

CÁLCULO DE CORTOCIRCUITOS SIMÉTRICOS EN REDES ELÉCTRICAS

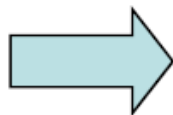
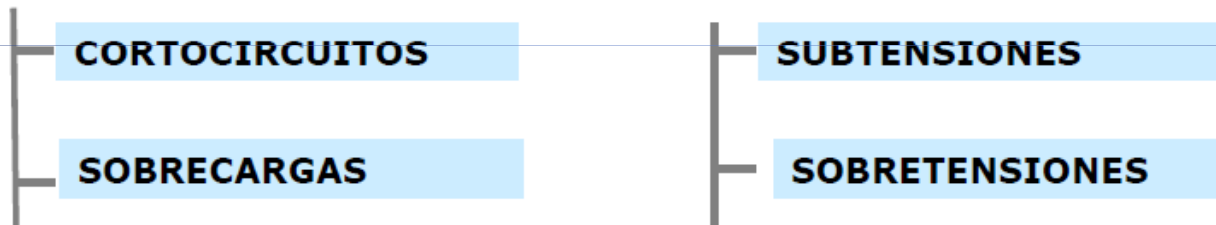
I. INTRODUCCIÓN

INCIDENTE

DEFINICIÓN

Todo cambio **NO DESEADO** en la red, que reduce la calidad en el suministro eléctrico

TIPOS



SISTEMA DE PROTECCIÓN

Conjunto de instrumentos necesarios para la detección y eliminación de los incidentes en los sistemas de energía eléctrica.

CÁLCULO DE CORTOCIRCUITOS SIMÉTRICOS EN REDES ELÉCTRICAS

CORTOCIRCUITO

DEFINICIÓN

Se tiene un **CORTOCIRCUITO** cuando **dos o más puntos** de una red, que en condiciones normales de funcionamiento se encuentran a diferente potencial, **se ponen en contacto** a través de una pequeña o nula impedancia

Se produce al fallar el **AISLAMIENTO** correspondiente

CAUSAS

Pérdida de propiedades aislantes del medio: envejecimiento, calentamiento, contaminación,...

Sobretensiones: de origen interno o externo (atmosférico)

Efectos mecánicos: roturas, deformaciones,...

CÁLCULO DE CORTOCIRCUITOS SIMÉTRICOS EN REDES ELÉCTRICAS

EFFECTOS

Calentamiento de conductores. En función del valor y de la duración de la corriente de cortocircuito, pueden causar el deterioro irreversible

Esfuerzos electrodinámicos. Posibilidad de roturas y desplazamientos bruscos de elementos que pueden ocasionar nuevas faltas

Variaciones de tensión. Caídas en las fases involucradas y eventuales elevaciones en las otras fases.

TIPOS

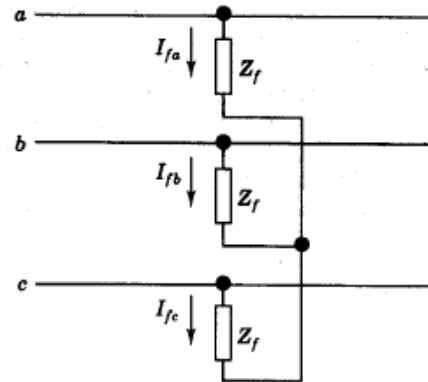
1. SIMÉTRICOS (también llamados **EQUILIBRADOS** o **TRIFÁSICOS**). Las tres fases están involucradas simultáneamente y en el mismo punto. El circuito resultante es equilibrado)

2. ASIMÉTRICOS (también llamados **DESQUILIBRADOS**). No todas las fases están involucradas por igual. El circuito resultante resulta desequilibrado y su estudio requiere herramientas matemáticas para poder trabajar con modelos trifásicos equilibrados:

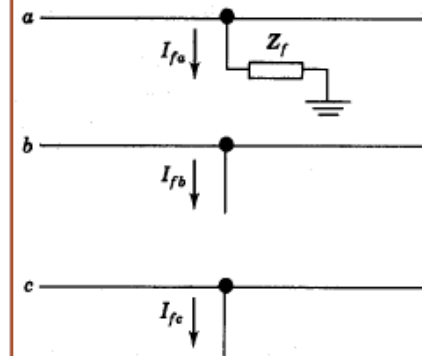
(Componentes simétricas)

CÁLCULO DE CORTOCIRCUITOS SIMÉTRICOS EN REDES ELÉCTRICAS

**Fallos
SIMÉTRICOS
(3%)**

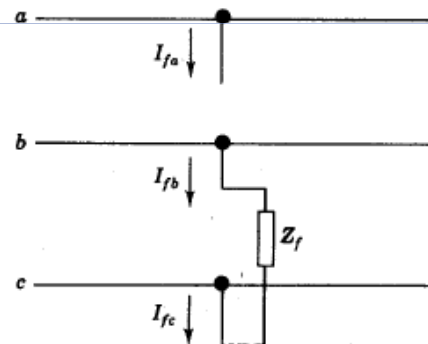


**Fallo
ASIMÉTRICO
LÍNEA-TIERRA
(78%)**



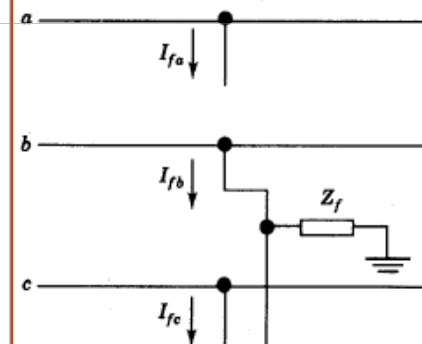
La impedancia de fallo, Z_f , puede ser nula

**Fallo
ASIMÉTRICO
LÍNEA-LÍNEA**



**Fallo
ASIMÉTRICO
DOBLE LÍNEA-
TIERRA**

(19 %)



Primeramente se estudiarán los cortocircuitos en MÁQUINAS SÍNCRONAS y después en cualquier punto de una red eléctrica

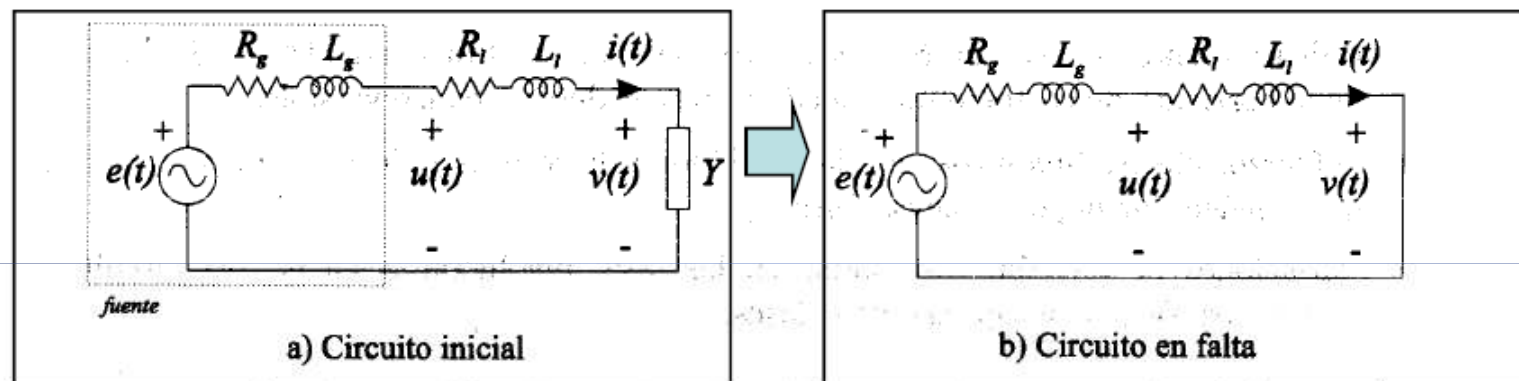
CÁLCULO DE CORTOCIRCUITOS SIMÉTRICOS EN REDES ELÉCTRICAS

II. CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO EN LAS MÁQUINAS SÍNCRONAS

PLANTEAMIENTO

TRANSITORIO RL SERIE

El comportamiento de una red eléctrica (*circuito a*) cuando sufre un cortocircuito es SIMILAR al régimen transitorio de un circuito RL SERIE (*circuito b*)



$e(t) = \sqrt{2}E \cdot \text{sen}(\omega t + \theta)$ → El desfase de la fuente equivale al momento de producirse el corto

Cálculo de la corriente de cortocircuito:

$$e(t) = Ri + L \frac{di}{dt} \Rightarrow$$

$$i(t) = K e^{-\frac{R}{L}t} + i_{\infty}(t)$$

$$i(t) = \left(i(0) - \sqrt{2}I_{cc} \text{sen}(\theta - \varphi) \right) e^{-\frac{R}{L}t} + \sqrt{2}I_{cc} \text{sen}(\omega t + \theta - \varphi)$$

$$I_{\infty} = \frac{E}{\sqrt{R^2 + (L\omega)^2}}$$

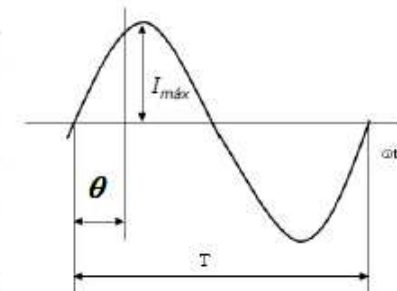
$$\text{tg}(\varphi) = \frac{L\omega}{R} = \frac{X}{R}$$

$$i(0) = \sqrt{2}I_0 \text{sen}(\theta - \varphi_0)$$

$$I_0 = \frac{E}{\sqrt{(R + R_c)^2 + (L\omega + X_c)^2}}$$

$$\text{tg}(\varphi_0) = \frac{L\omega + X_c}{R + R_c}$$

$$R_c + jX_c = \frac{1}{Y}$$



CÁLCULO DE CORTOCIRCUITOS SIMÉTRICOS EN REDES ELÉCTRICAS

(...)

$$i(t) = -\sqrt{2}I_{cc}\text{sen}(\theta - \varphi)e^{-\frac{R}{L}t} + \sqrt{2}I_{cc}\text{sen}(\omega t + \theta - \varphi)$$

VALOR MÍNIMO

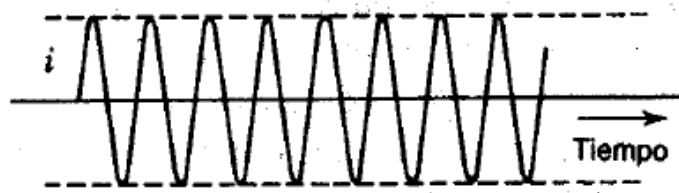
El mínimo valor aparece cuando:

$$\theta - \varphi = 0^\circ \text{ y } \omega t = \pi$$



NO HAY TRANSITORIO

$$I_{\min} = \sqrt{2}I_{cc}$$



a)

VALOR MÁXIMO

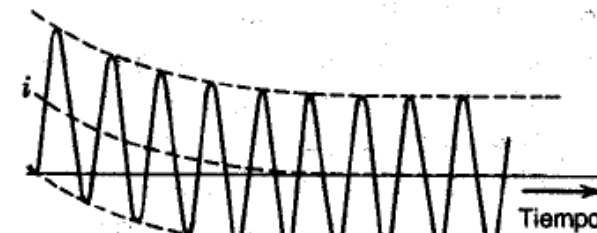
$$R = 0, \theta - \varphi = -90^\circ \text{ y } \omega t = \pi. \Rightarrow 2\sqrt{2}I_{cc}$$

Pero en redes inductivas, $L\omega > R$, y los máximos valores aparecen cuando:

$$\theta = 0^\circ \text{ y } \omega t = \pi, 3\pi, 5\pi, \dots$$

$$i_{\max}(t) = \sqrt{2}I_{cc}\text{sen}(\varphi) \left(1 + e^{-\frac{R}{X}\omega t}\right)$$

$$I_{\text{pico}} = \sqrt{2}I_{cc}\text{sen}(\varphi) \left(1 + e^{-\frac{R}{X}\pi}\right)$$



b)

$$\text{tg}(\varphi) = \frac{L\omega}{R} = \frac{X}{R}$$

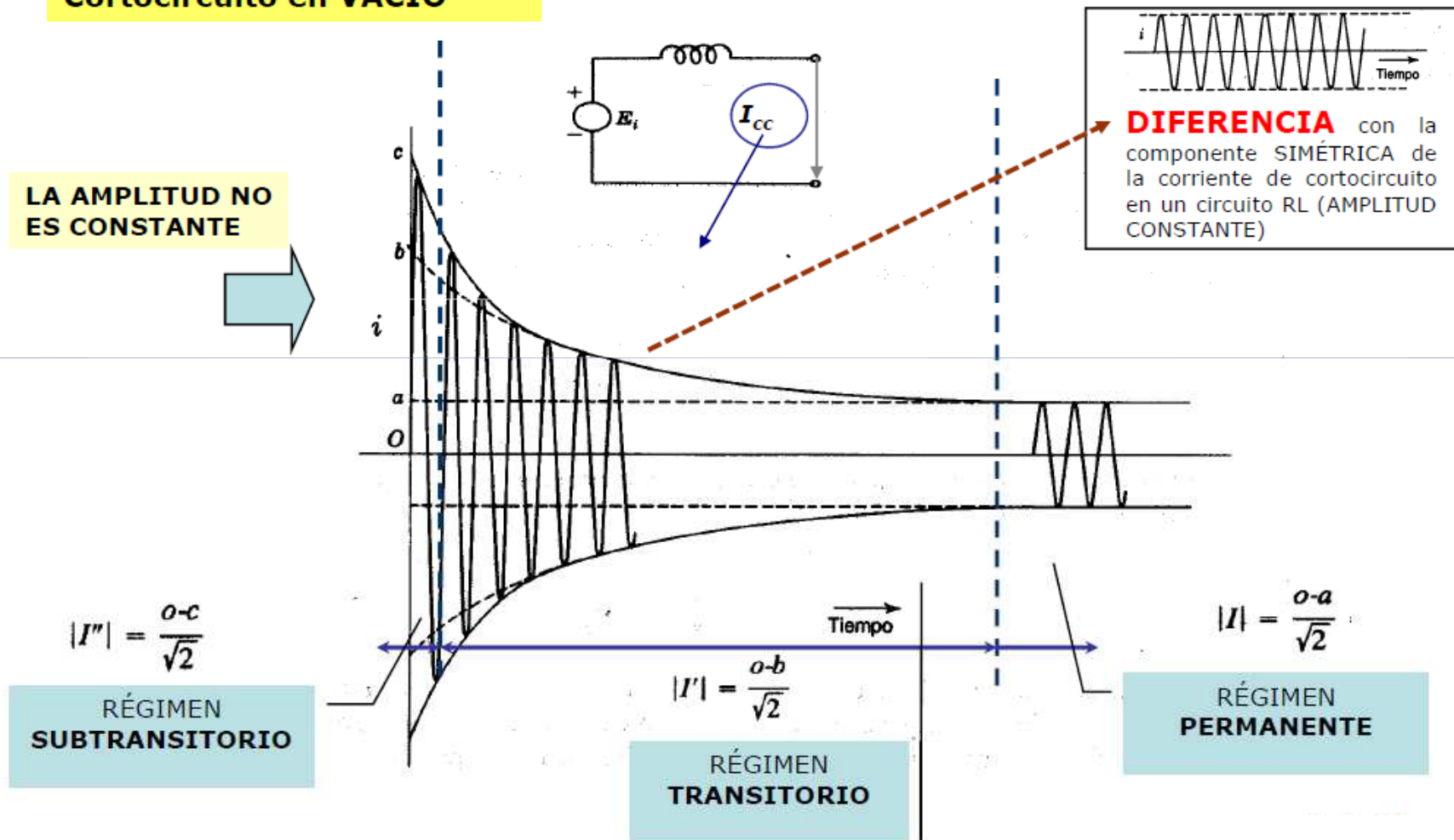
La magnitud de la corriente de cortocircuito tiene una componente **CONTINUA DECRECIENTE**, de característica **ALEATORIA** (depende de θ)

CÁLCULO DE CORTOCIRCUITOS SIMÉTRICOS EN REDES ELÉCTRICAS

LA MÁQUINA SÍNCRONA EN CORTOCIRCUITO

Cortocircuito en VACÍO

LA AMPLITUD NO ES CONSTANTE



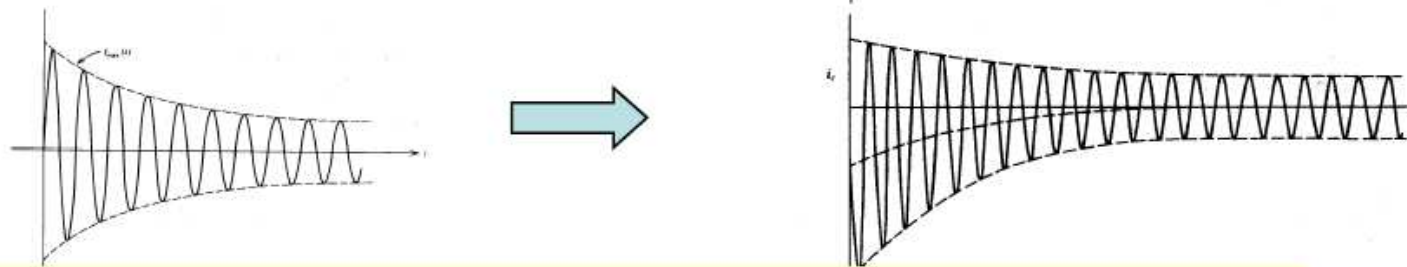
CÁLCULO DE CORTOCIRCUITOS SIMÉTRICOS EN REDES ELÉCTRICAS

Características de la CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO

La corriente **TOTAL** que existe en un cortocircuito de una máquina síncrona tiene dos componentes

1. Una componente **SENOIDAL** (anterior gráfica) de amplitud variable debido a los fenómenos electromagnéticos y que existe **SIEMPRE**
2. Una componente **CONTINUA** que decrece con el tiempo (exponencial), cuya magnitud depende del momento del cortocircuito. Puede no existir, al igual que en el circuito RL o tener un valor máximo. Tiene característica **ALEATORIA**

A la anterior gráfica, que representa sólo la componente SENOIDAL de la corriente, debería superponérsele la componente continua, para obtener la total.

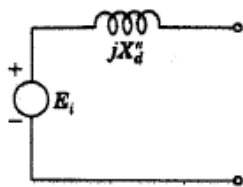


Los métodos de cálculo que estudiaremos determinan la componente **SIMÉTRICA** (SENOIDAL) de la corriente (subtransitoria, transitoria o permanente) de cortocircuito

CÁLCULO DE CORTOCIRCUITOS SIMÉTRICOS EN REDES ELÉCTRICAS

REACTANCIAS DE LA MÁQUINA SÍNCRONA

X''_d : REACTANCIA **SUBTRANSITORIA** DIRECTA



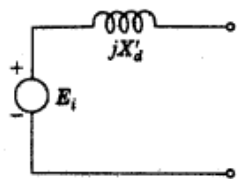
$$|I''| = \frac{o-c}{\sqrt{2}} = \frac{|E_i|}{X''_d}$$



Corriente SUBTRANSITORIA (o INICIAL SIMÉTRICA) : Es el valor eficaz de la componente alterna de la corriente que hay inmediatamente después de producirse el fallo.

Corresponde al régimen **SUBTRANSITORIO**

X'_d : REACTANCIA **TRANSITORIA** DIRECTA



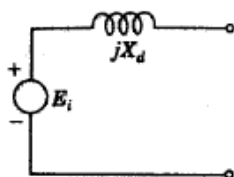
$$|I'| = \frac{o-b}{\sqrt{2}} = \frac{|E_i|}{X'_d}$$



Corriente TRANSITORIA: Es el valor eficaz de la corriente de cortocircuito, transcurridos los primeros ciclos.

Corresponde al régimen **TRANSITORIO**

X_d : REACTANCIA **SÍNCRONA** DIRECTA



$$|I| = \frac{o-a}{\sqrt{2}} = \frac{|E_i|}{X_d}$$



Corriente PERMANENTE DE CORTOCIRCUITO: Es el valor eficaz de la corriente de cortocircuito en régimen permanente. Es la que existiría en caso de no aislar el fallo.

Corresponde al régimen **PERMANENTE**

CÁLCULO DE CORTOCIRCUITOS SIMÉTRICOS EN REDES ELÉCTRICAS

III. CÁLCULO DE CORTOCIRCUITOS SIMÉTRICOS

EMPLEO de los tipos de reactancias

Cálculo de corriente inicial	Capacidad de interrupción de interruptores	Estudios de estabilidad
X''_d en GENERADORES X''_d en MOTORES	X''_d en GENERADORES X'_d en MOTORES	X'_d en GENERADORES X'_d en MOTORES

SIMPLIFICACIONES del modelo

Se **ignora el circuito magnetizante** de los transformadores

Se **desprecia la admitancia paralelo** de las líneas

Se utilizan técnicas de análisis de circuitos en **régimen permanente senoidal** para determinar el valor eficaz de la corriente . La componente en continua de las corrientes se considera con **factores de corrección**.

Se suele **despreciar la corriente previa al fallo**, lo que equivale a considerar que todas las fuentes tienen la misma tensión ($1/0^\circ$). El efecto de la corriente de carga sobre la de cortocircuito se suele determinar usando EL PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN

CÁLCULO DE CORTOCIRCUITOS SIMÉTRICOS EN REDES ELÉCTRICAS

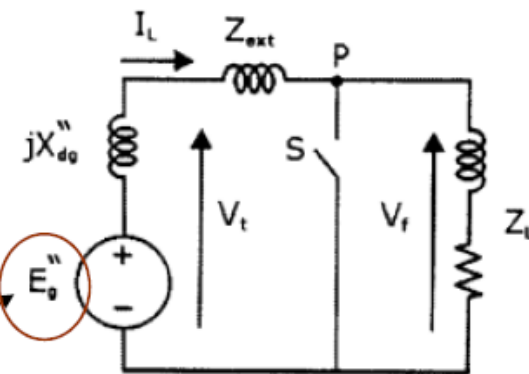
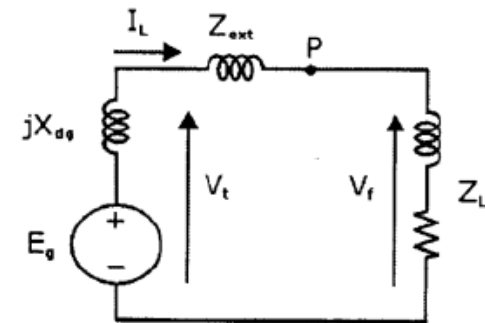
MÉTODO DE LAS TENSIONES INTERNAS

FUNDAMENTO

Queremos estudiar un cortocircuito en un generador síncrono que alimenta una carga.

El modelo que nos lleve a calcular la corriente subtransitoria $\mathbf{I}''$ (o transitoria, $\mathbf{I}'$) debe incluir la reactancia subtransitoria, $\mathbf{X}_g''$ (o transitoria, $\mathbf{X}_g'$), pero no la síncrona. Además debe representar la situación PREVIA AL FALLO, con la corriente de carga, $\mathbf{I}_L$

➡ **SOLUCIÓN:** La única posibilidad de reproducir en un solo modelo la situación PREVIA al fallo (que incluya la **corriente de carga**) y la situación POSTERIOR al fallo (que incluya la **reactancia subtransitoria**) es modificando la fuerza electromotriz de la máquina.



CÁLCULO DE CORTOCIRCUITOS SIMÉTRICOS EN REDES ELÉCTRICAS

DEFINICIÓN

Las **TENSIONES INTERNAS**, de las máquina son valores **FICTICIOS** de la fem, que permiten construir un modelo útil para representar al generador **INMEDIATAMENTE ANTES** e **INMEDIATAMENTE DESPUÉS** del fallo

$$E_g'' = V_t + jX_{dg}'' I_L = V_f + (Z_{ext} + X_{dg}'') I_L \quad (\text{TENSIÓN INTERNA SUBTRANSITORIA})$$

$$E_g' = V_t + jX_{dg}' I_L = V_f + (Z_{ext} + X_{dg}') I_L \quad (\text{TENSIÓN INTERNA TRANSITORIA})$$

OBSERVACIONES

El valor de las tensiones internas depende de las condiciones de funcionamiento de la máquina antes del fallo, es decir de I_L

Para calcular las corrientes de fallo (subtransitoria y transitoria), es necesario determinar **ANTES** las tensiones internas (subtransitoria y transitoria, respectivamente)

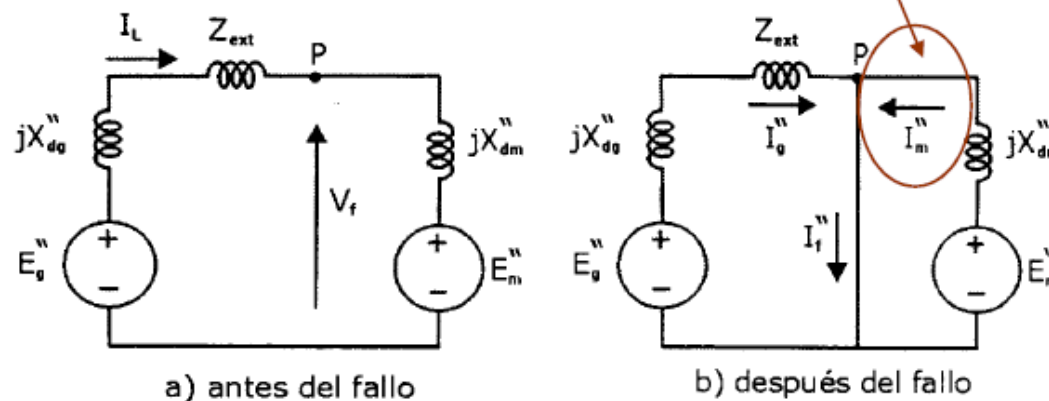
CÁLCULO DE CORTOCIRCUITOS SIMÉTRICOS EN REDES ELÉCTRICAS

Comportamiento de los MOTORES SÍNCRONOS en un cortocircuito

Los motores síncronos tienen reactancias del mismo tipo que los generadores

Cuando sufren un cortocircuito dejan de recibir energía de la red, pero debido a la inercia de su rotor, se mantiene girando por un corto periodo de tiempo en presencia de un campo electromagnético, todavía existente.

CONCLUSIÓN: La tensión interna hace que contribuyan al cortocircuito como si fueran generadores



$$E''_m = V_f - jX''_{dm} I_L$$

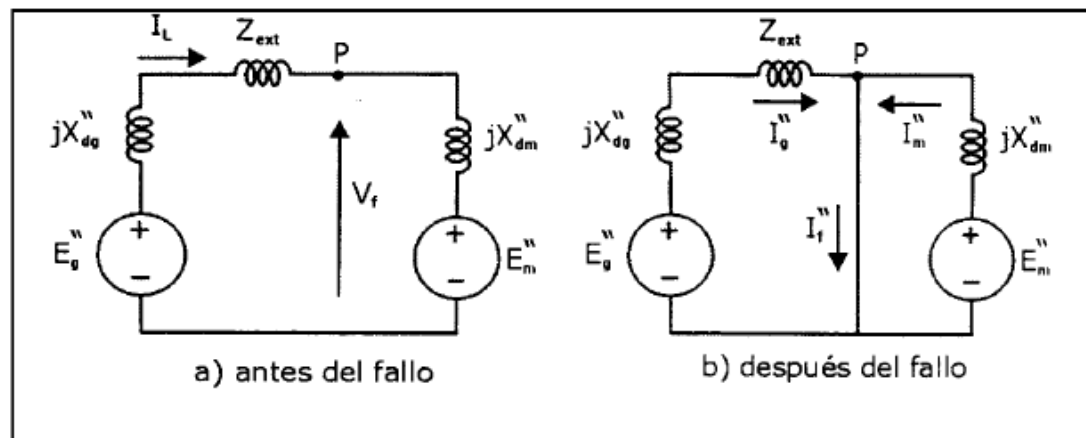
$$E'_m = V_f - jX'_{dm} I_L$$

CÁLCULO DE CORTOCIRCUITOS SIMÉTRICOS EN REDES ELÉCTRICAS

MÉTODO DEL EQUIVALENTE THEVENIN

PROCEDIMIENTO

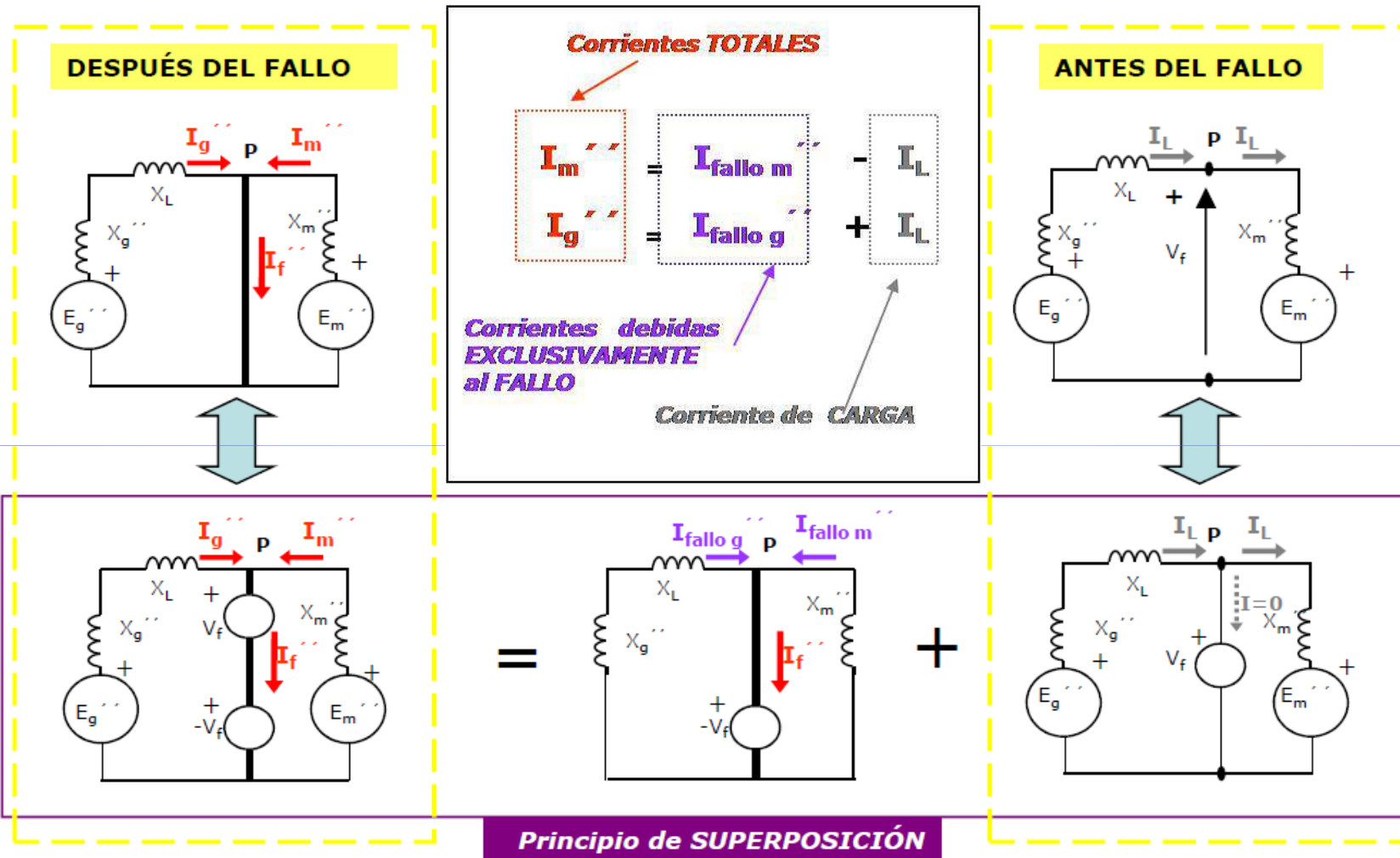
1. Se aplica el **TEOREMA DE THEVENIN** en el punto donde se produce el cortocircuito.
2. Se simula el fallo cortocircuitando el equivalente y obteniendo la **corriente de fallo total** I_f''
3. Se aplica el principio de **SUPERPOSICIÓN** para tener en cuenta el efecto del cortocircuito y el de la carga sobre la anterior corriente



Nota: Se emplean las **tensiones internas** de las máquinas para poder estudiar con un mismo modelo, tanto la situación PREVIA al fallo, como la inmediatamente POSTERIOR.

No obstante como se verá más adelante, con el método del equivalente de Thevenin no hace falta conocer su valor numérico para calcular las corrientes de fallo.

CÁLCULO DE CORTOCIRCUITOS SIMÉTRICOS EN REDES ELÉCTRICAS

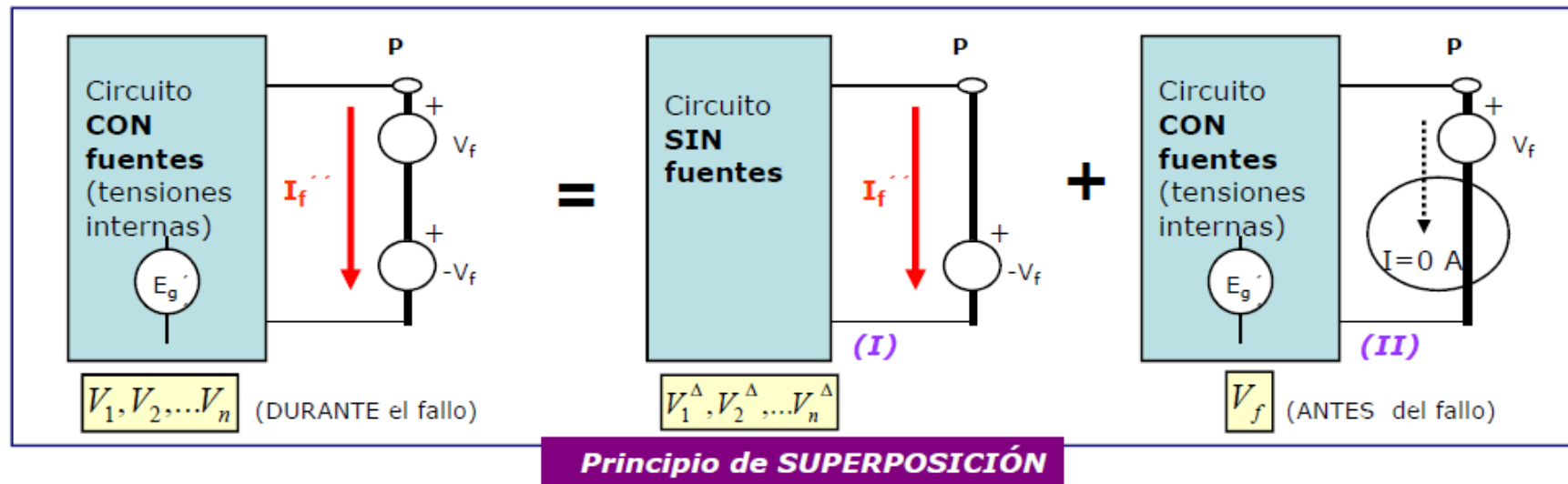


CÁLCULO DE CORTOCIRCUITOS SIMÉTRICOS EN REDES ELÉCTRICAS

MÉTODO DE LA MATRIZ DE IMPEDANCIAS DE NUDO

PROCEDIMIENTO

1. Es un método muy útil para estudiar fallos en sistemas con muchos nudos. Se pueden determinar, fácilmente, las corrientes en **TODAS** las ramas del circuito.
2. Se basa en el MÉTODO DE LAS **TENSIONES DE NUDO**
3. Se parte del **nudo "i"** (punto **P**) donde se va a producir el fallo y de la TENSIÓN PREVIA (V_f). Se simula el fallo cortocircuitando la red en (**P**)
4. Se calcula la corriente de fallo aplicando el principio de **SUPERPOSICIÓN**:



CÁLCULO DE CORTOCIRCUITOS SIMÉTRICOS EN REDES ELÉCTRICAS

...

5. En el circuito sin fuentes (I), se calculan las tensiones de los nudos debidas **exclusivamente** a la corriente de fallo:

$$V_1^\Delta, V_2^\Delta, \dots, V_n^\Delta$$

Matriz de **CORRIENTES**
(entrantes al nudo)

Matriz de
TENSIONES de
nudo

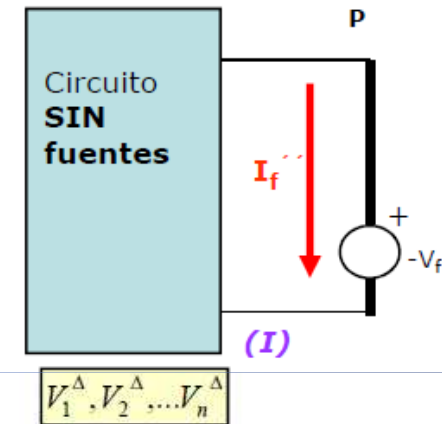
$$[I]_B = [Y]_B \cdot [V]_B$$

Matriz de **ADMITANCIAS** de nudo

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \dots \\ -I_f \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}_B = \begin{bmatrix} y_{11} & \dots & y_{1i} & \dots & y_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{i1} & \dots & y_{ii} & \dots & y_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{n1} & \dots & y_{ni} & \dots & y_{nn} \end{bmatrix}_B \cdot \begin{bmatrix} V_1^\Delta \\ \dots \\ -V_f \\ \dots \\ V_n^\Delta \end{bmatrix}_B$$

$$[V]_B = [Y]_B^{-1} \cdot [I]_B = [Z]_B \cdot [I]_B$$

Matriz de **IMPEDANCIAS** de nudo



CÁLCULO DE CORTOCIRCUITOS SIMÉTRICOS EN REDES ELÉCTRICAS

...

$$[V]_B = [Z]_B \cdot [I]_B \Rightarrow \begin{bmatrix} V_1^\Delta \\ \dots \\ -V_f \\ \dots \\ V_n^\Delta \end{bmatrix}_B = \begin{bmatrix} z_{11} & \dots & z_{1i} & \dots & z_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ z_{i1} & \dots & z_{ii} & \dots & z_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ z_{n1} & \dots & z_{ni} & \dots & z_{nn} \end{bmatrix}_B \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \dots \\ -I_f'' \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}_B$$

Como:

Matriz de **IMPEDANCIAS** de nudo

$$-V_f = -z_{ii} \cdot I_f'' \Rightarrow I_f'' = \frac{V_f}{z_{ii}} \Rightarrow$$

Tensiones en los nudos debidas **exclusivamente** al fallo

$$V_1^\Delta = -z_{1i} \cdot I_f'' = -\frac{z_{1i}}{z_{ii}} \cdot V_f$$

.....

$$V_i^\Delta = -z_{ii} \cdot I_f'' = -\frac{z_{ii}}{z_{ii}} \cdot V_f = -V_f$$

.....

$$V_n^\Delta = -z_{ni} \cdot I_f'' = -\frac{z_{ni}}{z_{ii}} \cdot V_f$$

CÁLCULO DE CORTOCIRCUITOS SIMÉTRICOS EN REDES ELÉCTRICAS

...

6. Se suman las tensiones de los nudos del circuito II, que son justamente iguales a V_f , al no considerarse corriente de carga previa al cortocircuito:

$$V_1 = V_f + V_1^{\Delta} = V_f - I_f'' \cdot z_{1i}$$

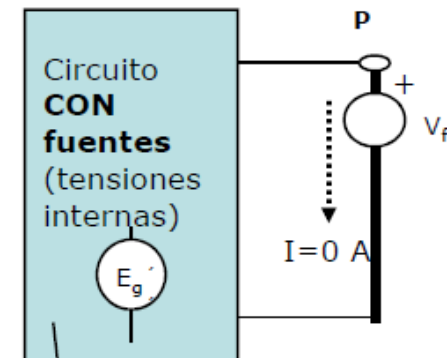
.....

$$V_i = V_f + V_i^{\Delta} = V_f - V_f = 0$$

.....

$$V_n = V_f + V_n^{\Delta} = V_f - I_f'' \cdot z_{ni}$$

El fallo es en el nudo "i"



(II)

V_f en **TODOS** los nudos

7. El resto de corrientes se calculan a partir de las tensiones y las impedancias correspondientes a las ramas. Ej:

iOjo! ($Z_{12} \neq z_{12}$)

$$I_{12}'' = \frac{V_1 - V_2}{Z_{12}}$$

Impedancia SERIE
de la línea 1-2

CÁLCULO DE CORTOCIRCUITOS SIMÉTRICOS EN REDES ELÉCTRICAS

III. CRITERIOS BÁSICOS DE SELECCIÓN DE INTERRUPTORES

DEFINICIÓN

El cálculo de las corrientes de cortocircuito de una red eléctrica es la base del diseño de su sistema de protección y de la selección de los correspondientes interruptores. Necesita algunos datos proporcionados por la **compañía suministradora**, como la **CAPACIDAD DE CORTOCIRCUITO**.

CAPACIDAD DE CORTOCIRCUITO

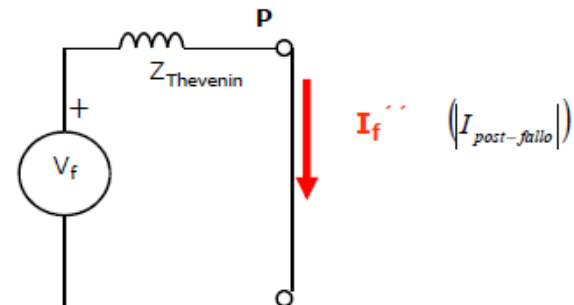
$$|ccc| = |V_{pre-fallo}| \cdot |I_{post-fallo}| (p.u.)$$

$$|ccc| = \sqrt{3} |V_{pre-fallo} (kV)| \cdot |I_{post-fallo} (kA)| (MVA)$$

Si... $|V_{pre-fallo}| = 1(p.u.) \Rightarrow |ccc| = |I_{post-fallo}| (p.u.)$

Por otra parte: $|I_{post-fallo}| = \frac{V_f}{Z_{Thevenin}}$

$$Z_{Thevenin} = \frac{1}{|ccc|}$$



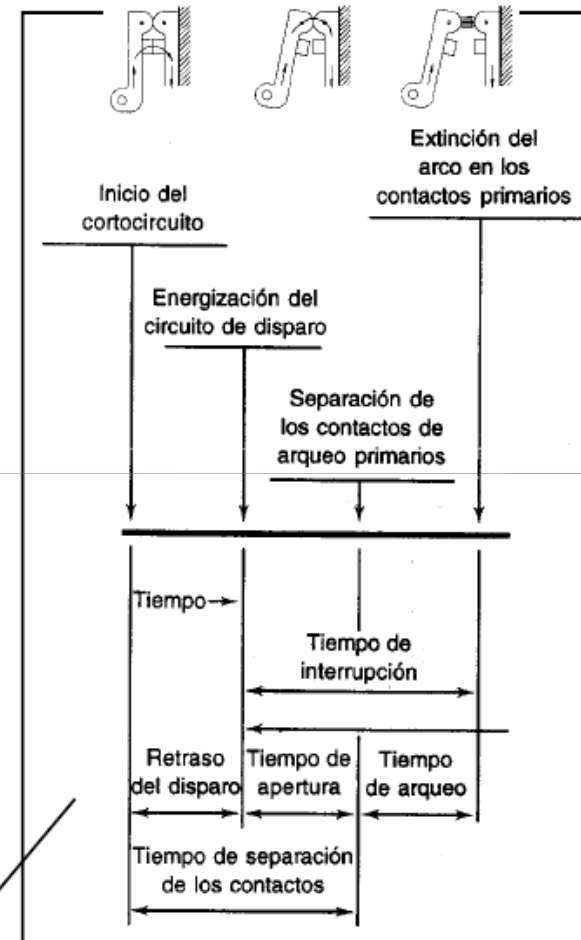
CÁLCULO DE CORTOCIRCUITOS SIMÉTRICOS EN REDES ELÉCTRICAS

OBSERVACIONES

1. Z_{thevenin} es reactiva a efectos prácticos
2. Los MVA de cortocircuito en caso de fallo perfecto son de naturaleza "reactiva" (*)
3. La magnitud de Z_{thevenin} tiene un valor mínimo inmediatamente después del fallo y luego crece
4. La "RIGIDEZ" de un nudo (o barra) **es directamente proporcional a su capacidad de cortocircuito**. Cuanto mayor sea ésta, menor es la impedancia equivalente al resto del sistema, visto desde la barra en cuestión y en consecuencia, mayor la capacidad de esta barra para mantener su tensión frente a un cortocircuito en otro punto de la red.

(*) Quiere decir que la corriente de cortocircuito está en cuadratura con la tensión pre-fallo

Apertura de un interruptor



CÁLCULO DE CORTOCIRCUITOS SIMÉTRICOS EN REDES ELÉCTRICAS

...

5. La capacidad de cortocircuito es un dato adecuado para determinar los interruptores, ya que éstos han de ser **capaces de soportar la corriente de cortocircuito** (*corriente post-fallo*) antes de que abran y también **soportar la tensión recuperada entre sus polos, una vez abiertos: 1 pu** (*tensión pre-fallo*) .(*)
6. Un NUDO INFINITO (o barra infinita) es aquel que tiene una capacidad de cortocircuito infinita, o sea, $Z_{\text{thevenin}}=0$. Mantendrá su tensión constante (salvo un fallo en el propio nudo)
7. En sistemas de ALTA TENSIÓN, la capacidad de cortocircuito puede llegar a ser de 5000 MVA. En núcleos urbanos alcanza los 500 MVA (referencia para cálculo de instalaciones)

(*) Es lógico dimensionar el interruptor para estas dos magnitudes, cuyo producto es, precisamente la capacidad de cortocircuito

CÁLCULO DE CORTOCIRCUITOS SIMÉTRICOS EN REDES ELÉCTRICAS

Corriente INSTANTÁNEA

DEFINICIÓN

1. En los cálculos anteriores, no se ha considerado la componente continua de la corriente de cortocircuito, sino sólo la CORRIENTE SIMÉTRICA INICIAL (ALTERNA)
2. La **CORRIENTE INSTANTÁNEA** es la suma de la componente en continua y la corriente simétrica inicial, calculada con las reactancias subtransitorias. El interruptor tiene que estar diseñado para **soportar** el valor máximo de esta corriente, ya que al darse en los primeros ciclos, todavía está cerrado.
3. Se tiene en cuenta mediante la aplicación de factores de corrección que, según la normativa, depende del nivel de tensión:

$$I_{instantánea} = I_{simétrica} \cdot \begin{cases} \times 1,6 & V_f \geq 5kV \\ \times 1,4 & V_f < 5kV \end{cases}$$

Calculada con las reactancias
**SUBTRANSITORIAS en generadores
y motores**

CÁLCULO DE CORTOCIRCUITOS SIMÉTRICOS EN REDES ELÉCTRICAS

Corriente de INTERRUPCIÓN

DEFINICIÓN

1. La **CORRIENTE de INTERRUPCIÓN** es la que realmente interrumpe el interruptor. No coincide con la instantánea porque los interruptores tienen un tiempo de apertura. Es menor que la instantánea.
2. Se obtiene a partir de la corriente simétrica calculada con las reactancias subtransitorias de los generadores y transitorias de los motores (máquinas con menos inercia) y de la rapidez de los interruptores:

$$I_{\text{interrupción}} = I_{\text{simétrica}} \cdot \begin{cases} \times 1,4 & \text{Interruptores de 2 ciclos} \\ \times 1,2 & \text{Interruptores de 3 ciclos} \\ \times 1 & \text{Interruptores de 8 ciclos o más} \end{cases}$$

Calculada con las reactancias
SUBTRANSITORIAS en generadores Y
TRANSITORIA en motores