a la monofásica, debe decir también cómo está puesta a tierra la fuente.

5. Redes de secuencia

A partir de los circuitos de secuencia de cada elemento del sistema se construyen las redes de secuencia del sistema respetando la topología.

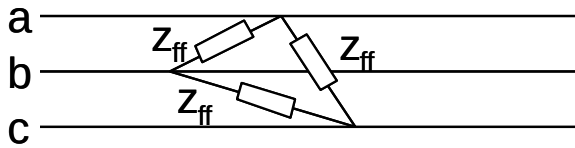
Las redes de secuencia del sistema muestran las trayectorias de la intensidad de cada secuencia en una fase del sistema real:

- **Red de secuencia positiva:** representa el sistema funcionando en situación equilibrada (monofásico equivalente).
- **Red de secuencia negativa:** se obtiene eliminando las fuentes de la red de secuencia positiva y sustituyendo los valores de Z_1 por los de Z_2 .
- **Red de secuencia homopolar:** es similar a la de secuencia negativa pero sustituyendo los valores de Z_2 por los de Z_0 .

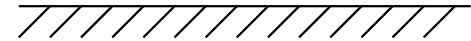
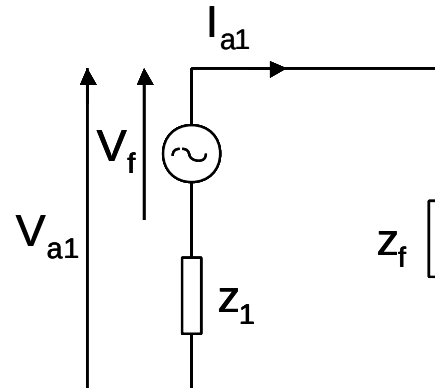
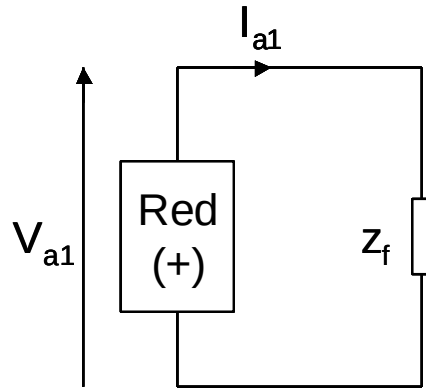
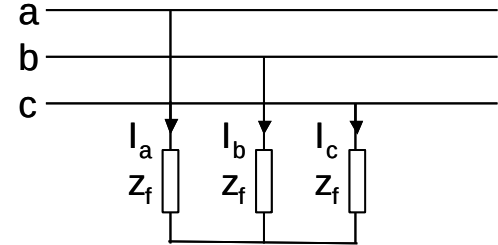


6.1 Falta trifásica

Sistema equilibrado $\longrightarrow$ Solo red de secuencia directa:



$$Z_f = \frac{Z_{ff}}{3}$$

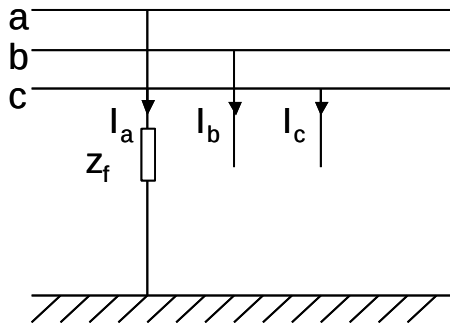


$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_f}$$

$$V_{a1} = I_{a1} \cdot Z_f$$

6.2 Falta monofásica

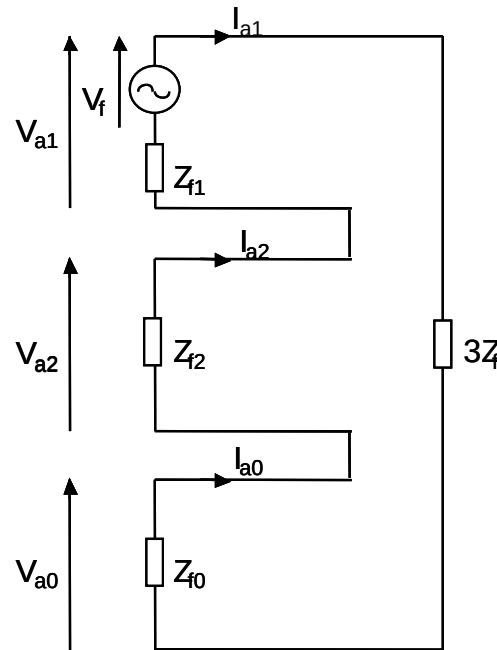
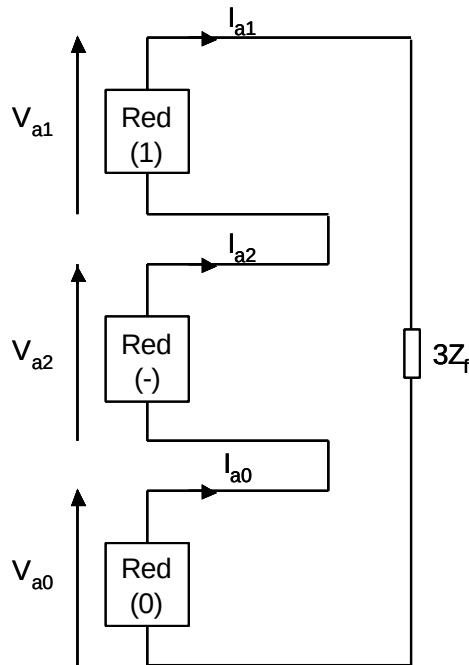
Sistema desequilibrado: existen las 3 redes y se conectan en serie



$$\begin{aligned} I_a &\neq 0 \\ I_b &= 0 \\ I_c &= 0 \end{aligned} \quad \xrightarrow{I_{abc} = A \cdot I_{012}} \quad \begin{aligned} V_a &= V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} \\ V_a &= Z_f \cdot I_a \end{aligned}$$

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = \frac{1}{3} I_a$$

$$I_a = \frac{V_{a0} + V_{a1} + V_{a2}}{Z_f}$$



$$V_{a1} = V_f - I_{a1} \cdot Z_1$$

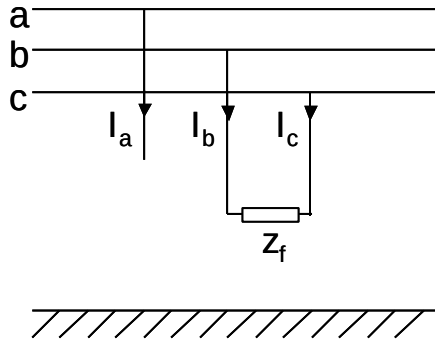
$$V_{a2} = -I_{a2} \cdot Z_2$$

$$V_{a0} = -I_{a0} \cdot Z_0$$

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_f}$$

6.3 Falta bifásica

Sistema desequilibrado: solo red directa e inversa. Se conectan en paralelo



$$I_a = 0$$

$$I_c = -I_b$$

$$I_{abc} = A \cdot I_{012}$$

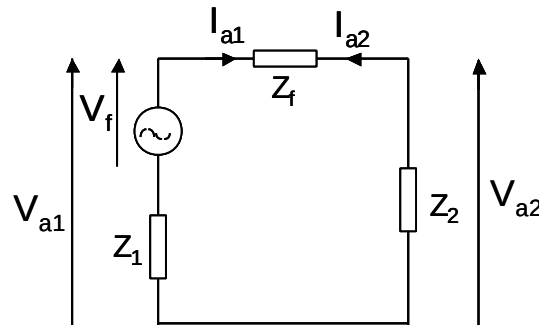
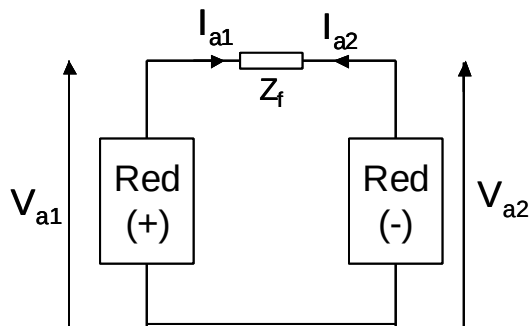
$$V_b - V_c = Z_f \cdot I_b$$

$$V_{abc} = A \cdot V_{012}$$

$$I_{a0} = 0$$

$$I_{a1} = -I_{a2}$$

$$V_{a1} - V_{a2} = Z_f \cdot I_{a1}$$



$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_f}$$

$$I_{a2} = -I_{a1}$$

$$I_{a0} = 0$$

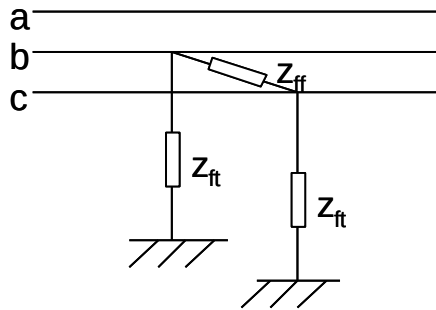
$$V_{a1} = V_f - I_{a1} \cdot Z_1$$

$$V_{a2} = -I_{a2} \cdot Z_2$$

$$V_{a0} = 0$$

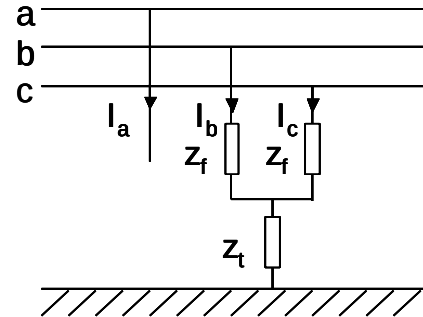
6.4 Falta bifásica a tierra

Sistema desequilibrado: existen las 3 redes. Se conectan en paralelo



$$Z_f = \frac{Z_{ff} \cdot Z_{ft}}{2Z_{ft} + Z_{ff}}$$

$$Z_t = \frac{Z_{ft}^2}{2Z_{ft} + Z_{ff}}$$



$$I_a = 0$$

$$I_{abc} = A \cdot I_{012}$$

$$I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} = 0$$

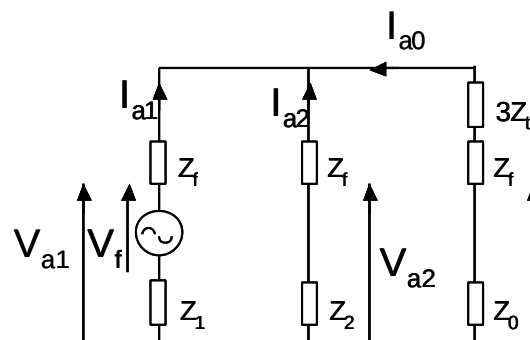
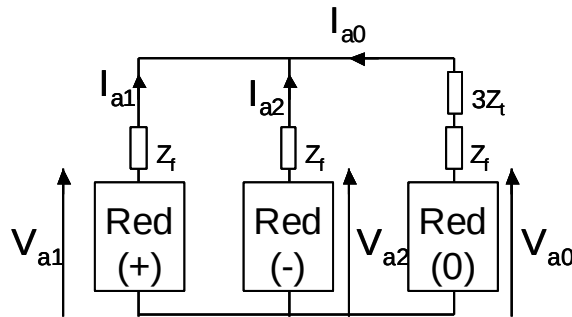
$$V_{abc} = A \cdot V_{012}$$

$$V_{a1} - Z_f \cdot I_{a1} = V_{a2} - Z_f \cdot I_{a2}$$

$$V_{a0} - I_{a0} (Z_f + 3Z_t) = V_{a2} - Z_f \cdot I_{a2}$$

$$V_b = Z_f \cdot I_b + (I_b + I_c) Z_t = I_b (Z_f + Z_t) + I_c \cdot Z_t$$

$$V_c = Z_f \cdot I_c + (I_b + I_c) Z_t = I_c (Z_f + Z_t) + I_b \cdot Z_t$$



$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_f \frac{(Z_2 + Z_f)(Z_0 + Z_f + 3Z_t)}{Z_2 + Z_0 + 2Z_f + 3Z_t}}$$

$$I_{a2} = -I_{a1} \frac{(Z_0 + Z_f + 3Z_t)}{Z_2 + Z_0 + 2Z_f + 3Z_t}$$

$$I_{a0} = -(I_{a1} + I_{a2})$$

$$V_{a1} = V_f - I_{a1} Z_1$$

$$V_{a2} = -I_{a2} Z_2$$

$$V_{a0} = -I_{a0} Z_0$$

7. Norma IEC 60.909:2001

La norma IEC 60.909:2.001 describe el método estandarizado de cálculo de corrientes de cortocircuito.

- **Ámbito de aplicación:** sistemas de corriente alterna trifásica de 50 Hz y 60 Hz hasta tensiones de 550 kV.
- **Objeto:** ser un método general y práctico que permita obtener resultados con una exactitud aceptable.
- **Ventajas:**
 - ♦ Para calcular las impedancias equivalentes solamente se necesitan los datos nominales de los equipos y la topología.
 - ♦ Sirve tanto para la fase de diseño como para sistemas ya en explotación.
- Se puede realizar el cálculo manualmente, pero existen programas que lo calculan de manera automática.

Se calculan **equivalentes de Thévenin** en el punto en el que se ha producido el cortocircuito (fuente de tensión equivalente e impedancia equivalente). Junto con este método también se emplean los métodos de **superposición** y **redes de secuencia equivalentes**.

7. Norma IEC 60.909:2001

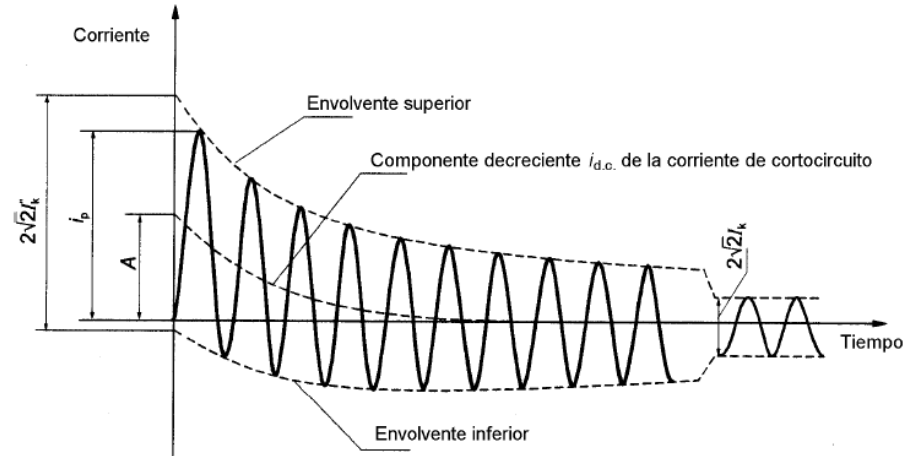
Hipótesis de cálculo

- No se produce un cambio de tipo de cortocircuito durante la duración del cortocircuito.
- No se produce ningún cambio en la configuración de la red durante la duración del cortocircuito.
- Se toman las impedancias correspondientes a la toma principal del cambiador de tomas de los transformadores.
- Se desprecian las resistencias de arco.
- Se desprecian las capacidades de las líneas, las admitancias y las cargas no rotativas, salvo en la secuencia homopolar.

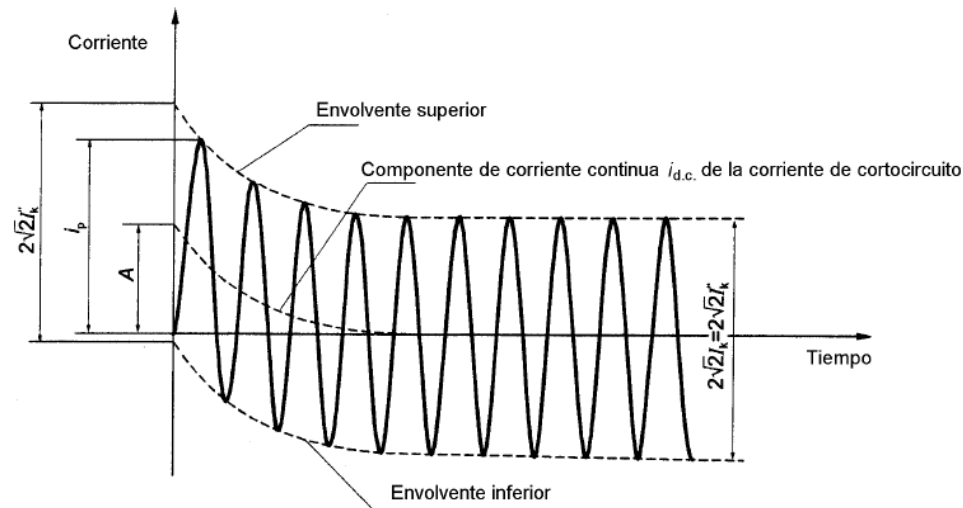
A pesar de que las hipótesis anteriores no se cumplan de manera precisa, su aplicación produce resultados con una exactitud aceptable.

7. Norma IEC 60.909:2001

Cortocircuitos cercanos a los generadores



Cortocircuitos alejados de los generadores



7. Norma IEC 60.909:2001

Definiciones (I)

- **Corriente de cortocircuito prevista (disponible):** corriente que circularía si el cortocircuito fuera reemplazado por una conexión ideal de impedancia despreciable sin ningún cambio en la alimentación.
- **Corriente de cortocircuito simétrica inicial I_k'' :** valor eficaz de la componente simétrica de corriente alterna de una corriente de cortocircuito prevista, siendo despreciada la componente de corriente continua, si existe.
- **Componente decreciente (aperiódica) $i_{d.c.}$ de la corriente de cortocircuito:** valor medio entre las envolventes superior e inferior de una corriente de cortocircuito decreciente desde un valor inicial hasta cero. En las redes no malladas se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$i_{dc} = \sqrt{2} \cdot I_k'' \cdot e^{-2 \cdot \pi \cdot f \cdot t \cdot \frac{R}{X}}$$

- **Valor de cresta de la corriente de cortocircuito i_p :** valor instantáneo máximo posible de la corriente de cortocircuito prevista (disponible). En las redes no malladas se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$i_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_k'' \text{ donde } \kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{R}{X}}$$

7. Norma IEC 60.909:2001

Definiciones (II)

- **Corriente de cortocircuito simétrica de corte I_b :** valor eficaz de un ciclo integral de la componente simétrica de corriente alterna de la corriente de cortocircuito prevista, en el instante de separación de los contactos del primer polo que abre de un dispositivo de interrupción.
- **Corriente de cortocircuito permanente I_k :** valor eficaz de la corriente de cortocircuito que permanece después del decrecimiento del fenómeno transitorio.
- **Corriente de cortocircuito térmica equivalente I_{th} :** valor eficaz de una corriente que tiene el mismo efecto térmico y la misma duración que la corriente real de cortocircuito, la cual puede contener una componente de corriente continua y puede disminuir en el tiempo.

$$\int_0^{T_k} i^2 \cdot dt = I_k''^2 \cdot (m + n) \cdot T_k = I_{th}^2 \cdot T_k \Rightarrow I_{th} = I_k'' \cdot \sqrt{m + n}$$

7. Norma IEC 60.909:2001

Generalmente, se calculan **dos** corrientes de cortocircuito:

Corriente de cortocircuito máxima: para seleccionar las características nominales de la aparamenta (i_p e I_{th}).

Hipótesis de cálculo:

- A la tensión nominal se le aplica un factor $c_{m\acute{a}x}$ (1,05 en B.T. y 1,10 en A.T.)
- Configuración que produce la mayor corriente de cortocircuito (fuentes de alimentación).
- Z_{cc} mínima.
- Tener en cuenta los motores.
- Cálculo de resistencia de líneas y cables a 20°C.

Corriente de cortocircuito mínima: para ajustar los relés de protección (I_b).

Hipótesis de cálculo:

- A la tensión nominal se le aplica un factor $c_{m\acute{a}x}$ (0,95 en B.T. y 1,00 en A.T.)
- Configuración que produce la menor corriente de cortocircuito (fuentes de alimentación).
- Z_{cc} máxima.
- No tener en cuenta los motores.
- Cálculo de resistencia de líneas y cables a temperatura máxima (250°C para XLPE).