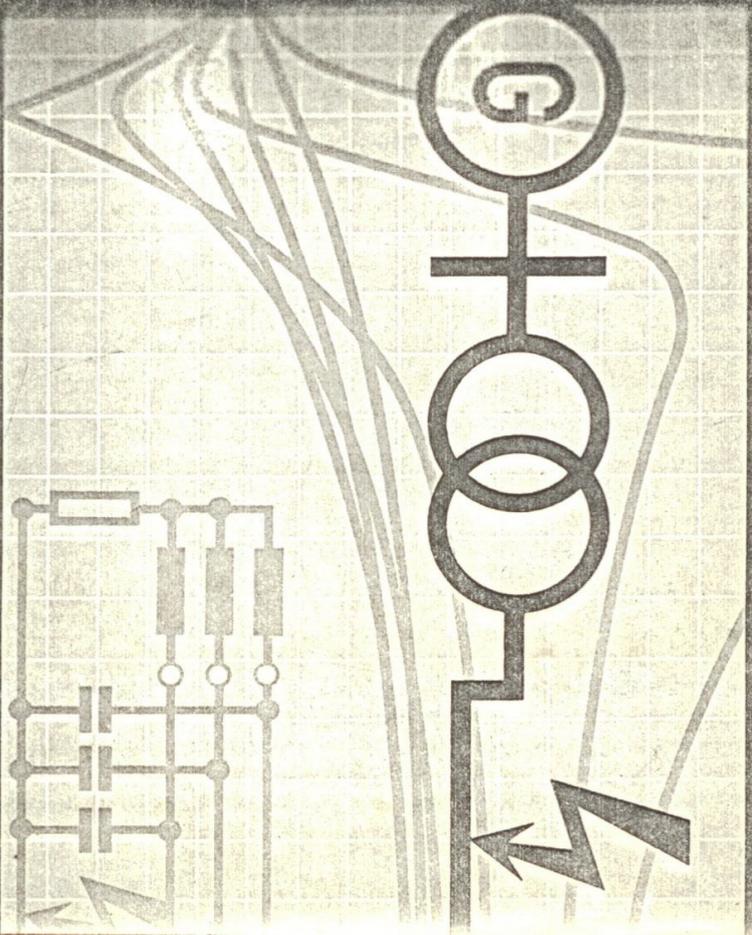




**SIEMENS**



**Las corrientes de cortocircuito  
en las redes trifásicas**



**SIEMENS**

Las corrientes de  
cortocircuito en  
las redes trifásicas

por Richar Roeper

Traducción de la 5.ª edición alemana  
Noviembre 1970

EDITORIAL DOSSAT S.A.

SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT

## Prólogo a la primera edición alemana

La determinación de las posibles corrientes de cortocircuito en las redes trifásicas adquiere una importancia creciente para el diseño de las instalaciones eléctricas por el desarrollo permanente de dichas redes y el continuo aumento de las potencias a transmitir por las mismas. Hoy más que nunca el ingeniero proyectista deberá prestar atención preferente a los problemas del cortocircuito si quiere construir en forma económica y segura. El presente trabajo trata distintos casos de los defectos que pueden presentarse en las redes trifásicas y los somete a un estudio detallado. Para su mejor comprensión se han deducido las principales ecuaciones para el cálculo de las corrientes de cortocircuito y de las tensiones a frecuencia de servicio, representándolas asimismo en forma gráfica de validez general, a los efectos de la comparación cualitativa.

Erlangen, enero de 1957

## Prólogo a la quinta edición alemana

La quinta edición es, en esencia, una reimpresión de la cuarta. Se han completado el texto y las tablas en algunos puntos del apartado C, con objeto de facilitar la comprensión de los métodos de cálculo y de ampliar el volumen de datos ofrecido.

Se ha añadido también una recopilación de fórmulas de cálculo que permiten determinar las impedancias de líneas aéreas.

Erlangen, agosto de 1970

SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT

Herausgeber : Siemens AG - Berlin - München  
© 1965 by Siemens - Berlin - München  
Printed in Spain D.L. M - 25996 - 1970 - MELSA - MADRID  
Editorial Dossat, Plaza de Santa Ana, 9, Madrid - 12

## INDICE

<b>A. Cortocircuitos de mayor importancia y forma de calcularlos</b>	
1. Introducción	8
2. Componentes simétricas	8
3. Impedancias directa, inversa y homopolar	12
4. Ecuaciones generales para la determinación de las corrientes de cortocircuito	14
a) Cortocircuito tripolar	15
b) Cortocircuito bipolar sin contacto a tierra	16
c) Cortocircuito bipolar con contacto a tierra	19
d) Contacto unipolar a tierra (cortocircuito a tierra)	23
e) Contacto doble a tierra	34
5. Comparación de los distintos casos de cortocircuito	42
a) Redes con punto neutro aislado	42
b) Redes cuyo punto neutro tiene puesta a tierra inductiva	43
c) Redes con punto neutro puesto rigidamente a tierra	44
<b>B. Variación de la corriente de cortocircuito en función del tiempo</b>	
1. El proceso de amortiguamiento	45
2. Valores característicos del proceso de amortiguamiento	49
a) Las reactivancias del generador	49
b) Las constantes de tiempo	50
c) Las fuerzas electromotrices	55
3. Cálculo de los valores instantáneos de la corriente de cortocircuito	57
a) El impulso $i_c$ de la corriente de cortocircuito	58
b) La corriente de ruptura $I_a$	60
c) La corriente permanente de cortocircuito $I_k$	63
<b>C. Tratamiento de la red y datos para el cálculo</b>	
1. Cálculo con impedancias relativas y con impedancias absolutas	66
2. Tratamiento de las redes con alimentación múltiple y con mallas	71
3. Impedancia de un punto de la red con potencia de cortocircuito conocida	73
4. Observaciones generales para el cálculo	74
5. Impedancia de los elementos de la instalación	75
6. Determinación numérica de impedancias de líneas aéreas	87
7. Ejemplo de un cálculo	92
<b>Indice alfabético</b>	99

## NOTACIONES

### 1. Corrientes

- $i_t$  Valor instantáneo de la corriente de cortocircuito
- $i_a$  Impulso de la corriente de cortocircuito (valor cresta)
- $I_t''$  Corriente inicial subtransitoria de cortocircuito (valor eficaz)
- $I_t'$  Corriente inicial transitoria de cortocircuito (valor eficaz)
- $I_k$  Corriente permanente de cortocircuito (valor eficaz)
- $I_a$  Corriente de ruptura simétrica (valor eficaz)

### 2. Tensiones

- $U$  Tensión entre conductores (en triángulo, valor eficaz)
- $U_y$  Tensión entre conductor y neutro (en estrella, valor eficaz)
- $E''$  Tensión subtransitoria del campo principal
- $E'$  Tensión transitoria del campo principal
- $E$  Tensión de la rueda polar
- $U_0$  Componente de la tensión homopolar
- $U_1$  Componente de la tensión directa
- $U_2$  Componente de la tensión inversa
- $U_n$  Tensión nominal
- $U_B$  Tensión relativa
- $U_x$  Porcentaje de la tensión de cortocircuito

### 3. Potencias

- $S_x''$  Potencia inicial de cortocircuito
- $S_a$  Potencia de ruptura simétrica
- $S_a^{asim}$  Potencia de ruptura asimétrica
- $P_n$  Potencia nominal
- $P_B$  Potencia relativa

### 4. Reactancias e Impedancias

- $X_d''$  Reactancia subtransitoria
- $X_d'$  Reactancia transitoria
- $X_d$  Reactancia sincrónica
- $Z_N$  Impedancia de la red
- $X_N$  Reactancia de la red
- $R_N$  Resistencia óhmica de la red
- $X_d''$  Reactancia subtransitoria relativa
- $x_d'$  Reactancia transitoria relativa
- $x_d$  Reactancia sincrónica relativa
- $x_N$  Impedancia relativa de la red
- $x_N$  Reactancia relativa de la red
- $r_N$  Resistencia óhmica relativa de la red
- $Z_0$  Impedancia homopolar
- $Z_1$  Impedancia directa
- $Z_2$  Impedancia inversa
- $k_0$  Relación de cortocircuito con excitación en vacío

### 5. Constantes de tiempo

- $T_d''$  Constante de tiempo subtransitoria
- $T_d'$  Constante de tiempo transitoria
- $T_E$  Constante de tiempo transitoria de marcha en vacío
- $T'_{d0}$  Constante de tiempo de la componente de corriente continua

Los vectores se designan siempre mediante símbolos en negrilla, mientras que los caracteres normales representan los correspondientes valores absolutos.

## A. Cortocircuitos de mayor importancia y forma de calcularlos

### 1. Introducción

En las redes trifásicas se pueden distinguir las siguientes clases más importantes de defectos, según el número de fases que se hallen en cortocircuito entre sí o con tierra:

- el cortocircuito tripolar,
- el cortocircuito bipolar sin contacto a tierra,
- el cortocircuito bipolar con contacto a tierra,
- el contacto unipolar a tierra (cortocircuito a tierra),
- el doble contacto a tierra.



Fig. 1  
Clases de defectos en una red trifásica

El cortocircuito tripolar equivale a una carga simétrica de la red trifásica; las tres fases intervienen de igual forma y son recorridas por la misma intensidad eficaz de la corriente de cortocircuito. Por lo tanto, el cálculo puede limitarse a una sola fase como en cualquier caso de una carga simétrica. Por el contrario, las demás formas del cortocircuito equivalen a cargas asimétricas y el cálculo exige procedimientos especiales para considerar esta asimetría. Uno de tales procedimientos es el cálculo de las corrientes de cortocircuito por el método de las componentes simétricas.

El método de las componentes simétricas no es nuevo, pero como el conocimiento de sus bases y la aplicación práctica de este procedimiento de cálculo no están muy difundidos, se considera útil tratarlo antes de proceder al estudio de las distintas formas del cortocircuito.

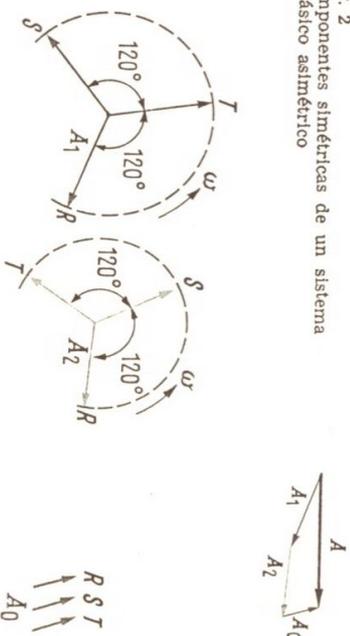
### 2. Componentes simétricas

Un vector  $A$  cualquiera (fig. 2) puede ser considerado como resultante de la suma de las tres componentes  $A_1$ ,  $A_2$  y  $A_0$ , todas ellas colocadas una a continuación de otra en forma absolutamente arbitraria. Si luego se complementa, de acuerdo con la figura 2, la componente  $A_1$  hasta formar un sistema trifásico simétrico de secuencia directa  $R, S, T$ , la componente  $A_2$  hasta formar otro sistema trifásico simétrico, pero de secuencia inversa, y, finalmente, la componente  $A_0$  hasta formar un tercer sistema simétrico

de secuencia cero (homopolar), resulta que con estos tres sistemas de componentes simétricas es posible representar cualquier sistema trifásico asimétrico.

$$\begin{aligned} A_R &= A_{1R} + A_{2R} + A_0 \\ A_S &= A_{1S} + A_{2S} + A_0 = a^2 \cdot A_{1R} + a \cdot A_{2R} + A_0 \\ A_T &= A_{1T} + A_{2T} + A_0 = a \cdot A_{1R} + a^2 \cdot A_{2R} + A_0 \end{aligned}$$

Fig. 2  
Componentes simétricas de un sistema trifásico asimétrico



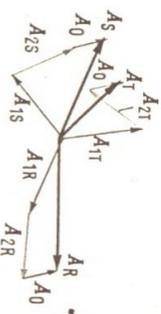
Entre los vectores y sus componentes rigen las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} \text{el operador } a &= -0,5 + j 0,866 && \text{equivale a un giro del vector en } +120^\circ \\ a^2 &= -0,5 - j 0,866 && \text{equivale a un giro del vector en } +240^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{(Téngase en cuenta:)} \\ 1 + a &= -a^2; \quad 1 + a^2 = -a \text{ y } 0,866 = 0,5 \cdot \sqrt{3} \end{aligned}$$

Según la magnitud y la posición relativa de las componentes simétricas, los vectores  $A_R, A_S$  y  $A_T$  pueden adquirir cualquier valor y cualquier fase. La figura 3 representa, por ejemplo, el sistema trifásico asimétrico resultante de la suma vectorial de los sistemas de componentes de la figura 2.

Fig. 3  
Composición de las componentes hasta formar el sistema trifásico asimétrico



Recíprocamente, también es posible determinar las componentes simétricas de un sistema trifásico asimétrico dado. Para esta operación rigen las siguientes expresiones:

$$A_{1R} = \frac{1}{3} (A_R + a \cdot A_S + a^2 \cdot A_T)$$

$$A_{2R} = \frac{1}{3} (A_R + a^2 \cdot A_S + a \cdot A_T)$$

$$A_0 = \frac{1}{3} (A_R + A_S + A_T)$$

La determinación gráfica de las diversas componentes se desprende de la composición geométrica de los vectores  $A_R$ ,  $A_S$  y  $A_T$ , tal como lo muestra la figura 4. A tal fin, el vector  $A_R$  se sitúa en la dirección del eje de referencia, y a partir del origen y extremo de  $A_R$  se llevan los vectores afectados por los operadores  $A_S$  y  $A_T$ . La resultante del diagrama de vectores equivale en magnitud y dirección a la componente  $3A_0$ . Si luego se hace girar los dos vectores  $A_S$  y  $A_T$ —no coincidentes con el eje de referencia— en los ángulos de  $120^\circ$  ó  $240^\circ$  de acuerdo con las expresiones arriba indicadas, con las resultantes correspondientes se determinan las componentes  $3A_{1R}$  y  $3A_{2R}$  en magnitud y dirección.

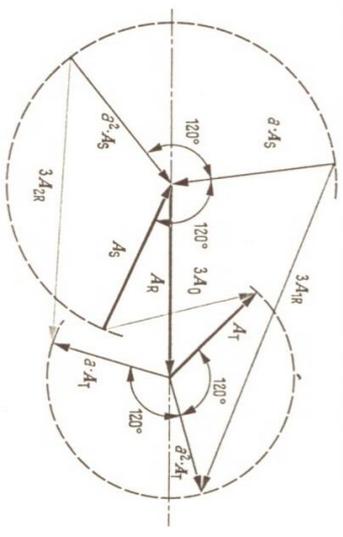


Fig. 4 Determinación gráfica de las componentes simétricas

La componente  $A_0$  existe únicamente cuando la suma geométrica de los vectores  $A_R$ ,  $A_S$  y  $A_T$  difiere de cero, es decir, cuando estos vectores no cierran un triángulo. La existencia de una componente  $A_0$  implica, por lo tanto, la condición de que, aparte de los tres conductores de fase, exista otra vía para la corriente (retorno por tierra, conductor neutro). Por otra parte, la componente  $A_{2R}$  se presenta casi siempre cuando los valores de las tres fases no son iguales entre sí.

Cuando los tres vectores  $A_R$ ,  $A_S$  y  $A_T$  forman un triángulo equi-

látero, las componentes  $A_0$  y  $A_{2R}$  desaparecen y sólo permanece el sistema directo, de acuerdo con la resultante  $3A_{1R}$ . Tal como indica la figura 5, esta resultante equivale siempre al triple de  $A_R$ , de manera que  $A_R = A_{1R}$  (caso de carga simétrica).

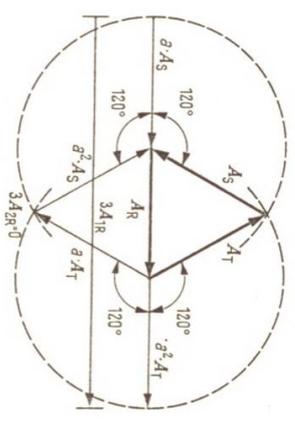


Fig. 5 Carga simétrica

Con ayuda del procedimiento que se acaba de describir, es posible descomponer cualquier sistema trifásico asimétrico en tres sistemas de componentes simétricas. Por lo tanto, todas las operaciones de cálculo pueden realizarse en forma monofásica y se simplifican considerablemente. Para las corrientes y las tensiones de un sistema trifásico rigen los grupos de ecuaciones (1) y (2), indicados a continuación; el grupo de ecuaciones (3) expresa las relaciones existentes entre las componentes de intensidad y de tensión, introduciendo las impedancias y las fuerzas electromotrices correspondientes.

$$(1) \begin{aligned} I_R &= I_{1R} + I_{2R} + I_0 \\ I_S &= a^2 \cdot I_{1R} + a \cdot I_{2R} + I_0 \\ I_T &= a \cdot I_{1R} + a^2 \cdot I_{2R} + I_0 \end{aligned} \quad (2) \begin{aligned} U_R &= U_{1R} + U_{2R} + U_0 \\ U_S &= a^2 \cdot U_{1R} + a \cdot U_{2R} + U_0 \\ U_T &= a \cdot U_{1R} + a^2 \cdot U_{2R} + U_0 \end{aligned}$$

$$(3) \begin{aligned} U_{1R} &= E_Y - Z_1 \cdot I_{1R} \\ U_{2R} &= -Z_2 \cdot I_{2R} \\ U_0 &= -Z_0 \cdot I_0 \end{aligned}$$

$U_{1R}$ ,  $U_{2R}$  y  $U_0$  constituyen las caídas de tensión producidas por las impedancias eficaces al pasar por ellas la componente correspondiente de la corriente. Sin embargo, las corrientes sólo pueden circular, cuando el sistema trifásico posea una fuerza electromotriz. La f.e.m. del sistema trifásico es  $E_Y$  (tensión simple) y, ya que se le considera simétrica, tiene la misma secuencia que el sistema directo. Por lo tanto, sólo aparece en el sistema directo. Tanto el sistema inverso, como el sistema homopolar carecen de f.e.m., por lo que se les puede considerar como sistemas pasivos.

### 3. Impedancias directa, inversa y homopolar

Las impedancias efectivas para cada una de las componentes de la corriente se designan con los nombres de impedancia directa, impedancia inversa e impedancia homopolar, respectivamente, en analogía con los sistemas simétricos correspondientes. En la figura 6 pueden apreciarse los esquemas de conexión que correspondrían a cada uno de los sistemas de componentes para la medición de las impedancias respectivas. Para los sistemas directo e inverso se han indicado tensiones trifásicas simétricas, de acuerdo con el carácter de dichos sistemas; para el sistema homopolar se indica una fuente de tensión monofásica.

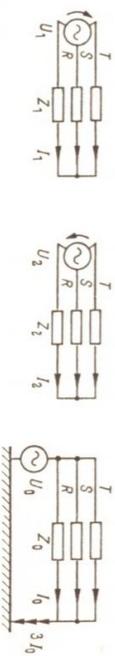


Fig. 6  
Esquemas de conexiones correspondientes a los tres sistemas de componentes

Los valores prácticos de las impedancias correspondientes a los distintos elementos componentes de las redes trifásicas están resumidos en el capítulo C (pág. 66).

#### a) La impedancia directa.

La impedancia directa  $Z_1$  es la impedancia de los elementos de servicio, correspondiente a la carga simétrica. Por lo tanto, equivale a la impedancia por fase en las líneas, a la impedancia de cortocircuito en los transformadores y bobinas de reactancia y a la impedancia eficaz en el instante del cortocircuito en los generadores.

#### b) La impedancia inversa.

La impedancia inversa  $Z_2$  de las líneas, de los transformadores y de las bobinas de reactancia es igual a la respectiva impedancia directa de estos elementos, por cuanto la resistencia que ellos ofrecen al paso de la corriente no varía al invertirse la secuencia de las fases. En cambio, la impedancia inversa de los generadores es aquella impedancia que presenta la máquina cuando se le impone un sistema inverso de tensiones durante su marcha sincrónica. Este sistema de secuencia inversa tiene en el estator una velocidad doble con respecto al rotor, mientras que la velocidad relativa del sistema directo, con respecto al rotor, es nula.

La impedancia inversa de los turbogeneradores equivale prácticamente a la impedancia directa eficaz en el instante de ini-

ciarse el cortocircuito. La impedancia inversa de los generadores con polos salientes, provistos de arrollamiento amortiguador, supera a la reactancia inicial en aprox. un 20 % y la de generadores desprovistos de arrollamiento de este género en un 50 % aproximadamente. La impedancia inversa de las máquinas asíncronas equivale con buena aproximación al valor de la reactancia de cortocircuito, es decir, a la reactancia correspondiente a la velocidad cero.

#### c) La impedancia homopolar.

La impedancia homopolar  $Z_0$  puede determinarse por cálculo o por medición, conectando las tres fases del sistema trifásico en paralelo y aplicando una tensión alterna monofásica. La impedancia homopolar de los generadores es, por regla general, considerablemente menor que la reactancia inicial, equivale aproximadamente a  $1/3 \dots 1/6$  de ésta. El valor de la impedancia homopolar de los transformadores depende de la clase de conexión de los mismos. Los transformadores conectados en estrella/triángulo tienen una impedancia homopolar de aprox. un 80 ... 100 % del valor de la impedancia directa. Los transformadores conectados en estrella/zig-zag poseen una impedancia homopolar relativamente pequeña, es decir, de aprox. un 10 % del valor de la impedancia directa. La impedancia homopolar de los transformadores conectados en estrella/estrella y provistos de un arrollamiento com-pensador en triángulo, diseñado para  $1/3$  de la potencia nominal de paso, puede llegar a ser hasta 2,4 veces el valor de la impedancia directa referida a la potencia nominal. Finalmente, la impedancia homopolar de los transformadores de tres columnas conectados en estrella/estrella, desprovistos de arrollamiento compensador, es 5 ... 10 veces mayor que la impedancia directa. Estos transformadores no pueden aplicarse sin precauciones especiales para la puesta a tierra del sistema, debido a que el elevado flujo de dispersión magnética circula a través de la chapa de la cuba, provocando un calentamiento excesivo. Los transformadores acorrazados y los grupos de tres transformadores monofásicos conectados en estrella/estrella tienen una impedancia homopolar que por el flujo magnético es prácticamente igual al valor de la impedancia en vacío, motivo por el cual no son apropiados para la puesta a tierra del sistema.

La impedancia homopolar de las líneas de transmisión depende en alto grado de su tipo (líneas aéreas o cables subterráneos) y de la conductividad del subsuelo. La impedancia que ofrece una línea aérea a las tres corrientes, iguales entre sí en intensidad y fase, del sistema homopolar resulta del circuito formado por los tres conductores y el retorno por tierra, la de los cables subterrá-

neos resulta del circuito formado por los tres conductores del cable, por la vaina de plomo y el retorno por tierra.

La reactancia homopolar de las líneas aéreas es aproximadamente 3...3,5 veces mayor que su reactancia directa, dependiendo este valor de la sección de los conductores y de la distribución de los mismos en los postes. La resistencia óhmica del sistema homopolar incluye, aparte de la de los conductores, la del retorno por tierra, exigiendo esta última un suplemento de aprox. 0,15 Ω/km a la resistencia óhmica del conductor.

Cuando las líneas aéreas están provistas de cables de tierra, una parte de la corriente del sistema homopolar también retorna por éstos. La reactancia homopolar no disminuye apreciablemente cuando estos cables de tierra son de acero, pero sí, cuando son de material buen conductor, por ejemplo de aluminio acero o de cobre\*.

La impedancia homopolar de los cables subterráneos difiere en grado mucho mayor de su impedancia directa que en el caso de las líneas aéreas, debido a la influencia de las envolturas de plomo. Los cables subterráneos de una sola envoltura de plomo tienen una reactancia homopolar mayor que aquellos con tres envolturas, y éstos, a su vez, tienen una reactancia homopolar mayor que los cables subterráneos unipolares. La resistencia óhmica del sistema homopolar comprende, aparte de la del conductor, la de las envolturas de plomo, las cuales aumentan en varias veces aquélla.

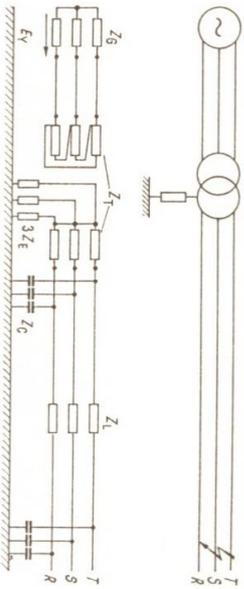


Fig. 7 Impedancias efectivas en el cortocircuito de una red trifásica

#### 4. Ecuaciones generales para la determinación de las corrientes de cortocircuito

Los distintos casos de cortocircuito se analizarán en el ejemplo sencillo de una red compuesta por un generador, un transformador y una línea, pudiendo considerarse este conjunto como parte integral de una red de mayor extensión.

\* "Nullimpedanz von Drehstromfelleitungen" ("Impedancia homopolar de líneas aéreas trifásicas"), por el doctor H. Dorsch, Siemens-Zeitschrift, julio, 1952, n.º 5.

La línea se supone abierta en su extremo. No obstante, las ecuaciones deducidas para la misma son de carácter general, de manera que también regirán para el caso de alimentarse la línea en dos o más puntos.

Las designaciones del esquema equivalente tienen el siguiente significado:

$Z_g$  impedancia de cortocircuito, por fase, del generador

$Z_r$  impedancia de cortocircuito, por fase, del transformador

$Z_l$  impedancia de la línea, por fase

$Z_c$  impedancia de fuga, del conductor hacia tierra

$Z_e$  impedancia de puesta a tierra del punto neutro del sistema

La impedancia  $Z_e$  de puesta a tierra es común para las tres fases y, por lo tanto, se aplicará en el esquema equivalente con su valor triple al referirlo a una sola fase. Con excepción de la impedancia a tierra  $Z_e$ , todas las demás impedancias del esquema están determinados por las exigencias particulares de la transmisión de energía. El valor de la impedancia de puesta a tierra puede ser elegido libremente de acuerdo con el comportamiento de la red que se desee en el caso de un cortocircuito.  $Z_e = 0$  corresponde a una red con punto neutro conectado rígidamente a tierra.

Normalmente no es necesario considerar la carga previa de la red (impedancia de los consumidores, capacitancias de servicio) en el cálculo de los cortocircuitos. Sin embargo, cuando ello resulta útil, dicha carga previa puede considerarse intercalando en los respectivos sistemas las impedancias correspondientes.

##### a) Cortocircuito tripolar

El cortocircuito tripolar es una carga simétrica. Las tensiones de las tres fases son nulas en el lugar del cortocircuito. Por lo tanto, rigen las siguientes condiciones:

$$U_R = U_S = U_T = 0$$

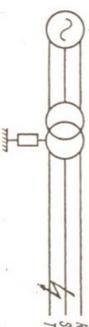
$$\text{Debido a que: } 3 U_{IR} = U_R + a \cdot U_S + a^2 \cdot U_T = 0$$

$$3 U_{2R} = U_R + a^2 \cdot U_S + a \cdot U_T = 0$$

$$3 U_0 = U_R + U_S + U_T = 0$$

$$\text{resulta también que: } U_{IR} = U_{2R} = U_0 = 0$$

Fig. 8 Cortocircuito tripolar



De las ecuaciones:

$$U_{IR} = E_Y - Z_1 \cdot I_{IR} = 0;$$

$$U_{2R} = -Z_2 \cdot I_{2R} = 0;$$

$$U_0 = -Z_0 \cdot I_0 = 0$$

$$I_S = a^2 \cdot I_{IR};$$

$$I_T = a \cdot I_{IR}$$

$$\text{resulta: } I_R = \frac{E_Y}{Z_1};$$

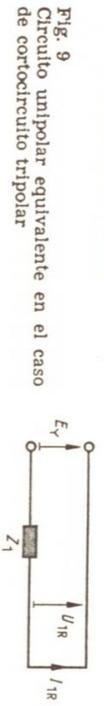
$$I_S = a^2 \cdot \frac{E_Y}{Z_1};$$

$$I_T = a \cdot \frac{E_Y}{Z_1}$$

Las corrientes de las tres fases tienen igual valor absoluto, de manera que se obtiene en forma general para el cortocircuito tripolar:

$$I_{k(3)} = \frac{E_Y}{Z_1}$$

El circuito monofásico que cumple con estas condiciones está representado en la figura 9.



La impedancia de puesta a tierra  $Z_e$  no tiene intervención en el cortocircuito, porque  $U_0 = 0$ . Un eventual contacto a tierra, simultáneo con el cortocircuito tripolar y en el mismo lugar de éste, tampoco tiene influencia.

La figura 10 permite apreciar, en el ejemplo de una red, cómo debe construirse en principio el esquema monofásico a utilizar en el cálculo.

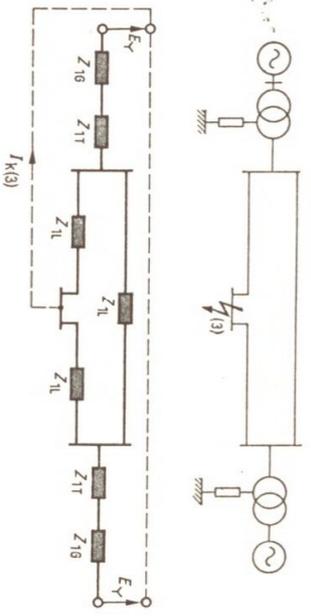


Fig. 10 Esquema de conexiones para el cálculo del cortocircuito tripolar

b) Cortocircuito bipolar sin contacto a tierra

En este caso rigen las siguientes condiciones:

$$U_S = U_R; I_R = 0; I_S = -I_R$$

y, por lo tanto, también:

$$U_R = a \cdot U_{IR} + a^2 \cdot U_{2R} + U_0; I_R = I_{IR} + I_{2R} + I_0 = 0$$

$$U_S = a^2 \cdot U_{IR} + a \cdot U_{2R} + U_0; 3I_0 = I_R + I_S + I_R = 0$$

Restando las ecuaciones de  $U_S$  y  $U_R$  se obtiene:

$$U_{IR} = U_{2R}$$

Además resulta:  $I_0 = \frac{U_0}{Z_0} = 0$

debido a  $U_0 = 0$  und  $I_R = -I_S$

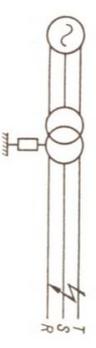


Fig. 11 Cortocircuito bipolar sin contacto a tierra

La figura 12 permite apreciar los sistemas directo e inverso que cumplen las condiciones citadas y, además, la suma de las componentes.

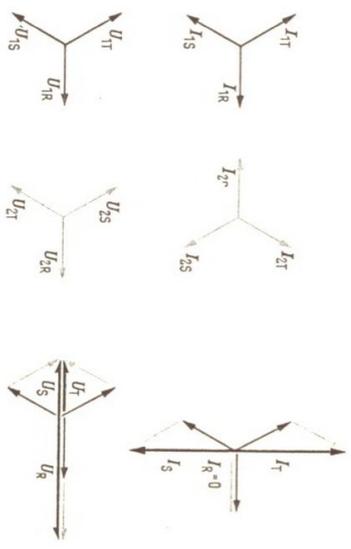


Fig. 12 Componentes simétricas y su composición en el cortocircuito bipolar sin contacto a tierra

La intensidad de la corriente de cortocircuito circulante a través de los conductores afectados por el defecto se determina como sigue, de acuerdo con las ecuaciones precisadas:

$$\text{Debido a que: } U_{IR} = U_{2R} \text{ und } I_{IR} = -I_{2R}$$

$$E_Y - Z_1 \cdot I_{IR} = -Z_2 \cdot (-I_{IR})$$

$$\text{resulta también } E_Y = Z_1 \cdot I_{IR} + Z_2 \cdot I_{IR}$$

y de lo que se obtiene:  $I_{IR} = -I_{2R} = \frac{E_Y}{Z_1 + Z_2}$

Además, rige:  $I_S = a^2 \cdot I_{1R} + a \cdot I_{2R}$  und  $I_T = a \cdot I_{1R} + a^2 \cdot I_{2R}$

de lo que resulta  $I_S = \frac{(a^2 - a) \cdot E_\gamma}{Z_1 + Z_2} = \frac{-j \cdot \sqrt{3} \cdot E_\gamma}{Z_1 + Z_2}$

y  $I_T = \frac{(a - a^2) \cdot E_\gamma}{Z_1 + Z_2} = \frac{j \cdot \sqrt{3} \cdot E_\gamma}{Z_1 + Z_2}$

El valor absoluto de ambas intensidades es igual. Por lo tanto, rige en forma general para el cortocircuito bipolar:

$$I_{K(2)} = \frac{\sqrt{3} \cdot E_\gamma}{Z_1 + Z_2}$$

Para el caso muy frecuente de  $Z_1 = Z_2$  se obtiene:

$$I_{K(2)} = \frac{\sqrt{3} \cdot E_\gamma}{2 \cdot Z_1} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{K(3)}$$

La tensión del conductor no afectado puede determinarse partiendo de la expresión ya conocida:

$$I_{1R} = -I_{2R} = \frac{E_\gamma}{Z_1 + Z_2}$$

como sigue:  $U_{1R} = E_\gamma - Z_1 \cdot \frac{E_\gamma}{Z_1 + Z_2} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot E_\gamma$

$$U_R = U_{1R} + U_{2R} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot E_\gamma$$

y en el caso de  $Z_1 = Z_2$  se obtiene:  $U_R = E_\gamma$ . La figura 13 indica el circuito unipolar que cumple con las condiciones indicadas:

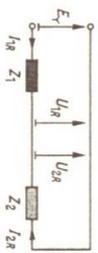


Fig. 13  
Circuito unipolar equivalente en el caso de cortocircuito bipolar sin contacto a tierra

La impedancia  $Z_E$  de puesta a tierra no tiene intervención en el cortocircuito, porque  $U_0 = 0$ .

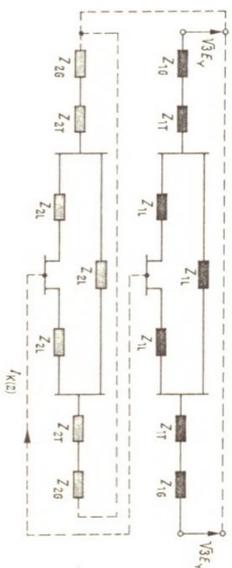
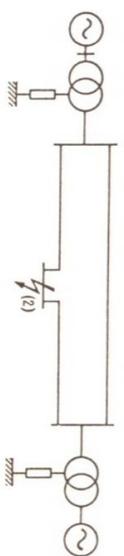


Fig. 14  
Esquema de conexiones para el cálculo del cortocircuito bipolar sin contacto a tierra

La figura 14 representa nuevamente el ejemplo de una red y la construcción del circuito monofásico a utilizar en el cálculo. De acuerdo con la condición arriba establecida:  $I_{1R} = -I_{2R}$  el sistema inverso ha sido conectado de forma que la corriente lo recorra en sentido contrario al del sistema directo.

c) Cortocircuito bipolar con contacto a tierra

Para este caso rigen las siguientes condiciones:

$$U_S = U_T = 0; \quad I_R = 0$$

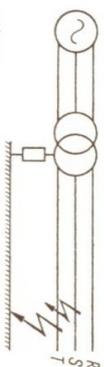


Fig. 15  
Cortocircuito bipolar con contacto a tierra  
De:  $I_R = I_{1R} + I_{2R} + I_0 = 0$   
 $I_{1R} = -I_{2R} - I_0$

Además, debido a  $3U_{1R} = U_R + a \cdot U_S + a^2 \cdot U_T = U_R$   
 $3U_{2R} = U_R + a^2 \cdot U_S + a \cdot U_T = U_R$   
 $3U_0 = U_R + U_S + U_T = U_R$

se obtiene:  $U_{1R} = U_{2R} = U_0$

La figura 16 representa la composición de los sistemas directo, inverso y homopolar, como también la suma de las componentes.

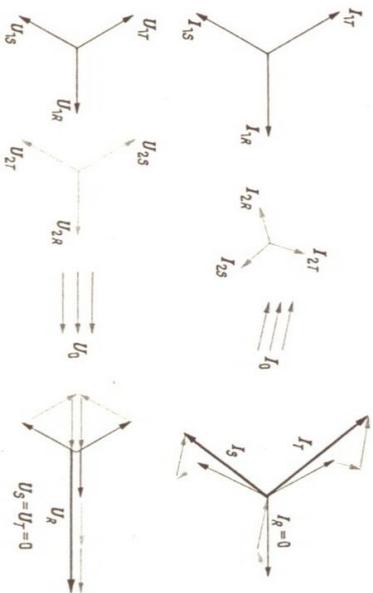


Fig. 16  
Componentes simétricas y su composición en el cortocircuito bipolar con contacto a tierra

La intensidad de la corriente de cortocircuito en los conductores afectados por el defecto puede calcularse como sigue:

debido a:  $U_{1R} = U_0$  und  $I_R = I_{1R} + I_{2R} + I_0 = 0$

se obtiene:

$$I_R = \frac{E_Y - U_{1R}}{Z_1} - \frac{U_{1R}}{Z_2} - \frac{U_{1R}}{Z_0} = 0$$

y:

$$U_{1R} = \frac{E_Y \cdot Z_0 \cdot Z_2}{Z_1 \cdot Z_2 + Z_2 \cdot Z_0 + Z_0 \cdot Z_1}$$

Reemplazando  $U_{1R}$  y efectuando el producto se obtiene:

$$I_{1R} = \frac{E_Y \cdot (Z_2 + Z_0)}{Z_1 \cdot Z_2 + Z_2 \cdot Z_0 + Z_0 \cdot Z_1}; \quad I_{2R} = - \frac{E_Y \cdot Z_0}{Z_1 \cdot Z_2 + Z_2 \cdot Z_0 + Z_0 \cdot Z_1}$$

$$I_0 = - \frac{E_Y \cdot Z_2}{Z_1 \cdot Z_2 + Z_2 \cdot Z_0 + Z_0 \cdot Z_1}$$

De las ecuaciones:

$$I_S = a^2 \cdot I_{1R} + a \cdot I_{2R} + I_0; \quad I_r = a \cdot I_{1R} + a^2 \cdot I_{2R} + I_0$$

resulta, después de algunas transformaciones:

$$I_S = \frac{-j \cdot \sqrt{3} \cdot E_Y \cdot [(1 + a^2) \cdot Z_2 + Z_0]}{Z_1 \cdot Z_2 + Z_2 \cdot Z_0 + Z_0 \cdot Z_1}$$

$$I_r = \frac{j \cdot \sqrt{3} \cdot E_Y \cdot [(1 + a) \cdot Z_2 + Z_0]}{Z_1 \cdot Z_2 + Z_2 \cdot Z_0 + Z_0 \cdot Z_1}$$

La tensión respecto a tierra del conductor no afectado se desprende sin mayor cálculo de las siguientes expresiones ya conocidas:

$$U_{1R} = U_{2R} = U_0$$

$$U_{1R} = \frac{E_Y \cdot Z_2 \cdot Z_0}{Z_1 \cdot Z_2 + Z_2 \cdot Z_0 + Z_0 \cdot Z_1}$$

obteniéndose:

$$U_R = \frac{3 \cdot E_Y \cdot Z_2 \cdot Z_0}{Z_1 \cdot Z_2 + Z_2 \cdot Z_0 + Z_0 \cdot Z_1}$$

Para el caso muy frecuente  $Z_1 = Z_2 = Z_0$  se obtiene:

$$U_R = 3 \cdot E_Y$$

$$U_R = Z_1 / Z_0 + 2$$

Las condiciones arriba mencionadas:

$U_{1R} = U_{2R} = U_0$  y  $I_R = -I_{2R} - I_0$  son cumplidas por el circuito unipolar de la figura 17.

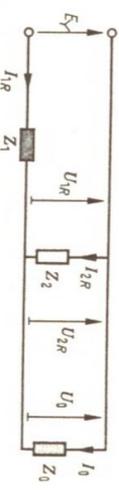


Fig. 17  
Circuito unipolar equivalente en el caso de cortocircuito bipolar con contacto a tierra

Para determinar  $I_{2R}$  o bien  $I_r$ , por medición, los valores medidos  $I_{1R}$  e  $I_{2R}$  deberán multiplicarse por  $a$  y  $a^2$ , de acuerdo con las relaciones indicadas, agregándoles luego a su suma el valor de  $I_0$ . La intensidad de corriente que pasa por tierra es  $3 I_0$ .

La figura 18 permite apreciar, en el ejemplo de una red, la forma de construir en principio el esquema unipolar de conexión. De acuerdo con la expresión encontrada:  $I_{1R} = -I_{2R} - I_0$ , los sistemas inverso y homopolar han de conectarse en tal forma que la corriente circule por ellos en dirección contraria a la del sistema directo.

Deberá tenerse en cuenta que la impedancia homopolar sólo deberá considerarse en aquellas partes de la red, en las cuales pueda desarrollarse el sistema homopolar. Forman parte del sistema homopolar en el ejemplo citado: las impedancias  $Z_g$  de puesta a tierra, las impedancias  $Z_c$  de fuga, las impedancias homopolares de los dos transformadores con puesta a tierra y las im-

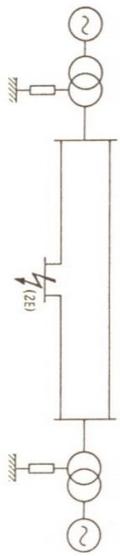
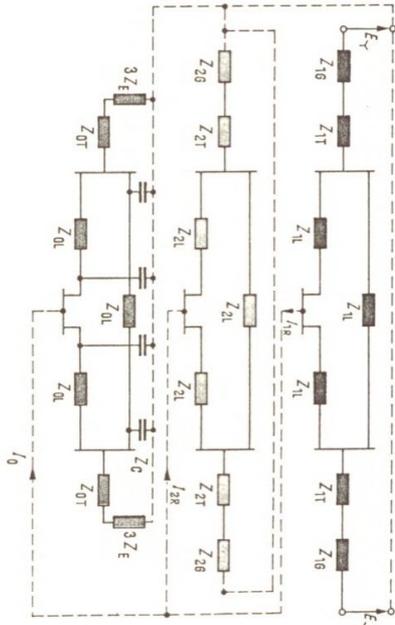


Fig. 18  
Esquema de conexiones para el cálculo del cortocircuito bipolar con contacto a tierra



pedancias homopolares de las líneas tendidas entre estos dos transformadores.

Las curvas representadas en las tablas I, II y III permiten una buena apreciación de la corriente de cortocircuito a esperar en caso de defecto bipolar con contacto a tierra. En estas tablas se indican las corrientes de cortocircuito que circulan por los conductores afectados y por tierra, en función de la relación  $Z_0/Z_1$  de los valores absolutos y en función del ángulo de desfase entre las impedancias  $Z_1$  y  $Z_0$ . En cuanto a la impedancia directa y la inversa se ha supuesto el caso muy frecuente  $Z_{11}/Z_2 = 1$ . Por otra parte, las intensidades están referidas a la intensidad del cortocircuito tripolar  $I_{k^{(3)}} = E_Y/Z_1$ , de manera que la representación gráfica permite una comparación directa de las intensidades de corriente correspondientes a ambos casos.

Las tablas I y II permiten apreciar que la intensidad de la corriente de cortocircuito varía considerablemente cuando  $Z_0/Z_1$  es de valor pequeño y cuando el ángulo de desfase entre  $Z_1$  y  $Z_0$  es grande. En el caso teórico de  $\phi_1 - \phi_0 = 180^\circ$  con  $Z_0/Z_1 = 0,5$  resulta el valor  $\infty$ , mientras que con  $\phi_1 - \phi_0 = 120^\circ$  y  $Z_0/Z_1 = 1$  puede quedar anulada la corriente en uno de los conductores afect-

tados. Cuando  $\phi_1 - \phi_0 > 90^\circ$ , esto quiere decir que una de las dos impedancias  $Z_0$  y  $Z_1$  debe poseer carácter capacitivo y la otra carácter inductivo. Este caso se produce prácticamente sólo en aquellas redes, cuyo punto neutro esté aislado, pues en estas redes aparece el efecto de la capacitancia  $Z_c$  en el sistema homopolar, mientras que en los sistemas directo e inverso prevalece la inductancia. Para  $Z_0 \rightarrow \infty$  las curvas tienden hacia el valor  $\sqrt{3}/2$ , es decir, hacia el valor correspondiente al cortocircuito bipolar sin contacto a tierra. En el caso de resultar de la resta  $\phi_1 - \phi_0$  un ángulo negativo, se intercambian las corrientes en los conductores: el valor correspondiente a la fase T rige para la fase S y viceversa.

La tabla III representa la intensidad de la corriente de cortocircuito que circula por tierra. Esta intensidad es tanto mayor, cuanto menor es la relación  $Z_0/Z_1$  y cuanto mayor es  $\phi_1 - \phi_0$ . El signo de esta diferencia de ángulos no tiene importancia para este caso.

La tabla IV representa el valor de la tensión a la frecuencia de servicio, correspondiente al conductor no afectado, en función de la relación  $Z_0/Z_1$  y del desfase  $\phi_1 - \phi_0$ . El signo del desfase no tiene influencia en el resultado. El valor teórico mínimo corresponde a  $Z_0 = 0$  y equivale a cero. Para  $Z_0 \rightarrow \infty$  las curvas tienden hacia el valor  $1,5 \cdot E_Y$ , es decir, la tensión respecto a tierra del conductor no afectado equivale entonces al 86,6% de la tensión completa  $\sqrt{3} \cdot E_Y$ .

La tensión toma valores especialmente elevados cuando  $\phi_1 - \phi_0$  sobrepasa los  $90^\circ$ . En el caso teórico  $\phi_1 - \phi_0 = 180^\circ$  con  $Z_0/Z_1 = 0,5$  resulta el valor  $\infty$ . Tal como ya se ha mencionado, el caso de  $\phi_1 - \phi_0 > 90^\circ$  prácticamente sólo es posible en las redes con punto neutro aislado.

d) Contacto unipolar a tierra (cortocircuito a tierra)

En este caso rigen las siguientes condiciones:

$$I_R = 0; \quad I_S = 0; \quad I_T = 0$$

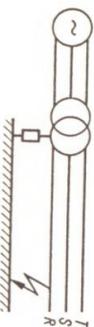
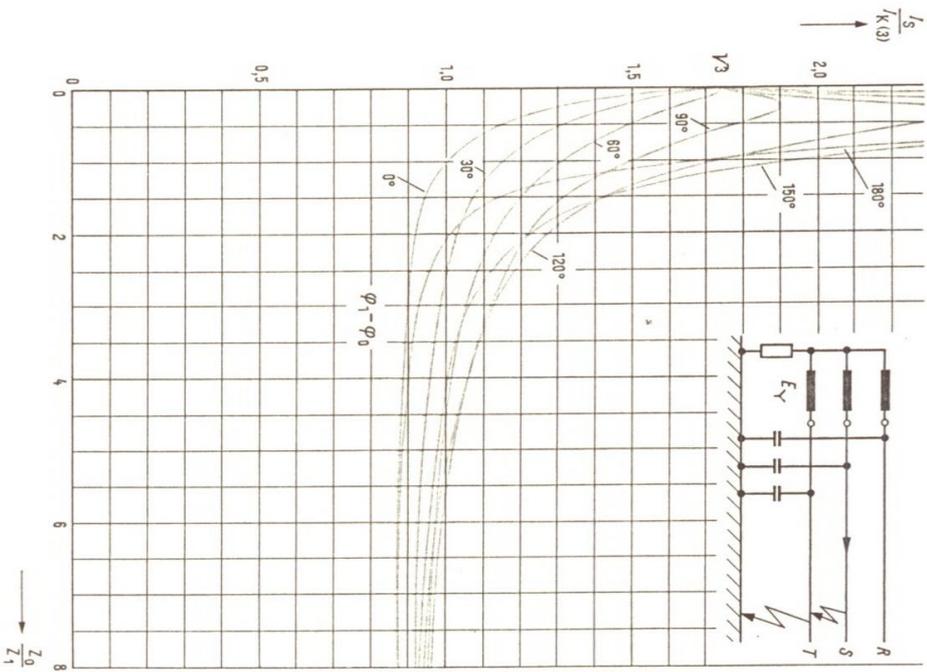


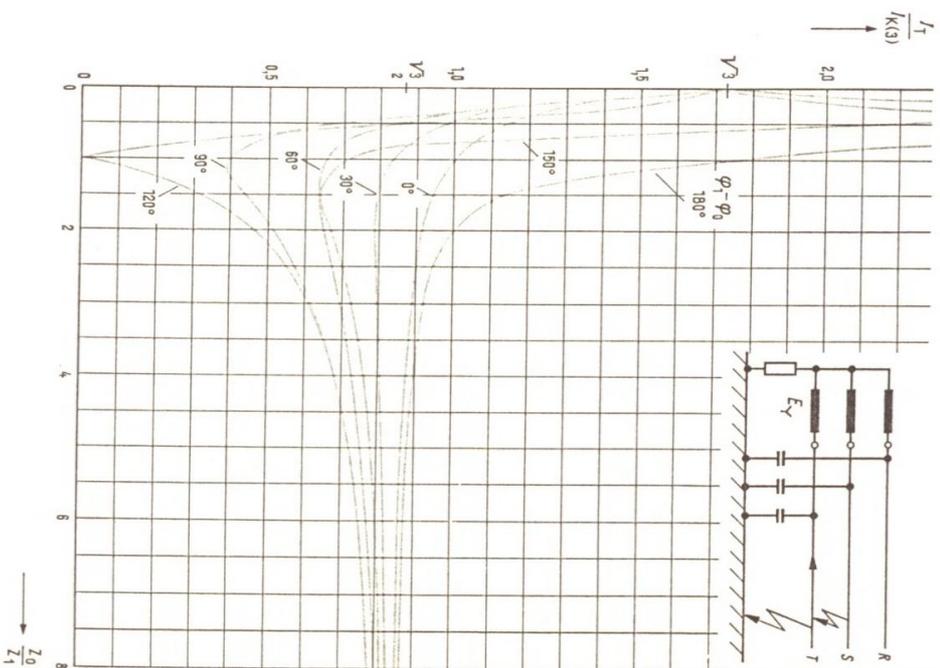
Fig. 19 Contacto unipolar a tierra



**TABLA I**  
 Cortocircuito bipolar con contacto a tierra  
 Corriente de cortocircuito en la fase S, comparada  
 del cortocircuito tripolar  
 $E_Y$  Fuerza electromotriz  
 $Z_0$  Impedancia del sistema homopolar  
 $Z_1$  Impedancia del sistema directo  
 $Z_2$  Impedancia del sistema inverso  
 $\varphi_1, -\varphi_0$  Desfase entre las  
 impedancias  $Z_1, Y, Z_0$

$$I_S = \frac{-j\sqrt{3}[(1+a^2)Z_2 + Z_0] \cdot E_Y}{Z_1 \cdot Z_2 + Z_2 \cdot Z_0 + Z_0 \cdot Z_1}$$

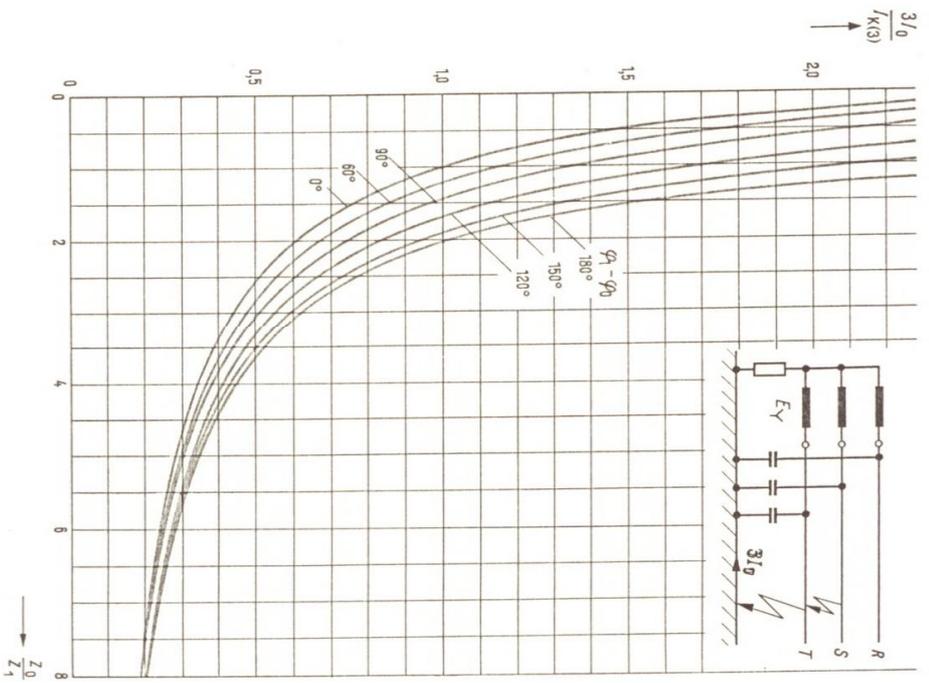
$$Z_1 = Z_2$$



**TABLA II**  
 Cortocircuito bipolar con contacto a tierra  
 Corriente del cortocircuito en la fase T, comparada  
 con la corriente del cortocircuito tripolar  
 $E_Y$  Fuerza electromotriz  
 $Z_0$  Impedancia del sistema homopolar  
 $Z_1$  Impedancia del sistema directo  
 $Z_2$  Impedancia del sistema inverso  
 $\varphi_1, -\varphi_0$  Desfase entre las  
 impedancias  $Z_1, Y, Z_0$

$$I_T = \frac{j\sqrt{3}[(1+a)Z_2 + Z_0] \cdot E_Y}{Z_1 \cdot Z_2 + Z_2 \cdot Z_0 + Z_0 \cdot Z_1}$$

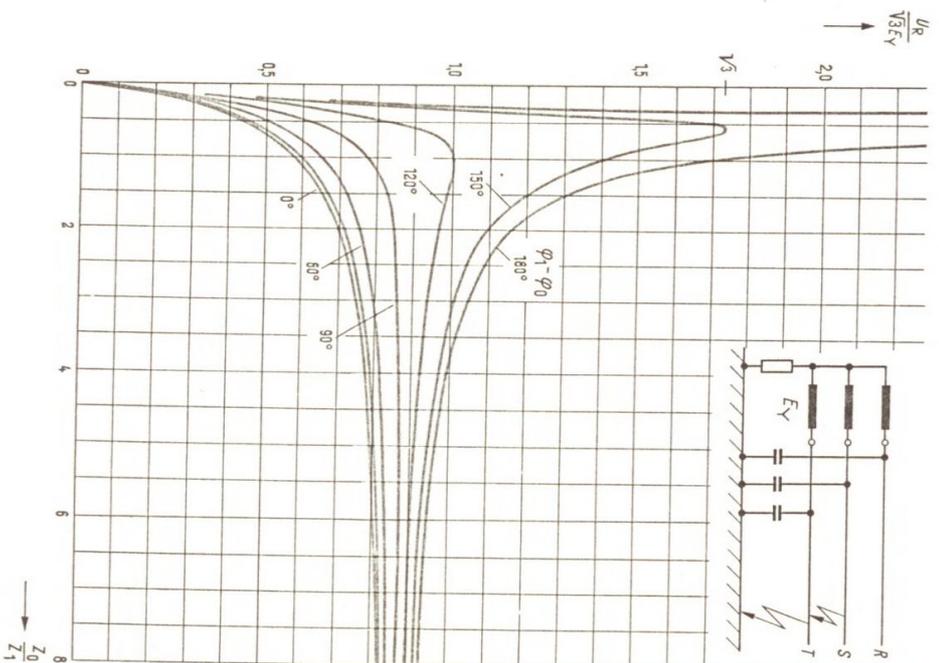
$$Z_1 = Z_2$$



**TABLA III**  
 Cortocircuito bipolar con contacto a tierra, comparada con la corriente del cortocircuito tripolar.  
 $E_Y$  Fuerza electromotriz  
 $Z_0$  Impedancia del sistema homopolar  
 $Z_1$  Impedancia del sistema directo  
 $Z_2$  Impedancia del sistema inverso  
 $\phi_1 - \phi_0$  Desfase entre las impedancias  $Z_1$  y  $Z_0$

$$3I_0 = \frac{-3Z_2}{Z_1 \cdot Z_2 + Z_2 \cdot Z_0 + Z_0 \cdot Z_1} \cdot E_Y$$

$$Z_1 = Z_2$$



**TABLA IV**  
 Tensión máxima a frecuencia de servicio entre el conductor no afectado y tierra, correspondiente al cortocircuito bipolar con contacto a tierra.  
 $E_Y$  Fuerza electromotriz  
 $Z_0$  Impedancia del sistema homopolar  
 $Z_1$  Impedancia del sistema directo  
 $Z_2$  Impedancia del sistema inverso  
 $\phi_1 - \phi_0$  Desfase entre las impedancias  $Z_1$  y  $Z_0$

$$U_R = \frac{3Z_0 \cdot Z_2}{Z_1 \cdot Z_2 + Z_2 \cdot Z_0 + Z_0 \cdot Z_1} \cdot E_Y$$

$$Z_1 = Z_2$$

Debido a las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} 3I_{1R} &= I_R + a \cdot I_S + a^2 \cdot I_R = I_R \\ 3I_{2R} &= I_R + a^2 \cdot I_S + a \cdot I_R = I_R \\ 3I_0 &= I_R + I_S + I_T = I_R \end{aligned}$$

resulta que:

$$I_{1R} = I_{2R} = I_0$$

Además de:

$$U_R = U_{1R} + U_{2R} + U_0 = 0$$

se obtiene:

$$U_{1R} = -U_{2R} - U_0$$

La figura 20 muestra la composición de los sistemas directo, inverso y homopolar que cumplen con estas condiciones, y representa también la suma de los componentes.

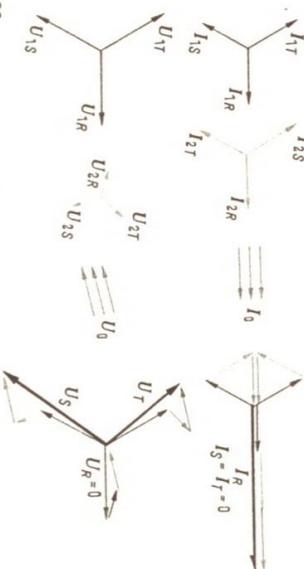


Fig. 20  
Componentes simétricas y su composición en el cortocircuito unipolar a tierra

La intensidad de la corriente de cortocircuito en el conductor afectado por el defecto puede calcularse como sigue:

Debido a que:

$$U_R = U_{1R} + U_{2R} + U_0 = 0 \text{ und } I_{1R} = I_{2R} = I_0$$

resulta:

$$U_R = E_Y - Z_1 \cdot I_{1R} - Z_2 \cdot I_{1R} - Z_0 \cdot I_{1R} = 0$$

$$I_{1R} = \frac{E_Y}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

Como rige:  $I_R = I_{1R} + I_{2R} + I_0 = 3I_{1R}$ , se obtiene la siguiente ecuación de validez general:

$$I_{k(1)} = I_R = \frac{3 \cdot E_Y}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

La tensión de los conductores no afectados se puede calcular con ayuda de las componentes simétricas como se indica a continuación. Para ello en las ecuaciones:

$$U_S = a^2 \cdot U_{1R} + a \cdot U_{2R} + U_0; \quad U_R = a \cdot U_{1R} + a^2 \cdot U_{2R} + U_0$$

se sustituyen las tensiones  $U_{1R}$ ,  $U_{2R}$  y  $U_0$  por sus equivalentes:

$$U_{1R} = E_Y - Z_1 \cdot I_{1R}; \quad U_{2R} = -Z_2 \cdot I_{2R}; \quad U_0 = -Z_0 \cdot I_0$$

considerando, además:

$$I_{1R} = I_{2R} = I_0 = \frac{E_Y}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

se obtiene, después de algunas transformaciones:

$$\begin{aligned} U_S &= E_Y \cdot \left( a^2 - \frac{Z_0 + a^2 \cdot Z_1 + a \cdot Z_2}{Z_0 + Z_1 + Z_2} \right) \\ U_T &= E_Y \cdot \left( a - \frac{Z_0 + a \cdot Z_1 + a^2 \cdot Z_2}{Z_0 + Z_1 + Z_2} \right) \\ U_0 &= E_Y \cdot \left( -\frac{Z_0}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \right) \end{aligned}$$

Las condiciones arriba indicadas:

son cumplidas por el circuito unipolar de la figura 21.

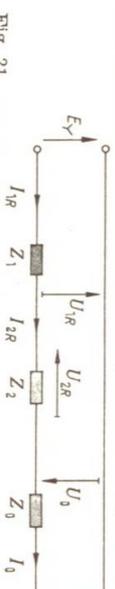


Fig. 21  
Circuito unipolar equivalente en el caso de cortocircuito unipolar

La figura 22 representa el mismo ejemplo de una red y la forma como debe construirse en principio el esquema unipolar de conexiones. De acuerdo con la condición  $I_R = I_{1R} = I_0$ , los sistemas inverso y homopolar se deben conectar en forma tal, que la corriente circule por ellos en el mismo sentido que en el sistema directo.

Las curvas de la tabla V permiten una buena apreciación de la influencia que tienen las impedancias sobre la intensidad del cortocircuito unipolar. Esta tabla representa la intensidad de la corriente de cortocircuito a tierra, en función de la relación  $Z_0/Z_1$  y del ángulo de desfase entre  $Z_0$  y  $Z_1$ . En cuanto a la impedancia directa y a la impedancia inversa, se ha supuesto el caso muy frecuente en que  $Z_1/Z_2 = 1$ . Por otra parte, la intensidad está referida a la intensidad del cortocircuito tripolar  $I_{k(3)} = E_Y/Z_1$ , para permitir una comparación directa de las intensidades de corriente que se presentan en ambos casos. Las curvas permiten apreciar que la corriente de cortocircuito aumenta considerablemente cuan-

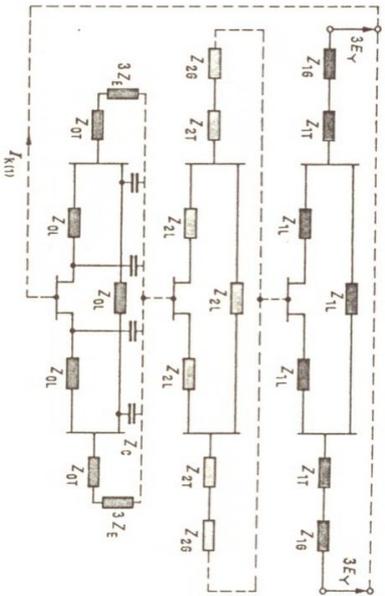
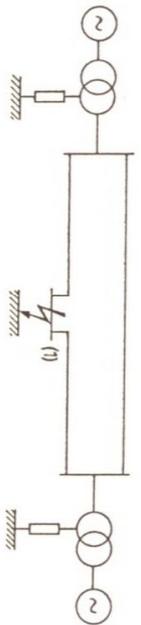


Fig. 22  
Esquema de conexiones para el cálculo del cortocircuito unipolar a tierra

do el desfase entre  $Z_1$  y  $Z_0$  es grande. En el caso teórico  $\varphi_1 - \varphi_0 = 180^\circ$  con  $Z_0/Z_1 = 2$  resulta el valor  $\infty$ . Sin embargo,  $\varphi_1 - \varphi_0 > 90^\circ$  significa que la impedancia homopolar debe tener carácter capacitivo y este caso prácticamente sólo es posible en aquellas redes cuyo punto neutro está aislado.

Las tablas VI y VII representan las tensiones a frecuencia de servicio, respecto a tierra, de los conductores no afectados, en función de la relación  $Z_0/Z_1$  y del desfase  $\varphi_1 - \varphi_0$ . Con  $Z_1 = 0$  ambos conductores tienen la misma tensión respecto a tierra, o sea:  $0,5 \cdot \sqrt{3} \cdot E_Y$ . Con  $Z_0 \rightarrow \infty$  todas las curvas tienden hacia el valor  $\sqrt{3} \cdot E_Y$ , es decir, la tensión respecto a tierra de los conductores no afectados equivale en tal caso a la tensión compuesta.

Las tensiones toman valores especialmente elevados cuando el desfase de las impedancias excede los  $90^\circ$ . En el caso teórico  $\varphi_1 - \varphi_0 = 180^\circ$  con  $Z_0/Z_1 = 2$  resulta el valor  $\infty$ . Pero, como ya se ha mencionado, el caso de  $\varphi_1 - \varphi_0 > 90^\circ$  se produce prácticamente sólo en las redes con punto neutro aislado. Cuando de la resta  $\varphi_1 - \varphi_0$  resulte un ángulo negativo, se intercambian las tensiones de las fases: el valor correspondiente a la fase S registrará para la fase T y viceversa.

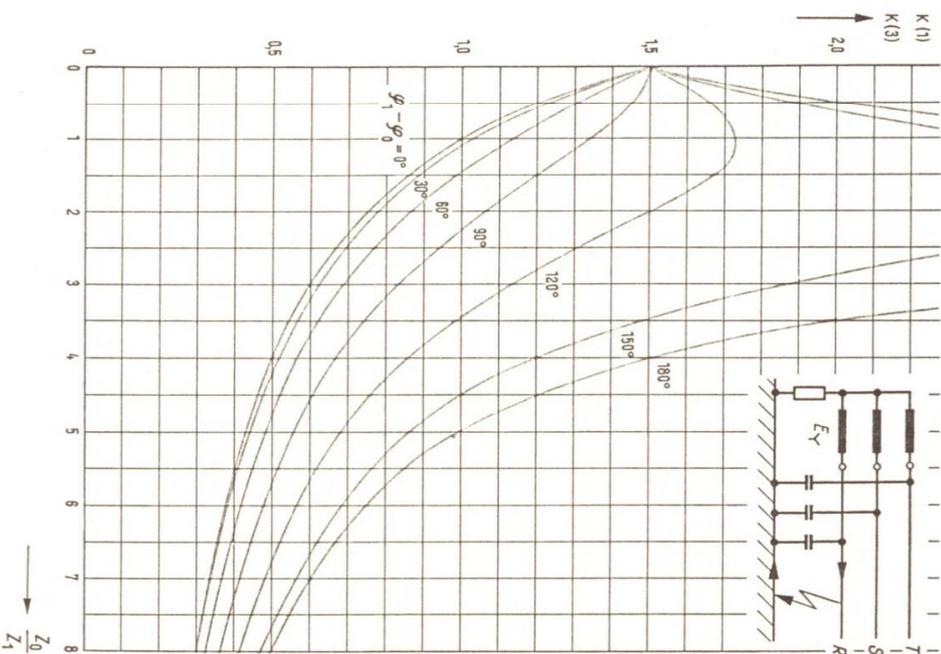
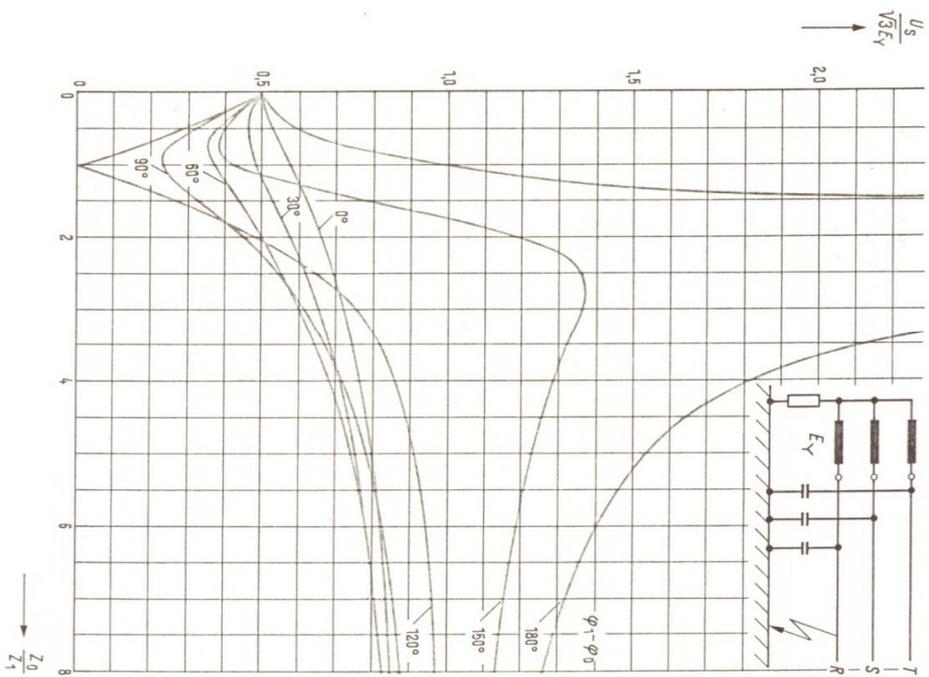


TABLA V.  
Intensidad de la corriente del cortocircuito unipolar, comparada con la del cortocircuito tripolar.  
 $E_Y$  Fuerza electromotriz  
 $Z_0$  Impedancia del sistema homopolar  
 $Z_1$  Impedancia del sistema directo  
 $Z_2$  Impedancia del sistema inverso  
 $\varphi_1 - \varphi_0$  Desfase entre las impedancias  $Z_1$  y  $Z_0$

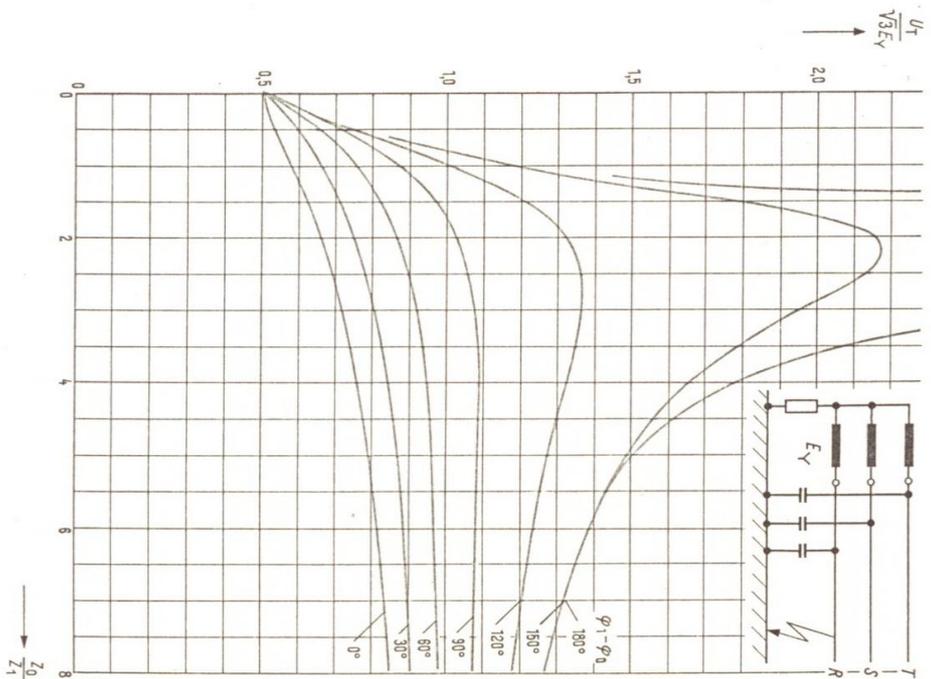
$$K_{(1)} = I_R = \frac{3 E_Y}{Z_0 + Z_1 + Z_2}$$



**Tabla VI**  
 Contacto unipolar a tierra  
 Tensión a frecuencia de servicio de la fase S respecto a tierra  
 $E_Y$  Fuerza electromotriz  
 $Z_0$  Impedancia del sistema homopolar  
 $Z_1$  Impedancia del sistema directo  
 $Z_2$  Impedancia del sistema inverso  
 $\phi_1 - \phi_0$  Desfase entre las impedancias  $Z_1$  y  $Z_0$

$$U_S = \left[ a^2 - \frac{Z_0 + a^2 Z_1 + a Z_2}{Z_0 + Z_1 + Z_2} \right] E_Y$$

$$Z_1 = Z_2$$



**Tabla VII**  
 Contacto unipolar a tierra  
 Tensión a frecuencia de servicio de la fase T respecto a tierra  
 $E_Y$  Fuerza electromotriz  
 $Z_0$  Impedancia del sistema homopolar  
 $Z_1$  Impedancia del sistema directo  
 $Z_2$  Impedancia del sistema inverso  
 $\phi_1 - \phi_0$  Desfase entre las impedancias  $Z_1$  y  $Z_0$

$$U_T = \left[ a - \frac{Z_0 + a Z_1 + a^2 Z_2}{Z_0 + Z_1 + Z_2} \right] E_Y$$

$$Z_1 = Z_2$$

e) *Contacto doble a tierra*

Por tratarse de un caso muy particular (el defecto se presenta simultáneamente en dos puntos distintos de la red), las relaciones se deducirán partiendo de una red cuyo esquema de impedancias venga representado por una conexión en estrella. De esta manera, las relaciones podrán aplicarse también a todas las redes enmascaradas y con alimentación múltiple, que pueden reducirse a una conexión en estrella de impedancias por medio de una transformación del circuito en triángulo en otro en estrella equivalente. Obsérvese que en la impedancia  $Z_c$  se han incluido todas las impedancias propias de la alimentación, o sea, también las del transformador y generador.

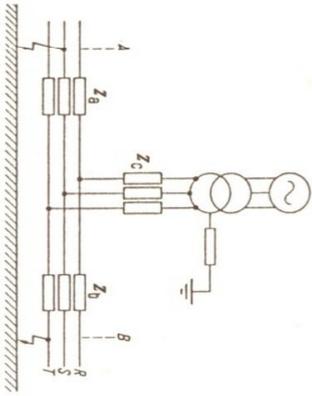


Fig. 23 Contacto doble a tierra

En el punto de defecto A, figura 23, se cumplen las condiciones:

$$I_R = 0; \quad I_T = 0; \quad U_S = 0$$

por lo tanto,

$$3I_{1S} = a^2 I_R + I_S + a I_T = I_S$$

$$3I_{2S} = a I_R + I_S + a^2 I_T = I_S$$

$$3I_{0S} = I_R + I_S + I_T = I_S$$

y

$$I_{1S} = I_{2S} = I_{0S}$$

En el punto de defecto B se cumple:

$$I_R = 0; \quad I_S = 0; \quad U_T = 0$$

y como

$$3I_{1T} = a I_R + a^2 I_S + I_T = I_T$$

$$3I_{2T} = a^2 I_R + a I_S + I_T = I_T$$

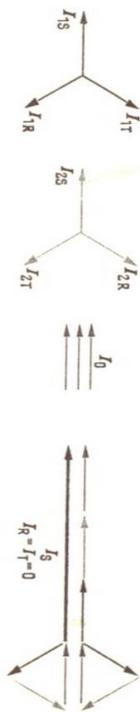
$$3I_{0T} = I_R + I_S + I_T = I_T$$

resulta en este

$$I_{1T} = I_{2T} = I_{0T}$$

En la figura 24 puede verse la constitución de los sistemas directo, inverso y homopolar que corresponden a las anteriores condiciones, así como la adición de las componentes para los dos puntos, A y B, en que tiene lugar el defecto.

*Punto de defecto A*



*Punto de defecto B*

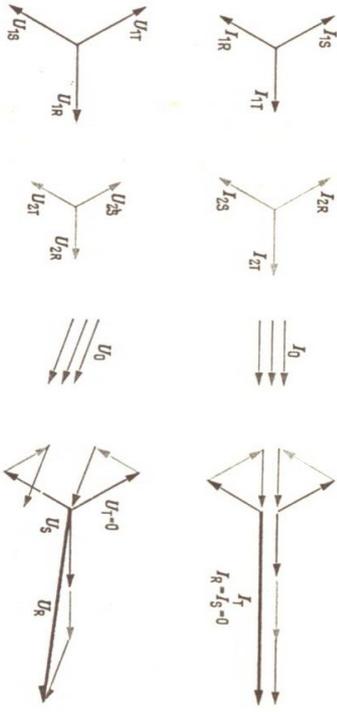


Fig. 24 Componentes simétricas y su composición en el caso de contacto doble a tierra

En la red que se ha tomado como base se verifican además las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} U_{ISA} &= a^2 E_Y - Z_{1c} (I_{IS} + a I_{IT}) - Z_{1a} \cdot I_S \\ U_{SSA} &= -Z_{2c} (I_{2S} + a^2 I_{2T}) - Z_{2a} \cdot I_{2S} \\ U_{0A} &= -Z_{0c} (I_{0S} + I_{0T}) - Z_{0a} \cdot I_{0S} \\ U_{ITB} &= a E_Y - Z_{1c} (I_{IT} + a^2 I_{IS}) - Z_{1b} \cdot I_{IT} \\ U_{ITB} &= -Z_{2c} (I_{IT} + a I_{2S}) - Z_{2b} \cdot I_{IT} \\ U_{0B} &= -Z_{0c} (I_{0T} + I_{0S}) - Z_{0b} \cdot I_{0T} \end{aligned}$$

De las condiciones

$$\begin{aligned} U_{SA} &= U_{ISA} + U_{SSA} + U_{0A} = 0 \\ U_{TB} &= U_{ITB} + U_{2TB} + U_{0B} = 0 \end{aligned}$$

y

teniendo además en cuenta que

$$I_{IS} = I_{2S} = I_{0S} \quad \text{und} \quad I_{IT} = I_{2T} = I_{0T}$$

se deducen las dos igualdades siguientes:

$$\begin{aligned} a^2 E_Y &= (Z_{1c} + Z_{2c} + Z_{0c} + Z_{1a} + Z_{2a} + Z_{0a}) \cdot I_{0S} + (a Z_{1c} + a^2 Z_{2c} + Z_{0c}) \cdot I_{0T} \\ a E_Y &= (Z_{1c} + Z_{2c} + Z_{0c} + Z_{1b} + Z_{2b} + Z_{0b}) \cdot I_{0T} + (a^2 Z_{1c} + a Z_{2c} + Z_{0c}) \cdot I_{0S} \end{aligned}$$

Multiplicando la última ecuación por  $a$  se pueden despejar  $I_{0S}$  e  $I_{0T}$  de los segundos miembros.

Teniendo en cuenta que  $I_S = 3I_{0S}$  e  $I_T = 3I_{0T}$ , las corrientes que fluyen a tierra en los puntos de defecto  $A$  y  $B$  son por consiguiente:

$$\begin{aligned} I_S &= \frac{3 E_Y}{N_S} [(a^2 - 1) Z_{2c} + (a^2 - a) Z_{0c} + a^2 (Z_{1b} + Z_{2b} + Z_{0b})] \\ I_T &= \frac{3 E_Y}{N_S} [(a - 1) Z_{2c} + (a - a^2) Z_{0c} + a (Z_{1a} + Z_{2a} + Z_{0a})] \end{aligned}$$

Siendo

$$\begin{aligned} N_S &= 3(Z_{1c} Z_{2c} + Z_{1c} Z_{0c} + Z_{2c} Z_{0c}) + (Z_{1a} + Z_{2a} + Z_{0a}) \cdot (Z_{1b} + Z_{2b} + Z_{0b}) \\ &+ (Z_{1a} + Z_{2a} + Z_{0a} + Z_{1b} + Z_{2b} + Z_{0b}) \cdot (Z_{1c} + Z_{2c} + Z_{0c}) \end{aligned}$$

Al punto neutro del sistema, puesto a tierra, fluye una corriente:

$$I_S + I_T = \frac{3 E_Y}{N_S} [-3 Z_{2c} + a (Z_{1a} + Z_{2a} + Z_{0a}) + a^2 (Z_{1b} + Z_{2b} + Z_{0b})]$$

Sin embargo, dicha corriente no es, por regla general, superior a la que circula desde el punto de defecto más próximo hacia el neutro del sistema, en caso de cortocircuito bipolar con contacto

40

a tierra, o bien de contacto a tierra unipolar. Por lo tanto, en lo que sigue se tendrá solamente en cuenta la corriente que circula a través de tierra entre los dos puntos de defecto, en el caso de que  $Z_{0c} \rightarrow \infty$ , significando esto último que el punto neutro de la red no está puesto a tierra, o que lo está a través de bobinas ajustadas a la capacidad de la red.

Bajo este supuesto, la expresión que sirve para determinar en ambos puntos de defecto,  $A$  y  $B$ , la corriente que pasa a tierra, o sale de ella, es la siguiente:

$$I_T = -I_S = \frac{(a - a^2) E_Y}{Z_{1c} + Z_{2c} + \frac{1}{3} (Z_{1a} + Z_{2a} + Z_{0a} + Z_{1b} + Z_{2b} + Z_{0b})} = \frac{(a - a^2) E_Y}{N_T}$$

Con  $Z_1 = Z_2$  y sustituyendo al mismo tiempo  $(a - a^2)$  por  $j\sqrt{3}$ , se simplifica la igualdad, resultando

$$I_T = -I_S = \frac{2 Z_{1c} + \frac{2}{3} (Z_{1a} + Z_{1b}) + \frac{1}{3} (Z_{0a} + Z_{0b})}{j\sqrt{3} E_Y}$$

Las componentes de las tensiones, que aparecen en los puntos de defecto  $A$  y  $B$ , se deducen de las ecuaciones correspondientes, dadas al principio:

$$\begin{aligned} U_{ITR} &= \frac{E_Y}{N_T} [a N_T - a Z_{1c} - (a - 1) \frac{1}{3} Z_{1a}] \\ U_{ITR} &= \frac{E_Y}{N_T} [a^2 Z_{2c} + (a^2 - 1) \frac{1}{3} Z_{2a}] \\ U_{0A} &= \frac{E_Y}{N_T} [-a^2 N_T - a Z_{2c} + a^2 Z_{1c} - \frac{1}{3} (a - a^2) (Z_{1a} + Z_{2a})] \\ U_{ISB} &= \frac{E_Y}{N_T} [a^2 N_T - a^2 Z_{1c} - (a^2 - 1) \frac{1}{3} Z_{1b}] \\ U_{2SB} &= \frac{E_Y}{N_T} [a Z_{2c} + (a - 1) \frac{1}{3} Z_{2b}] \\ U_{0B} &= \frac{E_Y}{N_T} [-a N_T - a^2 Z_{2c} + a Z_{1c} - \frac{1}{3} (a^2 - a) (Z_{1b} + Z_{2b})] \end{aligned}$$

Obteniéndose de ello para las tensiones:

$$\begin{aligned} U_{TA} &= U_{ITR} + U_{2TA} + U_{0A} & U_{SB} &= U_{ISB} + U_{2SB} + U_{0B} \\ U_{RA} &= 2U_{0A} - (U_{ITR} + U_{2TA}) & U_{RB} &= 2U_{0B} - (U_{ISB} + U_{2SB}) \end{aligned}$$

las expresiones siguientes, después de sumar convenientemente los componentes:

$$\begin{aligned}
 U_{TA} &= \frac{E_Y}{N_T} \left[ (a - a^2) N_T - (a - a^2)(Z_{1c} + Z_{2c}) - a Z_{1a} + a^2 Z_{2a} \right] \\
 U_{RA} &= \frac{E_Y}{N_T} \left[ (1 - a^2) N_T - (1 - a^2) Z_{1c} - (a - 1) Z_{2c} + a^2 Z_{1a} - a Z_{2a} \right] \\
 U_{SB} &= \frac{E_Y}{N_T} \left[ (a^2 - a) N_T - (a^2 - a)(Z_{1c} + Z_{2c}) - a^2 Z_{1b} + a Z_{2b} \right] \\
 U_{RB} &= \frac{E_Y}{N_T} \left[ (1 - a) N_T - (1 - a) Z_{1c} - (a^2 - 1) Z_{2c} + a Z_{1b} - a^2 Z_{2b} \right]
 \end{aligned}$$

La figura 25 muestra la constitución de principio del esquema de conexiones unipolar para evaluar la corriente debida a un doble contacto a tierra, así como las componentes de las tensiones que se presentan en los dos puntos de defecto, para el caso más frecuente de  $Z_1 = Z_2$ . Los valores de las tensiones representadas con líneas de trazos discontinuos se obtienen cuando el conmutador  $U$  están en la posición correspondiente.

En contraposición a los casos tratados anteriormente, con un solo punto de defecto, las componentes de las tensiones  $U_1$ ,  $U_2$  y  $U_0$ , no se pueden medir en este caso directamente. Sin embargo, se pueden medir las sumas de las componentes, tal como se representa en el esquema, obteniéndose fácilmente a partir de dichas sumas las tensiones buscadas.

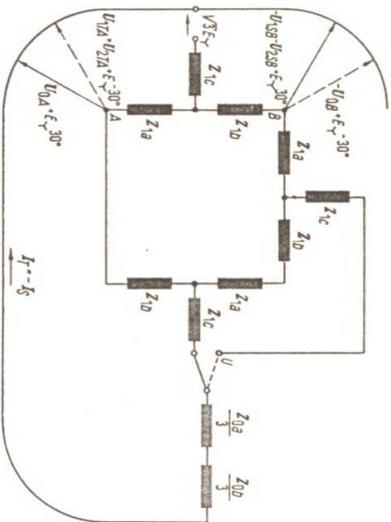
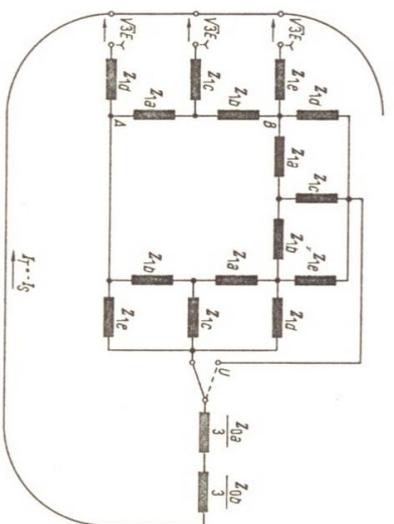


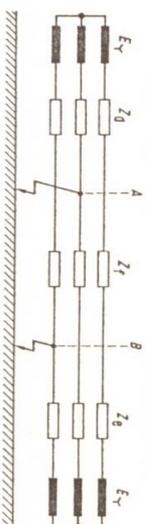
Fig. 25 Esquema de conexiones para el cálculo del contacto doble a tierra (alimentación simple)

El esquema anterior es válido en general y no está sujeto a limitación alguna, en lo que respecta al número de alimentaciones.



En la figura 26 se representa, por ejemplo, el caso de una triple alimentación a través de las impedancias  $Z_a$ ,  $Z_b$  y  $Z_c$ . En el caso especial de doble alimentación a través de las impedancias  $Z_d$  y  $Z_e$ , según la figura 27, la corriente de contacto doble a tierra puede también determinarse de manera puramente numérica por medio de la expresión:

$$I_T = -I_S = \frac{(a - a^2) E_Y}{Z_{1d} Z_{1e} + \frac{1}{3} Z_{1f} (Z_{1d} + Z_{1e}) + \frac{Z_{2d} Z_{2e} + \frac{1}{3} Z_{2f} (Z_{2d} + Z_{2e})}{Z_{1d} + Z_{1e} + Z_{1f}} + \frac{1}{3} Z_{0f}}$$



La igualdad anterior se obtiene efectuando la transformación estrella-triángulo de la red utilizada para deducir las relaciones con las impedancias en estrella  $Z_a$ ,  $Z_b$  y  $Z_c$ . En el caso más frecuente, en que  $Z_1 = Z_2$ , y sustituyendo  $(a - a^2)$  por  $j\sqrt{3}$ , la igualdad se simplifica, quedando:

$$I_T = -I_S = \frac{j\sqrt{3} E_Y}{\frac{2Z_{1d} Z_{1e} + \frac{2}{3} Z_{1f} (Z_{1d} + Z_{1e})}{Z_{1d} + Z_{1e} + Z_{1f}} + \frac{1}{3} Z_{0f}}$$

En las tablas VIII y IX se han representado las curvas de tensión de las fases R y T en el punto de cortocircuito A, a la fre-

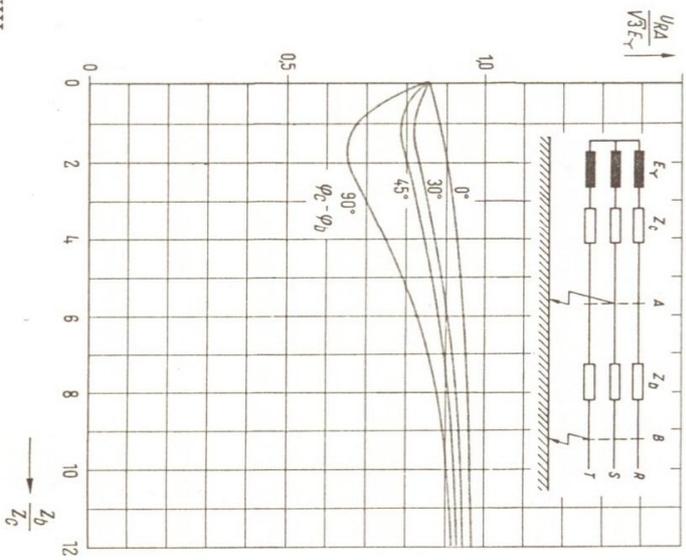


TABLA VIII

Tensión respecto a tierra de la fase R, a la frecuencia de servicio, en el punto de cortocircuito A, en el caso de contacto doble a tierra

$$U_{RA} = -\sqrt{3} E_{\gamma} \left[ a - \frac{a Z_{1c} + a^2 Z_{2c}}{Z_{1c} + Z_{2c} + \frac{1}{3} (Z_{1b} + Z_{2b} + Z_{0b})} \right]$$

- $E_{\gamma}$  Fuerza electromotriz
- $Z_0$  Impedancia del sistema homopolar
- $Z_1$  Impedancia del sistema directo
- $Z_2$  Impedancia del sistema inverso
- $\varphi_c - \varphi_b$  Desfase entre las impedancias  $Z_c$  y  $Z_b$

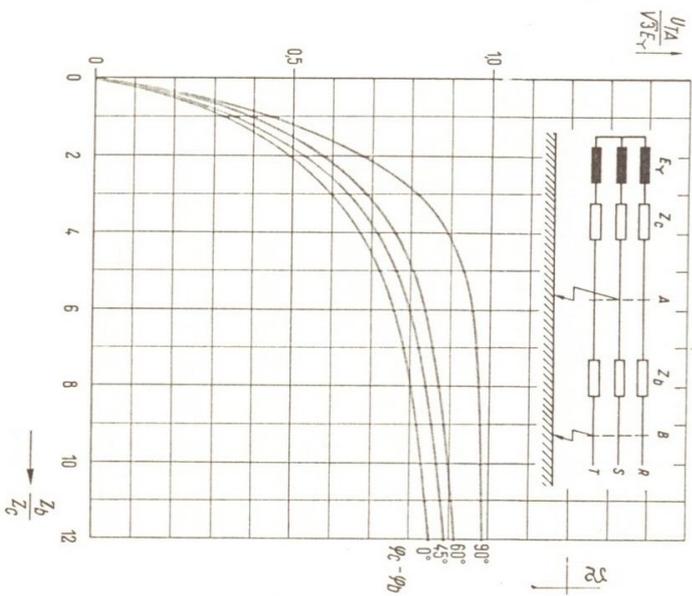


TABLA IX

Tensión respecto a tierra de la fase T, a la frecuencia de servicio, en el punto de cortocircuito A, en el caso de contacto doble a tierra

$$U_{TA} = \sqrt{3} E_{\gamma} \left[ 1 - \frac{Z_{1c} + Z_{2c}}{Z_{1c} + Z_{2c} + \frac{1}{3} (Z_{1b} + Z_{2b} + Z_{0b})} \right]$$

- $E_{\gamma}$  Fuerza electromotriz
- $Z_0$  Impedancia del sistema homopolar
- $Z_1$  Impedancia del sistema directo
- $Z_2$  Impedancia del sistema inverso
- $\varphi_c - \varphi_b$  Desfase entre las impedancias  $Z_c$  y  $Z_b$

cuencia de servicio, y en función de la relación  $Z_0/Z_c$  y del desfase entre las impedancias  $Z_c$  y  $Z_0$ . Se ha supuesto, una vez más, que la impedancia directa y la inversa son iguales. Con  $Z_0 = 0$  se obtiene una tensión de la fase no afectada,  $R$ , igual a  $0,866 \cdot \sqrt{3} E_y = 1,5 E_y$ , mientras que la tensión de la fase  $T$ , en contacto con tierra, es nula. Para  $Z_0 \rightarrow \infty$  tienden todas las curvas al valor  $\sqrt{3} E_y$ , es decir, tanto la tensión respecto a tierra de la fase  $R$ , como la de la fase  $T$ , resultan en este caso igual a la tensión com- puesta.

##### 5. Comparación de los distintos casos de cortocircuito

De la comparación de los resultados obtenidos para los cortocircuitos tripolares y bipolares resulta que la corriente del cortocircuito bipolar no excede  $\sqrt{3}/2$  veces el valor de la corriente del cortocircuito tripolar, siempre que  $Z_2 = Z_1$ , lo que en la gran mayoría de los casos es así. Por otra parte, las curvas de las tablas I a VII permiten apreciar que, bajo ciertas condiciones, las corrientes del cortocircuito bipolar con contacto a tierra y las del cortocircuito unipolar pueden superar a la corriente del cortocircuito tripolar y que, además, pueden presentarse considerables elevaciones de tensión a frecuencia de servicio en las fases no afectadas por el defecto. Estas condiciones especiales se someterán a continuación a un estudio crítico.

##### a) Redes con punto neutro aislado

Como ya se ha explicado más arriba, los valores extremadamente elevados de la corriente y de la tensión se presentan en ambos casos de cortocircuito únicamente cuando el desfase de las impedancias  $Z_1$  y  $Z_0$  es grande y, además, cuando la relación  $Z_0/Z_1$  es pequeña. Un desfase elevado entre las impedancias citadas sólo es posible en las redes con punto neutro aislado, excluyendo de estas consideraciones el caso de un sistema con puesta a tierra capacitiva del punto neutro. Para que en tales redes la relación  $Z_0/Z_1$  sea pequeña, la corriente del cortocircuito tripolar, medida en el lugar del defecto, no debe ser mucho mayor que la corriente de carga capacitiva de todas las líneas conectadas galvánicamente entre sí en la red observada. Este caso prácticamente no se presenta. Generalmente, la relación  $Z_0/Z_1$  tendrá un valor mínimo de 5, siendo superado considerablemente en la gran mayoría de los casos.

Como, por otra parte, la corriente del cortocircuito bipolar con contacto a tierra y la del cortocircuito unipolar es, a partir de  $Z_0/Z_1 = 5$ , menor que la corriente del cortocircuito tripolar, generalmente no es necesario considerar estos defectos al determinar la intensidad máxima de cortocircuito. Por lo tanto, en las redes con punto neutro aislado la intensidad máxima de cortocircuito se presenta siempre con el defecto tripolar.

##### b) Redes cuyo punto neutro tiene puesta a tierra inductiva

Cuando el punto neutro de la red no esté aislado, encontrándose conectado a tierra a través de una inductancia, y cuando dicha inductancia  $3 \cdot Z_E + Z_{or}$  esté exactamente ajustada a la capacidad  $Z_c$  de la red, resulta que la impedancia del sistema homopolar adquiere un valor prácticamente infinito. En ambos casos de cortocircuito circulará por tierra únicamente una pequeña corriente residual inevitable. La corriente del cortocircuito bipolar con contacto a tierra adquiere entonces el valor correspondiente al cortocircuito bipolar sin contacto a tierra, mientras que la del contacto unipolar con tierra es casi nula. Por lo tanto, también en este caso la intensidad máxima de cortocircuito es la correspondiente al defecto tripolar.

Cuando la compensación de la red no es exacta, deben distinguirse dos casos:

- $\alpha$ ) La reactancia inductiva  $3 \cdot Z_E + Z_{or}$  es mayor que la reactancia capacitiva  $Z_c$  de la red respecto a tierra (compensación incompleta).
- $\beta$ ) La reactancia inductiva  $3 \cdot Z_E + Z_{or}$  es menor que la reactancia capacitiva  $Z_c$  de la red respecto a tierra (compensación excesiva).

En el caso  $\alpha$ ), la impedancia del sistema homopolar resulta aumentada por la inductancia a tierra, conectada en paralelo con la capacitancia de la red, pero la impedancia homopolar mantiene su carácter capacitivo. La corriente a tierra es, por lo tanto, en ambos defectos menor que en las redes con punto neutro aislado. En el caso  $\beta$ ), la impedancia del sistema homopolar aumentará solamente cuando la inductancia  $3 \cdot Z_E + Z_{or}$  no sea menor que el 50% del valor de la capacitancia de las líneas respecto a tierra. Bajo esta condición, la intensidad de cortocircuito en ambos defectos también sigue siendo menor que en las redes cuyo punto neutro esté aislado y, por consecuencia, menor que el valor del cortocircuito tripolar.

Por el contrario, cuando  $3 \cdot Z_E + Z_{or}$  es menor que el 50% del valor de la capacitancia de la red, la impedancia del sistema homopolar también disminuye. Pero, por otra parte, esta impedancia homopolar tiene carácter inductivo y el desfase  $\phi_1 - \phi_0$  entre las impedancias no excede del margen de  $0 \dots 90^\circ$ . Los valores extremadamente elevados de las intensidades y tensiones que correspondían a desfases mayores de  $90^\circ$  no se presentarán, por lo tanto, en las redes cuyo punto neutro posee puesta a tierra inductiva. La disminución de la impedancia homopolar puede provocar, sin embargo, que la relación  $Z_0/Z_1$  sea menor de 5, de manera que la corriente de cortocircuito posible en ambos defectos puede llegar a superar el valor de la corriente del cortocircuito tripolar. Al comparar las curvas de las tablas I y V puede apreciarse

que, dentro del margen de los desfases de  $0 \dots 90^\circ$ , la corriente del cortocircuito bipolar con contacto a tierra puede llegar a ser algo mayor que la del cortocircuito unipolar.

c) *Redes con punto neutro puesto rigidamente a tierra*

Prosiguiendo con la disminución de la impedancia a tierra  $Z_e$  hasta anularla por completo, se llega a la red con puesta rígida a tierra. En el sistema homopolar, las capacitancias  $Z_c$  entre las líneas y tierra prácticamente están cortocircuitadas, pues las impedancias homopolares  $Z_{or}$  y  $Z_{ol}$  son de valor mucho menor que  $Z_c$ . La relación  $Z_0/Z_1$  puede disminuir fácilmente hasta 0,5, pero el desfase entre  $Z_1$  y  $Z_0$  se mantiene dentro del margen de  $0 \dots 90^\circ$ .

Por lo tanto, también quedan excluidos los valores extremos de la intensidad y de la tensión que corresponderían a los desfases mayores de  $90^\circ$ . Sin embargo, el cortocircuito unipolar puede producir, bajo ciertas condiciones, corrientes cuyo valor exceda hasta aproximadamente un 30% a la corriente del cortocircuito tripolar. En el cortocircuito bipolar con contacto a tierra es incluso posible que la corriente de cortocircuito exceda a la del defecto tripolar hasta en un 50%, aproximadamente.

Las tensiones a frecuencia de servicio y respecto a tierra de las fases no afectadas pueden alcanzar en el caso más desfavorable 1,1 veces el valor de la tensión compuesta de servicio. De acuerdo con las recomendaciones VDE, una red de alta tensión, en la cual la tensión a frecuencia de servicio y respecto a tierra de las fases no afectadas por un defecto exceda del 80% de la tensión de servicio máxima admisible, no se considera puesta eficazmente a tierra, no admitiéndose en tal caso el aislamiento reducido. Por lo tanto, al emplear aislamiento reducido, deberá cuidarse que el valor de la relación  $Z_0/Z_1$  no sea igual a 5, o esté comprendido entre 3 y 4, cuando el desfase de las impedancias no sea mayor de  $30^\circ$ .

Contrariamente a la práctica usual en Alemania, donde se suele limitar la puesta rígida a tierra a las instalaciones con tensiones altísimas y se dota de bobinas de compensación a las redes de media tensión, en los países extranjeros se encuentra frecuentemente la toma de tierra a través de una resistencia óhmica en las redes de media tensión. Estas resistencias se suelen diseñar de manera que la corriente a tierra no resulte apreciablemente mayor que la corriente nominal de la instalación.

Las comparaciones de los distintos casos de cortocircuito han puesto de manifiesto que las intensidades máximas de cortocircuito se presentan siempre con el defecto tripolar cuando se trata de redes con punto neutro aislado o de redes compensadas. En las redes con puesta a tierra inductiva de bajo valor o rígida, la intensidad máxima de cortocircuito puede esperarse con el defecto bipolar con contacto a tierra o con el defecto unipolar.

**B. Variación de la corriente de cortocircuito en función del tiempo**

**1. El proceso de amortiguamiento**

Las expresiones para el cálculo de las corrientes de cortocircuito, deducidas en el capítulo A, siempre tienen por resultado el valor eficaz de la corriente alterna que se presenta con el defecto. La expresión general para este cálculo es:

$$I_k = \frac{E_Y}{\sum Z_{1,2,0}}$$

en la cual  $E_Y$  es la fuerza electromotriz y  $Z_{1,2,0}$  son las impedancias directa, inversa y homopolar, intercaladas en el circuito afectado. Estas impedancias incluyen, por lo tanto, las impedancias correspondientes a los generadores y las de la red.

Entre todas las impedancias que intervienen en el cortocircuito, la impedancia del generador ocupa un lugar singular. En efecto, la reacción del inducido provoca durante el desarrollo del cortocircuito un debilitamiento más o menos pronunciado del campo de excitación, disminuyendo en consecuencia la tensión en los bornes del generador. Esta merma de tensión puede ser considerada también como efecto de un incremento de la impedancia del generador, suponiendo constante la fuerza electromotriz existente antes de producirse el cortocircuito. El incremento de la impedancia del generador implica a su vez una disminución de la corriente de cortocircuito, siendo esta disminución tanto más pronunciada, cuanto más cerca del generador se encuentre el defecto. La figura 28 representa el ejemplo de la variación de la corriente de cortocircuito en la fase R de un generador plenamente excitado, afectado repentinamente por un cortocircuito en sus bornes.

Primeramente, la corriente de cortocircuito aumenta hasta adoptar un valor elevado de punta, denominado intensidad de impulso  $i_s$  de la corriente de cortocircuito; luego decrece hasta un valor estacionario final  $I_p$ , denominado corriente permanente de cortocircuito. El decremento observado es más pronunciado en los primeros instantes, siendo luego más moderado. El fenómeno se desarrolla en forma asimétrica con respecto al eje de referencia durante cierto tiempo relativamente corto. Se observará en primer lugar lo que ocurre en el instante  $t = 0$ , de acuerdo con la figura 29, con el objeto de aclarar el origen de la elevada punta de corriente.

Si el cortocircuito se produce precisamente al pasar la tensión por cero, la intensidad se defasa aproximadamente en  $90^\circ$ , debido

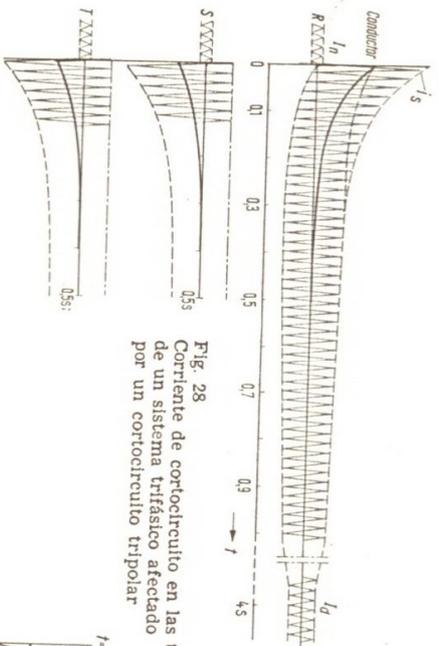


Fig. 28  
Corriente de cortocircuito en las tres fases de un sistema trifásico afectado por un cortocircuito tripolar

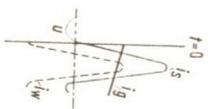


Fig. 29  
Componente de corriente alterna y componente de corriente continua en el instante de iniciarse el cortocircuito

a la carga inductiva del circuito —prácticamente sólo actúa la reactancia de dispersión del generador. La corriente de cortocircuito en el instante  $t = 0$  debería tomar inmediatamente su valor máximo. Sin embargo, debido al carácter inductivo de la reactancia del generador, dicho valor no puede alcanzarse en el acto, sino que en el instante  $t = 0$  la corriente de cortocircuito es también así denominada componente de corriente continua, cuyo valor inicial equivale al valor de punta de la corriente alterna en el instante  $t = 0$ , desapareciendo después de algunos periodos.

La corriente de cortocircuito puede considerarse, por lo tanto, compuesta por dos componentes, es decir: la componente de corriente alterna, simétrica con respecto al eje de referencia, y la componente de corriente continua, cuyo trazado permanece en un solo lado de dicho eje. Se obtiene la variación real de la corriente de cortocircuito sumando los valores instantáneos correspondientes de las componentes de corriente alterna y de corriente continua. La curva empieza con el valor cero, tal como se había presupuesto, alcanzando su valor máximo al cabo de un semiperíodo (éste equivale a 10 ms, cuando la frecuencia es de 50 Hz) y, finalmente, la corriente se va amortiguando hasta alcanzar el valor estacionario permanente, en concordancia con las constantes de tiempo correspondientes a cada una de las componentes.

La observación de la corriente se ha limitado hasta ahora a

la intensidad de una sola fase, precisamente aquella en la cual el cortocircuito acació en el instante de pasar la tensión por el valor cero. La tensión de las demás fases, correspondiente al mismo instante, equivale al 86,6 %, tal como se desprende de la figura 30. La corriente alterna, atrasada en aproximadamente 90°, se iniciará, por lo tanto, con el 50 % de su valor máximo y lo mismo sucederá con la correspondiente componente de corriente continua. La suma de las tres componentes de corriente continua es igual a cero, tal como también lo es la suma de las componentes de corriente alterna. La corriente de cortocircuito correspondiente a las demás fases está representada en la figura 28. La asimetría ya no es tan pronunciada, porque la componente de corriente continua es menor que en la fase observada en primer lugar. Si casualmente una de las fases tuviese la tensión máxima en el instante de iniciarse el cortocircuito, esta fase no tendría componente de corriente continua. La corriente alterna de cortocircuito, atrasada en aproximadamente 90°, se iniciaría con el valor cero y su variación sería completamente simétrica con respecto al eje de referencia.

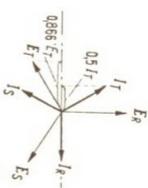


Fig. 30  
Tensiones e intensidades de corriente correspondientes a las tres fases en un circuito inductivo

Tal como ya se mencionó más arriba, la amortiguación de la corriente alterna de cortocircuito, hasta disminuir al valor de la corriente permanente de cortocircuito, es debida al efecto de la reacción del inducido, la cual debilita el campo de excitación  $\Psi$ , por consiguiente, provoca la disminución de la fuerza electromotriz efectiva. Esta transición hacia la corriente estacionaria permanente de cortocircuito es relativamente lenta y obedece a una función exponencial, denominándose fenómeno transitorio; por analogía, también se denomina corriente transitoria de cortocircuito a la corriente alterna de cortocircuito correspondiente. Otro fenómeno compensador está superpuesto en los primeros instantes a la corriente transitoria de cortocircuito: es el que procede, por una parte, de las corrientes Foucault en los rotores macizos  $\gamma$ , por otra parte, de la influencia de los arrollamientos amortiguadores de la máquina. Ambas influencias se oponen en los primeros instantes al desarrollo del campo de dispersión entre el estator y el rotor, con lo que provocan el aumento del valor inicial de la corriente alterna de cortocircuito. Sin embargo, este fenómeno desaparece rápidamente, recibiendo por ello la denominación de fenómeno subtransitorio. Por analogía, también se denomina corriente subtransitoria de cortocircuito a la corriente alterna de

correctricuito desarrollada en los primeros instantes siguientes a la iniciación del correctricuito. La figura 31 representa el fenómeno amortiguado de un correctricuito en los bornes del generador, pudiendo apreciarse las respectivas componentes del correctricuito a través de un lapso de 10 periodos, y habiéndose tomado como corriente nominal del generador  $I_n = 1$ .

La componente alterna de la corriente de correctricuito empieza con un valor que depende de la reactancia subtransitoria del generador; después de algunos periodos disminuye hasta un valor que depende de la reactancia transitoria y, finalmente, decrece en forma relativamente lenta hasta adquirir su valor estacionario, es decir, hasta la corriente permanente de correctricuito, la cual depende de la reactancia sincrona del generador. Por otra parte, la componente de corriente continua, superpuesta a la componente alterna, depende del instante de iniciación del correctricuito y provoca la asimetría de la corriente de correctricuito durante los primeros instantes.

La asimetría de la corriente de correctricuito con respecto al eje de referencia es tanto más acusada, cuanto mayor sea la relación entre la constante de tiempo de corriente continua  $T_g$  y la subtransitoria  $T''_d$ . Como puede apreciarse en la figura 31, en la que se indican los valores medios utilizados para representar el proceso de amortiguamiento, la asimetría puede dar lugar también a un retardo en el primer paso por cero de la corriente. Siendo de esperar que dicho paso por cero sea tardío, siempre que la relación  $T_g/T''_d$  sea superior a 3.

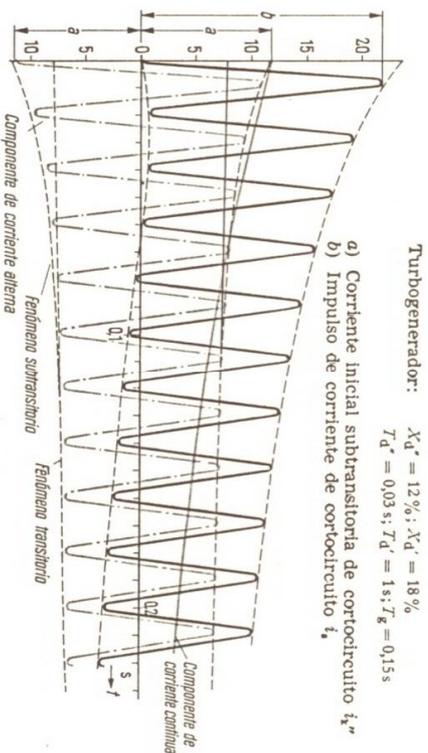


Fig. 31 Amortiguación de la corriente correspondiente a un correctricuito en los bornes

Esta forma de la corriente de correctricuito no solo es característica para un correctricuito en los bornes del generador, sino que también se observa un comportamiento similar en los correctricuitos ubicados en la red, a una distancia no muy grande del generador. Cuando el defecto se produce en un lugar muy alejado del generador, las impedancias de éste pierden su papel preponderante ante las impedancias de la red, y el valor inicial de la corriente de correctricuito no difiere apreciablemente del valor estacionario final.

## 2. Valores característicos del proceso de amortiguamiento

### a) Las reactancias del generador

La variación de la corriente de correctricuito, estudiada en el apartado anterior, demuestra la necesidad de distinguir tres clases de reactancias del generador, para estar en condiciones de poder determinar con exactitud los valores correspondientes a los distintos instantes. Estas reactancias son las siguientes:

- la reactancia subtransitoria  $X''_d$
- la reactancia transitoria  $X'_d$
- la reactancia sincrona  $X_d$

Tanto la reactancia subtransitoria, como también la transitoria, están referidas a las intensidades del generador correspondientes al instante  $t = 0$ .

La reactancia subtransitoria  $X''_d$  abarca la reactancia de dispersión de los arrollamientos estátorico y rotórico del generador, estando incluida en la dispersión rotórica la influencia del arrollamiento o barras de amortiguación y la de las piezas macizas del rotor. El promedio del valor relativo de la reactancia subtransitoria de los turbogeneradores es de aproximadamente 0,12 (12%) y el de los generadores con polos salientes y arrollamiento amortiguador es de aprox. 0,18 (18%).

La reactancia transitoria  $X'_d$  abarca la reactancia de dispersión de los arrollamientos estátorico y de excitación del generador. Generalmente, esta reactancia es mayor que la reactancia subtransitoria. Sin embargo, puede tener el mismo valor que ésta, cuando el rotor posee polos y culatas laminados y está desprovisto de un arrollamiento amortiguador. El promedio del valor relativo de la reactancia transitoria de los turbogeneradores es de aproximadamente 0,18 (18%) y el de los generadores con polos salientes y arrollamiento amortiguador es de aprox. 0,27 (27%). Por lo tanto, en ambos tipos de generadores su valor es aproximadamente 1,5 veces mayor que el de la reactancia relativa subtransitoria.

La reactancia sincrona  $X_d$  es la reactancia total del arrollamiento inducido (reactancia de dispersión estátorica + reactancia de reacción del inducido) del generador. Su valor relativo equivale

al valor recíproco de la relación de cortocircuito en vacío,  $k_0$ , siendo en su promedio igual a 1,6 (160 %) en los turbogeneradores e igual a 1 (100 %) en las máquinas con polos salientes.

Todas las reactancias precitadas pertenecen al concepto de la reactancia «directa», explicado en el capítulo A, tratándose únicamente de diversos valores de ésta, correspondientes sólo al generador y necesarios para determinar distintos valores instantáneos de la corriente de cortocircuito.

El subíndice «d» indica que las reactancias están referidas a aquella posición del rotor, en la cual coinciden los ejes de los arrollamientos estatórico y rotórico. Este eje común es denominado eje longitudinal o «directo». Aparte de estas reactancias, el generador también posee reactancias referidas a un eje transversal, pero éstas no tienen mayor importancia para el cálculo de los cortocircuitos.

En el capítulo C están recopilados los valores promedios de las reactancias de los generadores, valores que pueden utilizarse para cálculos aproximados.

b) *Las constantes de tiempo.*

Las reactancias precitadas de los generadores determinan, juntamente con las impedancias de la red intercaladas entre el generador y el lugar del cortocircuito, los valores iniciales y finales del fenómeno amortiguado. Sin embargo, la determinación del desarrollo de este fenómeno en función del tiempo requiere el conocimiento de las constantes de tiempo, o sea:

- la constante de tiempo del fenómeno subtransitorio  $T_{d''}$
- la constante de tiempo del fenómeno transitorio  $T_{d'}$
- la constante de tiempo de la componente de corriente continua  $T_s$

La constante de tiempo  $T_{d''}$  del fenómeno subtransitorio depende de las propiedades amortiguadoras de los circuitos rotóricos, especialmente del arrollamiento amortiguador. Está ligada con las reactancias del generador y de la red y, respectivamente, mediante la siguiente expresión:

$$T_{d''} = \frac{X_d'' + X_N}{X_d' + X_N} \cdot T_{d0}''$$

en la cual  $T_{d0}''$  es la constante de tiempo subtransitoria del generador en vacío. El valor de  $T_{d0}''$  es del orden de 50 ms y no puede ser excedido por  $T_{d'}$ , porque  $X_d' > X_d''$ . Cuando el cortocircuito se produce en los bornes del generador, es decir, siendo la reactancia de la red  $X_N = 0$ , el valor de  $T_{d''}$  disminuye aproximadamente a 33 ms. Por lo tanto, el margen de variación de  $T_{d''}$  es relativamente pequeño y el fenómeno subtransitorio se limita a 3... 4 semiperíodos. La clase de cortocircuito (tripolar, bipolar o

unipolar) sólo tiene una influencia despreciable sobre la constante de tiempo subtransitoria.

La constante de tiempo  $T_{d'}$  del fenómeno transitorio depende de las propiedades amortiguadoras del circuito de excitación. Además, depende de la clase de cortocircuito, de manera que se obtienen valores diferentes en los cortocircuitos tripolares, bipolares y unipolares, respectivamente.

a) En el cortocircuito tripolar:

La constante de tiempo  $T_{d'}$  del cortocircuito tripolar está ligada a las reactancias del generador y de la red, respectivamente, por la siguiente expresión:

$$T_{d' (3)} = \frac{X_d' + X_N}{X_d + X_N} \cdot T_{d0}'$$

en la cual  $T_{d0}'$  es la constante de tiempo transitoria del generador en vacío (constante de tiempo del rotor en vacío). El valor de  $T_{d0}'$  es del orden de 5 a 12 s, correspondiendo el valor menor a los generadores con polos salientes y el mayor a los turbogeneradores.

Debido a que la reactancia sincrona  $X_d$  es mucho mayor que la reactancia transitoria  $X_d'$ , la constante de tiempo  $T_{d' (3)}$  se acercará al valor de  $T_{d0}'$  cuando el cortocircuito se produzca en un lugar muy lejano del generador. Cuando el cortocircuito se produce en los bornes del generador, es decir, siendo  $X_N = 0$ , el valor de  $T_{d' (3)}$  disminuye en los turbogeneradores hasta aprox. 1 s y en los generadores con polos salientes hasta aprox. 2 s. El fenómeno transitorio desaparece, por lo tanto, dentro de 3 a 6 segundos.

Cuando la impedancia de la red no es de carácter predominantemente inductivo, sino que contiene una buena parte de resistencia óhmica, deberá ampliarse la ecuación de la constante de tiempo transitoria como sigue:

$$T_{d' (3)} = \frac{R_N^2 / (X_d + X_N) + X_d' + X_N}{R_N^2 / (X_d + X_N) + X_d + X_N} \cdot T_{d0}'$$

La figura 32 representa el aumento de la constante de tiempo  $T_{d' (3)}$  correspondiente a cortocircuitos en la red, referida a la constante de tiempo  $T_{d0}'$  del rotor en vacío, tanto para impedancias de la red puramente inductivas, como también para aquellas con carácter predominantemente óhmico. La resistencia óhmica ha sido supuesta  $\sqrt{3}$  veces mayor que la reactancia, lo que corresponde a un ángulo de impedancia de  $30^\circ$ , tal como puede existir en redes de cables.

La representación de la figura 32 se refiere a turbogeneradores y a generadores con polos salientes, estando basada en los valores promedios de la relación entre las reactancias transitorias y sin-

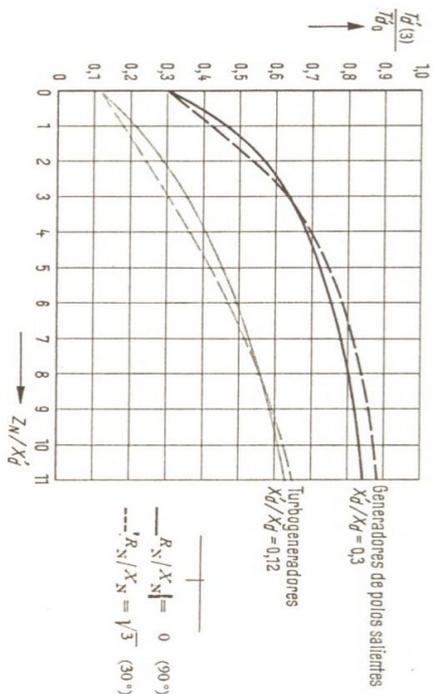


Fig. 32 Constante de tiempo  $T_d'$  del cortocircuito tripolar en función de la impedancia de la red

cronas correspondientes a estas máquinas. El trazado de las curvas demuestra que las constantes de tiempo correspondientes a redes con impedancias de carácter óhmico o más bien inductivo no difieren mucho. Primeramente, la componente óhmica de la impedancia de la red provoca una pequeña disminución de la constante de tiempo  $T_d^{(3)}$ , pero al aumentar  $Z_N$ , el valor de  $T_d^{(3)}$  vuelve prácticamente a coincidir con el valor correspondiente a la impedancia de la red puramente inductiva.

Por lo tanto, la constante de tiempo del fenómeno transitorio puede expresarse con suficiente exactitud y para todos los ángulos de impedancia prácticamente usuales mediante la ecuación:

$$T_d^{(3)} \approx \frac{X_d' + Z_N}{X_d + Z_N} \cdot T_{d0}'$$

en la cual  $Z_N$  es la impedancia de la red.

3) En el cortocircuito bipolar:

La determinación de la constante de tiempo  $T_d^{(2)}$  requiere la consideración de la impedancia inversa, además de la directa, en forma análoga a lo tratado en el capítulo A al estudiar el cortocircuito bipolar. En este caso rige la siguiente ecuación:

$$T_d^{(2)} \approx \frac{X_d' + X_2 + 2Z_N}{X_d + X_2 + 2Z_N} \cdot T_{d0}'$$

en la cual  $X_2$  es la reactancia inversa del generador.

Como ya se ha mencionado, la reactancia inversa  $X_2$  de los turbogeneradores es prácticamente igual a la reactancia subtran-

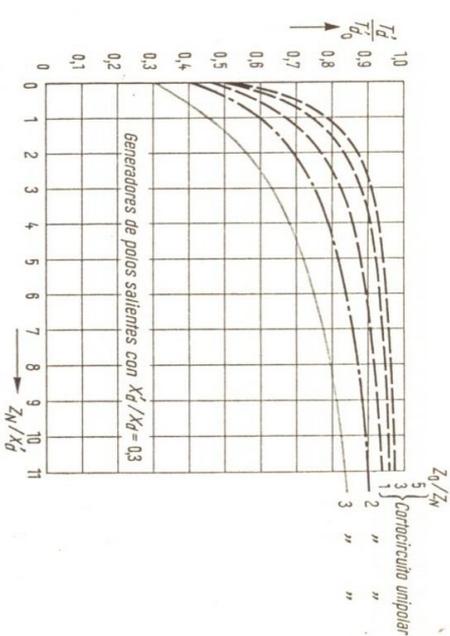
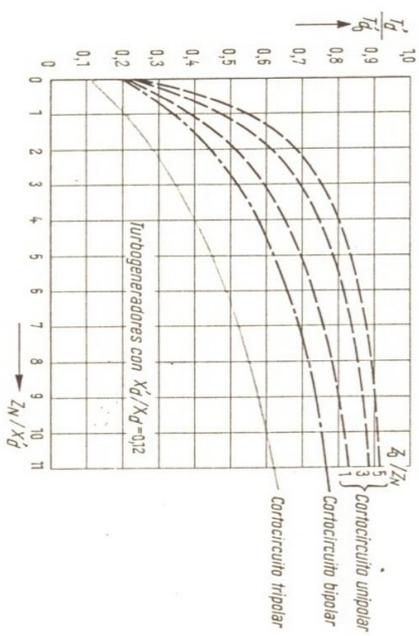


Fig. 33 Variación de la constante de tiempo  $T_d'$  en función de la impedancia de la red

más en desaparecer que cuando se trata de un defecto tripolar. La figura 33 representa la variación de la constante de tiempo  $T_{d(2)}$  correspondiente a cortocircuitos en la red, referida a la constante de tiempo  $T_{d0}'$  del rotor en vacío.

γ) En el cortocircuito unipolar:  
La determinación de la constante de tiempo  $T_{d(1)}$  del cortocircuito unipolar requiere la consideración de la impedancia homopolar además de la directa y de la inversa. En este caso rige la ecuación:

$$T_{d(1)}' \approx \frac{X_d' + X_2 + 2Z_N + Z_0}{X_d + X_2 + 2Z_N + Z_0} \cdot T_{d0}'$$

La impedancia homopolar provoca un aumento de la constante de tiempo  $T_{d(1)}$ , siendo este aumento tanto mayor, cuanto mayor es el valor de la impedancia homopolar con respecto a la impedancia directa;  $T_{d(1)}$  naturalmente no puede exceder el valor de  $T_{d0}'$ .

La figura 33 contiene algunas curvas para el valor de  $T_{d(1)}$ , correspondientes a diferentes valores de la relación  $Z_0/Z_1$ . De ellas se desprende que, en término medio, en los turbogeneradores  $T_{d(1)}$  equivale al doble de  $T_{d(2)}$ . Tratándose de generadores con polos salientes, esta diferencia no es tan pronunciada. El fenómeno transitorio del cortocircuito unipolar tarda en desaparecer aún más que el del bipolar.

La constante de tiempo  $T_k$  de la componente de corriente continua está determinada por las propiedades amortiguantes del circuito estático, es decir, depende de la relación entre la reactancia y la resistencia óhmica del arrollamiento estático y del circuito exterior del defecto. El valor de esta constante de tiempo prácticamente no varía en las distintas clases de cortocircuito y puede calcularse con la siguiente ecuación:

$$T_k = \frac{X_d'' + X_N}{\omega(R_N + R_N)}$$

siendo:  $R_N$  = resistencia óhmica del inducido del generador,  $R_N$  = resistencia óhmica de la red.

Cuando se trata de un cortocircuito en los bornes del generador, es decir, siendo  $X_N = R_N = 0$ , el valor de  $T_k$  es de aproximadamente 0,1 a 0,2 segundos, lo que en término medio equivale a una resistencia óhmica del inducido de aprox. 2 a 3% de la reactancia subtransitoria, mientras que en los grandes generadores con refrigeración por hidrógeno, el valor de  $T_k$  es hasta de 0,4 segundos. Cuando el cortocircuito se encuentra en la red, la constante de tiempo es tanto más pequeña, cuanto más pequeña sea la relación  $X_N/R_N$  en comparación con  $X_d''/R_N$ . Contrariamente a lo que acontece con la componente de corriente alterna, la com-

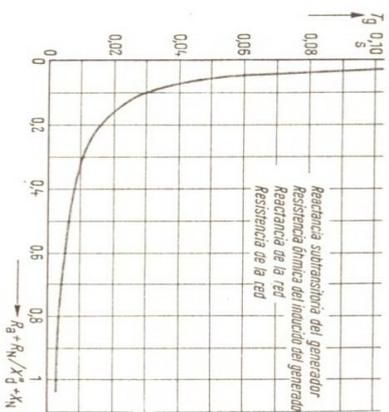


Fig. 34  
Constante de tiempo de la componente de corriente continua en función de la relación  $R/X$  del circuito afectado

ponente de corriente continua desaparece en forma más rápida cuando el cortocircuito se encuentra en la red y cuando ésta contiene resistencias óhmicas apreciables. La componente de corriente continua de cortocircuitos entre bornes desaparece después de 0,3 a 0,6 segundos. Este tiempo se reduce hasta aprox. 0,01 s, cuando el cortocircuito se encuentra en la red y según cual sea el valor de la relación  $R/X$  del circuito afectado. En la figura 34 se puede apreciar el rápido decremento de la constante de tiempo al aumentar la relación  $R/X$ .

La componente de corriente continua tiene una influencia preponderante en la formación de la primera punta de corriente de cortocircuito; por lo tanto, siempre es necesario considerar la resistencia óhmica de la red, cuando se deba determinar el impulso  $i_a$  de la corriente de cortocircuito.

### c) Las fuerzas electromotrices

La fuerza electromotriz  $E$  del generador con carga es mayor que la tensión  $U$  en sus bornes, debido a la caída de tensión provocada por la reactancia de dispersión del generador, y se denomina tensión del campo principal del generador. Debido a la inercia del campo magnético, esta fuerza electromotriz no puede variar instantáneamente en el momento del cortocircuito, de manera que la tensión del campo principal depende de la carga existente inmediatamente antes de producirse el cortocircuito.

En concordancia con la diferencia existente entre el valor de la reactancia subtransitoria y el de la transitoria, es necesario distinguir entre la tensión subtransitoria del campo principal  $E_y''$  y la tensión transitoria del campo principal  $E_y'$ . Además, se requiere el valor de la tensión en la rueda polar  $E_y$ , la cual es determinante de la corriente permanente de cortocircuito. La figu-

Máquina con rotor cilíndrico

Máquina de polos salientes

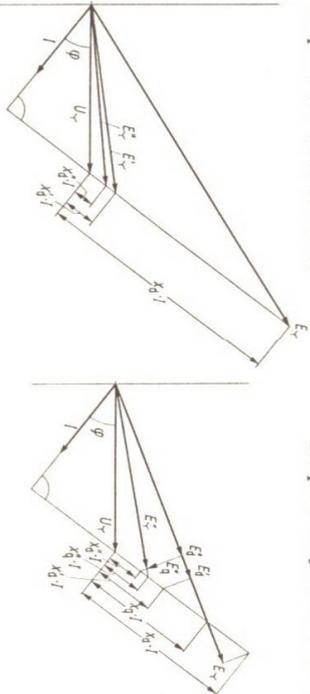


Fig. 35 Diagrama de tensiones de un generador síncrono

ra 35 representa el diagrama de las tensiones de máquinas síncronas bajo carga.

En las máquinas de polos salientes, debido a la forma de éstos, la reactancia síncrona según el eje transversal,  $X_q$ , es menor que la reactancia síncrona según el eje longitudinal,  $X_d$ . Por término medio se tiene  $X_q \approx 0,6 X_d$ . Además la relación entre  $X_q''$  y  $X_d''$  es generalmente mayor que 1. La diferencia que por estos motivos se origina en la determinación de las tensiones de la rueda polar y del campo principal, influye sin embargo poco en el cálculo de corrientes de cortocircuito, de manera que las sencillas relaciones deducidas del diagrama correspondiente a la máquina de rotor cilíndrico pueden aplicarse también, con la suficiente exactitud, a las máquinas de polos salientes.

Las fuerzas electromotrices están relacionadas con la tensión  $U_Y$  en los bornes del generador como sigue:

$$E_Y'' = U_Y + j X_d'' I; \quad E_Y' = U_Y + j X_d' I$$

Cargando el generador con su intensidad nominal y un factor de potencia  $\cos \varphi = 0,8$ , y aplicando, además, los valores promedios de las reactancias del generador ya citados, se obtienen las siguientes tensiones del campo principal:

$$\left. \begin{aligned} E_Y'' &\approx 1,08 \cdot U_Y \\ E_Y' &\approx 1,11 \cdot U_Y \end{aligned} \right\} \text{ en los turbogeneradores}$$

$$\left. \begin{aligned} E_Y'' &\approx 1,12 \cdot U_Y \\ E_Y' &\approx 1,18 \cdot U_Y \end{aligned} \right\} \text{ en las máquinas de polos salientes}$$

En consecuencia, la tensión en la rueda polar es de:

$$\left. \begin{aligned} E_Y &\approx 2,35 \cdot U_Y \\ E_Y &\approx 1,8 \cdot U_Y \end{aligned} \right\} \text{ en los turbogeneradores}$$

$$\left. \begin{aligned} E_Y &\approx 2,35 \cdot U_Y \\ E_Y &\approx 1,8 \cdot U_Y \end{aligned} \right\} \text{ en las máquinas de polos salientes}$$

Para la determinación del valor inicial  $I_k''$  de la corriente subtransitoria de cortocircuito se aplicará la tensión del campo principal  $E_Y''$ , cuyo valor, según el tipo de máquina, se encontrará entre  $1,08 \cdot U_Y$  y  $1,12 \cdot U_Y$ ; generalmente se aplica el promedio  $E_Y'' = 1,1 \cdot U_Y$ .

### 3. Cálculo de los valores instantáneos de la corriente de cortocircuito

La variación de la corriente de cortocircuito en función del tiempo viene dada por la siguiente ecuación:

$$i_{k(t)} = \sqrt{2} [(I_k'' - I_k') e^{-t/T_s} \sin(\omega t - \alpha) + (I_k' - I_k) e^{-t/T_s} \sin(\omega t - \alpha)] + I_k \sin(\omega t - \alpha) + I_k'' e^{-t/T_s} \sin \alpha$$

El primer término de esta ecuación representa la parte subtransitoria del fenómeno, el segundo la parte transitoria, el tercero la corriente permanente de cortocircuito y el último la parte de corriente continua.

$i_{k(t)}$  es el valor instantáneo de la corriente de cortocircuito en el instante  $t$ , y  $\alpha$  es el ángulo de fase de la corriente en el instante de iniciarse el cortocircuito.

Cuando la impedancia del circuito es de carácter inductivo, el ángulo  $\alpha$  prácticamente es de  $90^\circ$  y en este caso la ecuación queda simplificada como sigue:

$$i_{k(t)} = \sqrt{2} [(I_k'' - I_k') e^{-t/T_s} \cos \omega t + (I_k' - I_k) e^{-t/T_s} \cos \omega t + I_k \cos \omega t - I_k'' e^{-t/T_s}]$$

La figura 36 representa las diferentes componentes de la corriente de cortocircuito; para mayor claridad, las componentes alternas están representadas por sus curvas envolventes. Todos los valores correspondientes a intensidades y a constantes de tiempo de la ecuación precedente pueden expresarse por las impedancias del generador y de la red, correspondientes a cada caso de cortocircuito, y considerando las fuerzas electromotrices respectivas. En las relaciones de validez general, tratadas en el capítulo A para

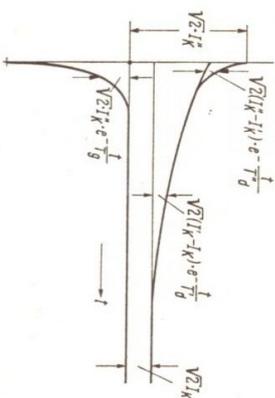


Fig. 36 Componentes de la corriente amortiguada de cortocircuito

determinar la corriente de cortocircuito, las expresiones  $Z_1$ ,  $Z_2$  y  $Z_0$  siempre representan a la impedancia total del circuito afectado. Ahora bien, para obtener los valores parciales de cortocircuito  $I_k''$ ,  $I_k'$  e  $I_k$ , es necesario separar las impedancias del generador de las de la red. Las relaciones correspondientes serán, por lo tanto, para el cortocircuito tripolar:

$$I_k'' = \frac{E_Y''}{X_d'' + Z_N}; \quad I_k' = \frac{E_Y'}{X_d' + Z_N}; \quad I_k^{(3)} = \frac{E_Y}{X_d + Z_N}$$

para el cortocircuito bipolar:

$$I_k^{(2)} = \frac{\sqrt{3} \cdot E_Y''}{X_d'' + X_2 + 2Z_N}; \quad I_k^{(2)} = \frac{\sqrt{3} \cdot E_Y'}{X_d' + X_2 + 2Z_N}; \quad I_k^{(2)} = \frac{\sqrt{3} \cdot E_Y}{X_d + X_2 + 2Z_N}$$

y para el contacto unipolar a tierra:

$$I_k^{(1)} = \frac{3 \cdot E_Y''}{X_d'' + X_2 + 2Z_N + Z_0}; \quad I_k^{(1)} = \frac{3 \cdot E_Y'}{X_d' + X_2 + 2Z_N + Z_0}; \quad I_k^{(1)} = \frac{3 \cdot E_Y}{X_d + X_2 + 2Z_N + Z_0}$$

La impedancia de la red está representada en estas ecuaciones simplemente con  $Z_N$ , por ser:  $Z_{1N} = Z_{2N}$ .

Además del valor inicial  $I_k''$  de la corriente subtransitoria de cortocircuito, existen otros dos valores de interés especial. Son ellos la primera punta de la corriente después de haberse establecido el cortocircuito y el valor eficaz de la corriente en el instante de la interrupción del cortocircuito. La primera punta, o sea el impulso  $i_c$  de la corriente de cortocircuito, se suele indicar siempre con su valor de cresta y es el valor determinante tanto para los esfuerzos dinámicos que deben poder soportar las instalaciones, como también para el poder de conexión de los interruptores. La intensidad eficaz de la corriente de cortocircuito existente en el instante de la interrupción es la corriente de ruptura  $I_k$ , la cual es el valor determinante de la capacidad de ruptura de los interruptores.

La corriente permanente de cortocircuito  $I_k$  también tiene cierta importancia, pues ella determina el valor final del proceso de amortiguamiento y con éste también el desarrollo de la corriente transitoria de cortocircuito.

#### a) El impulso $i_c$ de la corriente de cortocircuito

Para la formación de la punta máxima de la corriente se encontró un tiempo de  $t = 0,01$  s, siendo la frecuencia de 50 Hz y suponiendo que el cortocircuito se produce en el instante de pasar la tensión por cero y que la corriente de cortocircuito está atrasada en prácticamente  $90^\circ$  con respecto a la tensión. Sin embargo, cuando la impedancia de la red contiene resistencia óhmica, el desfase es menor de  $90^\circ$  y, si nuevamente se supone que el cortocircuito se inicia en el instante de pasar la tensión por cero, se

obtendrá un tiempo menor de 0,01 s para la formación de la punta máxima. Además, puede demostrarse mediante el cálculo que la punta siempre alcanza su valor máximo cuando el cortocircuito coincide con el paso de la tensión por cero. La figura 37 representa tres casos de desfase, a saber:  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\alpha = 63^\circ$  y  $\alpha = 45^\circ$ ; el valor  $\alpha = 63^\circ$  corresponde a  $R/X = 0,5$  y el valor  $\alpha = 45^\circ$  corresponde a  $R/X = 1$ .

Cuando el desfase es menor de  $45^\circ$ , es decir siendo  $R/X > 1$ , la componente de corriente continua prácticamente desaparece antes de haber alcanzado la componente alterna su valor máximo. En este caso la componente de corriente continua ya no contribuye a la formación de la primera punta de corriente, quedando determinada ésta únicamente por el valor de cresta de la componente alterna.

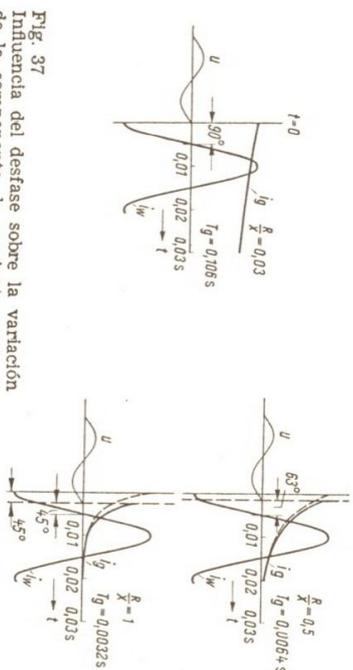


Fig. 37  
Influencia del desfase sobre la variación de la componente de corriente continua

A los efectos de comparación se han indicado las componentes de corriente continua correspondientes a  $\alpha = 90^\circ$  (trazo discontinuo) también en los casos dibujados para  $\alpha = 63^\circ$  y  $45^\circ$ . Se puede observar que el valor de la componente de corriente continua coincide con la punta de corriente sólo disminuye muy poco al variar el ángulo  $\alpha$ . Por lo tanto, puede utilizarse siempre el valor  $\alpha = 90^\circ$ , sin que la exactitud del cálculo quede afectada considerablemente.

La figura 38 representa la participación de la componente de corriente continua  $i_g$  en la formación de la punta de corriente, referida al valor de cresta de la componente alterna, en función de la relación  $R/X$  del circuito afectado, rigiendo la curva  $\alpha$  en combinación con la ordenada  $i_g/(\sqrt{2} \cdot I_k'')$ .

Cuando el cortocircuito se produce en los bornes del generador, y calculando con  $R_g/X_g'' = 0,03$ , lo que corresponde a una constante de tiempo  $T_g$  de aprox. 0,1 s, la componente de corriente

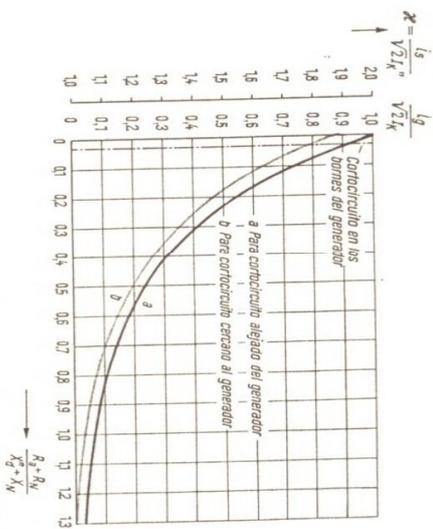


Fig. 38 Componente de corriente continua e índice de impulso  $X$  en el instante correspondiente al valor máximo de la corriente alterna

continua equivale al 90% del valor de cresta de la componente alterna. Como esta última, transcurridos los 0,01 s, ha disminuido también hasta aprox. el 90% de su valor inicial, resulta que la punta de corriente  $i_a$  alcanza aproximadamente un valor equivalente a  $1,8 \cdot \sqrt{2}$  veces el valor inicial de  $I_k''$  de la corriente subtransitoria de cortocircuito. Este es el valor que generalmente se aplica en el caso de un cortocircuito en los bornes. La curva  $b$  de la figura 38 representa el valor del índice de impulso  $x = i_a / (\sqrt{2} \cdot I_k'')$ , en función de la relación  $R/X$  del circuito afectado y válido para cortocircuitos cercanos al generador. Cuando los cortocircuitos estén lejanos del generador, en cuyo caso la componente alterna ya no es amortiguada, el índice de impulso  $x$  está dado por la curva  $a$ .

b) *La corriente de ruptura  $I_a$*

El instante de la interrupción de la corriente de cortocircuito depende del retardo mínimo del interruptor de potencia. Este retardo se compone del tiempo propio del interruptor y del retardo mínimo posible de los relés o dispositivos de disparo que provocan la desconexión. Estos tiempos varían entre 0,1 y 0,25 s, según el tipo de protección y de interruptor adoptado.

Es posible que con estos tiempos la componente de corriente continua, causante de la asimetría, aún no haya desaparecido y, por lo tanto, es necesario distinguir entre la corriente de ruptura asimétrica y la corriente de ruptura simétrica. El valor eficaz de la corriente de ruptura asimétrica viene dado por la siguiente expresión:

$$I_a (\text{asym}) = \sqrt{[(I_k'' - I_k') \cdot e^{-t/T_a} + (I_k' - I_k) \cdot e^{-t/T_a} + I_k]^2 + 2(I_k'' \cdot e^{-t/T_a} \cdot e^{-t/T_a})^2}$$

componente alterna                      componente continua

Por otra parte, la corriente de ruptura simétrica viene dada por:

$$I_a = (I_k'' - I_k') \cdot e^{-t/T_a} + (I_k' - I_k) \cdot e^{-t/T_a} + I_k$$

La figura 39 representa la influencia de la componente de corriente continua sobre el valor de la corriente de ruptura asimétrica, en función del retardo mínimo de desconexión  $y$  de la constante de tiempo de la componente continua. El valor eficaz de la corriente de ruptura simétrica se ha referido a una componente

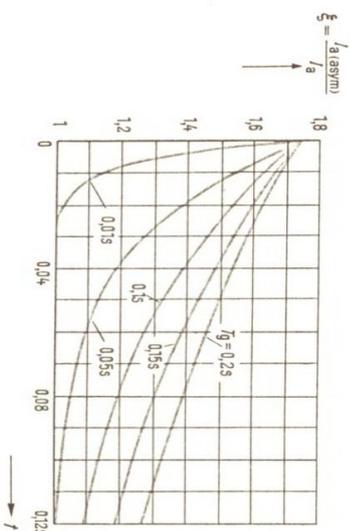


Fig. 39 Valor de la corriente de ruptura asimétrica en función del tiempo

de corriente alterna sin amortiguamiento, habiendo tomado  $I_a = I_k'' = 1$ , de manera que es posible apreciar directamente el aumento provocado por la componente de corriente continua. Las curvas  $T_a = 0,1$  s a  $0,2$  s rigen para los cortocircuitos en los cuales la impedancia de la red es prácticamente inductiva. Cuando la impedancia de la red contiene resistencia óhmica, la menor constante de tiempo provoca la desaparición rápida de la componente continua  $y$ , por lo tanto, un menor aumento de la corriente de ruptura asimétrica en comparación con la simétrica. Para las componentes de corriente alterna con amortiguamiento se determina el factor de aumento por:

$$\xi' = \sqrt{\frac{\xi^2 - 1}{\mu^2} + 1}$$

donde  $\mu$  es el factor de amortiguamiento.

Con tiempos  $t \geq 0,1$  s se desprecia generalmente el aumento relativamente pequeño de la corriente de ruptura, provocado por la componente de corriente continua, y se determina únicamente la corriente de ruptura simétrica.

Con el fin de evitar el cálculo algo engorroso de la corriente de ruptura simétrica correspondiente a cada clase de cortocircuito, es conveniente referir el valor de la corriente de ruptura simétrica  $I_n$  al valor inicial  $I_k''$  de la corriente subtransitoria de cortocircuito, el cual necesariamente debe determinarse en todo cálculo de cortocircuitos. Este procedimiento es posible, si se aplican los ya mencionados promedios para las impedancias  $X_d, X_d'$  y  $X_d''$  del generador y, además, se expresan las impedancias de la red en forma de múltiplos de las del generador. Según sea el valor del retardo mínimo de desconexión y el valor de las constantes de tiempo, dependientes de la impedancia de la red y de la clase de cortocircuito, se obtendrán diferentes valores del factor de amortiguamiento  $\mu = I_n/I_k''$ , los que pueden ser representados por curvas y permiten la determinación rápida de la corriente de ruptura.

El ángulo de impedancia de la red tiene solo poca influencia sobre el valor de la constante de tiempo  $T_{d'}$ , como ya se ha visto anteriormente. La variación de la función  $e^{-t/T_{d'}}$  es de solo un 2% cuando  $T_{d'}$  varía en un 20%, lo que puede suceder, por ejemplo, cuando la impedancia de la red pasa de su carácter óhmico al inductivo puro o cuando la constante de tiempo  $T_{d0}'$  del rotor en vacío es anormal. Como, además, el factor  $e^{-t/T_{d'}}$  solamente aparece en combinación con la diferencia de corrientes ( $I_k' - I_k$ ), el error real es aún más pequeño y generalmente menor del 1%. Por lo tanto, las curvas también permiten determinar la corriente de ruptura con exactitud suficiente.

La figura 40 representa la corriente de ruptura simétrica del

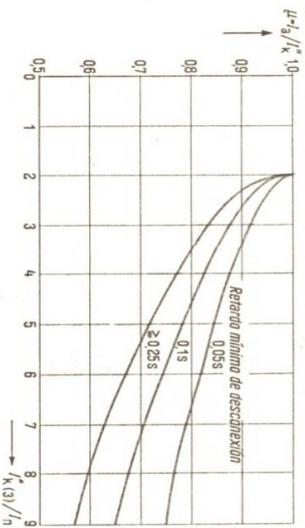


Fig. 40 Corriente de ruptura simétrica en función del retardo mínimo de desconexión (según VDE 0102)

cortocircuito tripolar para los retardos mínimos de desconexión de 0,05 s, 0,1 s y 0,25 s, en función de la relación  $I_k''/I_n \cdot I_k''$  es el valor inicial de la corriente subtransitoria de cortocircuito entregada por el generador al lugar del defecto, e  $I_n$  la intensidad nominal del generador.

En general, por  $I_k''$  se entiende siempre la corriente de cortocircuito inicial subtransitoria que fluye desde el generador al punto de cortocircuito a través del sistema directo.

Tratándose de un cortocircuito bipolar, para la relación  $I_k''(2)/I_n$  se multiplicarán por  $\sqrt{3}$  los valores de las abscisas de la figura 40. En correspondencia con la mayor constante de tiempo  $T_{d(2)}$  se obtienen valores más elevados de la relación  $I_n/I_k''$  que en el caso del cortocircuito tripolar.

Como la corriente transitoria inicial de corto circuito  $I_k''(2)$  alcanza, para  $Z_1 \leq Z_2$ , como máximo, un valor  $\sqrt{3/2}$  veces de  $I_k''(1)$ , también deberá disminuirse la corriente de ruptura  $I_n$  en la misma relación, para compararla con  $I_n(1)$ .

Considerando el factor  $\sqrt{3/2}$ , la corriente de ruptura del defecto bipolar supera a la del defecto tripolar únicamente cuando el retardo mínimo de desconexión sea  $t \leq 0,2$  s.

Para la relación  $I_k''(1)/I_n$ , habrá que multiplicar por 3 los valores de las abscisas de la figura 40, cuando se trate de cortocircuitos unipolares. Dentro del margen del retardo mínimo de desconexión sólo se observa una diferencia apreciable entre  $I_k''(1)$  e  $I_n(1)$  cuando el cortocircuito está cercano al generador. Además, cuando los transformadores de la red están puestas a tierra, en la mayoría de los casos  $I_n(1)$  será igual a la corriente subtransitoria inicial de cortocircuito  $I_k''(1)$ .

### c) La corriente permanente de cortocircuito $I_k$

El valor de la corriente permanente de cortocircuito  $I_k$  puede calcularse para la distintas clases de cortocircuitos mediante las ecuaciones ya desarrolladas. A tal efecto se tomará como fuerza electromotriz la tensión de la rueda polar  $E_y$ , que se deduce para una carga del generador igual a su intensidad nominal, con  $\cos \varphi = 0,8$ , y su reactancia sincrónica. Se presupone que la excitación del generador no se modifica después de haberse presentado el cortocircuito. Eventualmente, cuando la excitatriz pueda ser sobreexcitada, será necesario contar con valores más elevados de  $E_y$ .

La carga preexistente en la red, debida a los consumidores, influye en forma no despreciable sobre el valor de la corriente permanente de cortocircuito. En efecto, cuando el cortocircuito se encuentra en la red, la tensión residual en los bornes del generador es tanto más alta, cuanto más lejano es el cortocircuito, es decir, cuanto mayor es la impedancia de la red en comparación con la reactancia del generador. Los consumidores conectados pue-

den absorber entonces cierta intensidad de corriente, la que se resta de la corriente de cortocircuito que afluye al punto de defecto.

La carga de los consumidores puede ser representada por una impedancia de carga  $Z_L$ , conectada en paralelo con la impedancia  $Z_N$  de la red, situándola entre los bornes de la máquina y el lugar del cortocircuito. La corriente total suministrada por el generador en el caso de un cortocircuito tripolar puede expresarse entonces como sigue:

$$I_L + I_{k(3)} = \frac{E_Y}{X_d + \frac{Z_N \cdot Z_L}{Z_N + Z_L} + Z_L}$$

como, además, es:  $I_L/I_k = Z_N/Z_L$ , resulta:

$$I_{k(3)} = \frac{E_Y}{X_d (1 + Z_N/Z_L) + Z_N}$$

Debido a que el carácter de la impedancia de carga previa no puede conocerse de forma precisa (motores, aparatos de alumbrado y calefacción, influencia de relés de tensión mínima, etc.) y como consecuencia de la distinta capacidad de sobreexcitación de los generadores, la corriente permanente de cortocircuito no puede determinarse con la misma exactitud que la corriente de ruptura  $I_{kr}$ .

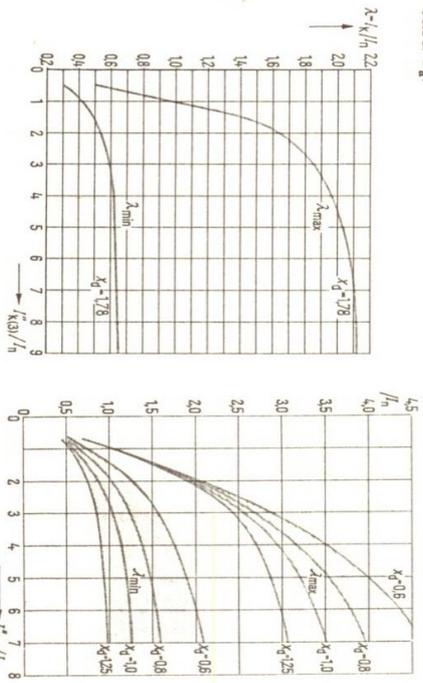


Fig. 41 Factores  $\lambda_{max}$  y  $\lambda_{min}$  para determinar la corriente permanente de cortocircuito (VDE 0102)

De la figura 41 puede obtenerse la corriente permanente de cortocircuito tripolar con las excitaciones de plena carga y en vacío, valiéndose del factor  $\lambda = I_k/I_n$ , y en función de la relación  $I_k''^{(3)}/I_n$ . En este caso no se tiene en cuenta la impedancia de carga previa.

Para considerar la capacidad de sobreexcitación de los generadores, se ha tomado en las curvas  $\lambda_{max}$  un valor igual a 1,3 de la excitación de carga nominal en los turbogeneradores, y de 1,6 en las máquinas de polos salientes.

En caso de cortocircuito bipolar, habrá que multiplicar por  $\sqrt{3}$  los valores de las abscisas de la figura 41 para obtener la relación  $I_k''^{(2)}/I_n$ , y si el cortocircuito es unipolar habrá que utilizar el factor 3 para determinar la relación  $I_k''^{(1)}/I_n$ . De acuerdo con esto, la corriente permanente de cortocircuito en caso de defecto bipolar viene dada por:

$$I_{k(2)} = \lambda \cdot \sqrt{3} \cdot I_n$$

y con defecto unipolar por:

$$I_{k(1)} = \lambda \cdot 3 \cdot I_n$$

Se puede observar que la corriente permanente de cortocircuito, en caso de que éste sea tripolar, es inferior a la que se produce cuando el defecto es bipolar, y esta última corriente es a su vez menor que la correspondiente a un cortocircuito unipolar.

## C. Tratamiento de la red y datos para el cálculo

### 1. Cálculo con impedancias relativas y con impedancias absolutas

Las magnitudes de las ecuaciones desarrolladas en los capítulos A y B para el cálculo de las corrientes de cortocircuito deben tratarse como valores absolutos, de acuerdo con la aplicación formal de la ley de Ohm, es decir, las fuerzas electromotrices se introducirán en voltios y las impedancias en  $\Omega$ /fase. Sin embargo, no es usual indicar el valor de las impedancias correspondientes a los generadores, transformadores y bobinas en  $\Omega$ /fase, sino que para tal fin se utilizan valores relativos. El valor de referencia es la relación existente entre la tensión nominal y la intensidad nominal del generador o del transformador correspondiente. En principio, la relación entre el valor absoluto y el valor relativo de una impedancia es la siguiente:

$$Z_n = z_n \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_n} = z_n \cdot \frac{U_n^2}{P_n}$$

- $z_n$  la impedancia relativa de cortocircuito, referida a los valores nominales,
- $Z_n$  la impedancia absoluta de corto circuito, en  $\Omega$ /fase,
- $U_n$  la tensión nominal (compuesta) en kV,
- $I_n$  la intensidad nominal en kA,
- $P_n$  la potencia nominal en MVA.

Como el cociente  $\frac{U_n^2}{\sqrt{3} \cdot I_n}$  bzw.  $\frac{U_n^2}{P_n}$  representa la impedancia

nominal en  $\Omega$ /fase, el valor  $z_n$  tiene el carácter de una magnitud sin dimensiones. Esta magnitud indica la proporción de la tensión nominal que debe aplicarse para que en el arrollamiento cortocircuitado fluya la corriente nominal, es decir, equivale a la relación entre la impedancia de cortocircuito y la impedancia nominal. Por ejemplo: un transformador, cuya tensión de cortocircuito es del 6 %, tiene una impedancia relativa de cortocircuito, referida a los valores nominales, de  $z_n = 0,06$ .

La ecuación precitada permite pasar del valor absoluto de cualquier impedancia (p. ej. la de una línea) al valor relativo, siempre que se fije una potencia básica. El valor de tal potencia básica puede ser elegido libremente: se podrá adoptar la potencia del generador o cualquier otra.

La impedancia relativa, referida a la potencia básica, está dada por:

$$z_B = Z_n \cdot \frac{P_B}{U^2}$$

siendo:

$P_B$  la potencia básica, en MVA,  
 $U_n$  la tensión de servicio de la línea, en kV.

Una vez elegida la base  $P_B$ , se utilizará sin variarla para todas las partes de la red. Por lo tanto, las impedancias relativas referidas a la potencia nominal de los generadores, transformadores, bobinas de reactancia, etc., deberán ser recalculadas para referirlas a la potencia básica elegida, siempre que ésta no concuerde con la potencia nominal. A tal efecto rige:

$$z_B = z_n \cdot \frac{P_B}{P_n}$$

La ecuación general de la potencia de cortocircuito en el lugar del defecto es, empleando impedancias relativas:

$$S_k = \frac{P_B \cdot E}{\sum z_B \cdot U}$$

Si, por otra parte, se desea efectuar los cálculos con los valores absolutos en  $\Omega$ /fase, será necesario referir estos valores absolutos a una tensión común de referencia, cuando en las redes existan varias tensiones de servicio. La tensión de referencia puede ser una de estas tensiones de servicio, como también puede elegirse cualquier otra. La impedancia  $Z_n$ , correspondiente a la tensión de servicio  $U_n$ , se transformará, para la tensión de referencia  $U_B$ , como sigue:

$$Z_B = Z_n \cdot \frac{U_n^2}{U^2}$$

Además, se tiene:

$$Z_B = z_n \cdot \frac{U_B^2}{P_n}$$

La ecuación general para la potencia de cortocircuito en el lugar del defecto es, empleando los valores absolutos de las impedancias:

$$S_k = \frac{U_B^2 \cdot E}{\sum Z_B \cdot U}$$

En ambos casos la intensidad de la corriente de cortocircuito es:

$$I_k = \frac{S_k}{\sqrt{3} \cdot U}$$

Табла X Ejemplo para el cálculo de un cortocircuito, empleando impedancias absolutas y relativas

	Cálculo con impedancias en $\Omega$ /fase Tensión relativa elegida $U_B = 10$ kV	Cálculo con impedancias relativas Potencia básica elegida $N_B = 60$ MVA
Generador de 60 MVA	$X_G'' = x_d'' \cdot \frac{U_B^2}{P_G}$ $= 0,12 \cdot \frac{10^2}{60} = 0,2 \Omega$	$x_G'' = x_d'' \cdot \frac{P_B}{P_G}$ $= 0,12 \cdot \frac{60}{60} = 0,12$
Transformador de 40 MVA	$X_T = x_k \cdot \frac{U_B^2}{P_T}$ $= 0,10 \cdot \frac{10^2}{40} = 0,25 \Omega$	$x_T = x_k \cdot \frac{P_B}{P_T}$ $= 0,10 \cdot \frac{60}{40} = 0,15$
Línea l = 22 km	$X_L = X_L' \cdot l \cdot \frac{U_B^2}{U_L^2}$ $= 0,4 \cdot 22 \cdot \frac{10^2}{63^2} = 0,22 \Omega$	$x_L = X_L' \cdot l \cdot \frac{P_B}{U_L^2}$ $= 0,4 \cdot 22 \cdot \frac{60}{63^2} = 0,133$
Transformador de 12 MVA	$X_T = 0,08 \cdot \frac{10^2}{12} = 0,67 \Omega$ $\Sigma X_B = 1,34 \Omega$	$x_T = 0,08 \cdot \frac{60}{12} = 0,4$ $\Sigma x_B = 0,803$
Potencia inicial de cortocircuito	$S_k^{(3)} = \frac{U_B^2 \cdot E_d''}{\Sigma X_B \cdot U}$ $= \frac{10^2}{1,34} \cdot 1,1 = 82,2$ MVA	$S_k^{(3)} = \frac{P_B \cdot E_d''}{\Sigma x_B \cdot U}$ $= \frac{60}{0,803} \cdot 1,1 = 82,2$ MVA
Corriente inicial subtransitoria de cortocircuito Triángulo-estrella	$I_k^{(3)} = \frac{S_k^{(3)}}{\sqrt{3} \cdot U}$ $= \frac{82,2}{\sqrt{3} \cdot 10} = 4,75$ kA	$I_k^{(3)} = \frac{S_k^{(3)}}{\sqrt{3} \cdot U}$ $= \frac{82,2}{\sqrt{3} \cdot 10} = 4,75$ kA

Cabe mencionar que la potencia de cortocircuito  $S_k$  es una magnitud de cálculo sin significación física, ya que resulta del producto de dos magnitudes no simultáneas, es decir, de la corriente de cortocircuito  $I_k$  y de la tensión de servicio  $U$ .

El factor  $E/U$  considera la influencia de la fuerza electromotriz. Al determinar la potencia inicial de cortocircuito  $S_k^{(3)}$  puede adaptarse como promedio 1,1.

En la tabla X se comparan los dos procedimientos de cálculo, aplicados a una red sencilla; con el fin de no complicar el ejemplo, se consideran únicamente las reactivancias inductivas.

La forma simplificada del proceso de cálculo, recogida en la tabla X, es válida bajo el supuesto de que las tensiones nominales de cada uno de los elementos de la instalación se puedan referir exactamente a la tensión de servicio del punto de cortocircuito con ayuda de las relaciones de transformación de los transformadores. Así, el transformador de la central eleva la tensión del generador hasta 63 kV y el transformador de la red reduce esta última a 10 kV.

En aquellos casos en los que las tensiones nominales de cada uno de los elementos de la instalación no puedan reducirse con exactitud a la tensión de servicio del punto de cortocircuito, habrá que multiplicar además las impedancias, calculadas sobre la base de dichas tensiones nominales, por un factor resultante de las relaciones de transformación de los transformadores.

Es conveniente designar de manera correlativa,  $U_1, U_2, U_3, U_4$ , etcétera, las tensiones nominales de cada uno de los elementos de la instalación, empezando por el generador hasta llegar al punto de cortocircuito. Multiplicando las impedancias, calculadas a base de las tensiones nominales de cada uno de los elementos de la instalación, por las relaciones de transformación nominales de los transformadores posconectados, se obtienen, como puede verse en el ejemplo de la tabla XI, los valores de la impedancia referidos al punto de cortocircuito. Para determinar la potencia y la intensidad de cortocircuito, se empleará la tensión de servicio  $U$  del punto de cortocircuito.

El cálculo se puede aplicar también con valores elegidos arbitrariamente de la tensión básica  $U_B$  o de la potencia básica  $P_B$ . En tales casos, habrá que multiplicar los valores de la impedancia, determinados según el método descrito, por el factor  $(U_B/U)^2$  o  $P_B/U^2$ , respectivamente.

En cálculos aproximativos y en aquellos casos en los que no se conozcan las relaciones nominales exactas de los transformadores, es en general suficiente el proceso simplificado de cálculo de acuerdo con la tabla X.

Tabla XI Ejemplo para el cálculo ampliado de un cortocircuito con valores absolutos de impedancia

	<p>Cálculo con impedancias en <math>\Omega</math>/fase</p>
<p>Generador de 60 MVA</p> $X_{G1}'' = X_{d1}'' \cdot \frac{U_1^2}{P_{G1}} \left( \frac{U_3}{U_2} \cdot \frac{U_5}{U_4} \right)^2$ $= 0,12 \cdot \frac{10,5^2}{60} \left( \frac{6,3}{10,5} \cdot \frac{10}{60} \right)^2 = 0,222 \Omega$	
<p>Transformador de 40 MVA</p> $X_{Tr} = n_k \cdot \frac{U_3^2}{P_{Tr}} \left( \frac{U_5}{U_4} \right)^2$ $= 0,10 \cdot \frac{63^2}{40} \left( \frac{10}{60} \right)^2 = 0,275 \Omega$	
<p>Línea l = 22 km</p> $X_{L1} = X_{L1}' \cdot l \cdot \left( \frac{U_5}{U_4} \right)^2$ $= 0,4 \cdot 22 \left( \frac{10}{60} \right)^2 = 0,245 \Omega$	
<p>Transformador de 12 MVA</p> $X_{Tr} = n_k \cdot \frac{U_5^2}{P_{Tr}}$ $= 0,08 \cdot \frac{10}{12} = 0,67 \Omega$	
	$\Sigma X = 1,41 \Omega$
<p>Potencia inicial de cortocircuito</p> $S_{K(3)''} = \frac{U^2}{\Sigma X} \cdot \frac{E_d''}{U}$ $= \frac{10^2}{1,41} \cdot 1,1 = 78,1 \text{ MVA}$	
<p>Corriente inicial subtransitoria de cortocircuito</p> $I_{K(3)''} = \frac{S_{K(3)''}}{\sqrt{3} \cdot U}$ $= \frac{78,1}{\sqrt{3} \cdot 10} = 4,51 \text{ kA}$	

## 2. Tratamiento de las redes con alimentación múltiple y con mallas

El cálculo de las corrientes de cortocircuito de una red con un solo punto de alimentación, tal como lo trata el ejemplo precedente, es relativamente fácil de realizar. Sin embargo, muy a menudo las redes son alimentadas en varios puntos, pudiendo presentarse circuitos separados, circuitos parcialmente comunes o circuitos con mallas. La figura 42 representa algunos ejemplos de tales redes.

El caso b) (cortocircuito con alimentación múltiple a través de circuitos separados) no es esencialmente diferente del caso a). La corriente de cortocircuito equivale simplemente a la suma de los valores parciales provenientes de los ramales A y B.

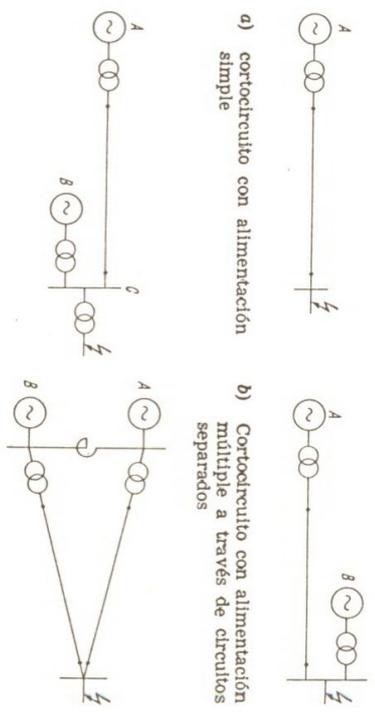


Fig. 42 Configuraciones fundamentales de las redes para el cálculo de cortocircuitos

c) Cortocircuito con alimentación múltiple a través de circuitos parcialmente comunes

d) Cortocircuito con alimentación múltiple a través de circuitos enmallados

El caso c) ya no permite efectuar una simple suma; en este caso se deberán conectar en paralelo las impedancias de los ramales A y B hasta el punto de derivación C y al valor de la impedancia reducida se le sumará la impedancia común a ambos circuitos. Los valores parciales de la corriente de cortocircuito, correspondientes a los ramales A y B, se obtienen con la relación entre la impedancia reducida y la impedancia del ramal.

El cálculo de las corrientes de cortocircuito del caso d) requiere que se transforme este circuito al caso c). Esta transfor-

mación generalmente se logra abriendo la malla, sustituyendo el circuito triángulo por un circuito estrella equivalente, de acuerdo con las ecuaciones de la figura 43.

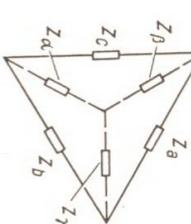
Triángulo-estrella	Estrella-triángulo	
$Z_a = \frac{Z_b Z_c}{Z_a + Z_b + Z_c}$	$Z_a = \frac{Z_a Z_b + Z_b Z_c + Z_c Z_a}{Z_c}$	
$Z_b = \frac{Z_a Z_c}{Z_a + Z_b + Z_c}$	$Z_b = \frac{Z_a Z_b + Z_b Z_c + Z_c Z_a}{Z_b}$	
$Z_c = \frac{Z_a Z_b}{Z_a + Z_b + Z_c}$	$Z_c = \frac{Z_a Z_b + Z_b Z_c + Z_c Z_a}{Z_a}$	

Fig. 43 Transformación equivalente de circuitos triángulo en circuitos estrella y viceversa

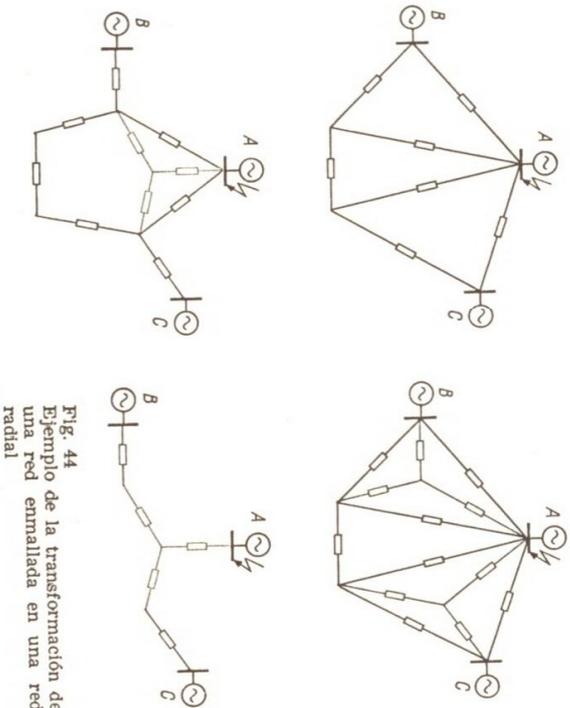


Fig. 44 Ejemplo de la transformación de una red enmallada en una red radial

Por ejemplo puede transformarse la red esbozada en la figura 44 provista de alimentación múltiple y mallas, en una red del tipo representado en la figura 44 d), mediante las sustituciones equivalentes triángulo/estrella representadas en los pasos b) y c), con lo que el cálculo se reduce al caso del cortocircuito con alimentación múltiple a través de circuitos parcialmente comunes.

Si aparte de la determinación de la corriente total de cortocircuito y de la participación de las centrales se necesita determinar la carga de cada una de las mallas, será necesario retransformar la red a su configuración original. Para ello deberán transformarse las cargas «estrella» en las cargas «triángulo» equivalentes, aplicando las ecuaciones de la figura 45.

El cálculo matemático de las redes con mallas es, en la mayoría de los casos, sumamente engorroso, siendo aconsejable recurrir a los analizadores de redes, o emplear instalaciones de elaboración de datos.

$$I_a = \frac{I_b Z_b + I_c Z_c}{Z_a} \quad I_\alpha = I_b + I_c$$

$$I_b = \frac{I_c Z_c + I_a Z_a}{Z_b} \quad I_\beta = I_a - I_c$$

$$I_c = \frac{I_a Z_a - I_b Z_b}{Z_c} \quad I_\gamma = I_a + I_b$$

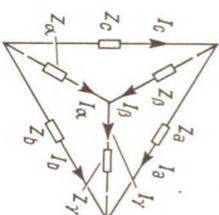


Fig. 45 Transformación de las corrientes en las mallas

### 3. Impedancia de un punto de la red con potencia de cortocircuito conocida

Frecuentemente solo se conoce la potencia de cortocircuito  $S_k''$  correspondiente a un punto de la red, ignorándose la potencia  $P_g$  de los generadores. En tales casos se puede calcular la impedancia de la red antepuesta como sigue:

$$Z_N = \frac{U_B^2}{S_k''} \cdot \frac{E_d''}{U} \quad \Omega/\text{fase}$$

El valor relativo es:

$$Z_N = \frac{P_B}{S_k''} \cdot \frac{E_d''}{U}$$

El valor de esta impedancia de la red no permite sacar conclusiones acerca de la impedancia del generador, incluida en la misma; por lo tanto, tampoco es posible determinar la amortiguación de la corriente de cortocircuito. Por razones de seguridad se presupone en estos casos que  $I_k'' = I_a = I_b$ , es decir, que la tensión de la red alimentadora sea rígida. En general, la condición  $I_k'' = I_a = I_b$  se cumple, si la impedancia de la red antepuesta es cinco veces menor que la impedancia existente a continuación del punto considerado.

#### 4. Observaciones generales para el cálculo

Cuando en las redes haya que considerar principalmente las impedancias de los generadores, transformadores y bobinas de reactancia, existiendo líneas aéreas o cables subterráneos de solo poca longitud o conectados en paralelo, frecuentemente podrán omitirse las resistencias óhmicas. En efecto, la impedancia no disminuirá apreciablemente de la reactancia, pues esta última es preponderante y la suma geométrica de una componente activa no tiene influencia práctica sobre el resultado. Asimismo, en la mayoría de los casos puede despreciarse la resistencia óhmica de aquellas líneas, cuya tensión de servicio sea mucho mayor que la tensión de servicio correspondiente al punto para el cual se desea determinar la corriente de cortocircuito. La influencia de estas resistencias óhmicas resulta despreciable al referirlas a la tensión del lugar de defecto. Por lo tanto, para la determinación de  $I_k''$  sólo se considerará la reactancia del circuito de defecto. Esta omisión perfectamente admisible simplifica el cálculo, especialmente cuando existen conexiones en paralelo y mallas, en cuyo caso la determinación de la impedancia resultante exigiría el cálculo complejo.

Sin embargo, cuando el circuito de defecto contiene resistencias óhmicas no despreciables (cables subterráneos o líneas aéreas de longitud apreciable o de sección pequeña, transformadores de poca potencia), su omisión redundaría no solo en la obtención de una impedancia total demasiado baja, sino que también se obtendría un valor excesivo para el impulso de la corriente de cortocircuito, el cual depende considerablemente de la relación entre la resistencia óhmica y la reactancia del circuito de defecto. La omisión de la resistencia óhmica tendría como consecuencia, en estos casos, la necesidad de prever aparatos con una resistencia dinámica mayor que la realmente requerida, dificultando la aplicación de aparatos que de otro modo serían adecuados.

Cuando la tensión de servicio es mayor de 1 kV, generalmente puede ser despreciada la impedancia de las barras colectoras en las instalaciones de maniobra, en comparación con la impedancia de los generadores, transformadores y bobinas de reactancia.

Contrariamente, en las instalaciones con tensiones de servicio de hasta 500 V, ya no puede despreciarse la reactancia de las barras colectoras y de las conexiones, siendo aconsejable considerar en el cálculo de cortocircuitos la longitud de los conductores secundarios de alimentación, aun cuando no exceda de algunos metros. Incluso las resistencias de paso de puntos de contacto, uniones por tornillo, etc., que pueden alcanzar valores de hasta unos 0,05 mΩ, dejan sentir sus efectos en las instalaciones de baja tensión.

#### 5. Impedancia de los elementos de la instalación

##### Generadores

La resistencia óhmica  $R_n$  es despreciable;  $R_n/X_d'' \approx 0,03$ . La reactancia subtransitoria  $X_d'' =$

$$X_d'' = \frac{X_d'' \cdot U_n^2}{100 \cdot P_G} \quad \Omega/\text{fase}$$

$P_G$  = potencia nominal del generador, en MVA,  
 $U_n$  = tensión nominal del generador, en kV,  
 $X_d''$  = reactancia subtransitoria relativa, en %.

Para los valores aproximados de las reactancias de los generadores véase la tabla XII.

Los generadores conectados en paralelo directamente, de igual reactancia subtransitoria pero de diferente potencia, pueden ser reemplazados por una sola máquina de potencia igual a la suma de todas las potencias parciales.

##### Motores síncronos

Los motores síncronos se tratarán en el cálculo como los generadores.

##### Motores asíncronos

Tratándose de motores asíncronos, el cálculo puede limitarse a la determinación de su participación en el impulso de la corriente de cortocircuito y en la corriente de ruptura, y no tener en cuenta la corriente permanente de cortocircuito. La impedancia de corto circuito del motor se obtiene de su corriente de arranque a la tensión nominal y con el rotor en cortocircuito:

$$Z_M = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_A} \quad \Omega/\text{Phase}$$

$U_n$  = tensión nominal del motor en kV  
 $I_A$  = corriente de arranque del motor en kA  
 Resistencia óhmica despreciable  
 $R/X \approx 0,07$

La determinación de la corriente de ruptura para el cortocircuito tripolar se lleva a cabo en la misma forma que en los generadores. Sin embargo, debido al rápido amortiguamiento de la tensión del motor, al factor de amortiguamiento  $\mu$  se le aplica otro factor  $q$ , cuyo valor es función de la potencia del motor por cada par de polos y del retardo mínimo de desconexión.

En el caso de defectos tripolares se tiene entonces:

$$I_a = \mu \cdot q \cdot I_k''$$

La figura 46 proporciona valores orientativos del factor  $q$ . Tratándose de cortocircuitos bipolares, se tomará  $q = 1$ . En este último caso los motores asincrónicos participan también en la corriente permanente de cortocircuito.

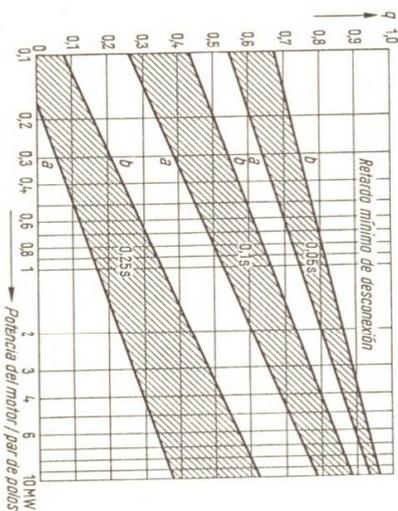


Fig. 46 Factor  $q$  para reducir el factor de amortiguamiento  $\mu$  en los motores asincrónicos (según VDE 0102)

#### Transformadores de dos arrollamientos

La resistencia óhmica  $R_T$  y la reactancia  $X_T$  se obtienen por medio de las siguientes relaciones:

$$R_T = \frac{u_r \cdot U_n^2}{100 \cdot P_T} \quad \Omega/\text{fase}$$

$$X_T = \frac{u_k \cdot U_n^2}{100 \cdot P_T} \quad \Omega/\text{fase}$$

$P_T$  = potencia nominal del transformador en MVA

$U_n$  = tensión nominal del transformador en kV

$u_r$  = caída relativa de tensión óhmica en % (pérdida en cortocircuito)

$u_k$  = tensión relativa de dispersión en %,  $u_k = \sqrt{u_k^2 - u_r^2}$

$u_k$  = tensión relativa de cortocircuito en %

Cuando  $u_k$  es mayor de un 5 % se admite  $u_k = u_r$ . Por regla general,  $R_T$  es despreciable en los transformadores de gran potencia. Para los valores aproximados de  $u_k$  y  $u_r$ , véase la tabla XII.

Tabla XII  
Características de máquinas síncronas

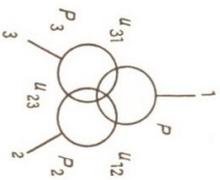
Tipo de máquina	Turbo- generadores	Generadores de polos salientes con arrollamiento amortiguador de alta velocidad	Generadores de polos salientes con arrollamiento amortiguador de baja velocidad	Generadores de polos salientes sin arrollamiento amortiguador de alta velocidad	Generadores de polos salientes sin arrollamiento amortiguador de baja velocidad
	2 p < 16	2 p < 16	2 p > 16	2 p < 16	2 p > 16
Reactancia subtransitoria $U_{x_d}''$ en % (saturada)	12 9 a 20	18 14 a 23	20 15 a 25	25 22 a 35	30 25 a 40
Reactancia transitoria $x_d'$ en % (saturada)	18 14 a 25	27 20 a 32	30 22 a 36	27 22 a 35	33 25 a 40
Reactancia síncrona $x_d$ en % (saturada)	160 120 a 200	100 80 a 140	100 75 a 125	100 80 a 140	100 75 a 125
Relación de vacío y corriente $k_0$	0,60 0,5 a 0,8	1,0 0,7 a 1,6	1,0 0,8 a 1,2	1,0 0,7 a 1,6	1,0 0,8 a 1,2
Reactancia inversa $x_2$ en %	12 9 a 20	20 14 a 25	24 15 a 27	45 36 a 63	50 35 a 60
Reactancia homopolar $x_0$ en %	2 a 10	3 a 20	3 a 22	4 a 24	4 a 30
Constante de tiempo subtransitoria $T_d''$ en s	0,03 0,02 a 0,05	0,03 0,02 a 0,05	0,03 0,02 a 0,05	—	—
Constante de tiempo transitoria $T_d'$ en s	1,3 0,5 a 1,8	1,6 0,7 a 2,5	1,6 0,7 a 2,5	1,6 0,7 a 2,5	1,6 0,7 a 2,5
Constante de tiempo de marcha en vacío $T_{d0}'$ en s	10 5 a 15	6 4 a 10	5 3 a 8	6 4 a 10	5 3 a 8
Constante de tiempo de la componente de corriente continua $T_d'$ en s	0,15 0,07 a 0,40	0,18 0,10 a 0,40	0,22 0,10 a 0,40	0,30 0,15 a 0,50	0,35 0,20 a 0,50

Tabla XIII  
Tensiones de cortocircuito de los transformadores

Tensión nominal superior en kV	6 a 20	30	60	110	220
$u_k$ en %	3,5 a 8	6 a 11	9 a 12	9 a 15	12 a 15
Potencia nominal en MVA	0,1	0,32	1	3,2	10
$u_r$ en %	1,8 a 2,1	1,5 a 1,8	1,3 a 1,5	0,8 a 1,0	0,5 a 0,7
					0,4 a 0,6
					32

**Transformadores de tres arrollamientos**

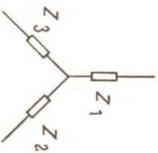
Los valores correspondientes a la impedancia de la conexión estrella equivalente están dados por las ecuaciones indicadas a continuación; el término negativo puede dar lugar a que alguna de las impedancias también resulte negativa:



$$Z_1 = \left( \frac{M_{12}}{P_{12}} + \frac{M_{31}}{P_{31}} - \frac{M_{23}}{P_{23}} \right) \cdot \frac{U_B^2}{2 \cdot 100} \Omega/\text{Phase}$$

$$Z_2 = \left( \frac{M_{23}}{P_{23}} + \frac{M_{12}}{P_{12}} - \frac{M_{31}}{P_{31}} \right) \cdot \frac{U_B^2}{2 \cdot 100} \Omega/\text{Phase}$$

$$Z_3 = \left( \frac{M_{31}}{P_{31}} + \frac{M_{23}}{P_{23}} - \frac{M_{12}}{P_{12}} \right) \cdot \frac{U_B^2}{2 \cdot 100} \Omega/\text{Phase}$$



**Bobinas de reactancia**

Resistencia óhmica  $R_D$  despreciable;  $R_D/X_D \approx 0,03$ .

$$X_D = \frac{u_D \cdot U_n}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot I_D} \quad \text{oder} \quad \frac{u_D \cdot U_n^2}{100 \cdot P_D} \Omega/\text{fase}$$

- $U_n$  tensión nominal de la bobina en kV
- $u_D$  reactancia relativa de la bobina en %
- $I_D$  intensidad nominal de la bobina en kA
- $P_D$  potencia nominal de paso de la bobina en MVA

**Cables subterráneos**

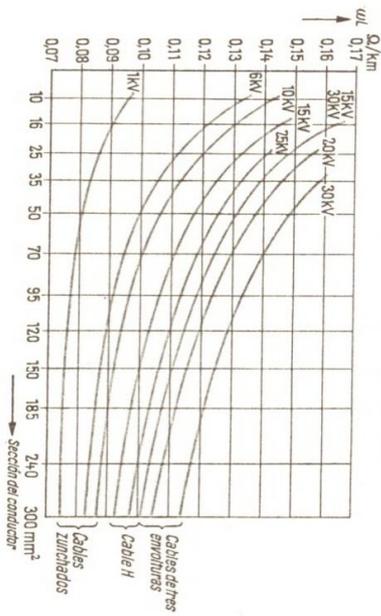
Resistencia óhmica  $R_k$  en  $\Omega/\text{km}$  y fase: véase la tabla XIV. Reactancia inductiva  $X_k$  en  $\Omega/\text{km}$  y fase: véanse las tablas XV y XVI. Para los cálculos aproximados puede adoptarse el valor promedio de  $X_k \approx 0,1 \Omega/\text{km}$  y fase.

Tabla XIV  
Resistencia óhmica de conductores cableados de cobre y de aluminio, en  $\Omega/\text{km}$ , correspondiente a una temperatura de 20 °C

Sección $\text{mm}^2$	Líneas aéreas		Cables subterráneos	
	Cu	Al	Cu	Al
10	1,784	3,03	1,79	3,03
16	1,115	1,895	1,121	1,90
25	0,714	1,212	0,722	1,22
35	0,510	0,866	0,518	0,874
50	0,357	0,606	0,366	0,615
70	0,255	0,433	0,265	0,443
95	0,188	0,319	0,200	0,331
120	0,149	0,253	0,161	0,265
150	0,119	0,202	0,131	0,214
185	0,0964	0,164	0,109	0,176
240	0,0744	0,126	0,087	0,138
300	0,0595	0,101	0,072	0,113
400	0,0446	0,0758	0,058	0,089

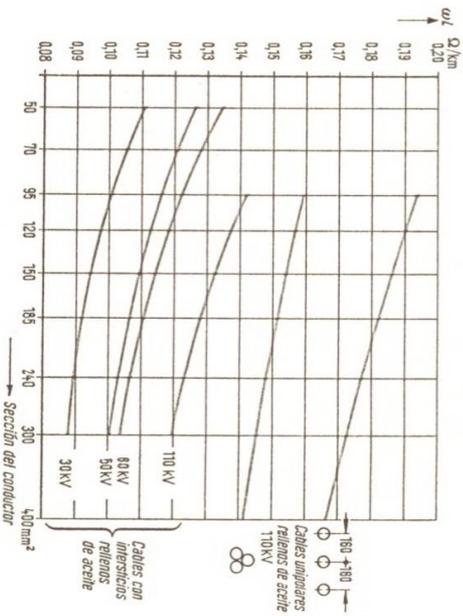
Tratándose de conductores de acero-aluminio, solamente se considerará la sección del aluminio

Tabla XV  
Cables subterráneos trifásicos de 30 a 115 kV. Reactancia Inductiva  $\omega L$  por fase para  $f = 50$  Hz.



Quando los cables no son armados, los valores disminuyen aproximadamente en un 10 %

Tabla XVI  
Cables subterráneos trifásicos de 30 a 115 kV. Reactancia Inductiva  $\omega L$  por fase  $f = 50$  Hz



Los cables unipolares rellenos de aceite sin armadura, colocados en triángulo y en contacto entre sí, tienen una reactancia inductiva hasta un 20 % inferior; al ubicarlos en un mismo plano, su reactancia inductiva es, sin embargo, un 5 % mayor.

Tabla XVII  
Cables subterráneos trifásicos rellenos de aceite de 30 a 110 kV. Impedancia homopolar para  $f = 50$  Hz

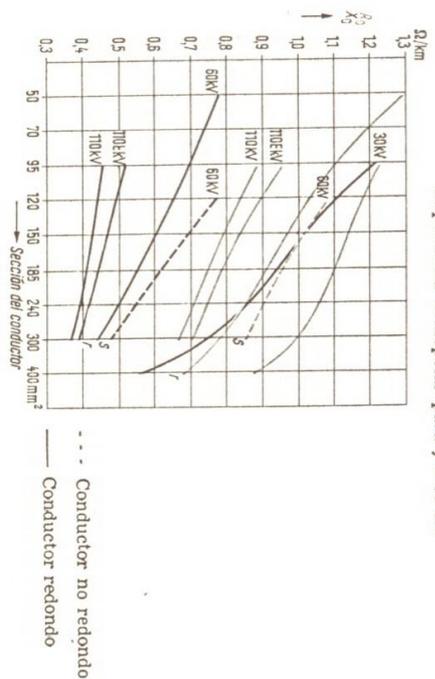
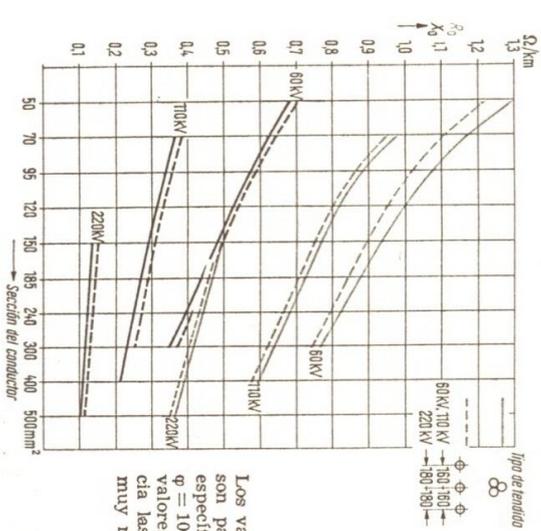
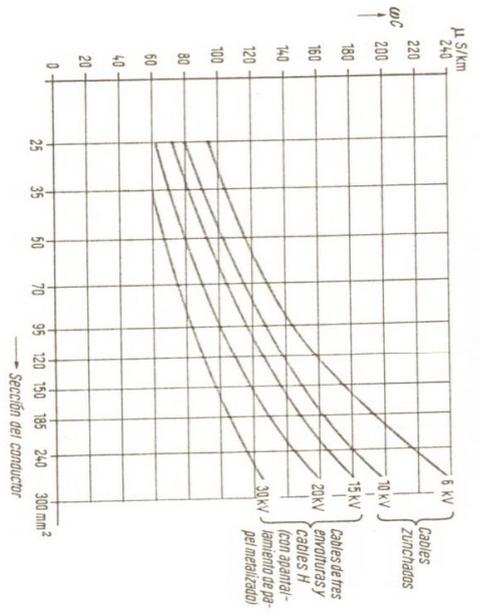


Tabla XVIII  
Cables subterráneos monofásicos rellenos de aceite (no armados) de 60 a 220 kV, impedancia homopolar para  $f = 50$  Hz



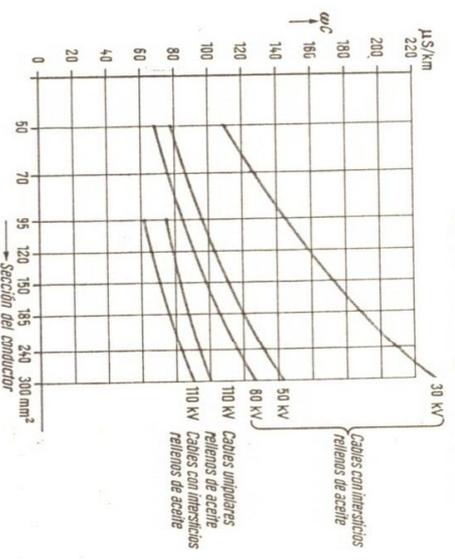
Los valores del diagrama son para una resistencia específica del terreno de  $\rho = 100 \Omega\text{m}$ . Para otros valores de dicha resistencia las discrepancias son muy reducidas

Tabla XIX. Conductancia capacitiva  $\omega C$  de cables subterráneos trifásicos de 6 a 30 kV. Conductancia capacitiva  $\omega C$  de servicio para  $f = 50$  Hz



Exceptuando los cables de canchales, la capacidad de servicio equivale siempre a la de cada fase con respecto a tierra. En los cables de canchales la capacidad de cada fase con respecto a tierra es aproximadamente el 60% de la de servicio

Tabla XX. Conductancia capacitiva  $\omega C$  de cables subterráneos trifásicos de 30 a 110 kV. Conductancia capacitiva  $\omega C$  de servicio para  $f = 50$  Hz



*Lineas aéreas*

Resistencia óhmica  $R_L$  en  $\Omega/km$  y fase: véase la tabla XIV. Reactancia inductiva  $X_L$  en  $\Omega/km$  y fase: véase la tabla XXI. Para los cálculos aproximados pueden adoptarse los siguientes valores:

$X_L = 0,4 \Omega/km$  y fase para líneas de más de 30 kV  
 $X_L = 0,35 \Omega/km$  y fase para líneas de hasta 30 kV

Los valores de la reactancia homopolar indicados en las tablas XXII y XXIV son válidos para líneas aéreas sin cable de tierra. Sin embargo, rigen también aproximadamente para líneas aéreas con cable de tierra. El factor de reducción de la reactancia homopolar oscila por término medio entre 0,85 y 0,95 con cables de tierra de acero, y entre 0,70 y 0,85 con cables de tierra de aluminio-acero. Para la determinación de la resistencia óhmica del sistema homopolar se incrementarán los valores de la tabla XIV en  $0,15 \Omega/km$  (resistencia óhmica del retorno por tierra).

Tabla XXI. Líneas aéreas trifásicas hasta 150 kV. Valores promedio de la reactancia inductiva  $\omega L$  por fase para  $f = 50$  Hz

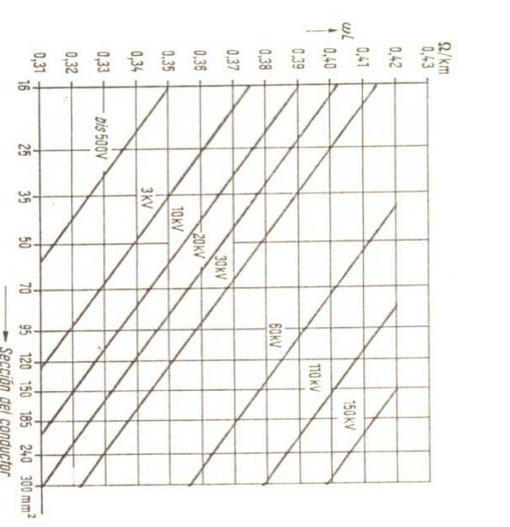
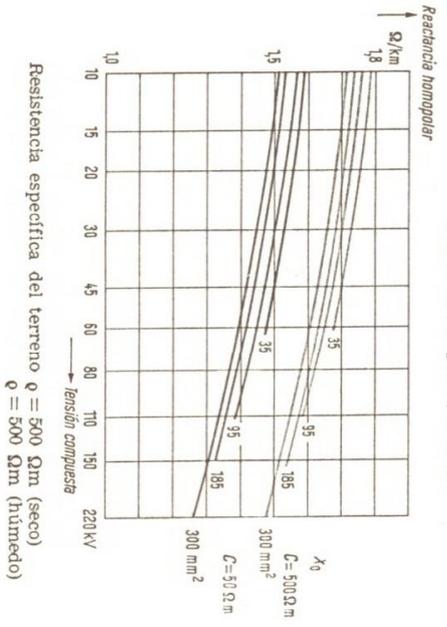
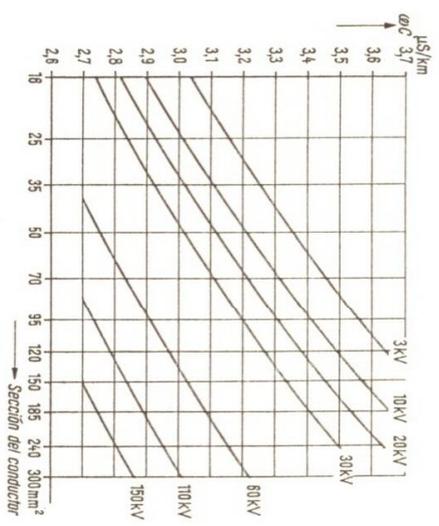


Tabla XXII  
Reactancia inductiva homopolar  $\omega L_0$  de líneas aéreas trifásicas hasta 150 kV para  $f = 50$  Hz



Resistencia específica del terreno  $\rho = 500 \Omega \text{m}$  (seco)  
 $\rho = 500 \Omega \text{m}$  (húmedo)

Tabla XXIII  
Líneas aéreas trifásicas hasta 150 kV. Conductancia capacitiva de servicio para  $f = 50$  Hz



La capacidad entre cada conductor y tierra es de aprox. un 50 a 60 % de la capacidad de servicio; el valor mayor rige para las líneas provistas de un solo circuito.

Tabla XXIV  
Líneas aéreas de corriente trifásica, de 220 kV y 380 kV. Valores medios de la reactancia inductiva  $\omega L$  y de la conductancia capacitiva de servicio  $\omega C$  para  $f = 50$  Hz

Tipo de línea	220 kV				380 kV			
	$\omega L_1$ Ω/km	$\omega L_0$ Ω/km	$\omega L_{10}$ Ω/km	$\omega C$ μS/km	$\omega L_1$ Ω/km	$\omega L_0$ Ω/km	$\omega L_{10}$ Ω/km	$\omega C$ μS/km
Un solo conductor	0,4	1,34	0,76	2,85	0,32	1,18	0,7	3,65
Haz de dos conductores	0,3	1,24	0,76	3,75	0,26	1,12	0,7	4,35
Haz de cuatro conductores								

$\omega L_1$  Reactancia directa por cada fase y circuito  
 $\omega L_0$  Reactancia homopolar por cada fase y circuito con  $\rho = 100 \Omega \text{m}$   
 $\omega L_{10}$  Reactancia homopolar de acoplamiento por cada fase de la línea de dos circuitos.  
Para la línea de dos circuitos resulta una reactancia homopolar de  $\omega L_{10} = \omega L_0 + \omega L_{10}$  por cada circuito y fase  
Esta reactancia es, por término medio, aproximadamente un 60 % mayor que la reactancia homopolar de la línea de un solo circuito.

En líneas de doble circuito, hay que tener en cuenta que la impedancia homopolar por fase y circuito, que resulta de la suma de las resistencias óhmicas y las reactancias, es decir  $Z_{00} = Z_0 + Z_{w0}$  sólo podrá emplearse cuando el defecto a considerar no se encuentre en el tramo de la línea, o sea, cuando la corriente homopolar circule por ambos circuitos en el mismo sentido. Para considerar las impedancias homopolar en un punto de defecto localizado en el tramo de la línea, hay que valerse del circuito equivalente de la figura 47, en el que  $a$  y  $b$  son las distancias del punto de defecto a los extremos de la línea.

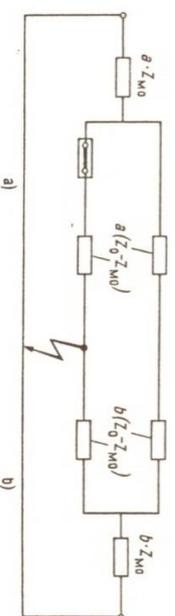


Fig. 47

El circuito equivalente es también válido cuando el circuito afectado se encuentre abierto en un extremo del tramo (interruptor de la figura abierto).

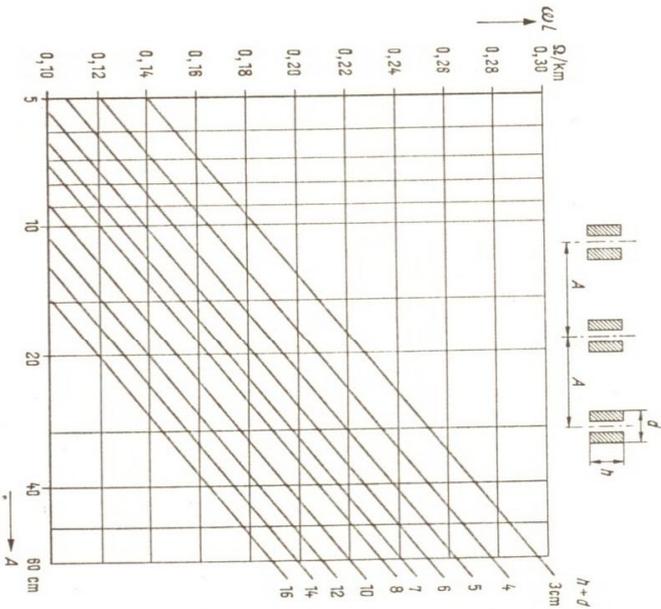
*Barras de conexión en las instalaciones de maniobra*

Resistencia óhmica  $R_i$ : despreciable.

Reactancia inductiva  $X_L$ : véase la tabla XXV.

Para los cálculos aproximados puede adoptarse una reactancia inductiva de 0,15  $\Omega/\text{km}$  y fase.

Tabla XXV  
Barras de sección rectangular. Reactancia inductiva  $\omega L$  por fase para  $f = 50 \text{ Hz}$



6. Determinación numérica de las impedancias de líneas aéreas  
(Véanse las notaciones de la página 88.)

1. Impedancia directa

a) Línea trifásica de un circuito con conductores cableados

$$Z_1 = R_1 + j\omega \cdot 10^{-4} \cdot \left( 2 \cdot \ln \frac{A}{r} + 0,5 \mu_1 \right) \Omega/\text{km por conductor}$$

b) Línea trifásica simétrica de doble circuito

$$Z_{11} = R_1 + j\omega \cdot 10^{-4} \cdot \left( 2 \cdot \ln \frac{A \cdot A'}{r \cdot A''} + 0,5 \mu_1 \right) \Omega/\text{km por conductor}$$

La influencia ejercida sobre el valor de la reactancia inductiva por las respectivas distancias  $A'$  y  $A''$  (inductancia de acoplamiento) es relativamente reducida tratándose de líneas de doble circuito. La reactancia inductiva sólo aumenta en la mayoría de los casos en un pequeño porcentaje.

2. Conductancia capacitiva de servicio  $\omega C_B$

a) Línea trifásica de un circuito con conductores cableados

$$\omega C_{B1} = \frac{\omega \cdot 0,0556}{\ln \left( \frac{A}{r} \cdot \sqrt{\frac{4H^2}{4H^2 + A^2}} \right)} \mu\text{S/km por conductor}$$

b) Línea trifásica simétrica de doble circuito

$$\omega C_{B11} = \frac{\omega \cdot 0,0556}{\ln \left( \frac{A}{r} \cdot \sqrt{\frac{4H^2}{4H^2 + A^2}} \cdot \frac{(4H^2 + A'^2) \cdot A'^2}{(4H^2 + A''^2) \cdot A''^2} \right)} \mu\text{S/km por conductor y circuito}$$

La influencia ejercida sobre el valor  $\omega C_B$  por las respectivas distancias  $A'$  y  $A''$  (capacidad de acoplamiento) es relativamente reducida tratándose de líneas de doble circuito. La capacidad de servicio solo se reduce en la mayoría de los casos en un pequeño porcentaje.

La capacidad de servicio se compone de la del conductor con respecto a tierra y de la de los conductores entre sí, de acuerdo con la igualdad:

$$C_B = C_E + 3 C_G$$

### 3. Conductancia capacitiva con respecto a tierra $\omega C_E$

a) Línea trifásica de un circuito, con conductores cableados y sin cable de tierra

$$\omega C_{E1} = \frac{\omega \cdot 0,0556}{\ln \left[ \frac{2H}{r} \left( \frac{4H^2}{A^2} + 1 \right) \right]} \quad \mu\text{S/km por conductor}$$

b) Línea trifásica simétrica de doble circuito sin cable de tierra

$$\omega C_{E11} = \frac{\omega \cdot 0,0556}{\ln \left[ \frac{2H}{r} \left( \frac{4H^2}{A^2} + 1 \right) \right] \cdot \sqrt{\frac{4H^2}{A_1'^2} + 1}} \quad \mu\text{S/km por conductor y circuito}$$

c) Línea trifásica de un circuito con conductores cableados y con cable de tierra

$$\omega C_{E1} = \frac{\omega \cdot 0,0556}{\ln \left[ \frac{2H}{r} \left( \frac{4H^2}{A^2} + 1 \right) \right] - \frac{3 \left[ \ln \left( \frac{4H \cdot b}{A_s^2} + 1 \right) \right]^2}{4 \cdot \ln \frac{2b}{r_s}}} \quad \mu\text{S/km por conductor}$$

d) Línea trifásica simétrica de doble circuito con cable de tierra

$$\omega C_{E11} = \frac{\omega \cdot 0,0556}{\ln \left[ \frac{2H}{r} \left( \frac{4H^2}{A^2} + 1 \right) \right] \cdot \sqrt{\frac{4H^2}{A_1'^2} + 1}} - \frac{6 \left[ \ln \left( \frac{4H \cdot b}{A_s^2} + 1 \right) \right]^2}{4 \cdot \ln \frac{2b}{r_s}} \quad \mu\text{S/km por conductor y circuito}$$

### 4. Impedancia homopolar

a) Línea trifásica de un circuito sin cable de tierra

$$Z_0 = R_L + 3 R_E + j \omega \cdot 10^{-4} \cdot \left( 6 \ln \frac{\delta}{3 \sqrt{r \cdot A^2}} + 0,5 \mu_1 \right) \quad \Omega/\text{km por conductor}$$

$$\text{siendo: } \delta = 1650 \sqrt{\frac{\rho}{\omega}} ; R_E = \frac{\pi}{2} \omega \cdot 10^{-4}$$

b) Línea trifásica simétrica de doble circuito sin cable de tierra

$$Z_{0E} = Z_0 + Z_{M0} \quad \Omega/\text{km por conductor y circuito}$$

siendo  $Z_{M0}$  la impedancia homopolar de acoplamiento de los dos circuitos.

Dicha impedancia viene dada por:

$$Z_{M0} = 3 R_E + j \omega \cdot 10^{-4} \cdot 6 \cdot \ln \frac{\delta}{A_L}$$

c) Línea trifásica de un circuito con cable de tierra

$$Z_{0E} = Z_0 - \frac{3 \cdot Z_{1s}^2}{Z_s} \quad \Omega/\text{km por conductor}$$

siendo:

$$Z_{1s} = R_E + j \omega \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot \ln \frac{\delta}{A_s} \quad \text{impedancia mutua entre la línea y el cable de tierra}$$

$$Z_s = R_s + R_E + j \omega \cdot 10^{-4} \left( 2 \cdot \ln \frac{\delta}{r_s} + 0,5 \mu_1 \right) \quad \text{impedancia homopolar del cable de tierra}$$

En el caso de líneas trifásicas con cable de tierra, una parte de la corriente homopolar circula por dicho cable, reduciéndose por lo tanto la corriente homopolar que fluye a tierra. El factor de reducción correspondiente viene dado por la expresión:

$$f_r = 1 - \frac{Z_{1s}}{Z_s}$$

De acuerdo con ello la proporción de corriente homopolar que circula a través del cable de tierra es:

$$1 - f_r = \frac{Z_{1s}}{Z_s}$$

d) Línea trifásica simétrica de doble circuito con cable de tierra

$$Z_{00E} = Z_{0E} + Z_{MOE} \Omega/\text{km} \text{ por conductor y circuito}$$

siendo  $Z_{MOE}$  la impedancia homopolar de acoplamiento de ambos circuitos, incluyendo el cable de tierra. Dicha impedancia viene dada por:

$$Z_{MOE} = Z_{MO} - \frac{3 \cdot Z_{1s}^2}{Z_s}$$

### 5. Aclaración de las notaciones

Los símbolos empleados en las expresiones anteriormente indicadas para  $Z_1$ ,  $Z_0$  y  $\omega C$  tienen el siguiente significado:

$$A = \sqrt[3]{a_{12} \cdot a_{23} \cdot a_{31}} ; A' = \sqrt[3]{a_{12}' \cdot a_{23}' \cdot a_{31}'} ; A'' = \sqrt[3]{a_{11}'' \cdot a_{22}'' \cdot a_{33}''}$$

$$H = \sqrt[3]{h_1 \cdot h_2 \cdot h_3} ; A_s = \sqrt[3]{a_{1s} \cdot a_{2s} \cdot a_{3s}} ; A_L = \sqrt[3]{A^2 \cdot A''}$$

- 1, 2, 3 Fases del sistema I
- 1', 2', 3' Fases del sistema II
- $a_{12}$  Distancia media entre conductores en m
- $a_{1s}$  Distancia entre conductor y cable de tierra en m
- $h_1$  Distancia entre conductor y tierra en m
- $h_s$  Distancia entre el cable de tierra y el terreno en m
- $r$  Radio del conductor en m
- $r_g$  Radio del cable de tierra en m
- $R_L$  Resistencia óhmica del conductor en  $\Omega/\text{km}$
- $R_E$  Resistencia óhmica del terreno en  $\Omega/\text{km}$
- $R_s$  Resistencia óhmica del cable de tierra en  $\Omega/\text{km}$
- $\delta$  Profundidad de penetración en el terreno en m
- $\rho$  Resistencia específica del terreno en  $\Omega\text{m}$
- $\mu_1$  Permeabilidad relativa (para Cu y Al  $\mu_1 = 1$ ; para el acero  $\mu_1 \approx 50$  a  $90$ )

Teniendo en cuenta la flecha de los conductores, para  $h$  se tomará la altura máxima del conductor sobre el terreno en los puntos de apoyo menos un 70 % de la flecha del conductor.

Tratándose de conductores dispuestos en haz, en el que  $n$  de ellos se hallen simétricamente dispuestos alrededor de un eje, en las relaciones indicadas para  $Z_1$ ,  $Z_0$  y  $\omega C$ , se sustituirá el radio del

conductor  $r$  por el radio equivalente del haz  $r_e$  y el factor  $0,5 \mu_1$  se dividirá por el número de conductores que componen el haz.

El radio equivalente se determina por la expresión:

$$r_e = \sqrt[n]{r_T \cdot S}$$

- $r_T$  Radio de un conductor componente del haz
- $S$  Producto de las distancias entre un conductor del haz y los restantes
- $n$  Número de conductores componentes del haz

En el supuesto de que haya que considerar dos cables de tierra, se tomará en lugar de  $r_g$  un radio equivalente  $r_{es}$  dependiente de ambos cables de tierra, que viene dado por

$$r_{es} = \sqrt{r_s \cdot a_{ss}}$$

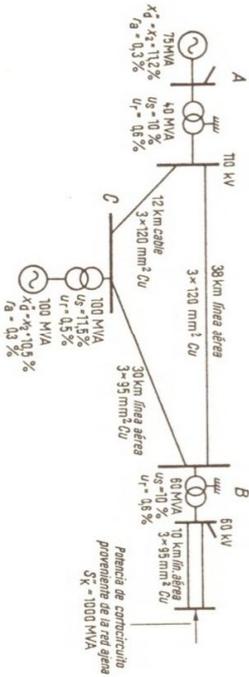
$a_{ss}$  Distancia entre ambos cables de tierra.

Tabla XXVI  
Valores medios de la resistencia específica del terreno según VDE 0141

Tipo de terreno	Terreno pantanoso	Terreno fangoso, arcilloso y de labor	Arena húmeda	Grava húmeda	Arena o Grava secas	Terreno pedregoso
$\rho \Omega\text{m}$	30	100	200	500	1000	3000

## 7. Ejemplo de un cálculo

Las centrales A y C están interconectadas entre sí y con la estación transformadora B mediante cables subterráneos y líneas aéreas. El punto neutro de la red está conectado rígidamente a tierra. Los transformadores utilizados para la puesta a tierra son de conexión estrella/estrella y están provistos de arrollamiento compensador conectado en triángulo. Se determinarán las corrientes del cortocircuito tripolar y unipolar en las barras colectoras de 110 kV de la central C. El cálculo se efectuará con las impedancias relativas, eligiéndose una potencia básica de  $P_b = 100 \text{ MVA}$ .



### Determinación de las impedancias

a) Impedancias del generador y del transformador de la central A  
 Generador 75 MVA:

$$z_{1G}'' = z_{2G} = (0,003 + j0,112) \cdot \frac{100}{75} = 0,004 + j0,15$$

Transformador 40 MVA:

$$z_{1T} = z_{2T} = (0,006 + j0,10) \cdot \frac{100}{40} = 0,015 + j0,25$$

$$z_{0T} \text{ sei } 1,2 \quad z_{1T} = 0,018 + j0,30$$

b) Impedancias del generador y del transformador de la central C  
 Generador 100 MVA:

$$z_{1G}'' = z_{2G} = (0,003 + j0,105) \cdot \frac{100}{100} = 0,003 + j0,105$$

Transformador 100 MVA:

$$z_{1T} = z_{2T} = (0,005 + j0,115) \cdot \frac{100}{100} = 0,005 + j0,115$$

c) Impedancias de la red y del transformador de la estación transformadora B  
 Red ajena:

$$z_{1N}'' = z_{2N}'' = 1000 \cdot 1,1 = 0,11 \text{ (determinado a partir de } S_N'' = 1000 \text{ MVA)}$$

Como valor aproximado puede suponerse una relación  $r/x = 0,1$ , de manera que:  $z_{1N}'' = z_{2N}'' = 0,011 + j0,11$  istr.

Línea aérea 60 kV:  $z_{1L} = z_{2L} = (0,19 + j0,38) \cdot \frac{10}{2} \cdot \frac{100}{60^2} = 0,027 + j0,053$

Transformador 60 MVA:

$$z_{1T} = z_{2T} = (0,006 + j0,10) \cdot \frac{100}{60} = 0,01 + j0,167$$

$$z_{0T} \text{ sei } 2,4 \quad z_{1T} = 0,024 + j0,4$$

d) Impedancias de las líneas de 110 kV

Línea aérea 120<sup>2</sup>Cu, 38 km:

$$z_{1L} = z_{2L} = (0,15 + j0,4) \cdot 38 \cdot \frac{100}{110^2} = 0,047 + j0,126$$

$$z_{0L} = (0,30 + j1,6) \cdot 38 \cdot \frac{100}{110^2} = 0,094 + j0,503$$

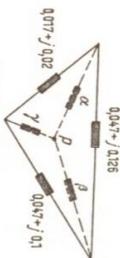
Línea aérea 95 Cu, 30 km:

$$z_{1L} = z_{2L} = (0,19 + j0,4) \cdot 30 \cdot \frac{100}{110^2} = 0,047 + j0,1$$

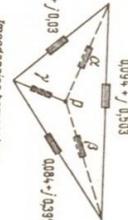
$$z_{0L} = (0,34 + j1,6) \cdot 30 \cdot \frac{100}{110^2} = 0,084 + j0,397$$

Cable unipolar  $z_{1K} = z_{2K} = (0,17 + j0,2) \cdot 12 \cdot \frac{100}{110^2} = 0,017 + j0,02$   
 bajo aceite,  
 120<sup>2</sup> Cu, 12 km:  $z_{0K} = (0,79 + j0,3) \cdot 12 \cdot \frac{100}{110^2} = 0,078 + j0,03$

La malla triangular formada por las líneas de 110 kV se reemplaza por una estrella equivalente, efectuándose la operación separadamente para las impedancias del sistema directo y del sistema homopolar.



Impedancias directas



Impedancias homopolares

$$z_{1\alpha} = z_{2\alpha} = \frac{(0,017 + j0,02) \cdot (0,047 + j0,126)}{0,111 + j0,246} = 0,008 + j0,01$$

$$z_{1\beta} = z_{2\beta} = \frac{(0,047 + j0,126) \cdot (0,047 + j0,1)}{0,111 + j0,246} = 0,021 + j0,051$$

$$z_{1\gamma} = z_{2\gamma} = \frac{(0,047 + j0,1) \cdot (0,017 + j0,02)}{0,111 + j0,246} = 0,007 + j0,008$$

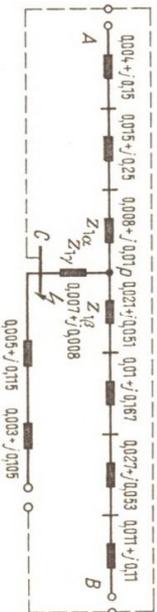
**Impedancias homopolares**

$$z_{0z} = \frac{(0,078 + j0,03)(0,094 + j0,503)}{0,256 + j0,93} = 0,039 + j0,018$$

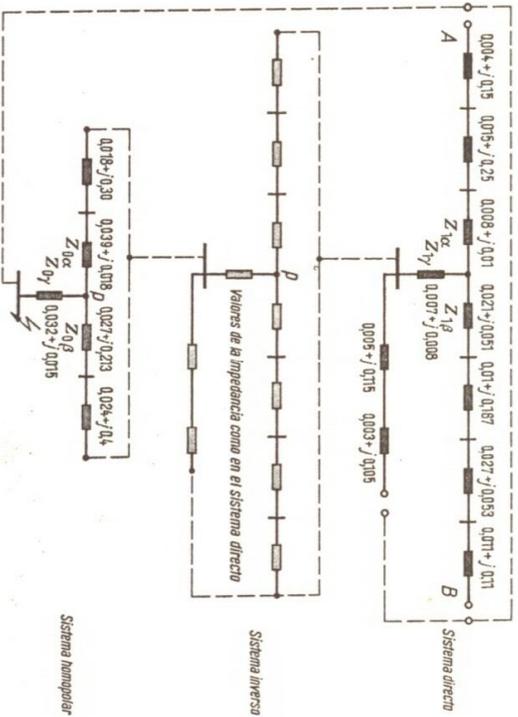
$$z_{0\beta} = \frac{(0,094 + j0,503)(0,084 + j0,397)}{0,256 + j0,93} = 0,027 + j0,213$$

$$z_{0\gamma} = \frac{(0,084 + j0,397)(0,078 + j0,03)}{0,256 + j0,93} = 0,032 + j0,015$$

El esquema de impedancias a emplearse en la prosecución del cálculo del cortocircuito tripolar tiene la siguiente configuración:



Para el cortocircuito unipolar rige el siguiente esquema con inclusión del sistema inverso y del sistema homopolar:



**Determinación de los valores correspondientes al cortocircuito tripolar**

a) Participación de la central A y de la estación transformadora B

Se agrupan y conectan en paralelo las impedancias individuales de los ramales desde A y B, respectivamente, hasta el punto de derivación P:

$$z_{AP} = (0,004 + j0,15) + (0,015 + j0,25) + (0,008 + j0,01) = 0,027 + j0,41$$

$$z_{BP} = (0,038 + j0,163) + (0,01 + j0,167) + (0,021 + j0,051) = 0,069 + j0,381$$

$$z_{AP} = 0,411$$

$$z_{BP} = 0,387$$

La impedancia combinada de los tramos conectados en paralelo se determina como sigue:

$$z_P = \frac{(0,027 + j0,41)(0,069 + j0,381)}{0,096 + j0,791} = 0,025 + j0,202$$

$$z_P = 0,203$$

Incluyendo la impedancia  $x_{\gamma\gamma}$ , ubicada entre P y C, se obtiene la impedancia resultante de acuerdo con:

$$z_{AB} = (0,025 + j0,202) + (0,007 + j0,008) = 0,032 + j0,210$$

$$z_{AB} = 0,212$$

La potencia inicial de cortocircuito, suministrada en conjunto por la central A y la estación transformadora B, es la siguiente:

$$S_{K(A,B)}'' = \frac{P_B}{z_{AB}} \cdot \frac{E''}{U} = \frac{100}{0,212} \cdot 1,1 = 520 \text{ MVA}$$

y la corriente subtransitoria de cortocircuito:

$$I_{K(A,B)}'' = \frac{520}{\sqrt{3} \cdot 110} = 2,73 \text{ kA}$$

Los valores parciales de la potencia inicial de cortocircuito, correspondientes a la central A y a la alimentación ajena B, resultan de la relación existente entre la impedancia combinada paralelo  $z_P$  y las impedancias de los ramales  $z_{AP}$  y  $z_{BP}$ , respectivamente. La parte correspondiente a la central A es:

$$S_{K(A)}'' = S_{K(A,B)}'' \cdot \frac{z_P}{z_{AP}} = 520 \cdot \frac{0,203}{0,411} = 257 \text{ MVA}$$

y la parte correspondiente a la alimentación B:

$$S_{k^{(B)}}'' = S_{k^{(A,B)}}'' - S_{k^{(A)}}'' = 520 - 257 = 263 \text{ MVA}$$

Para calcular la potencia de ruptura  $S_k$  en el punto C, se determinará primeramente la relación existente entre la potencia de cortocircuito suministrada por el generador hacia el lugar del defecto y la potencia nominal del generador.

$$\frac{S_{k^{(A)}}''}{P_G} = \frac{257}{75} = 3,43$$

De la figura 40 se obtiene para este valor, con un retardo de desconexión de 0,1 s,  $\mu_{0,1} = 0,85$ .

Por lo tanto, la potencia de ruptura suministrada por la central A al punto de cortocircuito resulta:

$$S_{k(A)} = \mu_{0,1} \cdot S_{k^{(A)}}'' = 0,85 \cdot 257 = 218 \text{ MVA}$$

Para la parte proveniente de la alimentación ajena debe adoptarse  $\mu_{0,1} = 1$ , de manera que:

$$S_{k(B)} = S_{k^{(B)}}'' = 263 \text{ MVA}$$

De la impedancia  $z_{AB} = 0,032 + j0,210$  se obtiene la relación  $r/x = 0,032/0,210 = 0,152$ , valor que, llevado a la figura 38, permite obtener el factor  $x = 1,6$ . Por lo tanto, el impulso de la corriente de cortocircuito, suministrado por A y B al lugar del defecto, es:

$$i_{k(AB)} = x \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k^{(A,B)}}'' = 1,6 \cdot \sqrt{2} \cdot 2,73 = 6,2 \text{ kA}$$

#### b) Participación de la central C

La impedancia del bloque generador-transformador de 100 MVA es:

$$z_C = (0,003 + j0,105) + (0,005 + j0,115) = 0,008 + j0,22$$

$$z_C = 0,22$$

de ahí:

$$S_{k^{(C)}}'' = \frac{100}{0,22} \cdot 1,1 = 500 \text{ MVA}$$

$$I_{k^{(C)}}'' = \frac{500}{\sqrt{3} \cdot 110} = 2,63 \text{ kA}$$

$$\text{De: } \frac{S_{k^{(C)}}''}{P_G} = \frac{500}{100} = 5$$

se deduce  $\mu_{0,1} = 0,79$  y  $S_{k(C)} = 0,79 \cdot 500 = 395 \text{ MVA}$ .

100

Para la relación  $r/x = 0,008/0,220 = 0,036$  resulta el factor  $x = 1,8$ , y por consiguiente el impulso de la corriente de cortocircuito será:

$$i_{k(C)} = 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 2,63 = 6,7 \text{ kA}$$

#### c) Valores totales en el lugar del defecto

$$S_k'' = S_{k^{(A,B)}}'' + S_{k^{(C)}}'' = 520 + 500 = 1020 \text{ MVA}$$

$$I_k'' = I_{k^{(A,B)}}'' + I_{k^{(C)}}'' = 2,73 + 2,63 = 5,36 \text{ kA}$$

$$S_k = S_{k(A)} + S_{k(B)} + S_{k(C)} = 218 + 263 + 395 = 876 \text{ MVA}$$

$$I_k = \frac{876}{\sqrt{3} \cdot 110} = 4,6 \text{ kA}$$

$$i_k = i_{k(AB)} + i_{k(C)} = 6,2 + 6,7 = 12,9 \text{ kA}$$

#### Determinación de los valores correspondientes al cortocircuito unipolar

La impedancia total del sistema directo se obtiene mediante la conexión en paralelo de la impedancia  $z_{AB}$ , ya determinada para el cortocircuito tri polar, con la impedancia  $z_C$ . Su valor es:

$$z_1 = \frac{(0,032 + j0,210) \cdot (0,008 + j0,220)}{0,04 + j0,43} = 0,01 + j0,108$$

$$z_1 = 0,108$$

La impedancia inversa tiene igual valor, es decir:

$$z_2 = 0,01 + j0,108$$

$$z_2 = 0,108$$

Para determinar la impedancia total del sistema homopolar se sumarán nuevamente las impedancias individuales de los ramales A y B hasta el punto P y se determinará la impedancia combinada. Se obtiene:

$$z_{0(A,B)} = (0,018 + j0,30) + (0,039 + j0,018) = 0,057 + j0,318$$

$$z_{0(A,B)} = 0,323$$

$$z_{0(B,P)} = (0,024 + j0,4) + (0,027 + j0,213) = 0,051 + j0,613$$

$$z_{0(B,P)} = 0,614$$

de ahí resulta la impedancia combinada:

$$z_{0(C,P)} = \frac{(0,057 + j0,318)(0,051 + j0,613)}{0,108 + j0,931} = 0,031 + j0,210$$

$$z_{0(C,P)} = 0,212$$

101

Incluyendo la impedancia  $z_{0V}$ , ubicada entre los puntos P y C, se obtiene la impedancia total del sistema homopolar como sigue:

$$z_0 = (0,031 + j0,210) + (0,032 + j0,015) = 0,063 + j0,225$$

$$z_0 = 0,234$$

La potencia inicial de cortocircuito correspondiente al lugar del defecto se obtiene aplicando la ecuación que rige para el cortocircuito unipolar:

$$S_{K^{(1)}} = \frac{3 P_B}{|z_1 + z_2 + z_0|} \cdot \frac{E''}{U} = \frac{3 \cdot 100}{|0,083 + j0,441|} \cdot 1,1 = \frac{330}{0,449} = 735 \text{ MVA}$$

y de ahí la corriente subtransitoria del cortocircuito unipolar:

$$I_{K^{(1)}} = \frac{735}{\sqrt{3} \cdot 110} = 3,86 \text{ kA}$$

El mismo valor puede obtenerse con ayuda de la tabla V. La relación  $z_0/z_1 = 0,234/0,108 = 2,17$  y el desfase de las impedancias  $z_0$  y  $z_1$ , de aproximadamente  $10^\circ$ , permiten obtener el factor:

$$\frac{I_{K^{(1)}}}{I_{K^{(3)}}} = 0,72$$

Como ya se obtuvo  $I_{K^{(3)}}$  5,36 kA, resulta:

$$I_{K^{(1)}} = 0,72 \cdot 5,36 = 3,86 \text{ kA}$$

Con  $I_{K^{(1)}} = 3,86 \text{ kA}$  está determinada la corriente de cortocircuito  $3 I_0$  que penetra a tierra en el lugar del defecto. Las corrientes parciales de cortocircuito que afluyen desde tierra hacia los puntos neutros de los transformadores conectados a tierra, resultan nuevamente de la relación existente entre la impedancia homopolar total y las impedancias homopolares parciales. El transformador de 40 MVA de la central A recibe la siguiente parte:

$$I_{K^{(1)A}} = I_{K^{(1)}} \cdot \frac{z_{0(CP)}}{z_{0(AB)}} = 3,86 \cdot \frac{0,212}{0,323} = 2,53 \text{ kA}$$

y el transformador de 60 MVA de la estación transformadora B recibe la siguiente parte:

$$I_{K^{(1)B}} = I_{K^{(1)}} \cdot \frac{z_{0(BP)}}{z_{0(AB)}} = 3,86 \cdot \frac{0,212}{0,614} = 1,33 \text{ kA}$$

## INDICE ALFABETICO

- Angulo de desfase entre impedancias 23, 24, 25, 26, 29, 31, 32, 33, 40, 41, 42, 45
- Asimetría de la corriente de cortocircuito 48, 49
- Barras reactancia inductiva 86
- Cables subterráneos
- Capacidad de servicio 82
- Reactancia inductiva 80
- Impedancia homopolar 81
- Resistencia óhmica 79
- Campo del generador
- Velocidad relativa 12
- Capacidad de sobreexcitación
- De los generadores 65
- Impulso 45, 58, 59
- Asimetría 48
- Carga previa de la red 15, 64
- Capacidad de servicio
- Cable subterráneo 82
- Línea aérea 84, 87
- Potencia básica 66, 67
- Tensión básica 67
- Circuitos enmallados 71, 72, 73
- Circuito equivalente 15, 18, 22, 29
- Componente de corriente alterna 46, 47, 48, 60
- Componente de corriente continua 46, 47, 48, 54, 59, 60, 62.
- Componentes de la corriente 11
- Componentes de la tensión 11, 38, 39
- Componente directa 9
- Componente homopolar 10
- Constante de tiempo
- De corriente continua 50, 54, 62, 77
- De cortocircuito 51, 52, 53
- En vacío 50, 77
- Del rotor en vacío 51, 52
- Subtransitoria 50, 77
- Transitoria
- Contacto doble a tierra 33, 34, 38, 39, 41
- Corriente de contacto con tierra
- Compensación excesiva 44
- Compensación incompleta 44
- Corriente de cortocircuito
- Asimetría 48, 49
- Asimetría 59
- Impulso 45, 58, 59
- Permanente 45, 64, 65
- Valor instantáneo 57
- Corriente de ruptura
- Asimétrica 60, 61
- Simétrica 60, 61, 62
- Cortocircuito en bornes del generador 47, 48
- Excitación en vacío 64
- Excitación en plena carga 64
- Factor de amortiguamiento 61
- Impedancias 12, 15, 16, 18, 22, 45, 66, 75, 78, 81, 85, 87, 89
- Impedancias del generador 12, 45
- Impedancias de cortocircuito
- Bobinas de reactancia 79
- Motores 75
- Transformadores 76, 78
- Impedancia de puesta a tierra 14, 15, 18, 22
- Impedancia de fuga 14, 21
- Impedancia directa 13, 87
- Impedancia de cortocircuito del motor 75
- Impedancia homopolar
- De transformadores 13
- De cables subterráneos 81
- Impedancia nominal 66
- Índice de impulso 60
- Líneas
- Resistencia óhmica 79
- Conductancia 87, 88
- Líneas aéreas
- Capacidad de servicio 84, 85, 88
- Reactancia inductiva 83, 85, 87
- Reactancia homopolar 84, 85, 89
- Resistencia óhmica 79, 83
- Notaciones 6
- Potencial de cortocircuito 67, 69, 73
- Punta de corriente 58, 59, 6
- Punto neutro 14, 36, 37, 42
- Punto neutro del sistema 14, 36, 37, 42
- Reacción del inducido 45, 47
- Reactancia
- Bobina 79
- Subtransitoria 49, 75
- Sincrona 49, 51, 52
- Transitoria 49, 51, 52

Reactancia homopolar de líneas aéreas 84, 85  
 Reactancia inductiva  
   De líneas aéreas 83, 85, 87  
   De cables subterráneos 80  
   De barras 86  
 Reactancia inicial 13  
 Reactancia relativa de bobina 79  
 Reactancia total de dispersión 49  
 Relación de cortocircuito en vacío 49, 77  
 Resistencia óhmica del inducido 54  
 Resistencia del terreno 91  
 Retardo mínimo de desconexión 61, 62, 75  
 Retorno por tierra  
   Resistencia óhmica del, 13  
   Resistencia óhmica  
   Del retorno por tierra 13  
   De cables subterráneos 79  
   De bobinas de reactancia 79  
   De líneas aéreas 79  
   De transformadores 76  
 Sincrona (reactancia) 49, 51, 52  
 Sistema activo 11  
 Sistema directo 9, 11, 12, 22, 28, 30, 33  
 Sistema homopolar 9, 11, 12, 22, 28, 30, 33  
 Sistema inverso 9, 11, 12, 22, 28, 30, 33  
 Sistema pasivo 11  
 Sistema trifásico  
   De secuencia inversa 8  
   De secuencia directa 8  
 Subtransitoria  
   Reactancia 49, 75  
   Constante de tiempo 50  
   Subtransitorios  
   Fenómenos 47  
 Tensión  
   A la frecuencia de servicio 23, 30, 40, 41, 42, 44  
   Básica 67  
   De campo principal 11  
   De cortocircuito 56, 57  
   Paso por cero 45, 59  
   De la rueda polar 45, 47, 56, 57  
   Tensión relativa de cortocircuito 76, 78  
 Transformador  
   Impedancia de cortocircuito 76, 78  
   Impedancia homopolar 13  
   Transformación triángulo-estrella 72, 73  
 Transitoria  
   Reactancia 49, 51, 53  
   Constante de tiempo 50, 52  
   Transitorios  
   Fenómenos 47, 51, 52, 54  
 Vacío  
   Relación de cortocircuito 49, 77  
   Constante de tiempo del rotor 51, 52  
   Constante de tiempo 50, 57  
   Valor instantáneo de la corriente de cortocircuito 57  
   Velocidad relativa  
   Del campo del generador 12