

CORTOCIRCUITOS

CONTENIDO

- Defectos eléctricos. Definiciones.
- Causas de los cortocircuitos.
- Consecuencias de los cortocircuitos.
- Cortocircuitos simétricos
- Cortocircuito en bornes de un generador sincrónico
- Cálculo de cortocircuitos en redes trifásicas.

DEFECTOS ELÉCTRICOS

- FALLA DE AISLACIÓN (shunt faults):
corto-circuito
- FALLA DE CONDUCCIÓN (series faults):
línea abierta

CORTO-CIRCUITOS

- Se denomina “corto-circuito” a todo incidente provocado por un contacto entre un conductor y la tierra o entre un conductor y otra pieza metálica conectada a tierra, o bien entre conductores.
- En casi la totalidad de los casos, en instalaciones de alta tensión, el contacto tiene lugar por intermedio de un arco.

Causas

- Orígen puramente eléctrico: provienen del deterioro de un aislador, que se vuelve incapaz de soportar la tensión.
- Orígen mecánico: se debe a la ruptura de conductores o de aisladores (ej. Caída de ramas de árbol sobre líneas aéreas o golpe de pico sobre cables subterráneos).
- Orígen atmosférico: son causados por eventos atmosféricos (ej. Un rayo que cae sobre una línea de AT, vientos extremos que acercan los conductores, humedad elevada).

Causas

- Originados por transitorios: los transitorios pueden producir sobretensiones elevadas que ocasionen la perforación de aisladores.
- Originados por falsas maniobras: por ejemplo, la apertura en carga de un seccionador, puesta a tierra de un equipo energizado.

Causas

- Las más comunes, 60-70% de las faltas se producen en las LAT
 - Rayos provocan sobretensiones que causan fallas en la aislación
 - Vientos: provocan caída de torres, caída de arboles sobre líneas, acercan conductores de fases distintas.
 - Contaminación que se deposita en los aisladores o salitre en líneas que se encuentran cerca de la costa.
 - Incendios cercanos o bajo las líneas

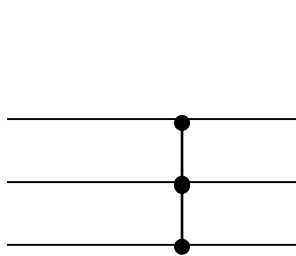
Causas

- Faltas en otros elementos del sistema
 - Cables subterráneos 10-15%
 - Interruptores 10-12%
 - Generadores, motores, transformadores 10-15%
 - Son faltas mucho menos comunes, producen daño permanente en los equipos, se deben generalmente a sobrecargas por tiempos prolongados, deterioro de la aislación, fallas mecánicas.

Consecuencias

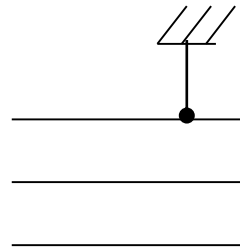
- Circulación de corrientes varias veces más grandes que las corrientes de operación normal
- Calentamiento debido a las corrientes de cortocircuito y daños causados por los arcos.
- Oscilaciones en el sistema, aceleración de máquinas
- Efectos electrodinámicos elevados en barras, bobinados de transformadores.
- Caídas de tensión elevadas.
- Posibles CORTES en el suministro.

Tipos de cortocircuitos



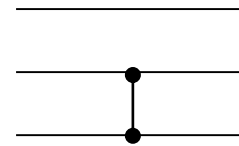
3F

C/C TRIFÁSICO
(8-10%)



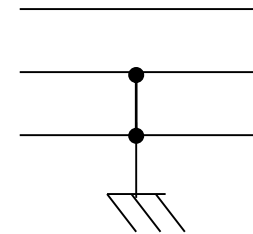
1FT

**C/C DE UNA
FASE A TIERRA**
(75-80%)



2F

**C/C ENTRE
DOS FASES**
(5-7%)



2FT

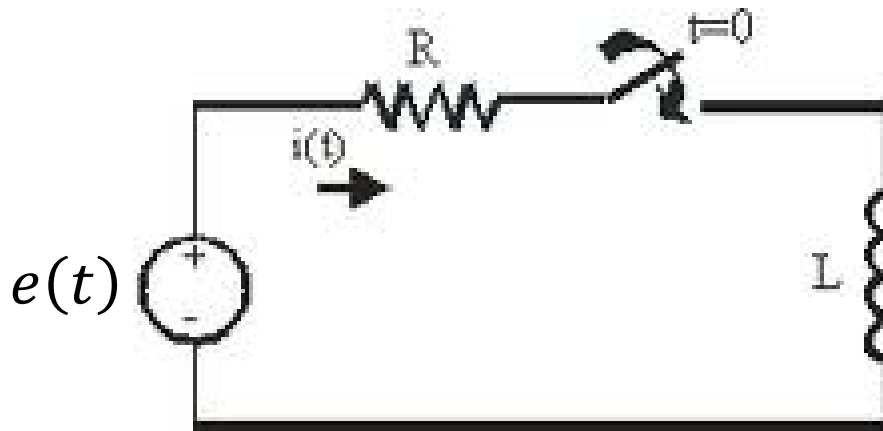
**C/C DE DOS
FASES A
TIERRA**
(10-12%)

***Faltas
Simétricas***

Faltas Asimétricas

Cortocircuitos simétricos

- Circuito R-L



$$\begin{aligned} e(t) &= \sqrt{2}V \text{sen}(wt + \alpha) \\ &= V_{max} \text{sen}(wt + \alpha) \end{aligned}$$

$$V_{max} \text{sen}(wt + \alpha) = Ri + L \frac{di}{dt}; \quad t > 0$$

Cortocircuitos simétricos

- Despejando $i(t)$

$$i(t) = \frac{V_{max}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \left[\text{sen}(\omega t + \alpha - \theta) - e^{-Rt/L} \text{sen}(\alpha - \theta) \right]$$
$$\theta = \text{tg}^{-1}(\omega L/R)$$

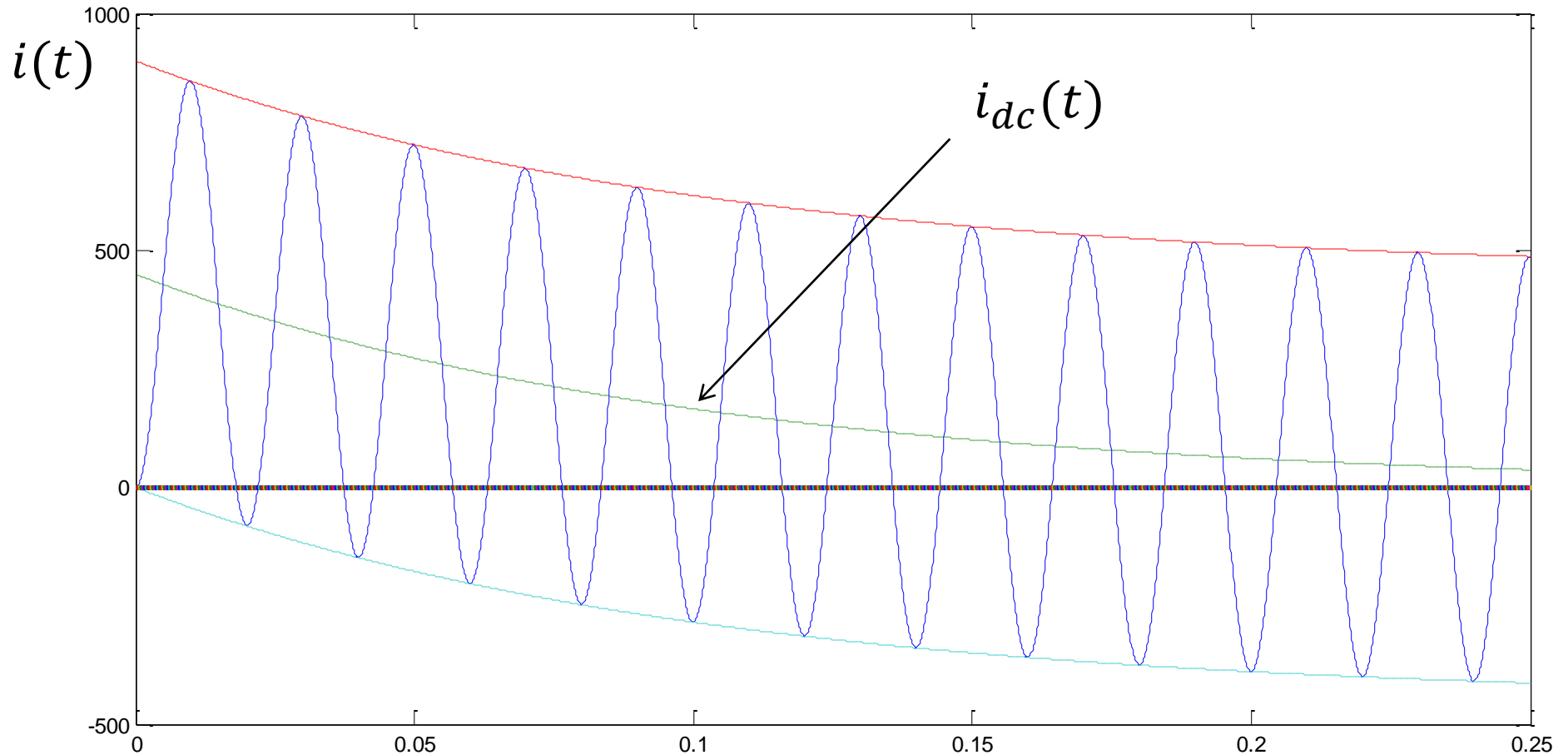
$$\mathbf{i}(t) = \mathbf{i}_{ac}(t) + \mathbf{i}_{dc}(t)$$

$\mathbf{i}_{ac}(t)$: corriente de falta simétrica (constante)

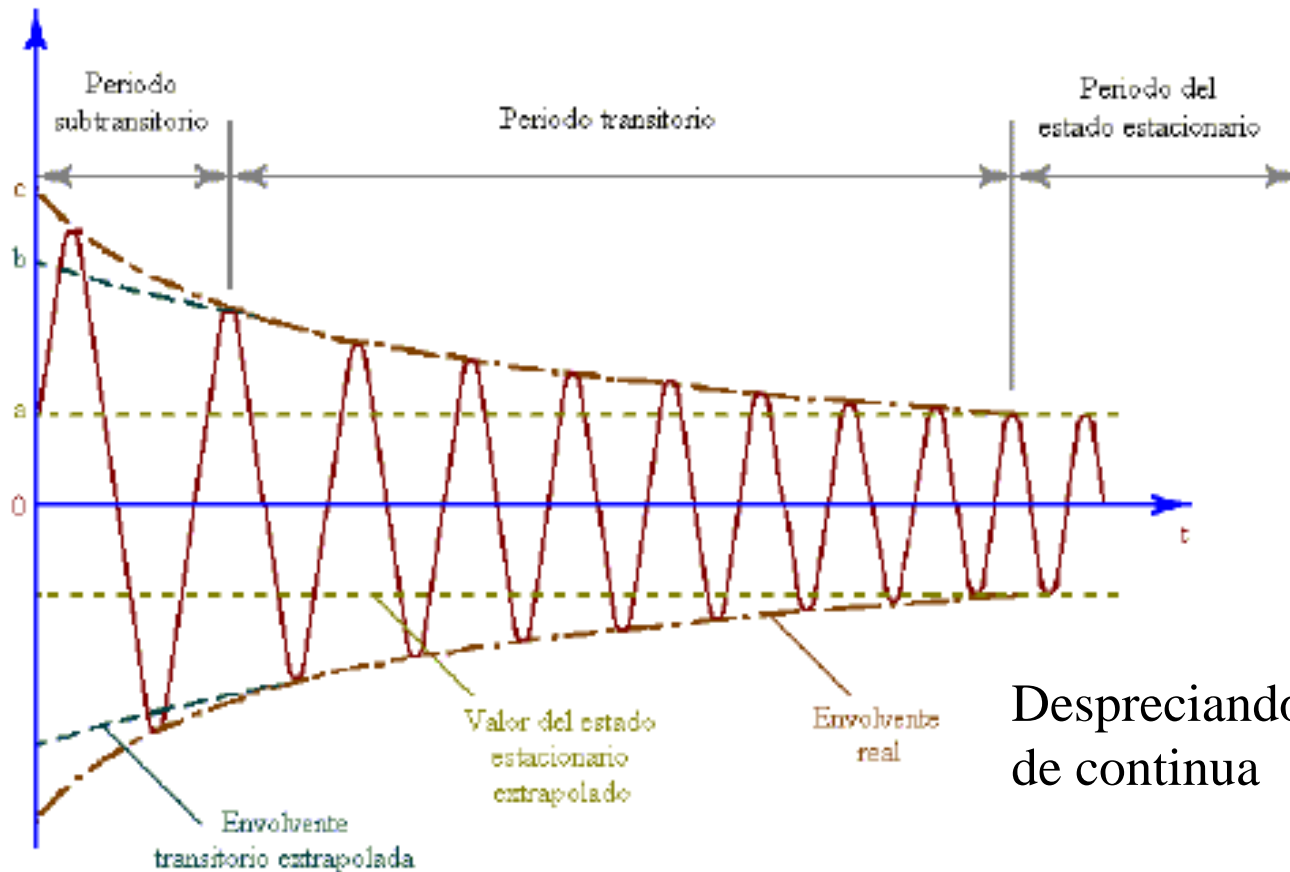
$\mathbf{i}_{dc}(t)$: componente continua (se extingue con el tiempo)

$\mathbf{i}(t)$: corriente de falta asimétrica

Cortocircuitos simétricos

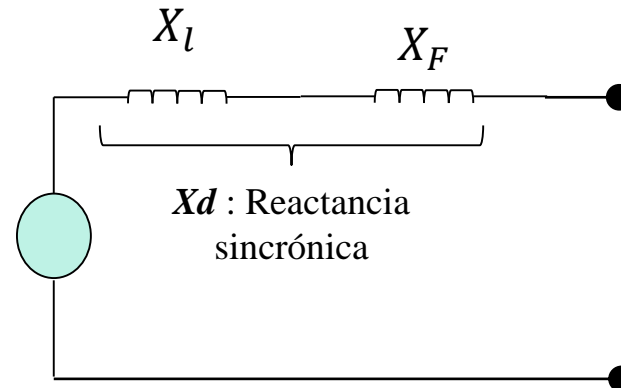
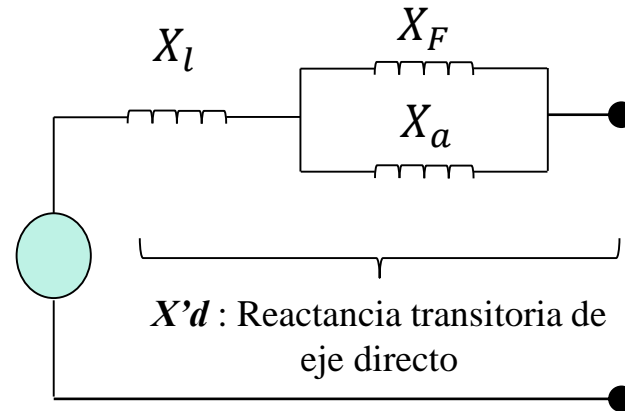
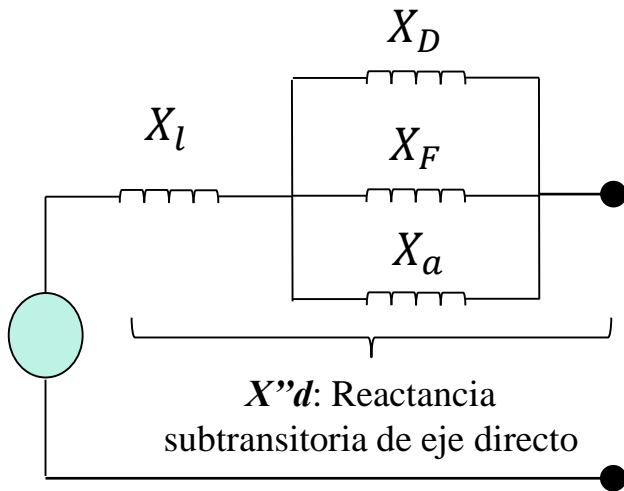


Cortocircuitos en generadores sincrónicos



Despreciando la componente de continua

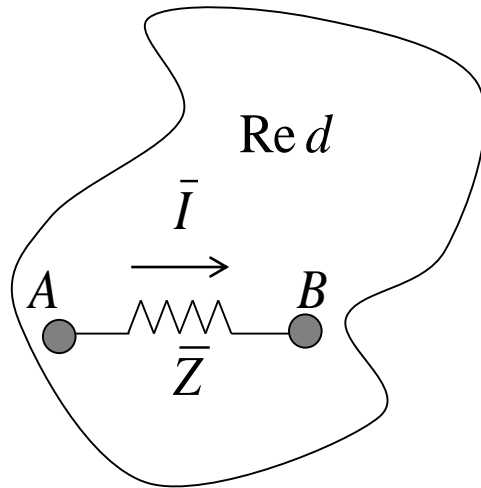
Cortocircuitos en generadores sincrónicos



Cálculo de cortocircuitos

- Teorema de Thevenin.
- Aplicación al caso de un cortocircuito.
- Cálculo de la corriente en un ramal cualquiera de la red cuando ocurre un c/c.
- Cálculo de c/c en una red trifásica (corrientes y tensiones).
- Método sistemático y un ejemplo de cálculo.

Teorema de Thevenin



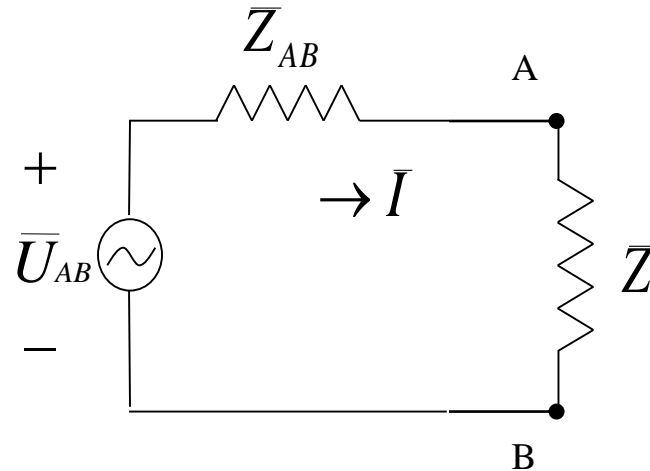
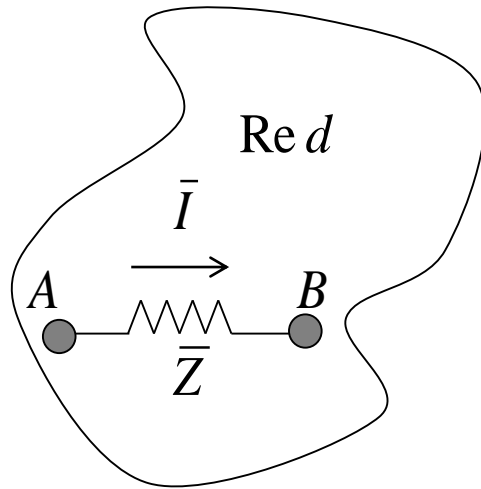
CÁLCULO DE LA CORRIENTE \bar{I}

QUE CIRCULA POR \bar{Z}

1. Abrir el ramal AB suprimiendo \bar{Z}
2. Calcular la tensión entre A y B, \bar{U}_{AB}
3. Reemplazar toda la red, salvo \bar{Z} por la impedancia vista entre A y B, \bar{Z}_{AB} (cortocircuitando todas las fems de la red)
4. Resulta:

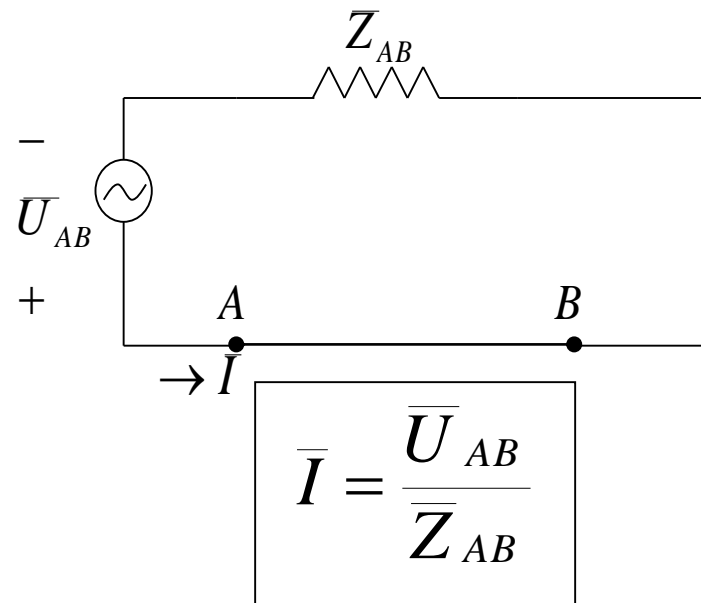
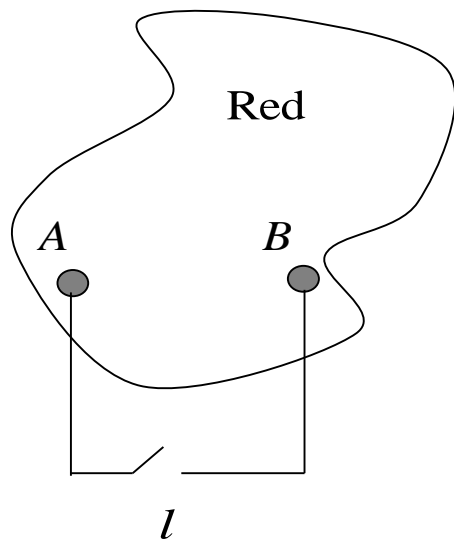
$$\bar{I} = \frac{\bar{U}_{AB}}{\bar{Z}_{AB} + \bar{Z}}$$

Teorema de Thevenin



Todo sucede como si se remplazara todo el resto de la red por el generador de f.e.m. \bar{U}_{AB} y de impedancia interna \bar{Z}_{AB}

Aplicación al caso de un c/c



$$\bar{I} = \frac{\bar{U}_{AB}}{\bar{Z}_{AB}}$$

Se observa que la corriente que circula por la impedancia \bar{Z}_{AB} lo hace desde B hacia A.

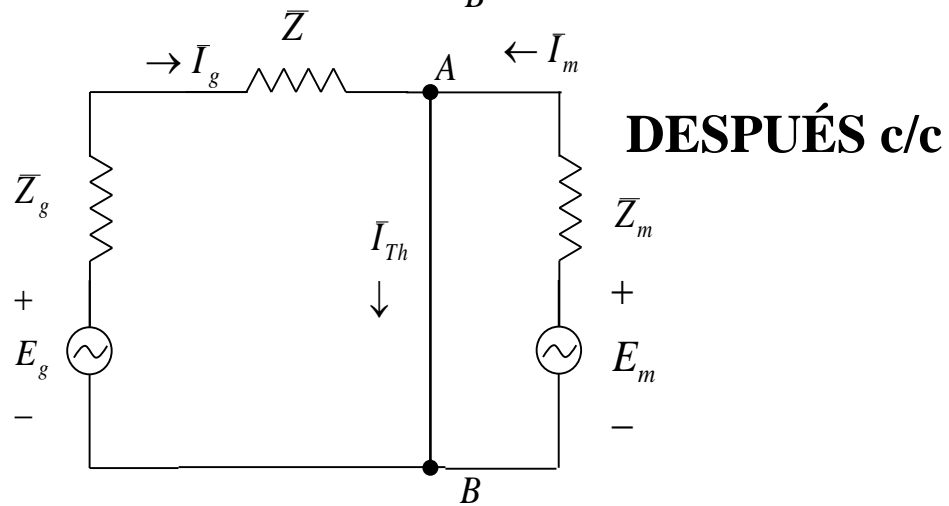
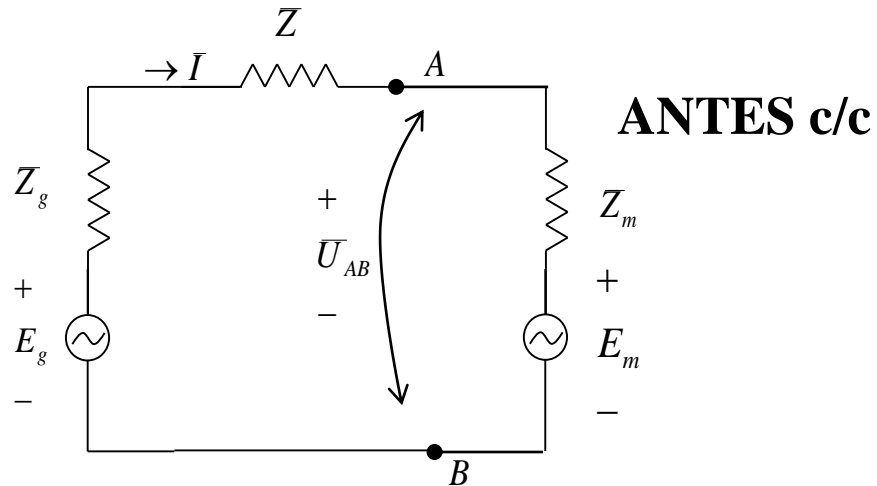
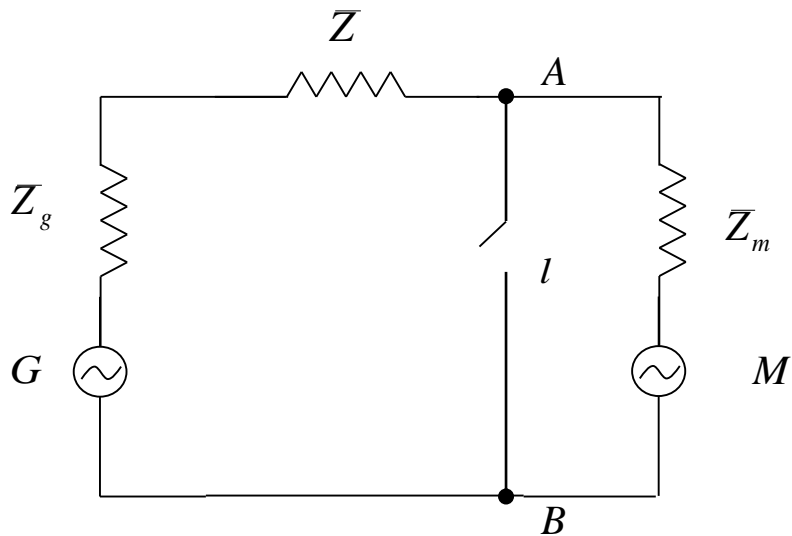
Corriente en un ramal cualquiera de la red

Al producirse el cortocircuito en un punto P de la red, por un ramal “ r ” cualquiera de la misma circulará una cierta corriente.

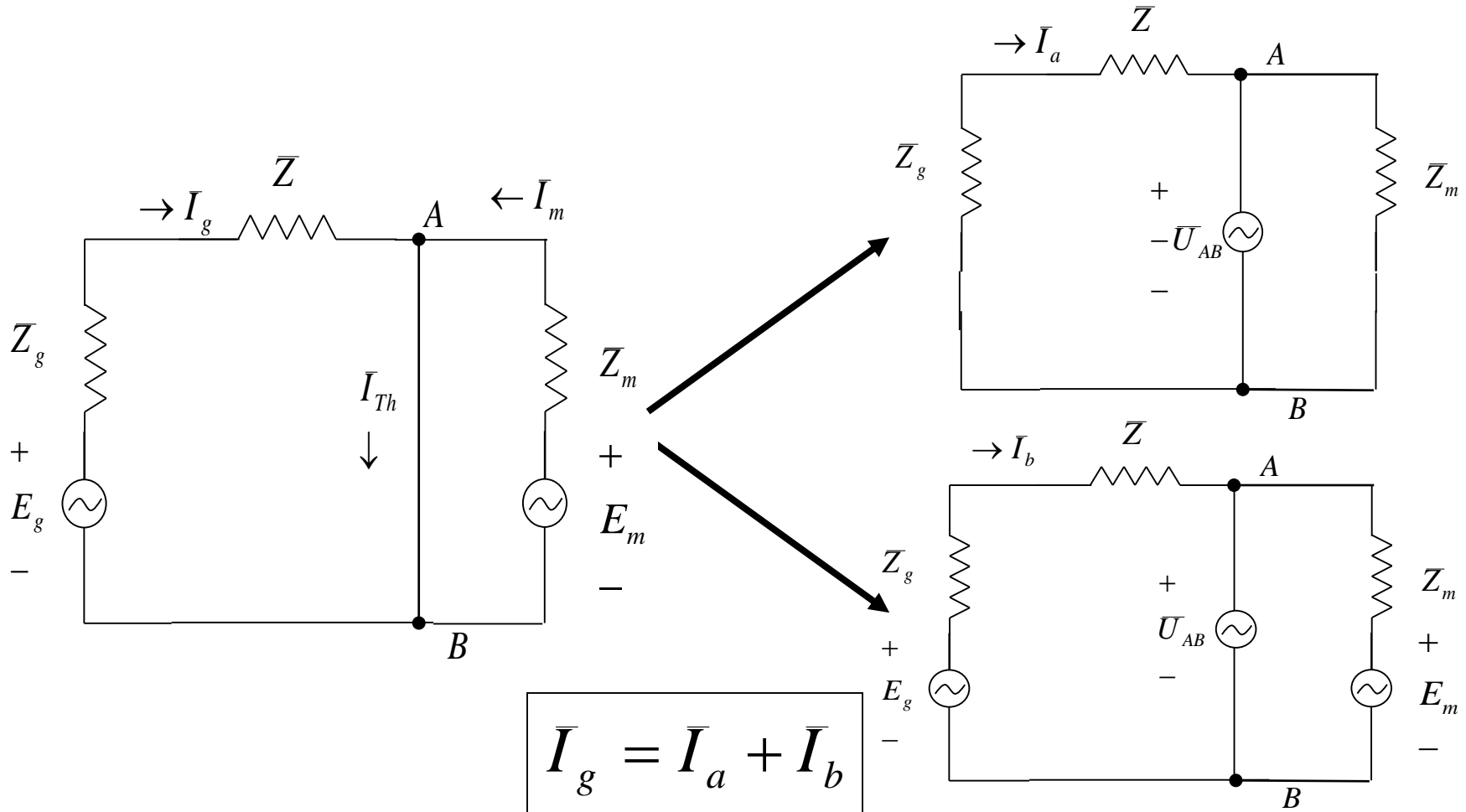
¿Cómo la calculamos?

Corriente en un ramal cualquiera de la red

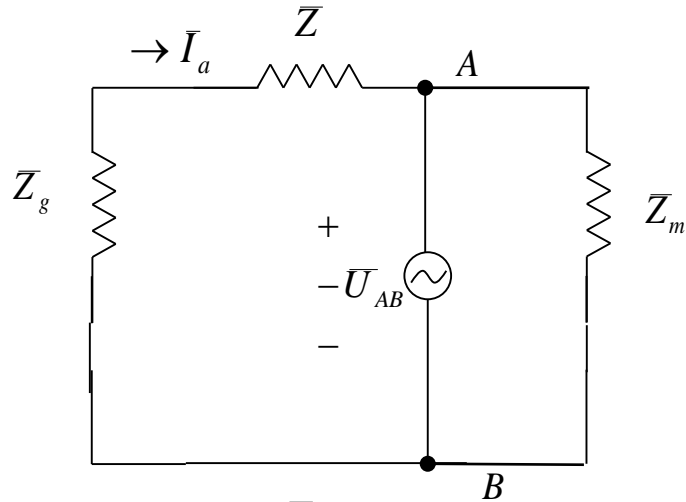
EJEMPLO



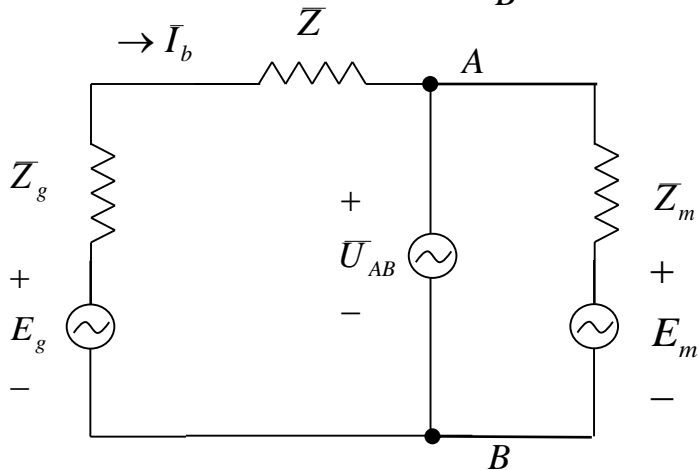
Corriente en un ramal cualquiera de la red



Corriente en un ramal cualquiera de la red

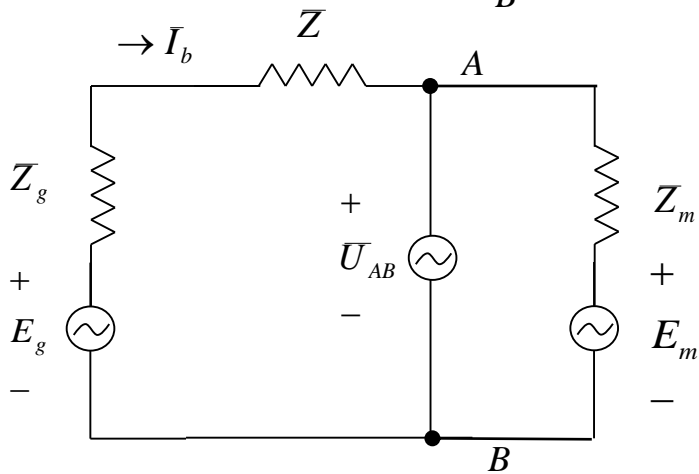
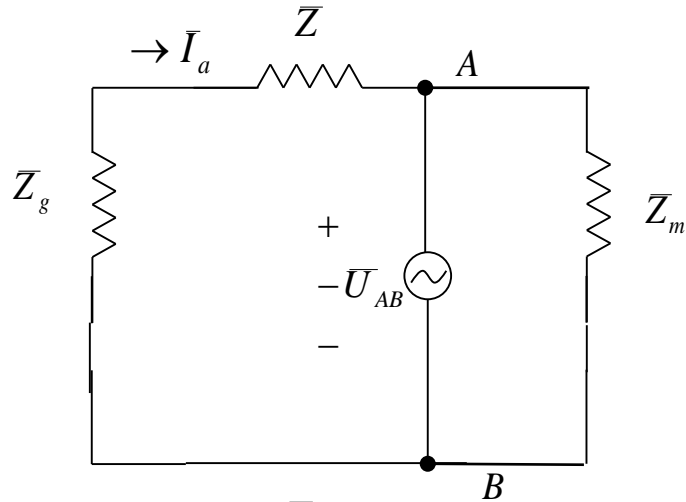


$$\bar{I}_a = \bar{I}_{Thg}$$



$$\bar{I}_b = \bar{I}_{g_antes_c/c}$$

Corriente en un ramal cualquiera de la red



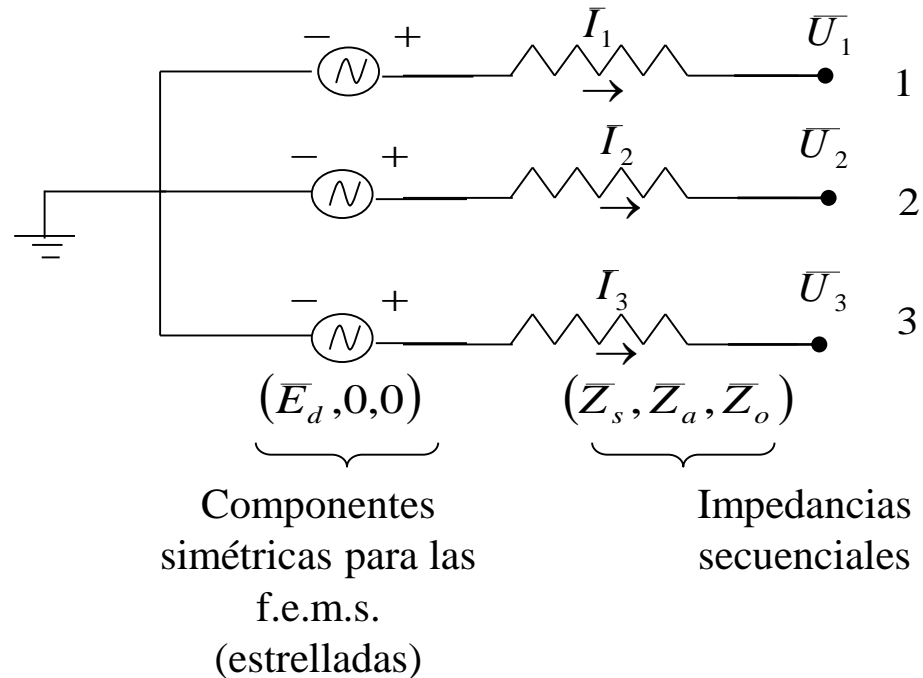
$$\bar{I}_g = \bar{I}_{Thg} + \bar{I}_{g_antes_c/c}$$

Cálculo de c/c en una red trifásica

Modelo de Thevenin para el cálculo de la corriente de c/c

$$(\underline{U}_1, \underline{U}_2, \underline{U}_3) \leftrightarrow (\underline{U}_d, \underline{U}_i, \underline{U}_h)$$

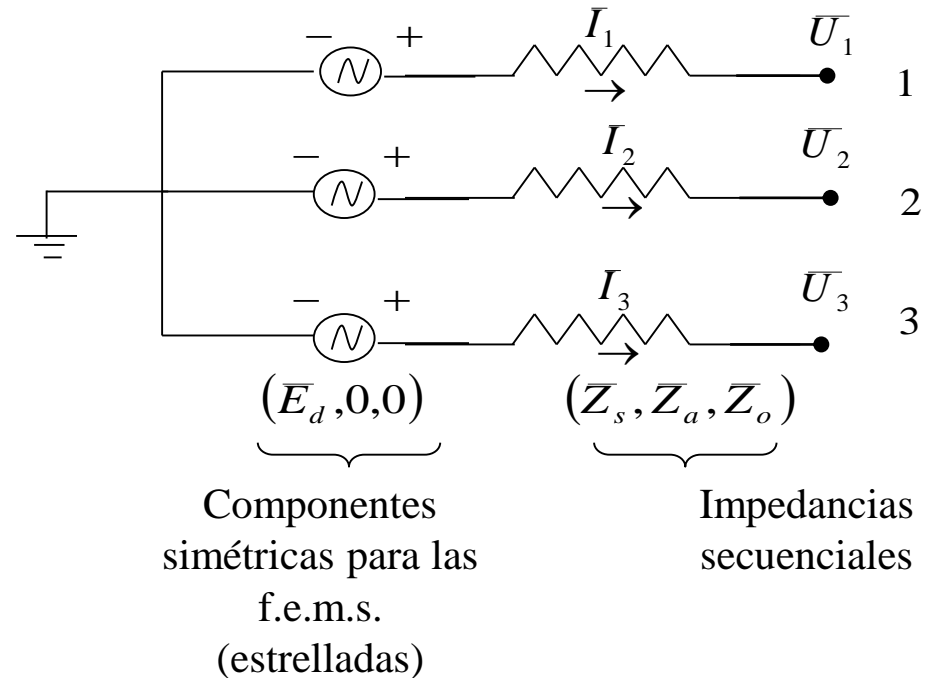
$$(\underline{I}_1, \underline{I}_2, \underline{I}_3) \leftrightarrow (\underline{I}_d, \underline{I}_i, \underline{I}_h)$$



Cálculo de c/c en una red trifásica

Ecuaciones generales del circuito (Ley de Ohm)

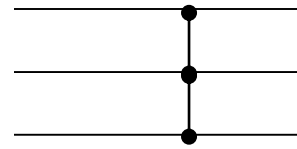
$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{E}_d = \bar{Z}_s \bar{I}_d + \bar{U}_d \\ 0 = \bar{Z}_a \bar{I}_i + \bar{U}_i \\ 0 = \bar{Z}_o \bar{I}_h + \bar{U}_h \end{array} \right.$$



Cortocircuito Trifásico (3F)

Ecuaciones que caracterizan el defecto (3F)

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{U}_1 = \bar{U}_2 = \bar{U}_3 \\ \bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3 = 0 \end{array} \right.$$



C/C TRIFÁSICO

3F

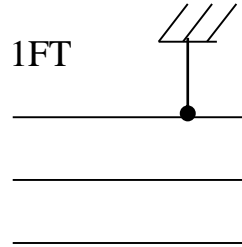
$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{U}_1 = \bar{U}_2 = \bar{U}_3 \\ \bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3 = 0 \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \bar{U}_d = \bar{U}_i = 0 \\ \bar{I}_h = 0 \end{array} \right.$$

$$\bar{I}_d = \frac{\bar{E}_d}{Z_s}, \bar{I}_i = 0, \bar{I}_h = 0$$

Cortocircuito Fase-Tierra (1FT)

Ecuaciones que caracterizan el defecto (1FT)

$$\begin{cases} \bar{U}_1 = 0 \\ \bar{I}_2 = 0 \\ \bar{I}_3 = 0 \end{cases}$$

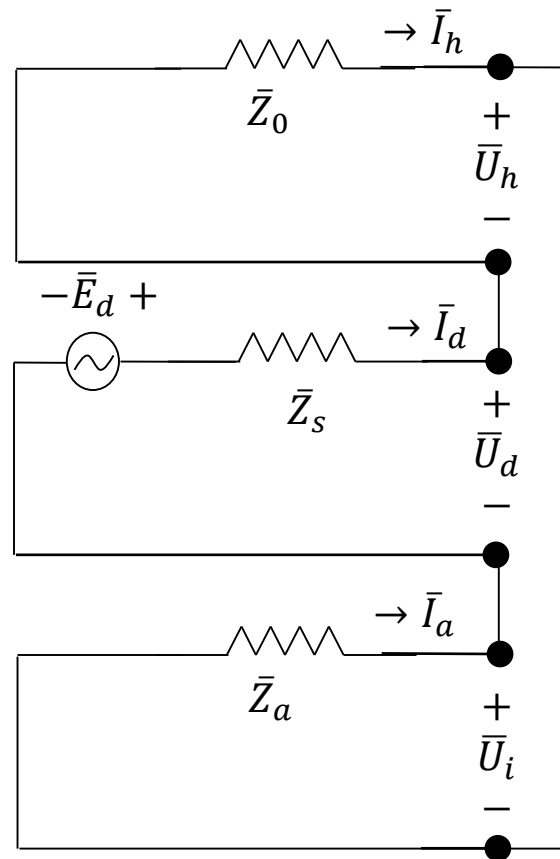


C/C DE UNA FASE A TIERRA

$$\begin{cases} \bar{U}_1 = 0 \\ \bar{I}_2 = 0 \\ \bar{I}_3 = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \bar{U}_d + \bar{U}_i + \bar{U}_h = 0 \\ a^2 \bar{I}_d + a \bar{I}_i + \bar{I}_h = 0 \\ a \bar{I}_d + a^2 \bar{I}_i + \bar{I}_h = 0 \end{cases} \Rightarrow \bar{I}_d = \bar{I}_i = \bar{I}_h$$

$$\bar{I}_d = \bar{I}_i = \bar{I}_h = \frac{\bar{E}_d}{\bar{Z}_s + \bar{Z}_a + \bar{Z}_o}$$

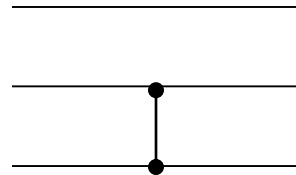
Cortocircuito Fase-Tierra (1FT)



Cortocircuito Fase-Fase (2F)

Ecuaciones que caracterizan el defecto (2F)

$$\begin{cases} I_1 = 0 \\ I_3 = -I_2 \\ U_2 = U_3 \end{cases}$$



2F

C/C ENTRE DOS FASES

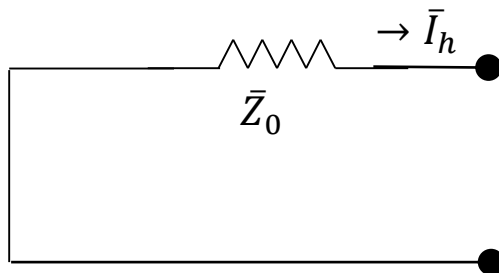
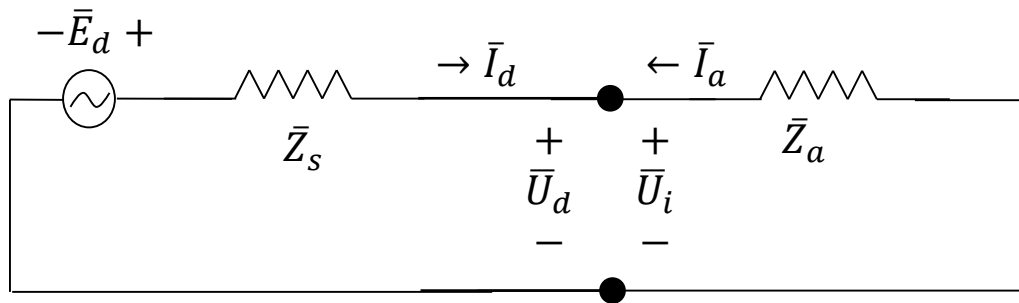
$$\begin{cases} I_1 = 0 \\ I_3 = -I_2 \end{cases} \Rightarrow I_1 + I_2 + I_3 = 0 \Rightarrow \begin{cases} I_d + I_i + I_h = 0 \\ I_h = 0 \end{cases}$$

$$U_2 = U_3 \Rightarrow U_d = U_i$$

$$\bar{E}_d = \bar{Z}_s I_d - \bar{Z}_a I_i \Rightarrow$$

$$\begin{aligned} I_d &= \frac{\bar{E}_d}{\bar{Z}_s + \bar{Z}_a} \\ I_i &= -\frac{\bar{E}_d}{\bar{Z}_s + \bar{Z}_a}, \quad I_h = 0 \end{aligned}$$

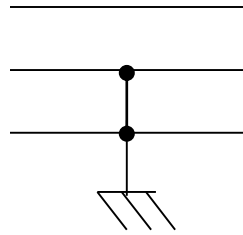
Cortocircuito Fase-Fase (2F)



Cortocircuito 2 Fases a Tierra (2FT)

Ecuaciones que caracterizan el defecto (2FT)

$$\begin{cases} U_2 = U_3 = 0 \\ I_1 = 0 \end{cases}$$



2FT

C/C DE DOS FASES A TIERRA

$$\begin{cases} U_d = U_i = U_h \\ I_d + I_i + I_h = 0 \end{cases}$$

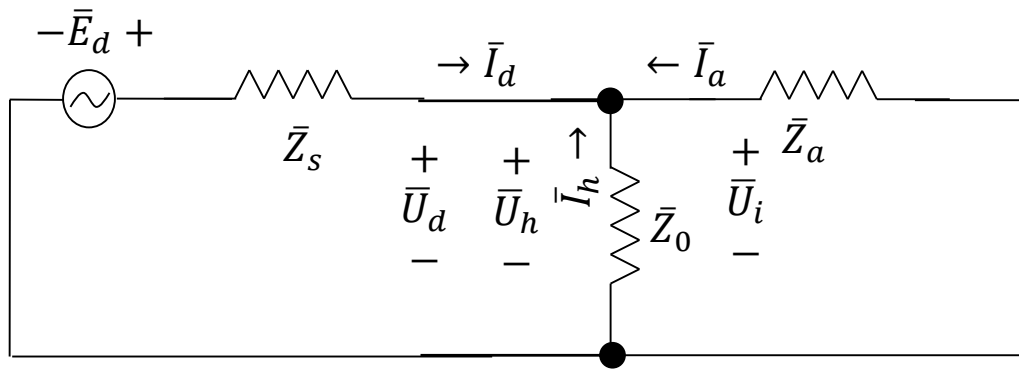
$$E_d - Z_s I_d = -Z_a I_i = -Z_o I_h$$

$$I_d - \frac{E_d - Z_s I_d}{Z_a} - \frac{E_d - Z_s I_d}{Z_o} = 0$$

$$I_d = \frac{Z_a + Z_o}{Z_s Z_a + Z_a Z_o + Z_o Z_s} E_d$$

$$I_i = -\frac{Z_o}{Z_s Z_a + Z_a Z_o + Z_o Z_s} E_d, \quad I_h = -\frac{Z_a}{Z_s Z_a + Z_a Z_o + Z_o Z_s} E_d$$

Cortocircuito 2 Fases a Tierra (2FT)



Cálculo de c/c en una red trifásica/8

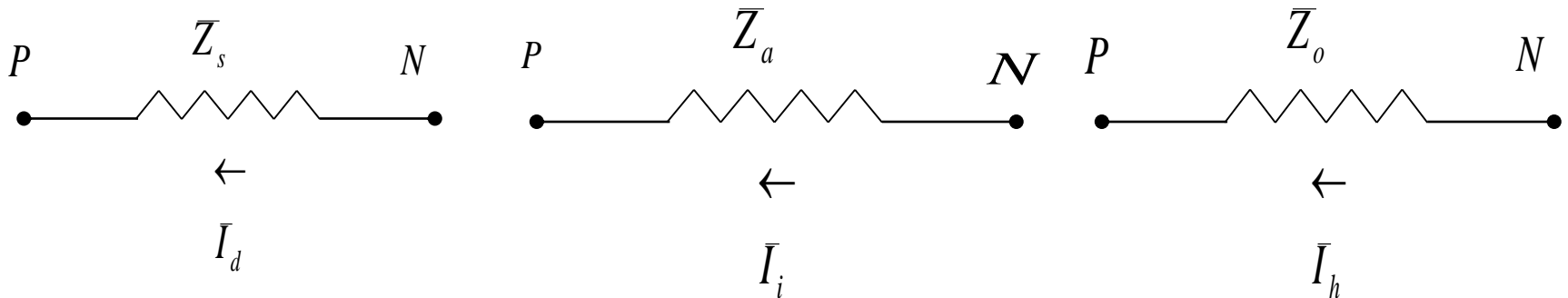
MÉTODO SISTEMÁTICO DE CÁLCULO

- Plantear el circuito antes del defecto y calcular la tensión \bar{E}_d en el punto P donde se producirá el c/c y la corriente \bar{I}_a que circula en el ramal r que nos interesa.
- Plantear separadamente las tres redes de secuencia y, mediante transfiguraciones, llegar a las impedancias $\bar{Z}_s, \bar{Z}_a, \bar{Z}_o$ vistas entre P y N.

Cálculo de c/c en una red trifásica/9

MÉTODO SISTEMÁTICO DE CÁLCULO

- Aplicar las fórmulas del modelo de Thevenin, de acuerdo al tipo de c/c que se produce en P, con los valores calculados $\bar{E}_d, \bar{Z}_s, \bar{Z}_a, \bar{Z}_o$. Deducir $\bar{I}_d, \bar{I}_i, \bar{I}_h$ en el c/c.



Cálculo de c/c en una red trifásica/10

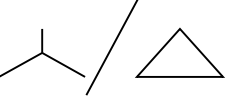
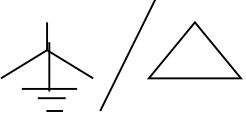
MÉTODO SISTEMÁTICO DE CÁLCULO

- Calcular los factores de distribución $\bar{f}_d, \bar{f}_i, \bar{f}_h$ en el ramal r . Para ello, en cada una de las redes, partir de una corriente 1 y distribuirla hasta llegar al ramal r .
- Deducir las componentes simétricas de las corrientes de Thevenin en el ramal r .

$$I'_d = \bar{f}_d I_d, \quad I'_i = \bar{f}_i I_i, \quad I'_h = \bar{f}_h I_h$$

Cálculo de c/c en una red trifásica/11

MÉTODO SISTEMÁTICO DE CÁLCULO

- **OJO!!** En cada pasaje a través de un trafo  o , tener en cuenta un **cambio de signo** para la **componente inversa** de la corriente. Tener en cuenta también si la **componente homopolar** puede o no **circular** por cada trafo, de acuerdo al esquema de conexión del mismo.

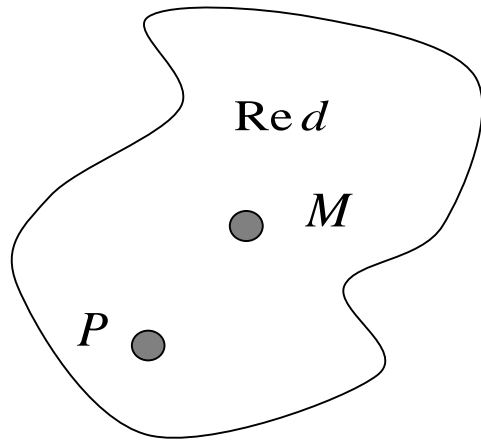
Cálculo de c/c en una red trifásica/12

MÉTODO SISTEMÁTICO DE CÁLCULO

- Halladas las componentes simétricas de Thevenin definitivas en el ramal r , sumarle a la directa la corriente \bar{I}_a que circulaba por r antes del defecto. Verificar el sentido de las corrientes antes de sumar.
- Deducir las componentes de fase, y en particular los módulos de esas corrientes, que constituyen el objetivo buscado.

Cálculo de c/c en una red trifásica/13

CÁLCULO DE TENSIONES



En una cierta red funcionando en régimen equilibrado, se produce un c/c en el punto P. Nos interesa calcular la tensión en otro punto M de la red, referidas al neutro N del sistema original, U_{M1}, U_{M2}, U_{M3}

Cálculo de c/c en una red trifásica/14

CÁLCULO DE TENSIONES - MÉTODO I

- Calcular la tensión en M antes del defecto:
 \bar{U}_M (estrellada, en la fase 1).
- Hacer el cálculo del defecto (corrientes de Thevenin en el c/c): $\bar{I}_d, \bar{I}_i, \bar{I}_h$
- En las redes de secuencia, elegir un ramal cualquiera entre M y N, de impedancia \bar{Z}' (impedancias sensibles $\bar{Z}'_s, \bar{Z}'_a, \bar{Z}'_o$ vistas entre M y N, halladas con transfiguraciones, si es necesario).

Cálculo de c/c en una red trifásica/15

CÁLCULO DE TENSIONES - MÉTODO I

- Deducir las corrientes de ese ramal:

$$\begin{cases} \bar{I}'_d = \bar{f}_d \bar{I}_d \\ \bar{I}'_i = \bar{f}_i \bar{I}_i \\ \bar{I}'_h = \bar{f}_h \bar{I}_h \end{cases}$$

- Deducir las tensiones de Thevenin en M:

$$\begin{cases} U_{MdTh} = -Z'_s \bar{I}'_d \\ U_{MiTh} = -Z'_a \bar{I}'_i \\ U_{MhTh} = -Z'_o \bar{I}'_h \end{cases}$$

Cálculo de c/c en una red trifásica/16

CÁLCULO DE TENSIONES - MÉTODO I

- Deducir las tensiones en M:

$$\begin{cases} \overline{U}_{Md} = \overline{U}_{MdTh} + \overline{U}_M \\ \overline{U}_{Mi} = \overline{U}_{MiTh} \\ \overline{U}_{Mh} = \overline{U}_{MhTh} \end{cases}$$

- Deducir las fásicas $\overline{U}_{M1}, \overline{U}_{M2}, \overline{U}_{M3}$, o sea las estrelladas, y eventualmente las compuestas $\overline{U}_{M12} = \overline{U}_{M1} - \overline{U}_{M2}, \overline{U}_{M23} = \overline{U}_{M2} - \overline{U}_{M3}, \overline{U}_{M31} = \overline{U}_{M3} - \overline{U}_{M1}$ y sus respectivos módulos.