

## **CALCULO DE CORTOCIRCUITO**

### **IMPORTANTE:**

El siguiente apunte, que corresponde al módulo de Cálculo de cortocircuito, está tratado con toda la rigurosidad matemática que requiere el tema ya que intentar resumirlo nos puede conducir a una simplificación demasiado grosera y puede no alcanzar las expectativas de alguno de los participantes del curso.

Por lo tanto recomendamos su lectura considerando que puede ser aprovechado en tres niveles de complejidad.

Un primer nivel es el que surge al encarar la lectura y comprensión del apunte en su totalidad. Este nivel sería el indicado para un técnico especializado ya que contiene ecuaciones con números complejos y se tiene en cuenta todos los tipos de falla considerando la asimetría inicial de la corriente.

Para un segundo nivel, recomendamos la lectura completa del apunte con el objeto de obtener una visión completa del tema, pero no es necesario comprender la totalidad de las formulas, debiéndose comprender conceptualmente, es decir sin rigurosidad matemática los puntos 4 (fundamentalmente la figura 6), 5, 9, 10, 11 y 12. Para este nivel es importante comprender los ejemplos N° 1 y 2.

El tercer nivel se consigue con la comprensión del punto 12 y el ejemplo N° 2, donde se minimiza al máximo la parte matemática del tema. Si bien en este punto se tratan solamente cortocircuitos en baja tensión, los conceptos son igualmente aplicables a redes de media y alta tensión. Este es el mínimo nivel requerido para la aprobación de este tema.

**Los puntos del 1 al 10 fueron extraídos del libro “Corrientes de cortocircuito en redes trifásicas” de Richard Roeper, 2da edición 1985. Marcombo S.A.**

**El punto 12 fue extraído del Manual de Baja Tensión de Siemens 1988.**

## CALCULO DE CORTOCIRCUITO

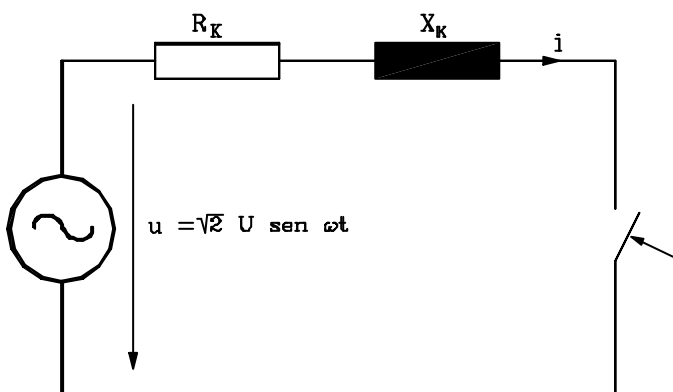
### Introducción

Los cortocircuitos provocan en las redes eléctricas modificaciones de los parámetros de servicio. El paso al nuevo estado va acompañado de fenómenos electromagnéticos y electromecánicos que definen las magnitudes y las variaciones temporales de la corriente de cortocircuito. Veremos algunos factores que influyen en la corriente de cortocircuito:

- Instante en el que se produce el cortocircuito: el valor de la tensión al instante de producirse el cortocircuito influye en gran manera en el valor máximo de la corriente.
- Las fuentes de corriente de cortocircuito: fundamentalmente se consideran las distintas máquinas síncronas como así también los motores síncronos y asíncronos. Frecuentemente se consideran también como fuente de corriente de cortocircuito a la potencia de cortocircuito de una alimentación externa.
- Estado previo de carga: incide principalmente sobre el número y potencia de los generadores además del valor de las fuerzas electromotrices al momento del cortocircuito.
- Ubicación del cortocircuito: determina el hecho de considerar si las máquinas síncronas influirán más o menos sobre el desarrollo del cortocircuito. Este aspecto es conocido como cortocircuito "próximo al generador" o como "lejano al generador".
- Duración del cortocircuito: los distintos aparatos de protección fijan esta variable.
- Forma de la red: aquí se consideran los distintos caminos de la corriente de cortocircuito y sus componentes parciales, por ejemplo, redes radiales o malladas.

### 1 Cortocircuito a tensión constante o lejano al generador

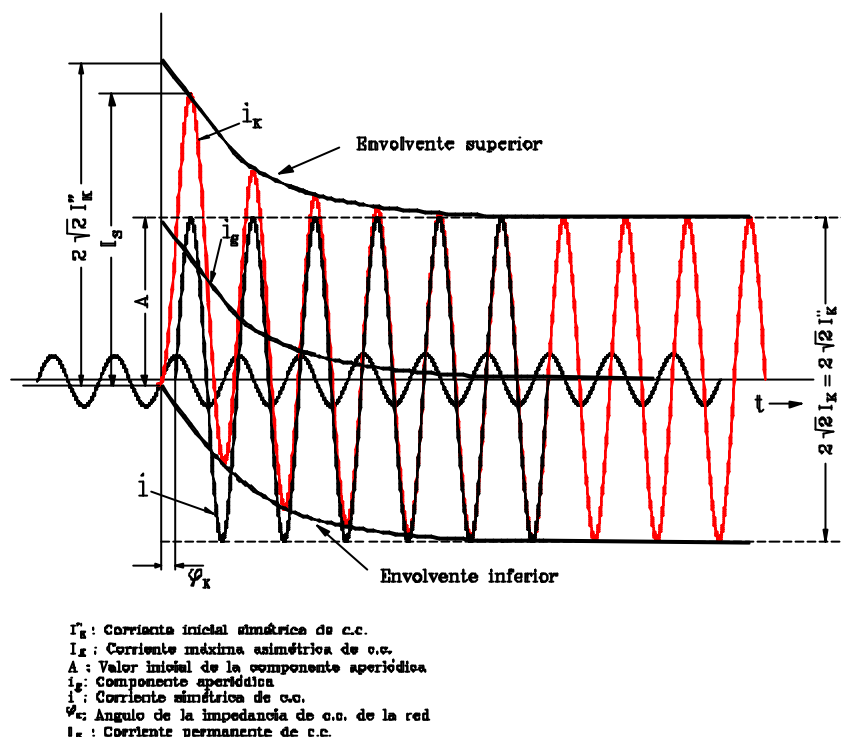
#### 1.1 Red monofásica



**Figura 1.- Esquema equivalente de un circuito monofásico**

La figura 1 representa el esquema equivalente de un circuito monofásico sin carga. Este circuito contiene una fuente ideal (resistencia interna nula) de tensión sinusoidal cuyo valor de cresta es  $\sqrt{2} U$  y pulsación constante  $\omega = 2\pi f$ . La resistencia  $R_k$  y reactancia inductiva  $X_k = \omega L$ , ambas son constantes y lineales. El cortocircuito se establece actuando sobre el interruptor en el instante  $t=0$  al pasar por cero la tensión. La figura 2 muestra un

oscilograma de valores de tensión y corriente para un cortocircuito de estas características. En el instante  $t=0$  la corriente tiene un valor nulo, luego pasa por un máximo (corriente máxima asimétrica de cortocircuito) y se amortigua hasta dar lugar a la corriente estacionaria simétrica de cortocircuito  $i$ . Esta corriente presenta un valor de cresta constante y un valor eficaz denominado “corriente permanente de cortocircuito”  $I_k$ .



**Figura 2.- Formas de onda típica de tensión y corriente para un cortocircuito alejado del generador**

La asimetría y el valor cresta de la corriente de cortocircuito están determinados por el instante en que se produce el cortocircuito, considerado con respecto a la variación temporal de la tensión, y por la impedancia de cortocircuito de la red  $Z_k=R_k+jX_k$ . Es muy común, sobre todo en redes de media y alta tensión que dicha impedancia tenga una alta componente inductiva. Por lo tanto, la corriente de cortocircuito debería adoptar bruscamente en el instante  $t=0$  el valor instantáneo correspondiente a la corriente simétrica de cortocircuito. Sin embargo la inductancia impide el crecimiento brusco de la corriente, partiendo entonces de un valor inicial nulo.

Para que esto pueda suceder debe existir una corriente transitoria  $i_g$  con un valor inicial  $A$  que coincida con el valor instantáneo negativo de la corriente simétrica de cortocircuito  $i$ . Esta corriente transitoria se denomina componente aperiódica y se amortigua de acuerdo a una función exponencial con una constante de tiempo  $T_g$ , desde el valor inicial hasta anularse.

La corriente simétrica de cortocircuito  $i$  resulta de la fuerza electromotriz y de la impedancia de la red y su valor eficaz al instante de producirse el cortocircuito se denomina “corriente inicial simétrica de cortocircuito”  $I''_k$ . Si  $U$  y  $Z_k$  permanecen constantes,  $I''_k$

coincide con la corriente permanente de cortocircuito, es decir,  $I''_k = I_k$  (no ocurre lo mismo en el caso del cortocircuito cercano al generador).

Las envolventes indican la variación de los valores de cresta de la corriente de cortocircuito. La intersección de la envolvente superior con el eje de ordenadas corresponde al valor  $A + \sqrt{2} I''_k$ ; en la práctica  $A < \sqrt{2} I''_k$ . La envolvente inferior corta al eje de ordenadas en el valor  $A - \sqrt{2} I''_k$ . La componente aperiódica sigue la línea media entre las envolventes superior e inferior.

La expresión de la corriente de cortocircuito es:

$$i_k = \sqrt{2} I''_k (\sin(\omega t + q f_k) - e^{-(t/T_g)} \cdot \sin(q f_k)) \quad (1.1.1)$$

donde:

$U$  = valor eficaz de la fuerza electromotriz,

$Z_k$  = módulo de la impedancia de cortocircuito de la red,

$t$  = tiempo,

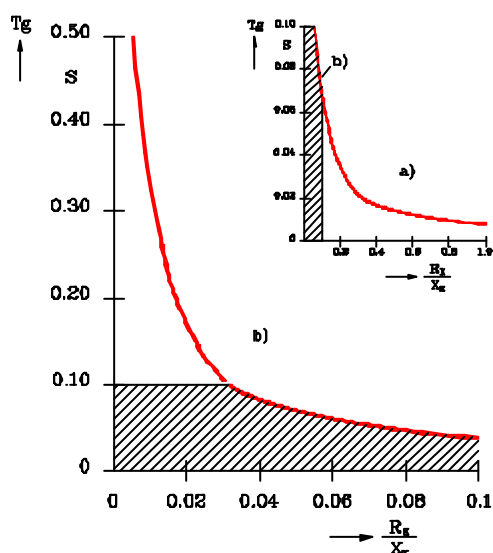
$q$  = ángulo de fase inicial de la tensión al producirse el cortocircuito,

$f_k$  = ángulo de la impedancia de cortocircuito de la red,

$T_g$  = constante de tiempo de la componente aperiódica ( $= L_k/R_k$ ),

$I''_k$  = corriente inicial simétrica de cortocircuito.

Las magnitudes  $Z_k$ ,  $f_k$  y  $T_g$  están determinadas por los parámetros  $R_k$  y  $X$  del circuito. El ángulo de fase inicial  $q$  depende del instante en que se produzca el cortocircuito, es decir del azar.



**Figura 3.- Variación de  $T_g$  con la relación entre  $R_k$  y  $X_k$  del circuito**

Para una misma impedancia  $Z_k$  el valor del máximo de la corriente simétrica de corto circuito resulta independiente del ángulo de impedancia  $f_k$ . El mayor valor inicial de la componente aperiódica  $i_g$  se da para el ángulo de fase inicial  $q = (f_k - 90^\circ)$ .

El valor de la primera cresta  $I_s$  de la corriente de cortocircuito  $i_k$  depende del ángulo de fase inicial  $q$  y del ángulo  $f_k$  de la impedancia. El mayor valor corresponde siempre al ángulo de fase inicial  $q = 0$ . Para  $q = f_k$  no existe la componente aperiódica; la corriente de cortocircuito  $i_k$  coincide con la corriente simétrica de cortocircuito.

La dependencia de la constante de tiempo  $T_g$  respecto a la relación  $R_k/Z_k$

se representa en la figura 3. Puede observarse un notable incremento de  $T_g$  para  $R_k/X_k < 0,1$ .

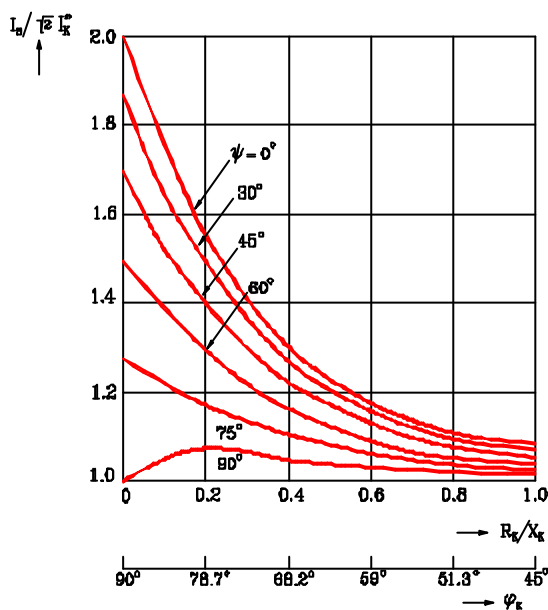
En la figura 4 puede observarse la dependencia de  $I_s/\sqrt{2}I''_k$  (corriente máxima asimétrica de cortocircuito respecto al valor de cresta de la corriente inicial simétrica de cortocircuito) respecto de la relación  $R_k/X_k$  y el ángulo de fase inicial  $q$ .

## 1.2 Red trifásica

Para el caso de un cortocircuito trifásico en un sistema trifásico y bajo las condiciones ideales que se plantearon precedentemente en lo que respecta a las fuentes de tensión y a las impedancias que conforman el circuito la ecuación que describe la corriente en la fase  $r$  es:

$$i_{rk} = \sqrt{2} I''_k (\sin(\omega t + q - f_k) - e^{-(t/T_g)} \sin(q - f_k)) \quad (1.2.1)$$

Dado que se trata de un cortocircuito trifásico equilibrado el análisis del mismo puede hacerse como tres sistemas monofásicos desfasados  $120^\circ$  entre cada uno de ellos. Por lo tanto las corrientes de las tres fases restantes pueden escribirse como sigue:



**Figura 4.- Relación entre la corriente máxima asimétrica de corto en función de  $R_k/X_k$  y del ángulo de fase inicial**

$$i_{sk} = \sqrt{2} I''_k (\sin(\omega t + q + 240^\circ - f_k) - e^{-(t/T_g)} \sin(q + 240^\circ - f_k)) \quad (1.2.2)$$

$$i_{tk} = \sqrt{2} I''_k (\sin(\omega t + q + 120^\circ - f_k) - e^{-(t/T_g)} \sin(q + 120^\circ - f_k)) \quad (1.2.3)$$

## 2. Cortocircuito alimentado por un generador síncrono.

### Cortocircuito en bornes en servicio en vacío

Para estos casos tiene una importancia fundamental las características específicas de los generadores sobre las variaciones temporales de la corriente de cortocircuito. Esto se observa de forma totalmente clara en el ejemplo de un cortocircuito en bornes de un generador síncrono con devanado amortiguador. Se considera que este generador está en

\* Componente permanente

Dichas variaciones deben su explicación a los fenómenos electromagnético que se presentan en el generador y por su influencia sobre la fuerza electromotriz. Sin embargo, para representar y calcular las relaciones de cortocircuito se considera en la práctica una tensión constante y se supone que el fenómeno de amortiguamiento de la corriente simétrica de cortocircuito viene provocado por un crecimiento de las reactancias del generador. De aquí las correspondientes reactancias son:

- \* Reactancia sincrónica,
- \* Reactancia transitoria y
- \* reactancia subtransitoria.

La componente permanente (corriente permanente de cortocircuito) tiene un valor cresta constante igual a  $\sqrt{2} I_k$ . Su valor eficaz es el cociente de la fuerza electromotriz entre fase y neutro  $U_{YN}$  y de la reactancia sincrónica  $X_d$  correspondiente al régimen permanente de cortocircuito.

$$I_k = U_{YN}/X_d \quad (2.1)$$

A esta corriente estacionaria simétrica de cortocircuito se le superpone una componente transitoria que se amortigua en forma relativamente lenta. Dicha componente es debida principalmente a las reactancias de dispersión de los devanados estatóricos y de excitación, ya que el generador en cortocircuito se comporta esencialmente como un transformador cortocircuitado.

El valor eficaz de la corriente transitoria simétrica de cortocircuito es el cociente de la fuerza electromotriz entre fase y neutro  $U_{YN}$  y de la reactancia transitoria  $X'_d$ .

$$I'_k = U_{YN}/X'_d \quad (2.2)$$

Al fenómeno transitorio se le superpone durante algunos períodos uno subtransitorio. En los generadores síncronos con devanado amortiguador aparece en los circuitos rotóricos fenómenos de compensación entre los circuitos de amortiguación y los de excitación. Estos fenómenos provocan en los circuitos estatóricos la componente subtransitoria de la corriente inicial simétrica de cortocircuito, cuyo valor inicial es igual a la amplitud máxima de la corriente inicial simétrica de cortocircuito  $\sqrt{2} I''_k$ . Su valor eficaz es el cociente de la fuerza electromotriz entre fase y neutro  $U_{YN}$  y de la reactancia subtransitoria  $X''_d$ .

$$I''_k = U_{YN}/X''_d \quad (2.3)$$

En máquinas síncronas con polos laminados y sin devanados amortiguadores no aparece el fenómeno subtransitorio ( $I'_k = I''_k$ ).

Las variaciones temporales de la corriente de cortocircuito desde que se produce éste hasta que se alcanza el estado estacionario puede expresarse mediante la siguiente ecuación:

$$i_k = \sqrt{2} ((I''_k - I'_k) e^{(-t/T''_d)} + (I'_k - I_k) e^{(-t/T'_d)} + I_k) \text{sen}(wt - f_k) + \sqrt{2} I''_k e^{(-t/T_g)} \text{sen } f_k \quad (2.4)$$

El primer miembro de la ecuación corresponde a la componente subtransitoria de la corriente simétrica de cortocircuito, el segundo a la componente transitoria, el tercero a la componente permanente y el último a la componente aperiódica.

Para los casos que aquí resultan de interés,  $w$  resulta constante. El ángulo de fase inicial  $q$  se supone igual a  $0^\circ$ .

### 3. Constantes de tiempo

Para determinar la variación temporal de la corriente aún resta conocerse las constantes de tiempo correspondientes a las reactancias.

Estas constantes son las siguientes:

- \* Constante de tiempo subtransitoria  $T''_d$ .
- \* Constante de tiempo transitoria  $T'_d$ .
- \* Constante de tiempo de la componente aperiódica  $T_d$ .

La primera de ellas,  $T''_d$ , corresponde a la componente de la corriente simétrica de cortocircuito que se amortigua en forma muy rápida. Depende de las características de amortiguación de los circuitos rotóricos y, especialmente, del devanado amortiguador. Se verifica que:

$$T''_d = ((X''_d + X_v)/(X'_d + X_v)) T''_{d0} \quad (3.1)$$

donde :

$X_v$  = impedancia de la red.

$T''_{d0}$  = constante de tiempo subtransitoria en vacío según el eje longitudinal de generador.

$T''_d$  vale unos 50 ms. Cuando el cortocircuito es a bornes del generador, o sea  $X_v=0$ , se tiene normalmente  $T''_d \approx 30$  ms. De aquí se desprende que el fenómeno subtransitorio queda limitado a unos pocos semiperíodos.

La constante de tiempo transitoria  $T'_d$  corresponde a la componente de la corriente simétrica de cortocircuito que se amortigua de forma considerablemente mas lenta. Depende de las características de amortiguación del circuito de excitación y está mas influida por el tipo de cortocircuito que  $T''_d$ , por lo que presenta valores diferentes para los circuitos tripolares, bipolares o unipolares.

En caso de un cortocircuito tripolar se cumple para la constante de tiempo transitoria  $T'_d$  la ecuación:

$$T'_d = ((X'_d + X_v)/(X_d + X_v)) T'_{d0} \quad (3.2)$$

La constante de tiempo transitoria en vacío  $T'_{d0}$  según el eje longitudinal del generador corresponde a la modificación de la fuerza electromotriz en vacío de dicho generador al variar súbitamente la tensión de excitación. Como la reactancia sincrónica  $X_d$  es mucho mayor que la reactancia transitoria  $X'_d$ ,  $T'_d$ , sólo puede alcanzar el valor de  $T'_{d0}$  si la impedancia de la red participa de forma considerable (cortocircuito alejado del generador).

Si se trata de un cortocircuito en bornes, es decir, para  $X_v = 0$ ,  $T'_d$  vale aproximadamente 1 s para los turbogeneradores de gran potencia y unos 2 s en máquinas de polos salientes. En turbogeneradores de pequeña potencia puede ser  $T'_d < 0,2$  s.

Si la impedancia de la red no es predominantemente inductiva sino que presenta una resistencia efectiva  $R_v$  bastante elevada, esta constante de tiempo puede ser calculada mediante:

$$T'_d = ((R_v^2 + (X'_d + X_v)(X_d + X_v)) / (R_v^2 + (X_d + X_v)^2)) T'_{d0} \quad (3.3)$$

La constante de tiempo de la componente aperiódica  $T_g$  depende de las características de amortiguación del circuito estatórico (es decir, de la relación entre la reactancia y la resistencia efectiva del devanado estatórico) y de la impedancia de la red.  $T'_g$  es prácticamente igual para todos los tipos de cortocircuito y se calcula mediante la relación:

$$T_g \gg (X''_d + X_v) / \omega(R_g + R_v) \quad (3.4)$$

donde  $R_g$  es la resistencia efectiva del devanado estatórico.

Para casos de cortocircuitos a bornes del generador,  $T_g$  varía entre 0,01 y 0,4 s dependiendo del tipo de generador que se trate.

#### 4. Componentes simétricas

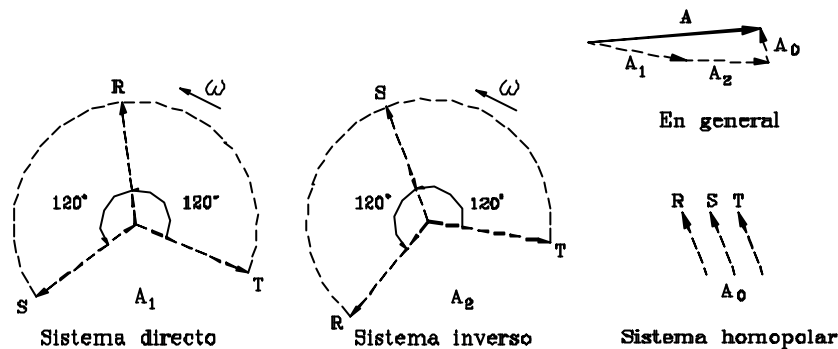
Un cortocircuito tripolar equivale a una carga simétrica de la red trifásica; de aquí que el cálculo de las corrientes de cortocircuito para las fallas trifásicas pueda reducirse al análisis de cualquier fase del sistema. Los restantes cortocircuitos que normalmente se consideran (doble línea, línea tierra, etc.) resultan equivalentes a cargas asimétricas y para su resolución a de recurrirse a procedimientos de cálculos especiales, tales como el método de las componentes simétricas.

##### 4.1 Método de cálculo

Cualquier vector  $A$  puede considerarse como la resultante de tres componentes  $A_1$ ,  $A_2$  y  $A_0$  dispuestas una a continuación de otra de forma arbitraria. Si se complementa como la componente  $A_1$  hasta formar un sistema trifásico simétrico de secuencia directa  $R S T$ , la componente  $A_2$  hasta formar un sistema trifásico de secuencia inversa  $R T S$  y la componente  $A_0$  hasta formar un sistema homopolar, resulta posible representar cualquier sistema trifásico asimétrico empleando estos tres sistemas de componentes.(figura 6).

Se cumplen las relaciones:

$$\begin{aligned} A_R &= A_{1R} + A_{2R} + A_0 \\ A_S &= A_{1S} + A_{2S} + A_0 = \alpha^2 A_{1R} + \alpha A_{2R} + A_0 \\ A_T &= A_{1T} + A_{2T} + A_0 = \alpha A_{1R} + \alpha^2 A_{2R} + A_0 \end{aligned} \quad (4.1)$$



**Figura 6.- Componentes simétricas correspondientes a un sistema trifásico**

El factor " $a$ " representa un operador capaz de rotar a un vector  $120^\circ$  manteniendo inalterado su módulo. En coordenadas rectangulares y polares puede ser escrito de la siguiente manera:

$$a = -0,5 + j 0,87 = 1 \cdot 120^\circ \quad (4.2)$$

De la misma forma " $a^2$ " rota a cualquier vector un ángulo de  $240^\circ$  sin variar su módulo y puede expresarse como sigue:

$$a^2 = -0,5 - j 0,87 = 1 \cdot 240^\circ \quad (4.3)$$

Según la magnitud y la posición relativa de las componentes simétricas, los vectores  $A_R$ ,  $A_S$  y  $A_T$  pueden tener cualquier módulo y ángulo de fase.

Recíprocamente, también resulta posible determinar las componentes simétricas correspondientes a un sistema trifásico asimétrico dado. Para esta operación se emplean las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} A_{1R} &= 1/3 (A_R + a A_S + a^2 A_T) \\ A_{2R} &= 1/3 (A_R + a^2 A_S + a A_T) \\ A_0 &= 1/3 (A_R + A_S + A_T) \end{aligned} \quad (4.4)$$

Este método permite descomponer cualquier sistema trifásico asimétrico en tres sistemas de componentes simétricas. De esta manera los circuitos que presentan desequilibrios pueden ser resueltos analizando una sola fase.

Para las corrientes y las tensiones de un sistema trifásico se cumplen entonces las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}
I_R &= I_1 + I_2 + I_0 & I_1 &= 1/3 (I_R + a I_S + a^2 I_T) \\
I_S &= a^2 I_1 + a I_2 + I_0 & I_2 &= 1/3 (I_R + a^2 I_S + a I_T) \\
I_T &= a I_1 + a^2 I_2 + I_0 & I_0 &= 1/3 (I_R + I_S + I_T)
\end{aligned}
\tag{4.5a} \tag{4.5b}$$

$$\begin{aligned}
U_R &= U_1 + U_2 + U_0 & U_1 &= 1/3 (U_R + a U_S + a^2 U_T) \\
U_S &= a^2 U_1 + a U_2 + U_0 & U_2 &= 1/3 (U_R + a^2 U_S + a U_T) \\
U_T &= a U_1 + a^2 U_2 + U_0 & U_0 &= 1/3 (U_R + U_S + U_T)
\end{aligned}
\tag{4.6a} \tag{4.6b}$$

Las componentes de secuencia positiva, negativa y nula, tanto de tensión como de corriente estén referidas siempre a la fase *R*.

## 5. Impedancia directa, inversa y homopolar

Las impedancias relacionadas con cada uno de los sistemas de componentes se designan, de forma análoga a la de estos sistemas, con los nombres de impedancia directa o de secuencia positiva, impedancia inversa o de secuencia negativa e impedancia negativa o de secuencia cero.

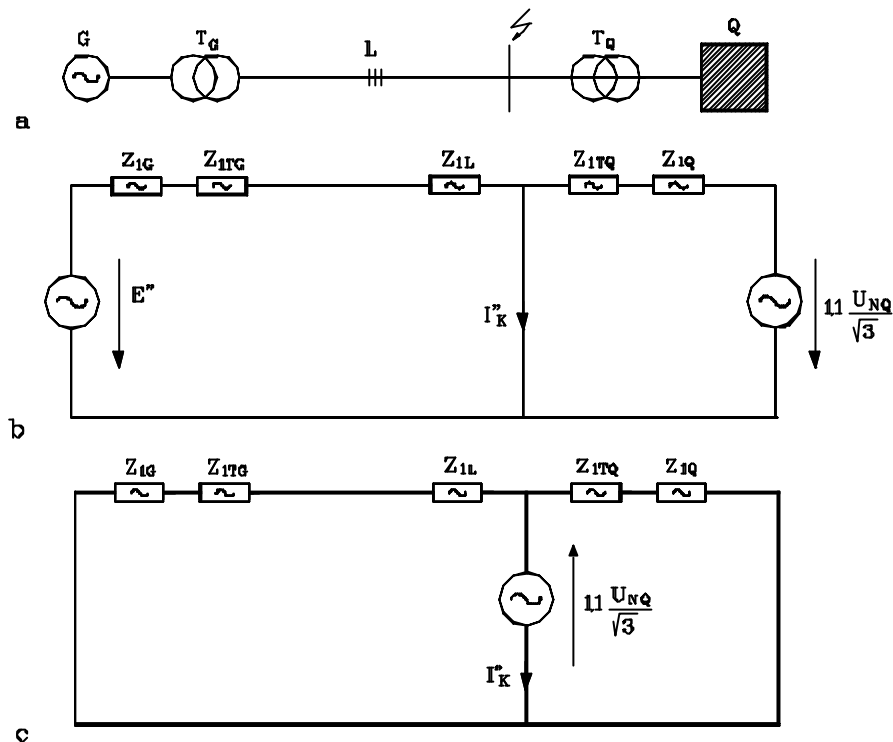
La impedancia directa  $Z_1$  de un aparato o un componente eléctrico es el cociente de la tensión entre fase y neutro y de la corriente de fase en el caso de que se le alimente mediante un sistema trifásico directo.

La impedancia inversa  $Z_2$  de un aparato o un componente eléctrico es el cociente de la tensión entre fase y neutro y de la corriente de fase en el caso de que se alimente mediante un sistema simétrico inverso.

En las líneas, transformadores y bobinas las impedancias directas e inversa resultan de igual valor ya que la impedancia de los mismos no varía al invertir la secuencia de las fases. Por el contrario, en el caso de generadores, la impedancia inversa es la que aparece cuando se le somete a un sistema inverso de tensiones durante su marcha síncrona. Este sistema tiene en el estator una velocidad relativa doble con respecto al rotor, mientras que el sistema directo presenta una velocidad relativa nula respecto del rotor. A pesar de esto para el caso de los turbogeneradores el valor de ambas impedancias coinciden.

La impedancia homopolar  $Z_0$  de un aparato o componente eléctrico para corriente trifásica es el cociente de la tensión entre fase y neutro y de la corriente de fase en el caso de que la alimentación sea una fuente de tensión monofásica, si los tres conductores principales dispuestos en paralelo constituyen el camino de ida de la corriente y existe un cuarto conductor que actúa como retorno común.

De lo anteriormente expuesto se desprende que la impedancia homopolar de un aparato o componente se refiere siempre a una conexión estrella.



**Figura 7.- Cálculo de la corriente inicial simétrica de cortocircuito sin consideración de la carga de la red.**

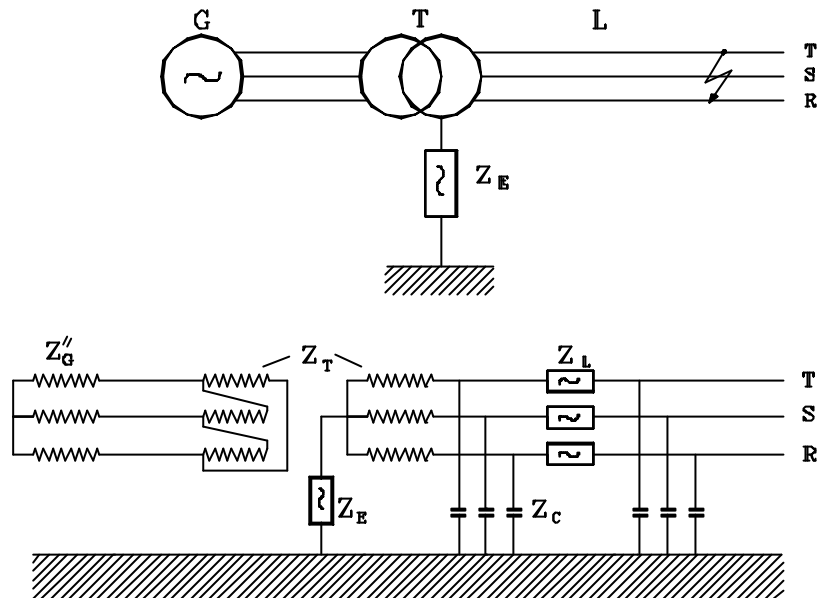
Si bien es factible calcular las corrientes de falla considerando el estado previo de carga y alcanzar un alto grado de exactitud, la complejidad del método no se justifica para los objetivos del curso.

El método propuesto supone que todas las impedancias involucradas tienen un valor constante y el caso planteado es un cortocircuito tripolar.

Para el cálculo de las corrientes iniciales simétricas de cortocircuito se plantean dos alternativas: considerar las tensiones de los generadores y acometidas o considerar una fuente de tensión en el punto del cortocircuito. Si el circuito bajo estudio es el representado en la figura 7a, la 7b y 7c representan las dos alternativas citadas. En la variante de la 7b, se representa  $E''$  (la fuerza electromotriz del generador) y la tensión de la acometida  $1.1 U$ . En la segunda alternativa, 7c, existe una fuerza electromotriz  $1.1 U$  como única fuente equivalente de tensión en el punto de defecto. Para esta situación la fuerza electromotriz del generador y la tensión de acometida se consideran nulas (ambas solo actúan con sus impedancias).

## 7. Estudio de los distintos tipos de cortocircuito

El estudio se basa en un circuito sencillo como la figura 8 donde se representa un generador  $G$ , un transformador  $T$  y una línea  $L$ .



**Figura 8.- Equivalente trifásico para el cálculo de cortocircuitos**

En el esquema equivalente se tiene:

$Z_G$  = impedancia de cortocircuito del generador.

$Z_T$  = impedancia de cortocircuito del transformador.

$Z_L$  = impedancia de la línea.

$Z_c$  = impedancias debidas a la capacidad de las fases respecto a tierra.

$Z_E$  = impedancia de puesta a tierra del punto neutro del transformador.

Todas estas representan impedancias por fase. La impedancia de puesta a tierra  $Z_E$  es común para las tres fases y por ello en el esquema equivalente debe considerarse un valor triple para una sola fase.

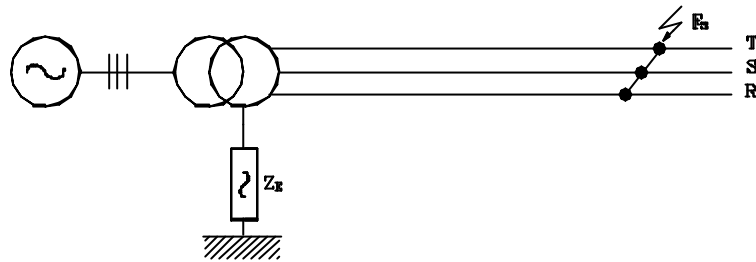
Es claro que la generación en todos los sistemas es a través de generadores síncronos trifásicos de secuencia directa. Por esto, se trate de cortocircuitos simétricos o asimétricos las fuerzas electromotrices solo aparecen en los sistemas de secuencia positiva.

En los cortocircuitos simétrico se toma como fase de referencia la fase  $R$ . En los asimétricos resulta conveniente tomar como referencia la fase cuyo comportamiento difiere del de las otras dos.

Se toma como fuerza electromotriz la de los generadores o las correspondientes acometidas.

### 7.1 Cortocircuito tripolar

El cortocircuito tripolar representa para la red una carga simétrica, figura 9. En el punto de cortocircuito se cumple:



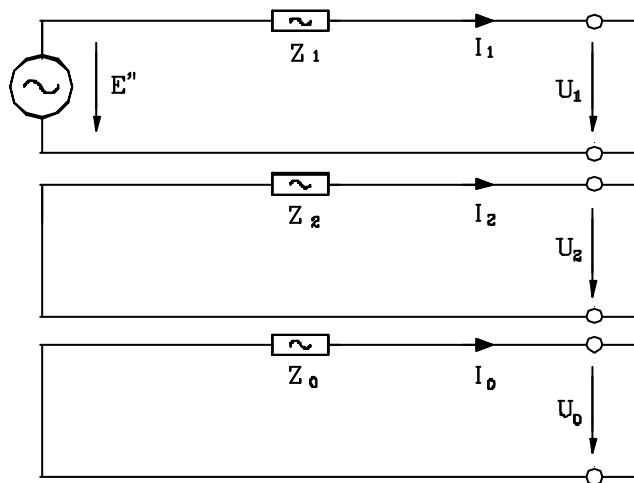
**Figura 9.- Esquema para el cortocircuito trifásico**

$$U_R = U_S = U_T = 0 \quad (7.1.1)$$

A partir de las ecuaciones (4.5) y (4.6) y siendo la fase *R* la referencia se obtiene:

$$U_1 = U_2 = U_0 = 0 \quad (7.1.2)$$

La figura 10 representa los esquemas de conexión de los sistemas de secuencias para la falla trifásica. A partir de (7.1.2) se deduce:



**Figura 10.- Combinación de las redes de secuencia para el cortocircuito trifásico**

Sistema directo:  $U_1 = E'' - I_1 Z_1 = 0, \quad I_1 = E''/Z_1, \quad (7.1.3)$

Sistema inverso:  $U_2 = -I_2 Z_2 = 0, \quad I_2 = 0, \quad (7.1.4)$

Sistema homopolar:  $U_0 = -I_0 Z_0 = 0, \quad I_0 = 0, \quad (7.1.5)$

Sustituyendo esto en 4.5a se tiene:

$$I_R = I_1, I_S = a^2 I_1, I_T = a I_1 \quad (7.1.6)$$

Como las corrientes en las tres fases son iguales, resulta para la corriente inicial simétrica de cortocircuito:

$$I''_{K3} = E''/Z_1 \quad (7.1.7)$$

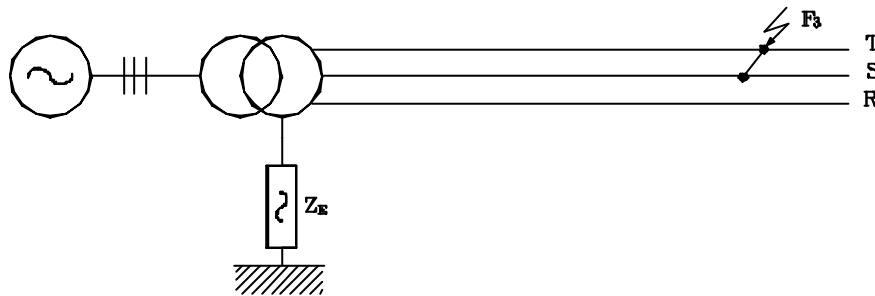
El análisis para las tensiones no resulta demasiado complicado y conduce a:

$$U_R = U_S = U_T = 0 \quad (7.1.8)$$

tal como se había previsto.

## 7.2 Cortocircuito bipolar sin contacto a tierra

Esquemáticamente se representa en la figura 11 y esto constituye para la red una carga asimétrica. Se cumple:



**Figura 11.- Esquema para el cortocircuito bifásico**

$$U_S = U_T, I_R = 0, I_S = -I_T \quad (7.2.1)$$

Tomando a  $R$  como fase de referencia, de las ecuaciones 4.5 y 4.6 se obtienen las siguientes relaciones:

$$U_S - U_T = U_1 - U_2 = 0, \quad U_1 = U_2, \quad (7.2.2)$$

$$3I_0 = I_R + I_S + I_T = 0, \quad I_0 = 0, \quad (7.2.3)$$

$$I_R = I_1 + I_2 + I_0 = 0, \quad I_1 = -I_2 \quad (7.2.4)$$

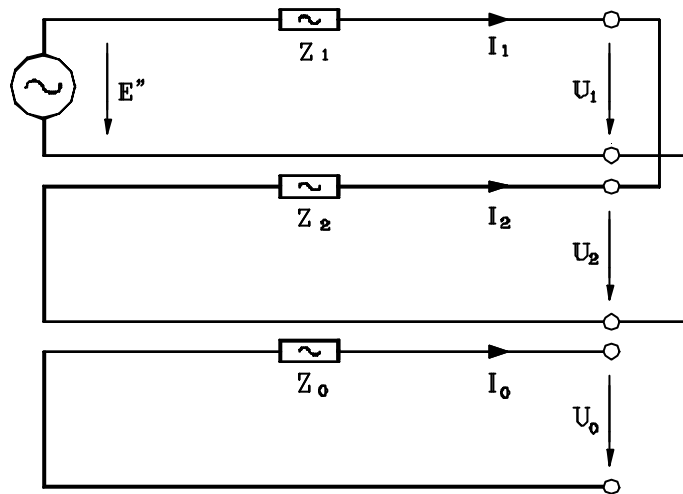
$$I_0 = U_0/Z_0, \quad U_0 = 0 \quad (7.2.5)$$

Para las corrientes  $I_S$  e  $I_T$ :

$$I_S = a^2 I_1 + a I_2, \quad I_S = (a^2 - a) I_1, \quad I_S = -j \sqrt{3} I_1 \quad (7.2.6)$$

$$I_T = a I_1 + a^2 I_2, \quad I_T = (a - a^2) I_1, \quad I_T = j \sqrt{3} I_1 \quad (7.2.7)$$

Del análisis de las ecuaciones 7.2.2 a la 7.2.5 surge el esquema de conexiones para los sistemas de secuencias que se muestran en la figura 12. Se cumplen las siguientes relaciones:



**Figura 12.- Combinación de las redes de secuencia para el cortocircuito bifásico**

$$U_1 = E'' - I_1 Z_1, \quad (7.2.8)$$

$$U_2 = -I_2 Z_2, \quad (7.2.9)$$

$$U_0 = -I_0 Z_0, \quad (7.2.10)$$

$$E'' = I_1 (Z_1 + Z_2) \text{ y por lo tanto } I_1 = E''/(Z_1 + Z_2) \quad (7.2.11)$$

Sustituyendo 7.2.6 y 7.2.7 en 7.2.8 se obtiene:

$$I_S = -j \sqrt{3} E''/(Z_1 + Z_2) \quad (7.2.12)$$

$$I_T = j \sqrt{3} E''/(Z_1 + Z_2) \quad (7.2.13)$$

Ambas corrientes tienen el mismo valor absoluto. Entonces para la corriente inicial simétrica correspondiente a un cortocircuito bipolar sin contacto a tierra se cumple que:

$$I''_{K2} = \sqrt{3} E'' / (Z_1 + Z_2) \quad (7.2.14)$$

Respecto de las tensiones y sabiendo que  $U_0=0$ , de la primera ecuación del sistema 5.6a se tiene:

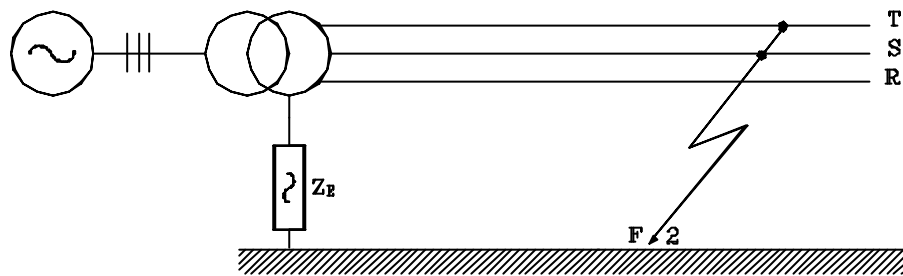
$$U_R = U_1 + U_2, \quad (7.2.15)$$

sustituyendo 7.2.8 y 7.2.9 en 7.2.15 resulta:

$$U_R = E'' 2 Z_2 / (Z_1 + Z_2) \quad (7.2.16)$$

### 7.3 Cortocircuito bipolar con contacto a tierra

De acuerdo a la figura 13 se cumple:



**Figura 13.- Esquema para el cortocircuito bifásico a tierra**

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

De la 4.5 y 4.6, tomando la fase R como referencia, se tienen las siguientes relaciones:

$$I_R = I_1 + I_2 + I_0 = 0 \quad (7.3.1)$$

es decir:

$$I_1 = -I_2 - I_0 \quad (7.3.2)$$

$$3U_1 = U_R + aU_S + a^2U_T = U_R \quad (7.3.3)$$

$$3U_2 = U_R + a^2U_S + aU_T = U_R \quad (7.3.4)$$

$$3U_0 = U_R + U_S + U_T = U_R \quad (7.3.5)$$

De 7.3.3, 7.3.4 y 7.3.5, surge que:

$$U_1 = U_2 = U_0 \quad (7.3.6)$$

De 7.3.2 y de 7.3.6 surge el esquema de conexión para los sistemas de secuencias mostrado en la figura 14. Se cumple:

$$U_1 = E'' - I_1 Z_1 \quad (7.3.7)$$

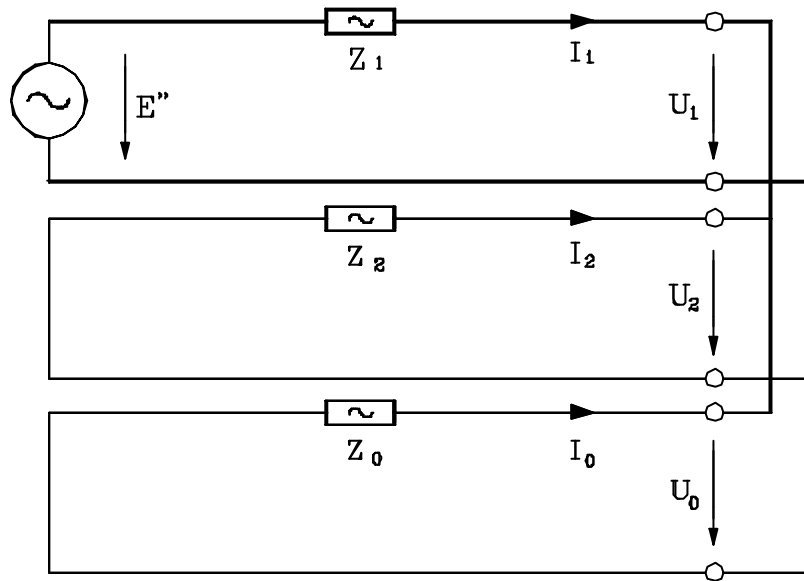
$$U_2 = -I_2 Z_2 \quad (7.3.8)$$

$$U_0 = -I_0 Z_0 \quad (7.3.9)$$

Trabajando con 7.3.1 y 7.3.6 se tiene:

$$I_R = E''/Z_1 - U_1 A/Z_1 Z_2 Z_0 = 0 \quad (7.3.10)$$

donde  $A = Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_0 Z_1$



**Figura 14.- Combinación de las redes de secuencia para el cortocircuito bifásico a tierra**

$$U_1 = E'' Z_2 Z_0 / A \quad (7.3.11)$$

además:

$$I_1 = E''(Z_2 + Z_0)/A, \quad I_2 = -E''Z_0/A, \quad I_0 = -E''Z_2/A \quad (7.3.12)$$

Con 7.3.12 en 4.5a se obtiene:

$$I_S = I''_{K2ES} = j \sqrt{3} E'' (aZ_2 - Z_0)/A \quad (7.3.13)$$

$$I_T = I''_{K2ET} = -j \sqrt{3} E'' (a^2 Z_2 - Z_0)/A \quad (7.3.14)$$

La corriente que circula por tierra resulta de la suma de  $I_S$  e  $I_T$  y la denominamos  $I_E$ ,

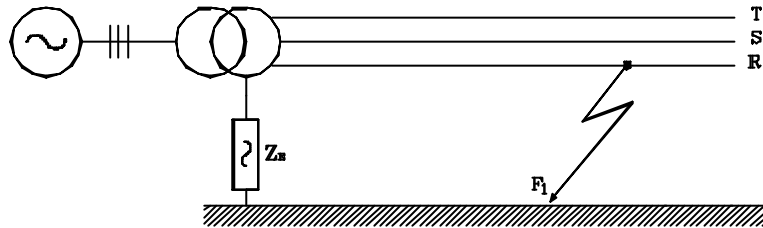
$$I''_{KE2E} = I_S + I_T = 3E''Z_2/A = 3I_0 \quad (7.3.14)$$

Por otro lado, la tensión entre la fase no fallada  $R$  y tierra en el lugar de la falla surge de 8.6 y la primera ecuación del sistema 4.6a siendo:

$$U_R = 3E''Z_2Z_0/A \quad (7.3.15)$$

#### 7.4 Cortocircuito unipolar a tierra

De la figura 15 que representa el caso se deduce que:



**Figura 15.- Esquema para el cortocircuito unipolar a tierra**

$$U_R = 0, \quad I_S = 0, \quad I_T = 0 \quad (7.4.1)$$

Tomando la fase  $R$  como referencia, de las ecuaciones 4.5 y 4.6 resulta:

$$3I_1 = I_R + aI_S + a^2I_T = I_R \quad (7.4.2)$$

$$3I_2 = I_R + a^2I_S + aI_T = I_R \quad (7.4.3)$$

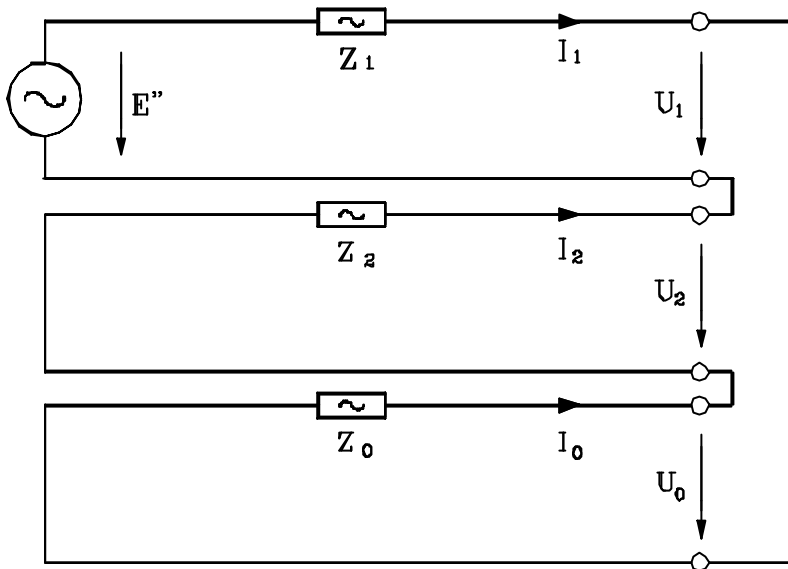
$$3I_0 = I_R + I_S + I_T = I_R \quad (7.4.4)$$

De aquí surge que:

$$I_1 = I_2 = I_0 \quad (7.4.5)$$

Respecto de las tensiones:

$$U_R = U_1 + U_2 + U_0 = 0 \quad (7.4.6)$$



**Figura 16.- Combinación de las redes de secuencia para el cortocircuito bifásico a tierra**

De donde surge:

$$U_1 = -U_2 - U_0 \quad (7.4.7)$$

De 7.4.5 y 7.4.7, surge el esquema de conexión de la figura 16, de la que se extraen las siguientes relaciones:

$$U_1 = E'' - I_1 Z_1 \quad (7.4.8)$$

$$U_2 = -I_2 Z_2 \quad (7.4.9)$$

$$U_0 = -I_0 Z_0 \quad (7.4.10)$$

De 7.4.5 y 7.4.6 se tiene:

$$U_R = E'' - I_1 Z_1 - I_2 Z_2 - I_0 Z_0 = 0 \quad (7.4.11)$$

$$I_1 = I_2 = I_0 = E'' / (Z_1 + Z_2 + Z_0) \quad (7.4.12)$$

De 7.4.2,  $3I_1 = I_R$ , por lo tanto:

$$I_R = I''_{KI} = 3E'' / (Z_1 + Z_2 + Z_0) \quad (7.4.13)$$

Sustituyendo 7.4.8, 7.4.10 y 7.4.12 en las ecuaciones que surgen del sistema 4.6a pueden obtenerse las tensiones de las fases no perturbadas respecto de tierra:

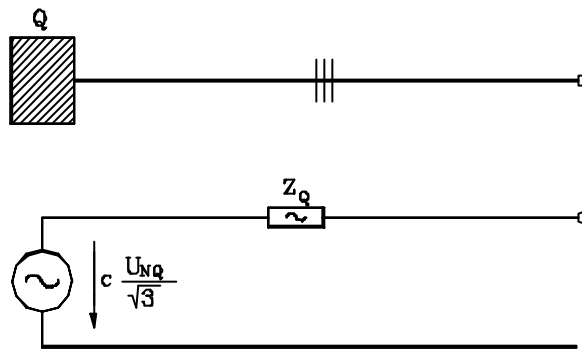
$$U_S = E'' (a^2 - (a^2 Z_1 + a Z_2 + Z_0)/(Z_1 + Z_2 + Z_0)) \quad (7.4.14)$$

$$U_T = E'' (a - (a Z_1 + a^2 Z_2 + Z_0)/(Z_1 + Z_2 + Z_0)) \quad (7.4.15)$$

## 8. Cálculo de las impedancias de aparatos y componentes y de la impedancia de la red

### 8.1 Acometidas

Esquemáticamente una acometida se representa como en la figura 17. La corriente de cortocircuito para un punto como este viene dado por la potencia de cortocircuito en el lugar de conexión de la red que alimenta a dicha acometida.



**Figura 17.- Acometida**

Se cumple:

$$S''_{KQ} = \sqrt{3} U_{NQ} I''_{KQ} \quad (8.1.1)$$

$$I''_{KQ} = 1,1 U_{NQ} / \sqrt{3} Z_Q \quad (8.1.2)$$

$$Z_Q = R_Q + jX_Q \quad (8.1.3)$$

Por lo que la impedancia de cortocircuito resulta ser:

$$Z_Q = 1,1 U_{NQ}^2 / S''_{KQ} \quad (8.1.4)$$

Donde:

$U_{NQ}$  = tensión nominal de la red en el punto de conexión  $Q$ .

$S''_{KQ}$  = potencia de cortocircuito para la corriente inicial simétrica en  $Q$ .

$I''_{KQ}$  = corriente inicial simétrica de cortocircuito en  $Q$ .

Si no se conocen otros valores, puede tomarse para la resistencia efectiva  $R_G = 0.1X_Q$  con  $X_Q = 0.995 X_Q$ .

## 8.2 Máquinas síncronas

La reactancia inicial  $X''_d$  (reactancia subtransitoria) de una máquina síncrona determina el valor de la corriente inicial simétrica de cortocircuito (figura 18). La impedancia de un generador es:

$$Z_G \gg R_G + jX''_d \quad (8.2.1)$$

Con

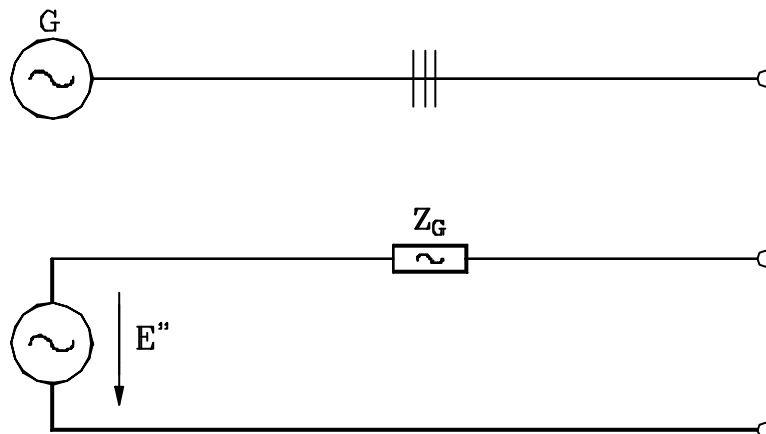
$$X''_d = x''_d U_{NG}^2 / 100 S_{NG} \quad (8.2.2)$$

donde:

$S_{NG}$  = potencia nominal del generador.

$U_{NG}$  = tensión nominal del generador.

$x''_d$  = reactancia inicial relativa.



**Figura 18.- Generador**

Para  $R_G$  puede tomarse con suficiente aproximación:

$R_G = 0.05 X''_d$  para generadores con  $U_{NG} > 1$  kV y  $S_{NG} < 100$  MVA.

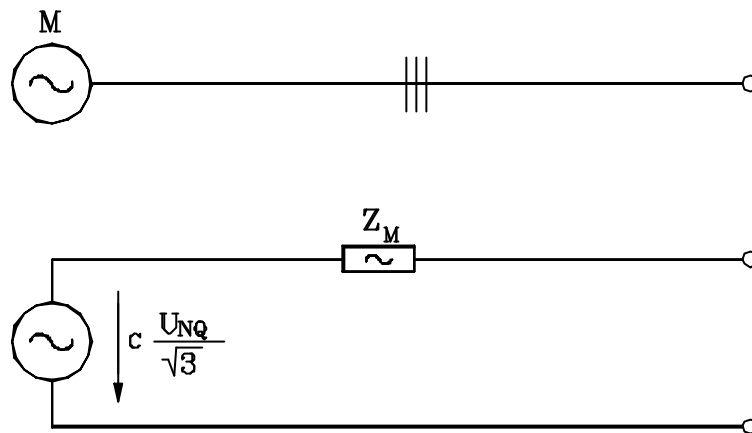
$R_G = 0.07 X''_d$  para generadores con  $U_{NG} > 1$  kV y  $S_{NG} < 100$  MVA.

$R_G = 0.15 X''_d$  para generadores con  $U_{NG} < 1000$  V.

Para los casos de motores y compensadores síncronos el tratamiento es el mismo que para generadores síncronos en lo que respecta al cálculo de las corrientes de cortocircuito.

### 8.3 Motores asíncronos

La impedancia a considerar para el cálculo de la corriente inicial simétrica de cortocircuito se obtiene a partir de la corriente inicial de arranque del motor a la tensión nominal (figura 19). Se tiene:



**Figura 19.- Motor**

$$Z_M = R_M + jX_M \quad (8.3.1)$$

$$Z_M = U_{NM} / \sqrt{3} I_{an} = (U_{NM}^2 / S_{NM}) (I_{NM} / I_{an}) \quad (8.3.2)$$

donde:

$U_{NM}$  = tensión nominal del motor.

$I_{an}$  = corriente inicial de arranque del motor.

$I_{NM}$  = corriente nominal del motor.

$S_{NM}$  = potencia aparente nominal del motor.

Una buena aproximación para  $R_M$  es:

$R_M/X_M = 0,10$  con  $X_M = 0,995 Z_M$ , para motores de alta tensión (potencia/par de polos  $\geq 1$  MW).

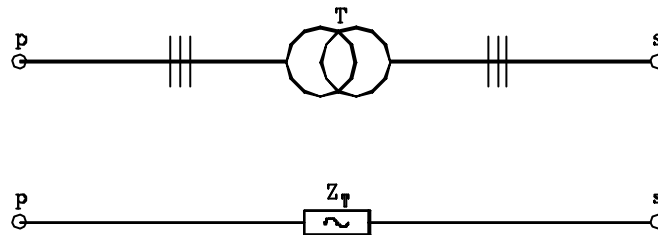
$R_M/X_M = 0,15$  con  $X_M = 0,989 Z_M$ , para motores de alta tensión (potencia/par de polos  $< 1$  MW).

$R_M/X_M = 0,30$  con  $X_M = 0,958 Z_M$ , para motores de baja tensión.

## 8.4 Transformadores

Los esquemas equivalentes correspondientes a los sistemas directo, inverso y homopolar dependen del número y de la conexión de los devanados del transformador. El módulo de la impedancia inversa coincide con el de la directa. Solo se analizarán los casos de transformadores con dos devanados.

Los valores de impedancias directa coinciden con los de las impedancias de cortocircuito. La figura 20 representa el circuito equivalente. Se cumple:



**Figura 20.- Transformador**

$$Z_1 = Z_2 = Z_{ps} = Z_T = R_T + jX_T \quad (8.4.1)$$

La impedancia  $Z_T$  se calcula a partir de la tensión de cortocircuito  $u_k$  del transformador.

$$Z_T = (u_{kn} U_{NT}^2) / (100 S_{NT}), \quad Z_T^2 = R_T^2 + X_T^2 \quad (8.4.2)$$

Siendo:

$$R_T = P_{cuN} / 3 I_{NT}^2 \quad (8.4.3)$$

donde:

$U_{NT}$  = tensión nominal del transformador (entre fases).

$S_{NT}$  = potencia nominal del transformador.

$u_{kn}$  = tensión de cortocircuito para la corriente nominal, expresada en %.

$P_{cuN}$  = pérdidas en el cobre para la potencia nominal.

$I_{NT}$  = corriente nominal del transformador.

## 8.5 Cables y conductores

Para el caso de cables, los fabricantes suministran los valores de las distintas impedancias de sus productos, ya sean los distintos tipos de tripolares como así también para los casos de unipolares en diferentes disposiciones.

Para las líneas aéreas es de uso común tabular los distintos tipos de impedancia en función de la sección de los mismos y a partir de una determinada distancia media geométrica entre los conductores de cada fase. A continuación se sugieren algunas expresiones matemáticas que dan una buena aproximación a estos valores.

$$Z'_l = R'_L + j \omega 10^{-4} (2 \ln(A/r) + 0,5 \mu_r) \text{ W/Km por fase,} \quad (8.5.1)$$

esto es para una línea trifásica simple con transposición de conductores. Obviamente el valor de la impedancia negativa resulta de igual valor.

$$Z'_0 = R'_L + 3 R'_E + j \omega 10^{-4} (6 \ln(\frac{d}{\sqrt[3]{rA^2}} + 0,5 \mu_r)) \text{ W/km por fase,} \quad (8.5.2)$$

válida para una línea trifásica sin hilo de tierra. En estas expresiones:

$R'_L$  = Resistencia efectiva de los conductores en  $\Omega/\text{km}$ ,

$R'_E = \frac{\rho}{w} 10^{-4} / 2$  Resistencia efectiva del terreno en  $\Omega/\text{km}$ .

$w$  = Pulsaciones =  $2\pi f$  en 1/s.

$A = \sqrt[3]{a_{12} \cdot a_{23} \cdot a_{31}}$ , donde los  $a_{ij}$  representan las distancias entre la fase  $i$  y la  $j$ .

$r$  = Radio del conductor en  $m$ .

$\mu_r$  = Permeabilidad relativa (1 para Cu y Al).

$d = 1650 \sqrt{(s/w)}$  en  $m$ , donde  $s$  es la resistividad del terreno.

## 8.6 Impedancias de secuencia homopolar de aparatos.

En muchos casos estos valores de impedancia no se disponen al momento de efectuar los cálculos de las corrientes de cortocircuito. De todas maneras existe abundante información al respecto. A continuación se dan algunos valores característicos para generadores síncronos (tabla I) y transformadores (tabla II).

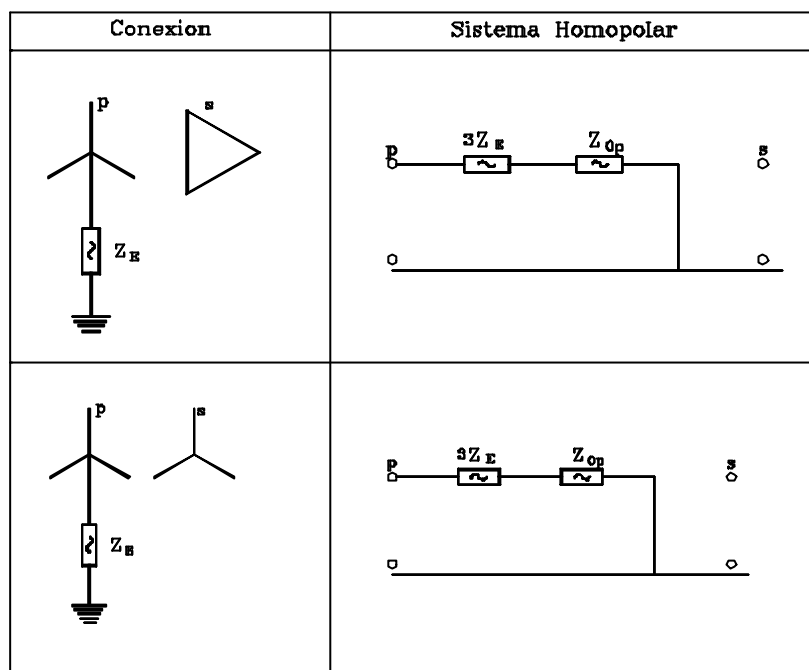
|                                                   |                             |
|---------------------------------------------------|-----------------------------|
| Potencia nominal en KVA                           | 40 a 1400                   |
| Reactancia subtransitoria<br>$x''_d$ en %         | 10 a 15                     |
| Reactancia transitoria<br>$x'_d$ en %             | 20 a 40                     |
| Reactancia sincrónica<br>$x_d$ en %               | 150 a 300                   |
| Reactancia inversa<br>$x_2$ en %                  | 10 a 15                     |
| Reactancia homopolar<br>$x_0$ en %                | $(0,4 \text{ a } 0,8)x''_d$ |
| Cte. de tiempo subtransitoria $T''_d$ en s        | 0,002 a 0,03                |
| Cte. de tiempo transitoria $T'_d$ en s            | 0,006 a 1                   |
| Cte. de tiempo de la comp. aperiódica $T'_g$ en s | 0,008 a 0,1                 |

Tabla I.- Para generadores síncronos de baja tensión con número de polos entre 4 y 14.  $R_G = 0,15 x''_d$ .

|             |             |            |             |            |
|-------------|-------------|------------|-------------|------------|
| $U_m$ KV    | 3 a 36      |            | 72,5        | 123        |
| $S_N$ MVA   | 2 a 4       | 5          | 6.3         | 10         |
| $U_{kps}$ % | 6           | 7          | 8           | 10         |
| $U_{kps}$ % | 1,05 a 0,85 | 0,7 a 0,65 | 0,75 a 0,65 | 0,85 a 0,7 |
| $(X_0/X_1)$ | 0,85 a 1    |            |             |            |
| $(R_0/R_1)$ | 1 a 3       |            |             |            |

Tabla II.-Para transformadores con conexión estrella/triángulo según DIN 42504/508.

La figura 21 muestra circuitos equivalentes de secuencia homopolar para distintos tipos de conexión de transformadores de dos devanados.



**Figura 21.- Equivalentes de secuencia cero para transformadores**

## 9 Cálculo de las corrientes de cortocircuito según VDE 0102

Cuando se dedujeron las fórmulas para calcular las corrientes iniciales simétricas de cortocircuito se empleó como fuerza electromotriz la correspondiente a los generadores o a las acometidas existentes. Las normativas de la VDE indican un método distinto, según el cual se ha de suponer que en el cortocircuito actúa una única fuente equivalente de tensión cuya fuerza electromotriz vale  $cU_h/3$ . El factor  $c$  permite tener en cuenta la diferencia existente entre la fuerza electromotriz inicial  $E''$  y la tensión de servicio de la red  $U_h$  en el punto de cortocircuito al calcular las máximas corrientes iniciales simétricas de cortocircuito.

Para redes trifásicas con tensiones nominales  $> 1$  KV se toma  $U_h = U_n$  = tensión entre fases de la red en el punto de cortocircuito y  $c = 1,1$ .

Para redes trifásicas con tensiones nominales  $\leq 1$  KV sin generadores de baja tensión se toma  $U_h = U_{NT}$  = tensión entre fases del lado de baja tensión de los transformadores que alimentan la red y  $c = 1$  o  $0,95$  según se trate del cálculo de las máximas o mínimas corrientes iniciales simétricas de cortocircuito.

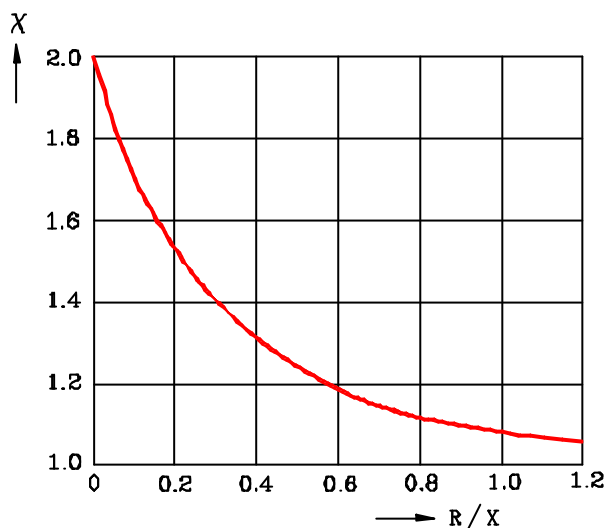
Las fuerzas electromotrices de los generadores y las correspondientes a las acometidas se consideran nulas y únicamente se tienen en cuenta las impedancias de las distintas fuentes de corrientes de cortocircuito.

No se consideran las capacitancias de las líneas en los sistemas directo e inverso y los motores se tratan como generadores.

Cuando se calculan defectos asimétricos, deben tenerse en cuenta en el sistema homopolar las capacitancias de las líneas .

## 9.1 Cálculo de las corrientes de cortocircuito $I_s$ e $I_k$

Corriente máxima asimétrica de cortocircuito:



$$I_s = x \sqrt{2} I''_k$$

El factor  $x$  depende de la relación  $R_k/X_k$  del circuito y tiene en cuenta el amortiguamiento temporal de la componente aperiódica, como así también la componente simétrica en el caso de cortocircuitos próximos al generador. (figura 22).

**Figura 22.- Factor  $x$  para el cálculo de la máxima corriente asimétrica de cortocircuito  $I_s$**

Corriente permanente de cortocircuito:

$$I_k = I_N$$

El factor  $I$  depende de la relación  $I''_k/I_N$ , de las condiciones de excitación y del tipo de máquina síncrona en cuestión. (figura 23).

## 9.3 Fórmulas para cálculo de cortocircuito

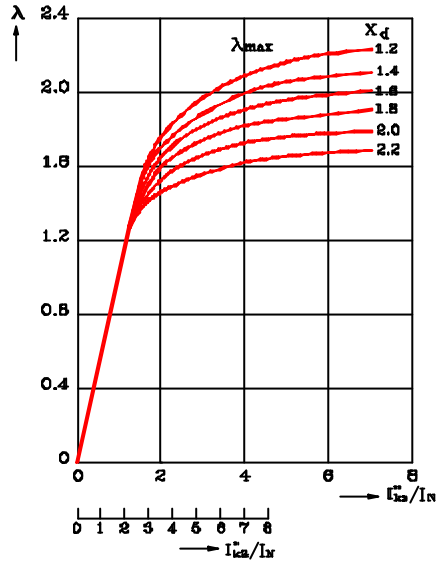
### 9.3.1 Cortocircuito tripolar:

$$I''_{K3} = c U_h / \sqrt{3} \cdot Z_I \quad (9.3.1.1)$$

### 9.3.2 Cortocircuito bipolar sin contacto a tierra:

$$I''_{K2} = U_h / (Z_I + Z_2) \quad (9.3.2.1)$$

$$U_R = cU_h 2Z_2 / \sqrt{3} (Z_1 + Z_2) \quad (9.3.2.2)$$



### 9.3.3 Cortocircuito bipolar con contacto a tierra:

$$I''_{K2ES} = (+j)cU_h(aZ_2-Z_0) / A \quad (9.3.3.1)$$

$$I''_{K2ET} = (-j)cU_h(a^2Z_2-Z_0) / A \quad (9.3.3.2)$$

$$I''_{KE2E} = (+j)c \sqrt{2} U_h Z_2 / A \quad (9.3.3.3)$$

$$U_R = \sqrt{3} cU_h Z_2 Z_0 / A \quad (9.3.3.4)$$

donde:

$$A = Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_0 Z_1$$

**Figura 23.- Factores para el cálculo de las corrientes permanentes de cortocircuito**

### 9.3.4 Cortocircuito unipolar a tierra:

$$I''_{K1} = \sqrt{3} cU_h / (Z_1 + Z_2 + Z_0) \quad (9.3.4.1)$$

$$U_S = cU_h(a^2-B) / \sqrt{3} \quad (9.3.4.2)$$

$$U_T = cU_h(a-C) / \sqrt{3} \quad (9.3.4.3)$$

donde:

$$B = (a^2 Z_1 + aZ_2 + Z_0) / (Z_1 + Z_2 + Z_0)$$

y,

$$C = (aZ_1 + a^2 Z_2 + Z_0) / (Z_1 + Z_2 + Z_0)$$

## 9.4 Redes con distintos niveles de tensión

A menudo deben calcularse las corrientes de cortocircuito en redes que presentan distintos niveles de tensión y que están interconectados entre transformadores. Las impedancias de líneas aéreas y cables están dadas en ohms por fase para la tensión de servicio correspondiente y las impedancias de generadores y transformadores, como valores adimensionales, generalmente porcentuales, referidos a los valores nominales (tensión y potencia). Por esto resulta conveniente referir todas las impedancias a un único nivel para toda la red. Se tratarán dos alternativas.

### 9.4.1 Impedancias absolutas

Para las impedancias absolutas  $Z_B$  referidas a la tensión de referencia  $U_B$  se tienen las siguientes relaciones:

para líneas aéreas y cable:

$$Z_B = Z_N (U_B^2 / U_N^2) \quad (9.4.1.1)$$

para generadores y transformadores:

$$Z_B = z_N (U_B^2 / S_N) \quad (9.4.1.2)$$

Como tensión de referencia  $U_B$  puede tomarse cualquier tensión. Sin embargo, resulta útil elegir la tensión de servicio de la sección de la red en la que se haya producido el cortocircuito.

### 9.4.2 Impedancias adimensionales

Como las potencias nominales de los distintos aparatos o componentes son diferentes o, como en el caso de líneas aéreas, no están definidas, es preciso establecer una única potencia de referencia  $S_B$ . Para las impedancias adimensionales  $z_B$  referidas a esta potencia se tienen las siguientes relaciones:

para líneas aéreas :

$$z_B = Z_N (S_B / U_N^2) \quad (9.4.2.1)$$

para generadores y transformadores:

$$z_B = z_N (S_B / S_N) \quad (9.4.2.2)$$

Como potencia de referencia puede elegirse cualquier valor. Sin embargo, resulta útil elegir la potencia del mayor generador o transformador, o un valor tal que simplifique los cálculos como, por ejemplo, 100 o 1000 MVA.

## 10 Impedancia de falta

En aplicaciones de protección contra sobrecorrientes es importante conocer no solo los máximos valores de las corrientes de falta sino también los mínimos. Un factor determinante en esta situación es la impedancia de falta, o sea, la impedancia del medio a través del cual circula la corriente en el punto donde se produce la falta. Este medio puede ser la rama de un árbol, un ave o cualquier animal, un arco eléctrico, una combinación de estas, etc.. Es tradicionalmente empleado, y con buenos resultados, asumir un valor de  $40\Omega$  de impedancia de falta para el cálculo de las corrientes mínimas de falta.

Las expresiones simplificadas para el cálculo de las distintas corrientes asumiendo un valor de impedancia de falta son:

Trifásica:

$$|I_{3K}| = \left| \frac{V}{Z_1 + Z_F} \right|$$

Bifásica:

$$|I_{2K}| = \left| \frac{\sqrt{3}V}{Z_1 + Z_2 + Z_F} \right|$$

Fase Tierra:

$$|I_{1K}| = \left| \frac{3V}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_F} \right|$$

## 11 Cálculo de Cortocircuitos en el Sistema de Distribución

### 11.1.- Introducción:

#### 11.1.2.- Expresiones de la impedancia de la acometida:

$S''_k$  = Potencia de cortocircuito (MVA)  
 $Z_{q1}$  = Impedancia equivalente de secuencia positiva del sistema  
 $V_{ll}$  = Tensión de línea (V).

$$Z_{q1} = \frac{1,1 * V_{ll}^2}{S''_k}$$

#### 11.1.3.- Expresiones de la impedancia del transformador

$Z_t$  = Impedancia del transformador  
 $S_t$  = Potencia del transformador  
 $V_{cc}$  = Tensión de cortocircuito del transformador  
 $I_n$  = Corriente nominal del transformador  
 $P_{cu}$  = Pérdidas en el cobre del transformador

Corriente nominal del transformador:  $I_n = \frac{S_t}{\sqrt{3} * V_{ll}}$

Resistencia del transformador:  $R_t = \frac{P_{cu}}{3 * I_n^2}$

Impedancia del transformador:  $Z_t = \frac{V_{cc} * V_{ll}^2}{S_t}$

Reactancia del transformador:  $X_t = \sqrt{Z_t^2 - R_t^2}$

Impedancia de secuencia positiva y negativa del transformador

$$Z_{t+} = R_t + jX_t$$

#### 11.1.4.- Expresiones de las impedancias de la línea

$Z_{l+}$  = Impedancia de secuencia positiva y/o negativa de la línea por unidad de longitud.  
 $Z_{l0}$  = Impedancia de secuencia nula de la línea por unidad de longitud.  
 $A$  = Distancia equivalente entre conductores.  
 $A_{ab}$  = Distancia entre los conductores de las fases a y b

$r$  = Radio del conductor.  
 $R_{con}$  = Resistencia por unidad de longitud del conductor  
 $F$  = Frecuencia = 50 Hz  
 $w$  = Pulsación angular =  $314. = 2 * \pi * f$   
 $\rho$  = Resistividad del terreno.  
 $\mu$  = Permeabilidad relativa.  
 $R_E$  = Resistencia del terreno  
 $\delta$  = Profundidad de penetración.

$$d = 1650 \sqrt{\frac{r}{w}}, \text{ m}$$

$$R_E = \frac{\rho}{2} * w * 10^{-4}, \Omega$$

$$A = \sqrt[3]{A_{AB} * A_{BC} * A_{CA}}$$

$$Z_{l+} = R_{con} + j * w * 10^{-4} (2 * \ln \left( \frac{A}{r} \right) + 0,5 * m), \Omega/\text{Km}$$

$$Z_{0+} = R_{con} + 3 * R_E + j * w * 10^{-4} (6 * \ln \left( \frac{d}{\sqrt[3]{r * A^2}} \right) + 0,5 * m), \Omega/\text{Km}$$

#### 11.1.5.- Expresiones para el cálculo de las corrientes de cortocircuito

$V_{fn}$  = Tensión fase-neutro del sistema.  
 $Z_F$  = Impedancia de falla.  
 $I_{3\phi}$  = Corriente de falta trifásica.  
 $I_{2\phi}$  = Corriente de falta bifásica.  
 $I_{1\phi}$  = Corriente de falta monofásica.  
 $Z_1$  = Impedancia equivalente de secuencia positiva del sistema hasta el punto del fallo.  
 $Z_2$  = Impedancia equivalente de secuencia negativa del sistema hasta el punto del fallo.  
 $Z_0$  = Impedancia equivalente de secuencia cero del sistema hasta el punto del fallo.

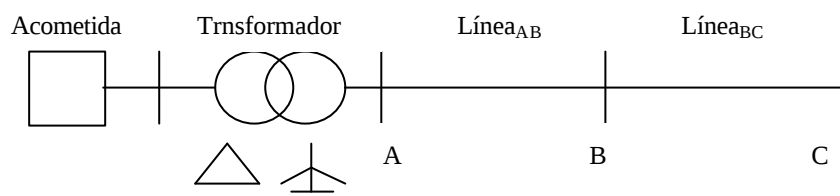
$$I_{3f} = \frac{V_{fn}}{Z_1 + Z_F}$$

$$I_{2f} = \frac{\sqrt{3} * V_{fn}}{Z_1 + Z_2 + Z_F}$$

$$I_{1f} = \frac{3 * V_{fn}}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3 * Z_F}$$

## 11.2.- Ejemplo N°1:

### 11.2.1.- Diagrama Unifilar



### 11.2.2.- DATOS:

*Acometida:*

$S''_k$  = Potencia de cortocircuito (MVA) = 70 MVA

*Transformador:*

$S_t$  = 2,5 MVA.

Relación de transformación = 33/13,8 kV

$V_{cc}$  = 7 %

$P_{cu}$  = 15 kW

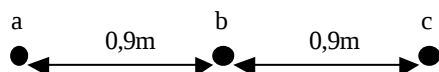
*Línea<sub>AB</sub>*: (3 $\phi$  = Trifásica)

Longitud = 5,8 km

Tipo de conductor: 3x70 Aluminio

$R_{con}$  = 0,484  $\Omega$ /km

Diámetro = 10,75 mm



*Línea<sub>BC</sub>*: (3 $\phi$ )

Longitud = 5,0 km

Tipo de conductor: 3x25 Aluminio

$$R_{\text{con}} = 1,31 \, \Omega/\text{km}$$

$$\text{Diámetro} = 6,45 \, \text{mm}$$

La disposición es idéntica que para el ramo anterior.

### 11.2.3.- Cálculo de las Impedancia:

*Cálculo de la impedancia de la acometida:*

$$Z_{q1} = \frac{1,1 * (13,2 \cdot 10^3)^2}{70 \cdot 10^6} = j2,73 \Omega$$

*Cálculo de impedancias del transformador:*

$$S_t = 2,5 \, \text{MVA.}$$

$$V_{ll} = 33/13,2 \, \text{kV}$$

$$V_{cc} = 7 \, \%$$

$$P_{cu} = 15 \, \text{kW}$$

$$I_n = \frac{2,5 \cdot 10^6}{\sqrt{3} * 13,8 \cdot 10^3} = 104,59 \, \text{A}$$

$$Z_t = \frac{0,07 * (13,8 \cdot 10^3)^2}{2,5 \cdot 10^6} = 5,37 \Omega$$

$$R_t = \frac{15 \cdot 10^3}{3 * 104,13} = 0,461 \Omega$$

$$X_t = \sqrt{5,37^2 - 0,461^2} = 5,35 \Omega$$

Impedancia de secuencia positiva del Transformador:

$$Z_{t+} = 0,461 + j5,37 \, \Omega$$

Suponiendo que para ese tipo de transformador (ver Roeper)  $X_0/X_1=1$ , y  $R_0/R_1=1,5$ ; por lo tanto:

Impedancia de secuencia cero del Transformador:

$$Z_{t0} = 0,691 + j5,37 \, \Omega$$

*Cálculo de impedancia de línea:*

*Tramo AB*

(conductores dispuestos en un mismo plano)

$$A_{ab} = A_{bc} = 0,9 \text{ m}; A_{ac} = 1,8 \text{ m};$$

$$\rho = 100 \text{ } \Omega\text{m}$$

Para aluminio de 70 mm<sup>2</sup>:

$$R_{con} = 0,484 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$R = 10,75/2 = 5,37 \text{ mm} = 0,00537 \text{ m};$$

$$A = \sqrt{1,8 * 0,9 * 0,9} = 1,13 \text{ m}$$

$$d = 1650 \sqrt{\frac{100}{314}} = 931 \text{ m}$$

$$R_E = \frac{\rho}{2} * 2 * p * 50 * 10^{-4} = 0,0493 \text{ } \Omega$$

$$Z_{l+} = 0,484 + j * 314 * 10^{-4} (2 * \ln\left(\frac{1,13}{0,0053}\right) + 0,5 * 1) = 0,484 + j0,352 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$Z_{0+} = 0,484 + 3 * 0,0493 + j * 314 * 10^{-4} (6 * \ln\left(\frac{931}{\sqrt[3]{0,0053 * 1,13^2}}\right) + 0,5 * 1) = 0,632 + j1,617 \text{ } \Omega/\text{km},$$

*Tramo BC*

A,  $\rho$ ,  $\delta$  y  $R_E$  resultan ser los mismos que para el tramo anterior.

$$r = 6,45/2 = 3,225 \text{ mm} = 0,00322 \text{ m};$$

$$Z_{l+} = 1,31 + j * 314 * 10^{-4} (2 * \ln\left(\frac{1,13}{0,00322}\right) + 0,5 * 1) = 1,31 + j0,383 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$Z_{0+} = 1,31 + 3 * 0,0493 + j * 314 * 10^{-4} (6 * \ln\left(\frac{931}{\sqrt[3]{0,00322 * 1,13^2}}\right) + 0,5 * 1) = 1,458 + j1,65 \text{ } \Omega/\text{km}$$

#### 11.2.4.- Cálculo de corrientes de cortocircuito:

Suponiendo que el Transformador sea conexión triángulo/estrella con neutro puesto a tierra

Para el cálculo en el punto A:

| Componente    | Secuencia positiva |      | Secuencia cero |      |
|---------------|--------------------|------|----------------|------|
|               | R                  | jX   | R              | jX   |
| Acometida     | 0                  | 2,73 | 0              | 0    |
| Transformador | 0,461              | 5,37 | 0,691          | 5,37 |
| Total         | 0,461              | 8,1  | 0,691          | 5,37 |

Suponiendo que  $Z_F = 0$  para el cálculo de las corrientes mínimas de corto, y además las impedancias de secuencia positiva y negativa son iguales, las corrientes de cortocircuito son:

$$I_{3fM} = \frac{7620}{0,461 + j.8,1} = 939 A$$

$$I_{3fm} = \frac{7620}{40,461 + j.8,1} = 184 A$$

$$I_{1fM} = \frac{3 * 7620}{2(0,461 + j.8,1) + (0,691 + j5,37)} = 1056 A$$

$$I_{1fm} = \frac{3 * 7620}{3 * 40 + 2(0,461 + j.8,1) + (0,691 + j5,37)} = 185 A$$

$$I_{2fM} = \frac{\sqrt{3} * 7620}{2 * (0,461 + j.8,1)} = 813 A$$

$$I_{2fm} = \frac{\sqrt{3} * 7620}{2 * (0,461 + j.8,1) + 40} = 299 A$$

|                                      |        |
|--------------------------------------|--------|
| Corriente de falta trifásica máxima  | 939 A  |
| Corriente de falta trifásica mínima  | 184 A  |
| Corriente de falta bifásica máxima   | 813 A  |
| Corriente de falta bifásica mínima   | 299 A  |
| Corriente de falta monofásica máxima | 1056 A |
| Corriente de falta monofásica mínima | 185 A  |

Para el cálculo en el punto B:

| Componente    | Secuencia positiva |               | Secuencia cero |               |
|---------------|--------------------|---------------|----------------|---------------|
|               | R                  | jX            | R              | jX            |
| Acometida     | 0                  | 2,73          | 0              | 0             |
| Transformador | 0,461              | 5,37          | 0,691          | 5,37          |
| Línea         | $5,8 * 0,484$      | $5,8 * 0,352$ | $5,8 * 0,632$  | $5,8 * 1,617$ |
| Total         | 3,26               | 10,14         | 4,35           | 14,74         |

$$I_{3fM} = \frac{7620}{3,26 + j.10,14} = 715 A$$

$$I_{3fm} = \frac{7620}{40 + 3,26 + j.10,14} = 171 A$$

$$I_{2fM} = \frac{\sqrt{3} * 7620}{2(3,26 + j.10,14)} = 619 A$$

$$I_{2fm} = \frac{\sqrt{3} * 7620}{2(3,26 + j.10,14) + 40} = 260 A$$

$$I_{1fM} = \frac{3 * 7620}{2(3,26 + j.10,14) + (4,35 + j14,74)} = 623 A$$

$$I_{1fm} = \frac{3 * 7620}{3 * 40 + 2(3,037 + j.7,451) + (4,0 + j12,06)} = 168 A$$

|                                      |       |
|--------------------------------------|-------|
| Corriente de falta trifásica máxima  | 715 A |
| Corriente de falta trifásica mínima  | 171 A |
| Corriente de falta bifásica máxima   | 619 A |
| Corriente de falta bifásica mínima   | 260 A |
| Corriente de falta monofásica máxima | 623 A |
| Corriente de falta monofásica mínima | 168 A |

Para el cálculo en el punto C:

| Componente    | Secuencia positiva |             | Secuencia cero |             |
|---------------|--------------------|-------------|----------------|-------------|
|               | R                  | jX          | R              | jX          |
| Acometida     | 0                  | 2,73        | 0              | 0           |
| Transformador | 0,461              | 5,37        | 0,691          | 5,37        |
| Línea (AB)    | 5,8 * 0,484        | 5,8 * 0,352 | 5,8 * 0,632    | 5,8 * 1,617 |
| Línea (BC)    | 5,0 * 1,31         | 5,0 * 0,383 | 5,0 * 1,458    | 5,0 * 1,65  |
| Total         | 9,81               | 12,05       | 11,6           | 22,99       |

$$I_{3fM} = \frac{7620}{9,81 + j.12,05} = 490A$$

$$I_{3fm} = \frac{7620}{40 + 9,81 + j.12,05} = 148A$$

$$I_{2fM} = \frac{\sqrt{3} * 7620}{2(9,81 + j.12,05)} = 424A$$

$$I_{2fm} = \frac{\sqrt{3} * 7620}{2(9,81 + j.12,05) + 40} = 205A$$

$$I_{1fM} = \frac{3 * 7620}{2(9,81 + j.12,05) + (11,6 + j22,99)} = 404A$$

$$I_{1fm} = \frac{3 * 7620}{3 * 40 + 2(9,81 + j.12,05) + (11,6 + j22,99)} = 144A$$

|                                      |       |
|--------------------------------------|-------|
| Corriente de falta trifásica máxima  | 490 A |
| Corriente de falta trifásica mínima  | 148 A |
| Corriente de falta bifásica máxima   | 424 A |
| Corriente de falta bifásica mínima   | 205 A |
| Corriente de falta monofásica máxima | 404 A |
| Corriente de falta monofásica mínima | 144 A |

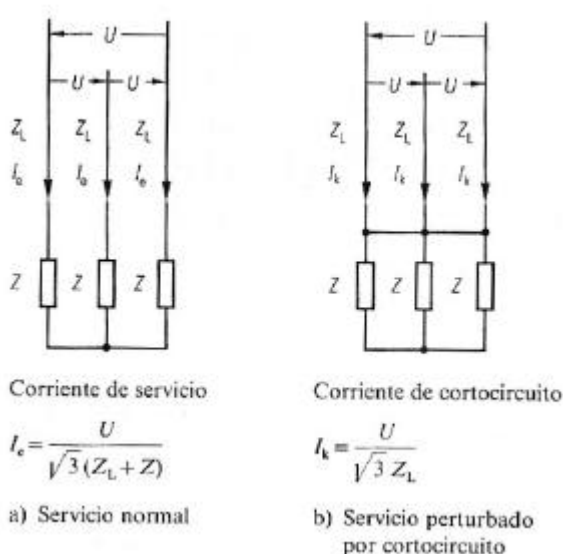
## 12. Corriente de cortocircuito en redes de BT

La corriente de cortocircuito prevista en el sitio de instalación es determinante para la elección de los aparatos de maniobra y distribuciones en función de su:

- resistencia a los cortocircuitos
- capacidad de ruptura (poder de corte)

La corriente de cortocircuito al final de los conductores (corriente de cortocircuito mínima) es determinante para la medida de protección mediante puesta a neutro.

Durante un servicio normal, la corriente de servicio  $I_c$  fluye a través de los conductores (véase fig. 2.4.a). Esta es determinada para la tensión de servicio  $U_c$  y la suma de las impedancias de la red  $Z_L$  y de la carga  $Z$ . En caso de cortocircuito desaparece la impedancia de la carga (véase fig. 2.4.b). Por tanto, la corriente de cortocircuito está solamente determinada por la tensión de servicio, la impedancia de la red y la impedancia del sitio del cortocircuito. Esta impedancia por ejemplo, la resistencia del arco, puede amortiguar considerablemente los cortocircuitos, no obstante, no se toma en cuenta para el cálculo de las corrientes de cortocircuito.



**Figura 24**

### 12.1 Cálculo de las corrientes de cortocircuito lejanas del generador, redes radiales trifásicas.

En la práctica, en redes de baja tensión, normalmente se calculan corrientes de cortocircuito lejanas del generador; esto significa, que la red de baja tensión es alimentada únicamente por transformadores conectados a redes potentes y, por tanto, la tensión en el primario permanece prácticamente constante en caso de cortocircuito en el secundario.

La corriente de cortocircuito más alta ocurre en caso de cortocircuito trifásico. La corriente inicial alterna de cortocircuito  $I''_k$  se calcula con la ecuación:

$$I''_k = \frac{c \cdot U_{NT}}{\sqrt{3} Z_k} = \frac{c \cdot U_{NT}}{\sqrt{3} \sqrt{R_k^2 + X_k^2}}$$

la corriente de choque  $I_s$  se determina mediante la igualdad:

$$I_s = c \cdot \sqrt{2} \cdot I_k''$$

donde:

- $U_{NT}$  = Tensión nominal del secundario de transformador.
- $C$  = Factor para determinar la tensión suplente, la cual alimenta al cortocircuito ( $c = 1.0$ , para corrientes de cortocircuito trifásicos alejados del generador y con una sola alimentación.)
- $Z_k$  = Impedancia de la vía de corriente de cortocircuito.
- $R_k$  = Resistencia efectiva de la vía de corriente de cortocircuito.
- $X_k$  = Reactancia de la vía de corriente de cortocircuito.
- $\chi$  = Factor para determinar la corriente de choque  $I_s$  (véase punto 9.1, fig. 22)

Un calculo aproximado de la corriente de cortocircuito prevista en el sitio de instalación de los aparatos de maniobra puede obtenerse mediante la utilización de los diagramas para la determinación de las impedancias y las corrientes de cortocircuito (véase las figuras. 25 a 27) según DIN 57102 hoja 2/VDE 0102 parte 2 (1975).

### 12.3 Diagramas para la determinación de las impedancias y corrientes de cortocircuito

El cálculo aproximado de la componente alterna de la corriente inicial de cortocircuito  $I_k''$  puede efectuarse, para tensiones nominales de servicio de 220, 380 y 500 V, utilizando los diagramas de las figuras 25, 26 y 27. Para el caso, hay que llenar los siguientes requisitos:

- La red es alimentada solamente por transformadores.
- La tensión en el primario del transformador, permanece constante en caso de cortocircuito en el secundario.

En los diagramas pueden leerse las reactancias  $X$  y las resistencias efectivas  $R$  para diferentes secciones de cables y secciones aéreas (conductores desnudos) en los diagramas también se muestran las resistencias efectivas  $R$  y las reactancias  $X$  de los transformadores en función de su potencia, utilizando la tensión de dispersión  $u_x$  de los transformadores como parámetro.

La tensión de dispersión se obtiene de:

$$u_x = \sqrt{u_k^2 - u_R^2}$$

Aquí significan:

$u_x$ : Tensión de dispersión del transformador en %

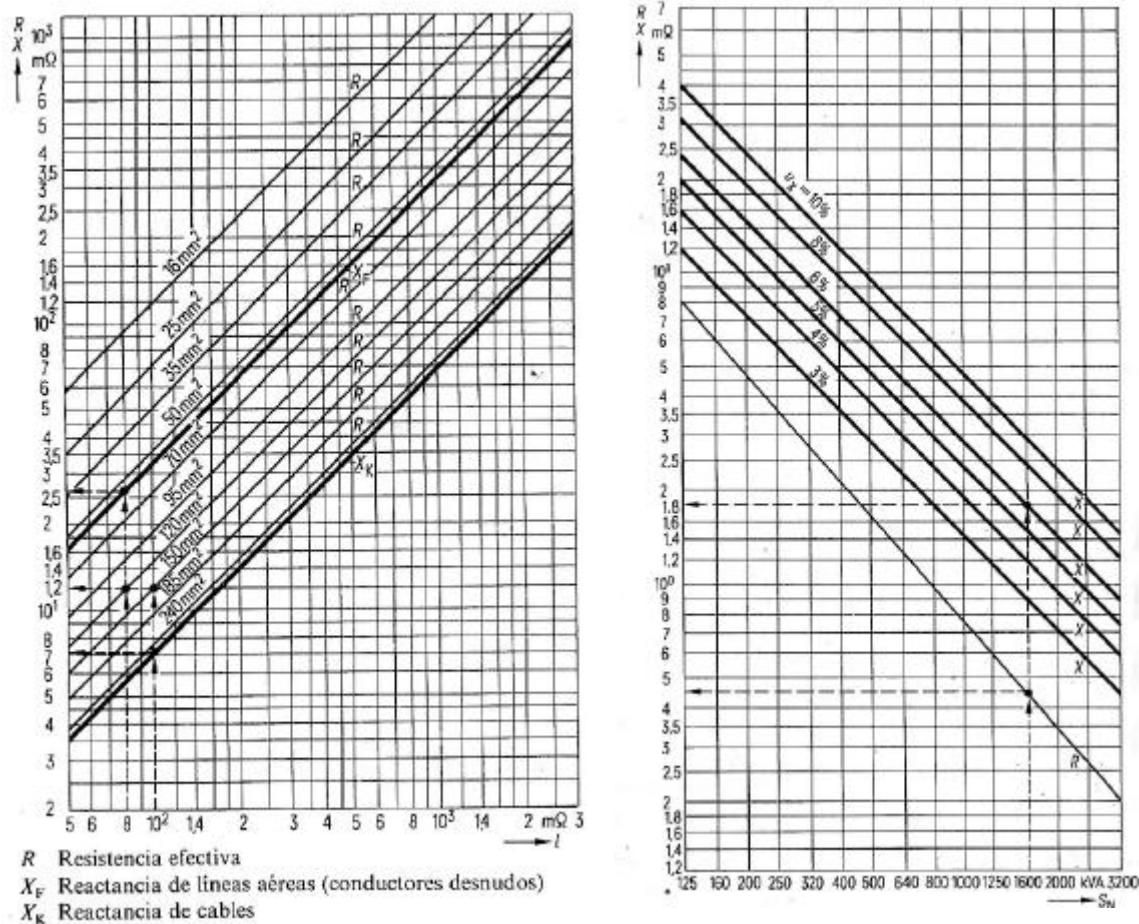
$u_k$ : Tensión de cortocircuito del transformador en %

$u_R$ : Caída de tensión óhmica en %

Los valores de  $u_k$  y  $u_R$  están indicados en los catálogos de los transformadores

De las figuras 25, 26 y 27 se lee entonces el valor efectivo de la corriente inicial alterna de cortocircuito  $I_k''$  en función de la resistencia efectiva total y de la reactancia total de vía de corriente del cortocircuito. Los valores calculados de esta manera son siempre más grandes que los valores que pueden adquirir los cortocircuitos en los sitios para los cuales se efectuó el cálculo o sea, los valores contienen un factor de seguridad. Esto se debe a las

resistencias de paso de los bornes (empalmes) y los contactos de los aparatos, así como a la resistencia del arco que casi siempre acompaña a los cortocircuitos. Dichas resistencias los amortiguan considerablemente y no fueron consideradas para la elaboración de los diagramas.



a) Resistencia efectiva y reactancia de líneas aéreas (conductores desnudos) y cables

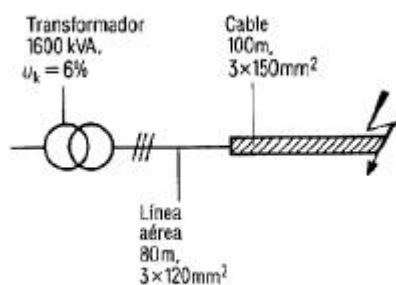
b) Resistencia efectiva y reactancia de transformadores

(cuando se emplean conductores de aluminio, los valores de la reactancia efectiva tomados del diagrama deben multiplicarse por 1,7)

R: Resistencia efectiva X: Reactancia

**Figura 25 Diagramas para determinar la corriente de cortocircuito en redes de 220V**

## Ejemplo N° 2: para una red de 220V



|                                     |                                 |
|-------------------------------------|---------------------------------|
| Potencia nominal del transformador: | $S_N = 1600 \text{ kVA}$        |
| Tensión de cortocircuito:           | $u_k = 6\%$                     |
| Caída de tensión óhmica:            | $u_R = 1\%$                     |
| Tensión nominal en el secundario:   | $U_N = 220 \text{ V}$           |
| Línea aérea: Longitud:              | $l = 80 \text{ m}$              |
| Sección:                            | $q = 3 \times 120 \text{ mm}^2$ |
| Material:                           | Cobre                           |
| Cable: Longitud:                    | $l = 100 \text{ m}$             |
| Sección:                            | $q = 3 \times 150 \text{ mm}^2$ |
| Material:                           | Cobre                           |

Tensión de dispersión :

$$u_k = u_k^2 - u_r^2 = 6^2 - 1^2 = 5.95\%$$

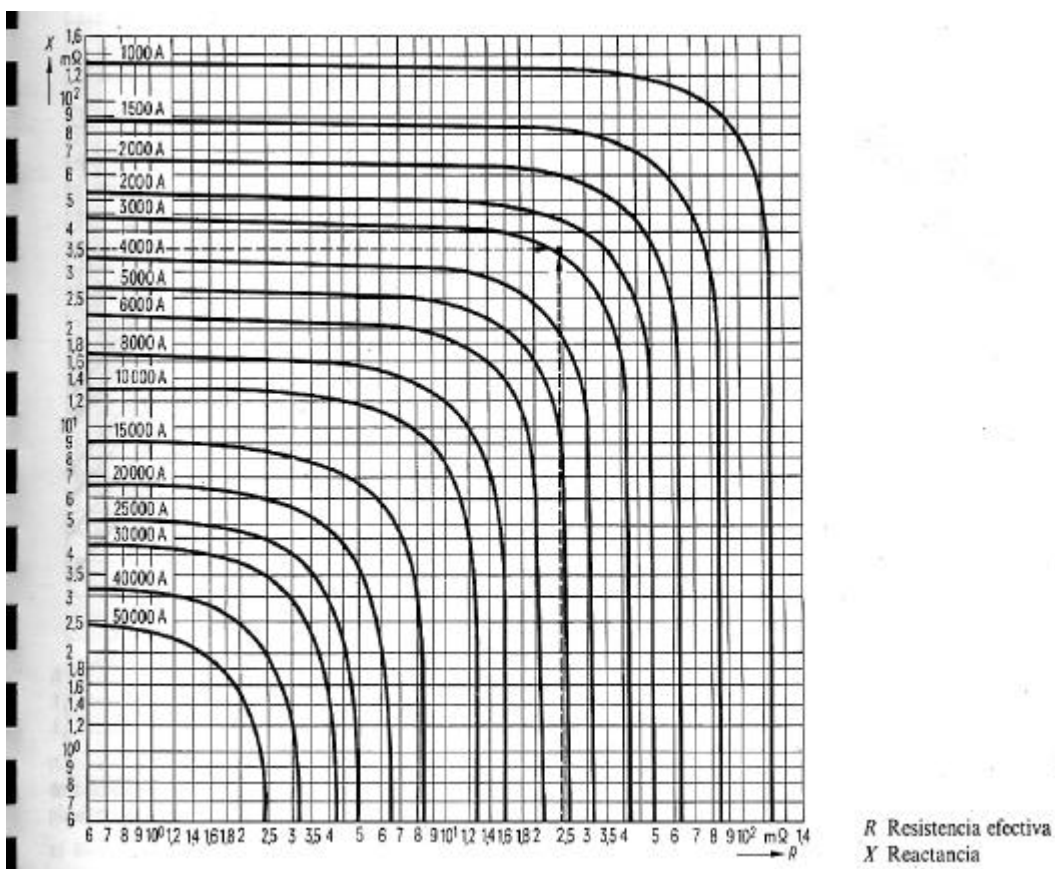
Resistencias efectivas y reactancias, determinadas mediante los diagramas 25 a y 25 b

|                                                                                   | Resistencia efectiva R<br>$\text{m}\Omega$ | Reactancia X<br>$\text{m}\Omega$ |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------|
| Transformador (fig. 2.10 b)                                                       | 0.45                                       | 1.8                              |
| Línea aérea (fig. 2.10 a)                                                         | 12                                         | 26                               |
| Cable (fig. 2.10 a)                                                               | 12                                         | 7.2                              |
| Resistencia y reactancia<br>Totales de la vía de la corriente<br>de cortocircuito | 24.45                                      | 35.0                             |

La resistencia y la reactancia totales de la vía de cortocircuito se obtienen efectuando las sumas aritméticas de los valores correspondientes de las componentes individuales.

*Lectura de la corriente inicial alterna de cortocircuito  $I''_k$*

La corriente de cortocircuito se obtiene de la figura 26, utilizando la resistencia y reactancias totales.



**Figura 26 Corriente inicial de cortocircuito  $I''_k$  (valor efectivo), en dependencia de la resistencia total de vía de cortocircuito.**

El punto de intersección de la resistencia efectiva con la reactancia nos da el valor de la corriente inicial alterna de cortocircuito  $I''_k$ . Si el punto de intersección queda entre dos curvas dibujadas, el valor de  $I''_k$  se calcula mediante una interpolación.

En el ejemplo con la resistencia efectiva y reactancia determinadas, la corriente inicial de cortocircuito asciende a  $I''_k = 3000\text{A}$