

# Cortocircuitos

Juan Alvaro Fuentes Moreno  
`juanalvaro.fuentes@upct.es`

Departamento de Ingeniería Eléctrica  
Universidad Politécnica de Cartagena

enero 2012

## Índice

---

- 1** Introducción
- 2 Efectos térmicos y dinámicos
- 3 Cortocircuitos simétricos: intensidad de choque
- 4 Fuentes de cortocircuito
- 5 Etapas de la onda de intensidad
- 6 Cálculo de cortocircuitos simétricos

## ■ Definición

- Camino conductor accidental o intencionado entre dos o más partes conductoras, que provoca entre estas partes conductoras unas diferencias de potencial nulas o muy próximas a cero

## ■ Causas:

- Pérdida de las propiedades aislantes del medio
  - Envejecimiento
  - Calentamiento
  - Contaminación
- Efectos mecánicos diversos
  - Roturas
  - Deformaciones
  - Desplazamientos

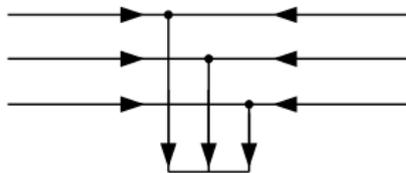
## ■ Efectos

- **Calentamiento de conductores por efecto Joule**, que en función del valor y la duración puede provocar deterioros irreversibles
- **Esfuerzos electrodinámicos**, con la posibilidad de roturas y desplazamientos que pueden dar lugar a nuevas faltas
- **Variaciones de tensión**, con caídas en las fases involucradas en el cortocircuito y eventuales elevaciones en las otras fases

- El análisis es tanto mas difícil según
  - Objetivos
  - Complejidad de la red
  - Grado de precisión
- Objeto del análisis de cortocircuitos
  - Cálculo de una instalación industrial de media y baja tensión
    - Determinar poder de corte de los interruptores
    - Límites térmicos de conductores y aparatos
    - Límites dinámicos de conductores y aparatos
      - Máxima corriente durante el cortocircuito (generalmente equilibrado)
        - Calculado en origen de la instalación y con un margen de seguridad
    - Ajuste de protecciones
      - Mínima corriente de cortocircuito (equilibrado y desequilibrado)
        - Calculado al final de la instalación y en las peores condiciones posibles
  - Ajuste de las protecciones de una red de alta tensión mallada
    - Cálculo de las intensidades en cualquier punto
    - Cálculo ante cualquier tipo de falta (equilibrado y desequilibrado)

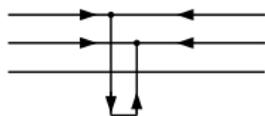
## ■ Tipos

### ■ Simétricos

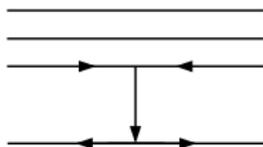


trifásico (3p)

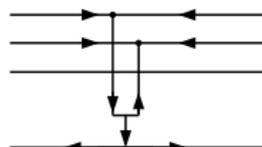
### ■ Asimétricos



2 fases (2p)



fase y tierra (pt)



2 fases y tierra (2pt)

### ■ Frecuencia

- Trifásicos: 5 %
- Dos fases y dos fases y tierra: 15 %
- Fase y tierra: 80 %

## Índice

---

- 1 Introducción
- 2 Efectos térmicos y dinámicos**
- 3 Cortocircuitos simétricos: intensidad de choque
- 4 Fuentes de cortocircuito
- 5 Etapas de la onda de intensidad
- 6 Cálculo de cortocircuitos simétricos

## ■ Térmicos

- Energía generada por efecto Joule hasta despeje de la falta:

$$W_{joule} = \int_0^{t=t_d} Ri^2(t)dt$$

- Si no es limitada puede provocar la destrucción del mismo por elevación de temperatura

## ■ Dinámicos

- Fuerzas electromagnéticas sobre conductores de las líneas y embarrados de los cuadros

$\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$

$$d\vec{F} = dq\vec{v} \wedge \vec{B}$$

$$dq\vec{v} = dq\frac{d\vec{l}}{dt} = \vec{i}dl \quad i = \frac{dq}{dt}$$

$$d\vec{F} = \vec{i} \wedge \vec{B}dl$$

Si integramos a lo largo de la longitud  $l$

$$F = \int_0^l \vec{i} \wedge \vec{B}dl = Bil \quad \text{si } B \text{ e } i \text{ son constantes}$$

y sustituimos el valor del campo  $B$  creado por  $i$

$$B = \frac{\mu i}{2\pi d}$$

obtenemos el valor de la fuerza ejercida sobre la barra de longitud  $l$

$$F = \frac{\mu i^2 l}{2\pi d}$$

- Fuerza máxima sobre la barra

$$F_{max} = \frac{\mu i_{choque}^2 l}{2\pi d} \quad \sigma_{max} = \frac{F_{max}}{l} = \frac{\mu i_{choque}^2}{2\pi d}$$

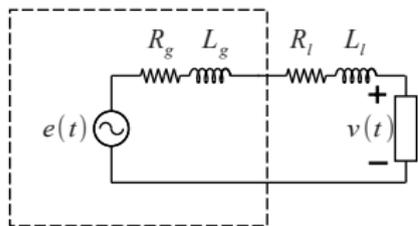
## Índice

---

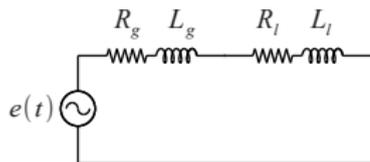
- 1 Introducción
- 2 Efectos térmicos y dinámicos
- 3 Cortocircuitos simétricos: intensidad de choque**
- 4 Fuentes de cortocircuito
- 5 Etapas de la onda de intensidad
- 6 Cálculo de cortocircuitos simétricos

# Cortocircuitos simétricos: intensidad de choque (I)

- El análisis de un corto requiere resolver las ecuaciones diferenciales que modelan el sistema
  - Dado su tamaño **no es práctico**
  - Se admite como suficiente preciso el modelado estacionario de la red (RES)
- Para establecer el comportamiento transitorio se estudiará un circuito RL



a) Circuito inicial



b) Circuito en falta

- Ecuación diferencial del circuito:

$$e(t) = \overbrace{(R_g + R_l)}^R i + \overbrace{(L_g + L_l)}^L \frac{di}{dt}$$

- Solución:

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

- $i_{\infty}(t)$  es la intensidad en estado estacionario en el circuito en falta
- K se determina de la continuidad de la corriente en  $t=0 \Rightarrow K = i(0_-) - i_{\infty}(0_+)$

## Cortocircuitos simétricos: intensidad de choque (II)

- Para un valor genérico de  $e(t, \theta) = \sqrt{2}E \text{sen}(\omega t + \theta) \Rightarrow$

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

- Donde

- Intensidad justo antes del corto

$$i(0_-) = \sqrt{2}I_o \text{sen}(\theta - \varphi_o)$$

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

- $\varphi_o = \arctan\left(\frac{\omega L + X_c}{R + R_c}\right)$

- Intensidad en régimen permanente justo después del corto

$$i_\infty(0_+) = \sqrt{2}I_{cc} \text{sen}(\theta - \varphi)$$

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

- $\varphi = \arctan\left(\frac{\omega L}{R}\right)$

- $i(t, \theta)$  se compone de dos funciones:

- Exponencial decreciente que desaparece al cabo de  $t = 5L/R$  s
  - Componente unidireccional o asimétrica se corresponde con la respuesta natural del circuito (solución de la ecuación diferencial homogénea)
- Sinusoidal
  - Componente periódica o simétrica, es la respuesta estacionaria o permanente del circuito (solución particular de la ecuación diferencial)

## Cortocircuitos simétricos: intensidad de choque (III)

- Debido a que  $R_c$  y  $L_c$  son mucho mayores que  $R$  y  $L$  se desprecia  $I_o$  frente a  $I_{cc} \Rightarrow$

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

- Valor máximo teórico  $\Rightarrow i_{max}^{teor} = 2\sqrt{2}I_{cc}$
- Si suponemos líneas aéreas,  $\omega L > R \Rightarrow$  máximos para  $\theta = 0^\circ$  y  $\omega t = \pi, 3\pi, 5\pi, \dots$

- Sustituyendo en  $i(t, \theta)$  obtenemos la envolvente de los máximos de la intensidad,  $i_{max}(t)$

$$i_{max}(t) = \sqrt{2}I_{cc} \operatorname{sen}(\varphi)e^{-\frac{R}{L}t} + \sqrt{2}I_{cc} \operatorname{sen}((2n - 1)\pi - \varphi) = \sqrt{2}I_{cc} \operatorname{sen}(\varphi)(1 + e^{-\frac{R}{L}t})$$

- $i_{max}$  decrece con el tiempo  $\Rightarrow$  Supremo se obtiene en el primer máximo:  $\omega t = \pi$
- Supremo de los máximos:  $i_{max}(\frac{\pi}{\omega}) = \sqrt{2}I_{cc} \operatorname{sen}(\varphi)(1 + e^{-\frac{R}{L}\frac{\pi}{\omega}})$  y a dicho valor se denomina **intensidad de pico, de cresta o de choque**.
- La norma IEC 60909 recomienda tres métodos para determinar la intensidad de choque, todos derivan de la siguiente expresión:

$$i_{choque} = \sqrt{2}I_{cc}(1.02 + 0.98e^{-\frac{R}{X}3})$$

- Se define  $\chi$  tal que  $i_{choque} = \sqrt{2}\chi I_{cc}'' \Rightarrow \chi = 1.02 + 0.98e^{-\frac{3R}{X}}$  y  $1 < \chi < 2$

## Índice

---

- 1 Introducción
- 2 Efectos térmicos y dinámicos
- 3 Cortocircuitos simétricos: intensidad de choque
- 4 Fuentes de cortocircuito**
- 5 Etapas de la onda de intensidad
- 6 Cálculo de cortocircuitos simétricos

## ■ Existen dos tipos de fuentes

### ■ Máquinas síncronas

- Generadores
- Motores

### ■ Máquinas asíncronas

- Motores

### ■ Los motores son fuentes al transformar su energía cinética de rotación en eléctrica mientras se frenan y hasta que se paran

- Su importancia es tanto mayor cuanto más grande sea
- Los motores asíncronos tienen menor influencia debido a que no tienen una fuente independiente que crea el campo magnético giratorio, como pasa en los síncronos
- Modelos a utilizar

	Subtransitorio	Transitorio	Permanente
Generadores síncronos	$X''$	$X'$	$X_s$
Motores síncronos	$X''$	$X'$	$X_s$
Motores asíncronos	$Z_m$	$Z_m$	$Z_m$

- Incluir síncronos siempre que su excitación no sea estática
- Incluir los asíncronos si son de alta tensión y, a veces, los de baja (no lo veremos)
- $Z_m$  es determinada a partir de la intensidad a rotor bloqueado

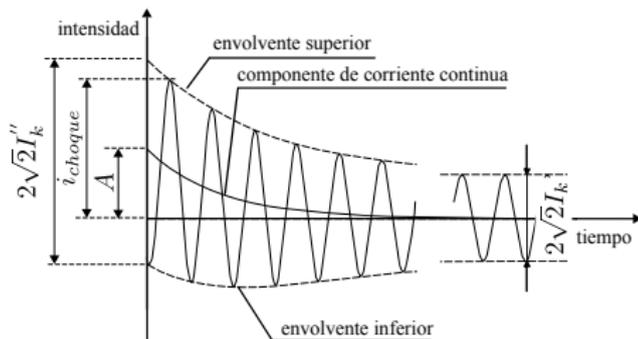
## Índice

---

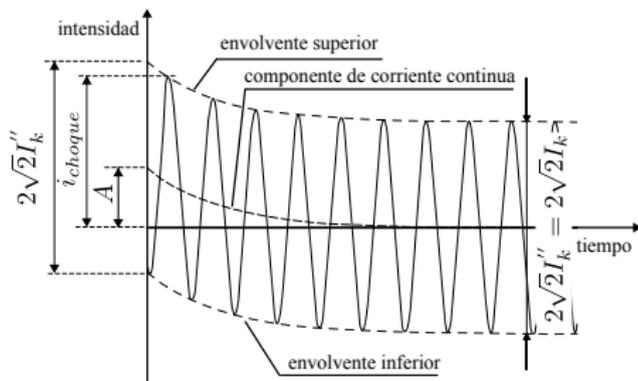
- 1 Introducción
- 2 Efectos térmicos y dinámicos
- 3 Cortocircuitos simétricos: intensidad de choque
- 4 Fuentes de cortocircuito
- 5 Etapas de la onda de intensidad**
- 6 Cálculo de cortocircuitos simétricos

# Etapas de la onda de intensidad

## ■ Evolución de la intensidad de cortocircuito cerca de un generador



## ■ Evolución de la intensidad de cortocircuito lejos de un generador



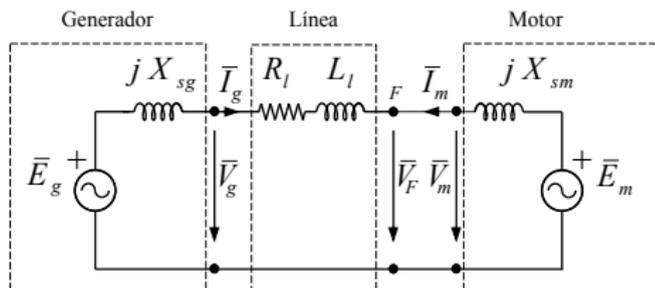
## Índice

---

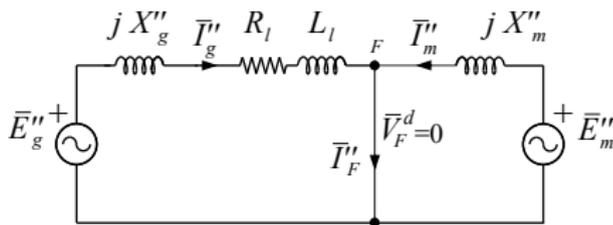
- 1 Introducción
- 2 Efectos térmicos y dinámicos
- 3 Cortocircuitos simétricos: intensidad de choque
- 4 Fuentes de cortocircuito
- 5 Etapas de la onda de intensidad
- 6 Cálculo de cortocircuitos simétricos**

# Cálculo de cortocircuitos simétricos: fem subtransitorias

## ■ Antes del fallo



## ■ Después del fallo



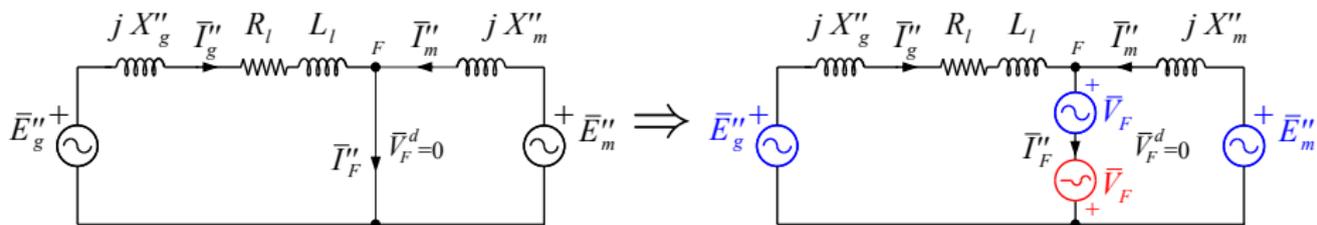
## ■ Cálculo de cortocircuitos

- Obtener tensiones e intensidades en bornes de las máquinas antes del fallo
- Cálculo de fem subtransitorias para todas las máquinas
  - $\bar{E}_g'' = jX_g'' \bar{I}_g + \bar{V}_g$
  - $\bar{E}_m'' = jX_m'' \bar{I}_m + \bar{V}_m$
  - Para equivalentes del sistema dados por  $S_{cc}$  no hay que hacer este paso
- Resolver el circuito de después del fallo

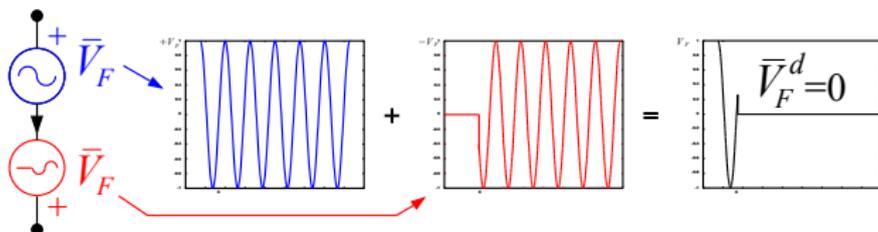
# Cálculo de cortocircuitos simétricos: método de Thevenin (I)

■ Es un método para resolver el circuito de después del fallo

■ Sustitución



■ Donde



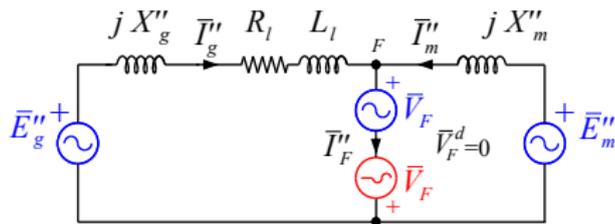
■ Superposición

■ Se resuelve el circuito de después del fallo como la suma de dos circuitos:

- **Circuito a:** todas las fuentes de tensión menos  $\bar{V}_F$
- **Circuito b:** sólo  $\bar{V}_F$

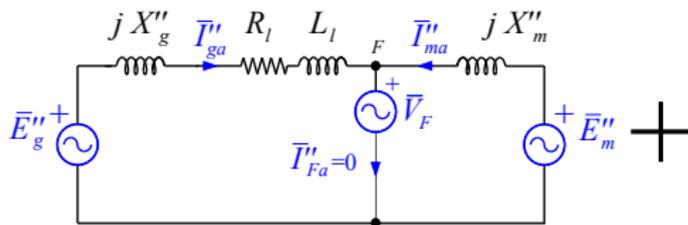
# Cálculo de cortocircuitos simétricos: método de Thevenin (II)

## ■ Superposición

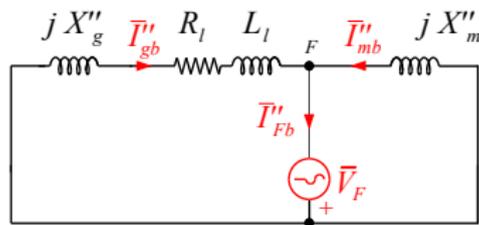


$$\begin{aligned} \vec{I}_m'' &= \vec{I}_{ma}'' + \vec{I}_{mb}'' \\ \vec{I}_g'' &= \vec{I}_{ga}'' + \vec{I}_{gb}'' \\ \vec{I}_F'' &= \vec{I}_{Fa}'' + \vec{I}_{Fb}'' \end{aligned}$$

Circuito a



Circuito b



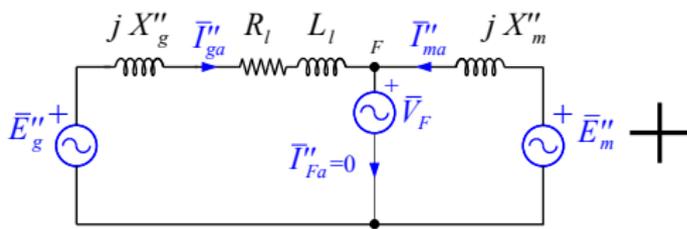
- Cualquier magnitud se obtendrá como la suma de dicha magnitud calculada en el **circuito a** y en el **circuito b**

# Cálculo de cortocircuitos simétricos: método de Thevenin (III)

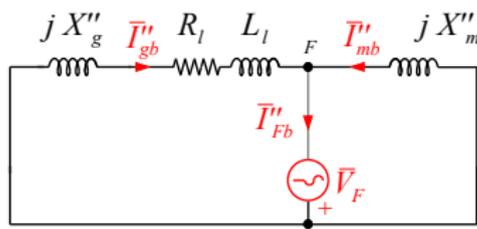
## ■ Consideraciones

- El **circuito a** es equivalente al circuito antes del fallo
- Del **circuito b** obtenemos fácilmente la intensidad de choque

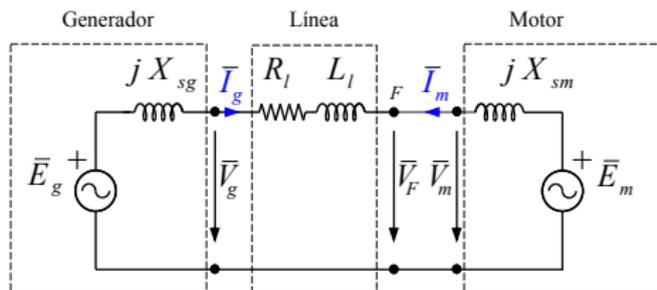
Circuito a



Circuito b



Circuito antes del fallo



$$\begin{aligned}
 \vec{I}''_F &= \vec{I}''_{Fa} + \vec{I}''_{Fb} = \vec{I}''_{Fb} \\
 \frac{\vec{V}_F}{\vec{I}''_{Fb}} &= \vec{Z}^{Thevenin} = R^{Thev} + jX^{Thev} \\
 i_F^{choque} &= \sqrt{2} I''_F (1.02 + 0.98e^{\frac{-R^{Thev}}{X^{Thev}}})^3
 \end{aligned}$$

## ■ Conclusiones

### ■ Cálculo de la componente alterna

- Corto cerca de una máquina síncrona  $\Rightarrow$  modelar las máquinas síncronas utilizando su modelo **subtransitorio**, transitorio o permanente en función del tiempo transcurrido desde el corto
- Corto lejos de una máquina síncrona  $\Rightarrow$  modelar la red utilizando el dato de  $S_{cc}$

### ■ Cálculo de $i_{choque}$

- Obtener la componente alterna
- Obtener  $Z_{thevenin}$  en el punto de fallo  $\Rightarrow \chi = 1.02 + 0.98e^{-3R_{thevenin}/X_{thevenin}}$

## ■ Simplificaciones

### ■ Se suelen despreciar (siempre que se pueda)

- Las resistencias de las líneas (excepto en baja)
  - Las capacidades de las líneas
  - Las admitancias en derivación
  - Las cargas no rotativas
  - La regulación de los transformadores
  - Las resistencias de arcos
- Después de todas las simplificaciones, para el caso de una red de transporte, quedan sólo fuentes de cortocircuito y las inductancias de la línea
- En el método de Thevenin despreciar las cargas supone no tener en cuenta la solución del permanente (circuito a). (Método de la fuente de tensión equivalente UNE 21-239)