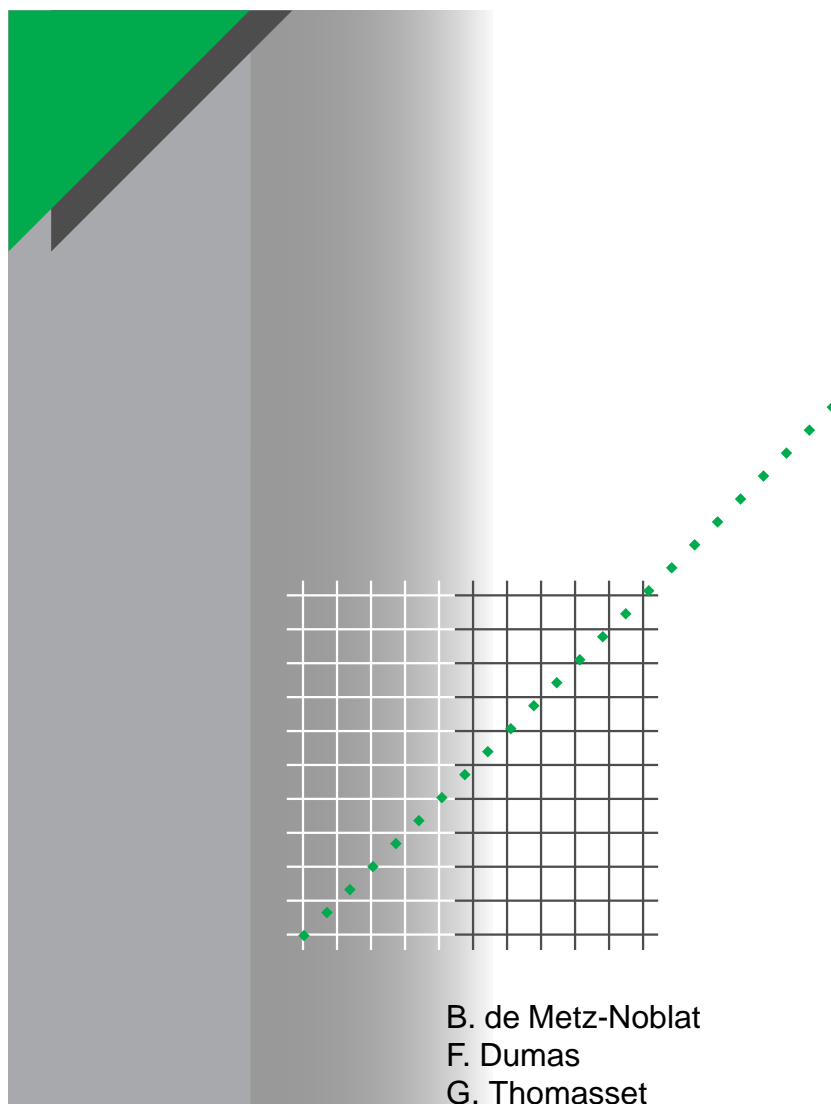


Cuaderno Técnico nº 158

Cálculo de corrientes de cortocircuito



Merlin Gerin
Modicon
Square D
Telemecanique

Schneider
 **Electric**

La **Biblioteca Técnica** constituye una colección de títulos que recogen las novedades electrotécnicas y electrónicas. Están destinados a Ingenieros y Técnicos que precisen una información específica o más amplia, que complemente la de los catálogos, guías de producto o noticias técnicas.

Estos documentos ayudan a conocer mejor los fenómenos que se presentan en las instalaciones, los sistemas y equipos eléctricos. Cada uno trata en profundidad un tema concreto del campo de las redes eléctricas, protecciones, control y mando y de los automatismos industriales.

Puede accederse a estas publicaciones en Internet:
<http://www.schneiderelectric.es>

Igualmente pueden solicitarse ejemplares en cualquier delegación comercial de **Schneider Electric España S.A.**, o bien dirigirse a:

Centro de Formación Schneider
C/ Miquel i Badia, 8 bajos
08024 Barcelona

Telf. (93) 285 35 80
Fax: (93) 219 64 40
e-mail: formacion@schneiderelectric.es

La colección de **Cuadernos Técnicos** forma parte de la «Biblioteca Técnica» de **Schneider Electric España S.A.**

Advertencia

Los autores declinan toda responsabilidad derivada de la incorrecta utilización de las informaciones y esquemas reproducidos en la presente obra y no serán responsables de eventuales errores u omisiones, ni de las consecuencias de la aplicación de las informaciones o esquemas contenidos en la presente edición.

La reproducción total o parcial de este Cuaderno Técnico está autorizada haciendo la mención obligatoria: «Reproducción del Cuaderno Técnico nº 158 de Schneider Electric».

Cuaderno Técnico nº 158

Cálculo de corrientes de cortocircuito



Benoît de METZ-NOBLAT

Ingeniero ESE, trabajó en el Grupo Saint-Gobain como ingeniero de investigación y después en trabajos sobre mantenimiento y trabajos nuevos.

Entró en Schneider Electric en 1986 como responsable del servicio «Electrotecnia y Redes Eléctricas» en la Dirección Científica y Técnica.



Frédéric DUMES

Doctor Ingeniero de la Université de Technologie de Compiègne (UTC) en 1993.

Entró en Schneider Electric en 1993, en el grupo de «Electrotecnia y Redes Eléctricas» de la Dirección Científica y Técnica. Se responsabilizó de proyectos de investigación sobre redes eléctricas industriales y distribución, además del desarrollo de programas para cálculos electrotécnicos.



Georges THOMASSET

Diplomado Ingeniero por el Institut d'Electrotechnique de Grenoble (IEG) en 1971, ha desarrollado estudios de diseño de redes industriales complejas en la Dirección Técnica Merlin Gerin.

Después de dirigir la oficina de estudios de «Distribución Pública MT e Instalaciones Hidroeléctricas», se responsabilizó, en 1984 del servicio técnico de la unidad industrial del Departamento de Fabricación de Conjuntos. Desde 1996 es responsable del desarrollo técnico de la oferta y redes eléctricas de la Dirección de Aplicaciones, Equipos y Servicios de Schneider Electric.

Trad.: E. Milà, J.M. Giró

Original francés: noviembre 1999


Versión española: septiembre 2000

Merlin Gerin

Modicon

Square D

Telemecanique

Schneider
 **Electric**

Terminología

Abreviaturas

| | |
|------|--------------------------------|
| JdB | Juego de Barras |
| PdC | Poder de Corte |
| CGBT | Cuadro General de Baja Tensión |

Símbolos

| | |
|----------------|--|
| α | Ángulo de disparo (aparición del defecto referido al paso por cero de la tensión) |
| c | Factor de tensión |
| $\cos \varphi$ | Factor de potencia (en ausencia de armónicos) |
| e | Fuerza electromotriz |
| E | Fuerza electromotriz (valor máximo) |
| φ | Ángulo de desfase (intensidad respecto a tensión) |
| i | Intensidad de corriente instantánea |
| i_a | Componente alterna senoidal de la intensidad de corriente instantánea |
| i_c | Componente continua de la intensidad de corriente instantánea |
| i_p | Valor máximo de intensidad de corriente (primera cresta de intensidad de corriente de defecto) |
| I | Intensidad eficaz máxima |
| I_b | Intensidad de corriente de cortocircuito cortada (CEI 909) |
| I_{cc} | Intensidad de corriente de cortocircuito permanente (I_{cc3} : trifásica, I_{cc2} : bifásica) |
| I_k | Intensidad de corriente de cortocircuito permanente (CEI 909) |
| I_k'' | Intensidad de corriente de cortocircuito inicial (CEI 909) |
| I_r | Intensidad de corriente asignada del alternador |
| I_s | Intensidad de corriente de servicio |

| | |
|-----------------|---|
| λ | Factor dependiente de la inductancia de saturación de un alternador |
| k y K | Constantes determinadas (tablas o ábacos) |
| Ra | Resistencia equivalente de la red aguas arriba |
| R_L | Resistencia unitaria o lineal de las líneas |
| S | Sección de los conductores |
| S_{cc} | Potencia de cortocircuito |
| S_n | Potencia aparente del transformador |
| t_{\min} | Tiempo muerto mínimo de establecimiento del cortocircuito, a menudo igual al tiempo de retardo de un interruptor automático |
| u | Tensión instantánea |
| u_{cc} | Tensión de cortocircuito de un transformador, expresada en % |
| U | Tensión compuesta de la red, en vacío |
| U_n | Tensión nominal, en carga, de la red |
| x | Reactancia en % de las máquinas giratorias |
| X_a | Reactancia equivalente de la red, aguas arriba |
| X_L | Reactancia unitaria o lineal de las líneas |
| X_{subt} | Reactancia subtransitoria del alternador |
| Za | Impedancia equivalente de la red, aguas arriba |
| Z_{cc} | Impedancia, aguas arriba, de la red sobre un defecto trifásico |
| Z_d, Z_i, Z_o | Impedancia directa, inversa y homopolar de una red o de un elemento |
| Z_L | Impedancia de conexión |

Cálculo de corrientes de cortocircuito

Las dimensiones de una instalación eléctrica y de los materiales que se instalan así como la determinación de las protecciones de personas y bienes precisan el cálculo de las corrientes de cortocircuito en cualquier punto de la red.

Este Cuaderno Técnico tiene por objetivo exponer los métodos de cálculo de las corrientes de cortocircuito previstas en las normas UTE C 15-105 y CEI 60909. Se refiere al caso de los circuitos radiales en BT y AT.

También se pretende ofrecer un buen conocimiento de los métodos de cálculo para determinar las corrientes de cortocircuito, incluso utilizando los medios informáticos.

| | |
|--|--------------|
| 1 Introducción | p. 6 |
| 1.1 Los principales defectos de cortocircuito | p. 8 |
| 1.2 Establecimiento de la intensidad de cortocircuito | p. 9 |
| 1.3 Normas y cálculos de las Icc | p. 13 |
| 1.4 Métodos presentados en este Cuaderno Técnico | p. 14 |
| 1.5 Las hipótesis de partida | p. 15 |
| 2 Cálculo de las Icc por el método de las impedancias | p. 16 |
| 2.1 Icc según los diferentes tipos de cortocircuito | p. 17 |
| 2.2 Determinación de las diversas impedancias de cortocircuito | p. 23 |
| 2.3 Relaciones entre las impedancias de los diferentes niveles de tensión de una instalación | p. 23 |
| 3 Cálculo de las Icc en las redes radiales con la ayuda de las componentes simétricas | p. 29 |
| 3.1 Interés de este método | p. 29 |
| 3.2 Repaso de la teoría de las componentes simétricas | p. 30 |
| 3.3 Cálculo según la CEI 60909 | p. 32 |
| 3.4 Ecuaciones de las diferentes corrientes | p. 34 |
| 3.5 Ejemplo de cálculo | p. 34 |
| 4 Cálculos por ordenador y conclusión | p. 37 |
| Bibliografía | p. 38 |

1 Introducción

Cualquier instalación eléctrica debe de estar protegida contra los cortocircuitos y esto, salvo excepción, cada vez que se presenta una discontinuidad eléctrica, lo que corresponde casi siempre a un cambio de sección de los conductores. La intensidad de la corriente de cortocircuito debe calcularse para cada uno de los diversos niveles de la instalación para poder determinar las características de los componentes que deberán soportar o cortar la corriente de defecto.

El organigrama de la **figura 1** indica el proceso lógico que hay que seguir para conocer las diferentes corrientes de cortocircuito y los parámetros que permiten realizar los cálculos para cada uno de los diferentes dispositivos de protección. Para elegir y regular convenientemente las protecciones se utilizan las curvas de intensidad en función del tiempo (**figuras 2, 3 y 4**). Es necesario conocer dos valores de corriente de cortocircuito:

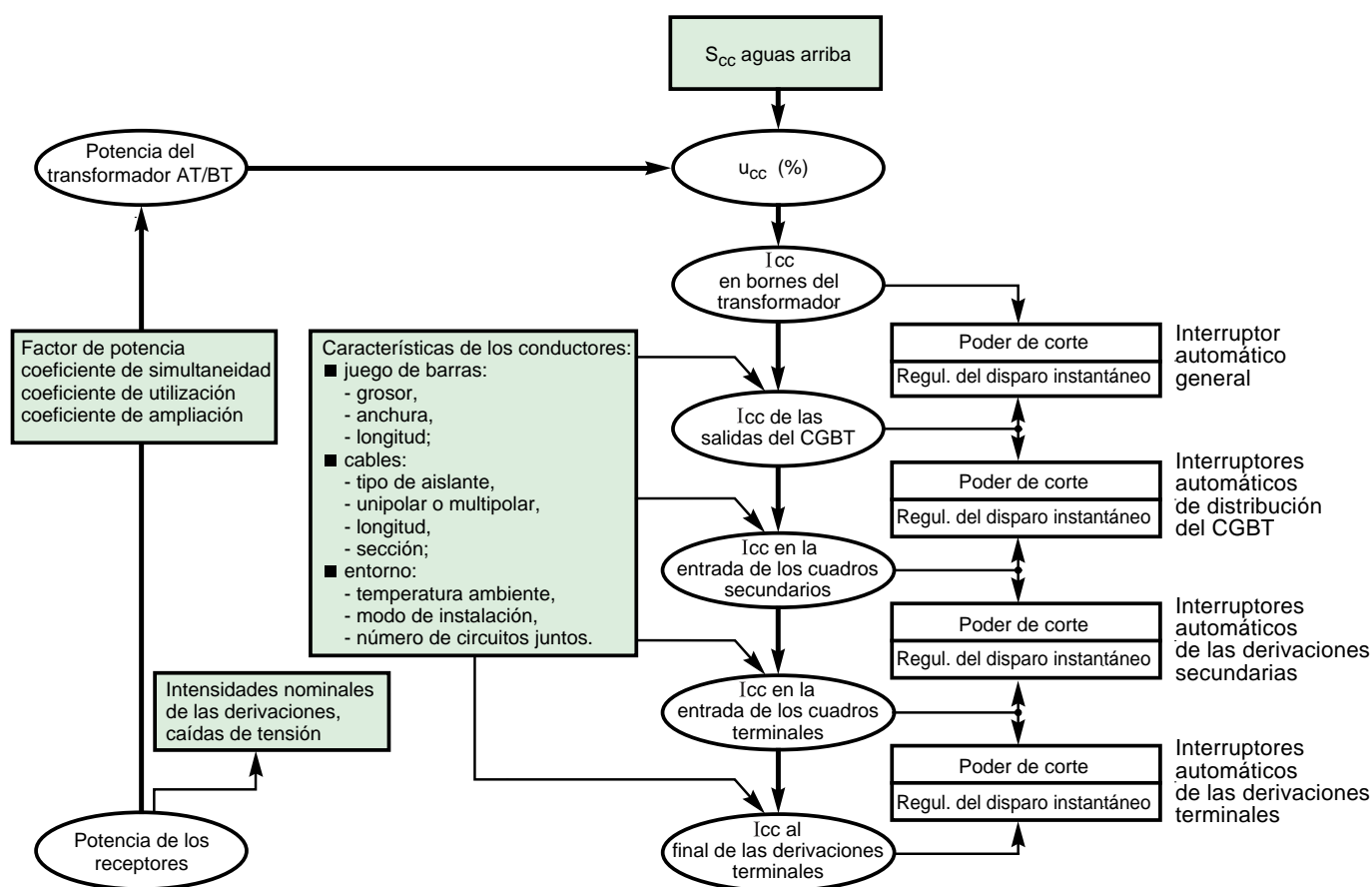


Fig. 1: Procedimiento de cálculo de I_{cc} para la concepción de una instalación.

- la corriente máxima de cortocircuito, que determina:
- el poder de corte -PdC- de los interruptores automáticos,
- el poder de cierre de la aparamenta,
- la sollicitación electrodinámica de conductores y aparamenta.

El valor corresponde a un cortocircuito inmediatamente aguas abajo de los bornes del elemento de protección. Debe de calcularse con una buena precisión (margen de seguridad).

- la corriente mínima de cortocircuito, indispensable para elegir de la curva de disparo de los interruptores automáticos y fusibles, especialmente cuando:
- la longitud de los cables es importante y/o la fuente o generador es relativamente impedante (generadores-onduladores),
- la protección de las personas se basa en el funcionamiento de los interruptores automáticos o de los fusibles, lo que es el caso concreto de los sistemas de distribución con los esquemas de conexión a tierra del neutro (o regímenes de neutro) TN o IT.

Recordemos que la corriente mínima de cortocircuito corresponde a un cortocircuito producido en el extremo una derivación protegida, cuando se produce un defecto bifásico en las condiciones de explotación menos severas (defecto alejado de la protección en el extremo de una línea con un solo transformador en servicio cuando se podrían conectar dos...).

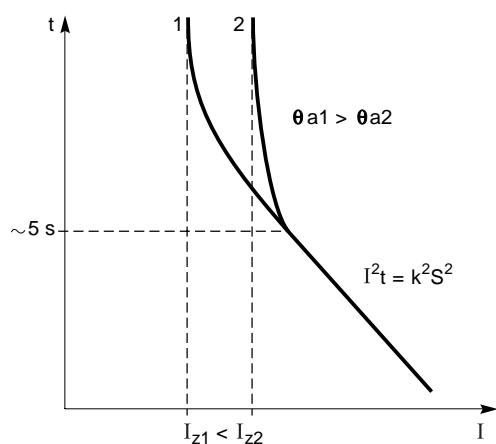


Fig. 2: Características I^2t de un conductor en función de la temperatura ambiente (1,2 representan el valor eficaz de la corriente en el conductor; I_z es el límite de corriente admisible en régimen permanente).

Recordemos también que en todos los casos, cualquiera que sea la corriente de cortocircuito (de mínimo a máximo), la protección debe de eliminar el defecto en un tiempo (t_c) compatible con la sollicitación térmica que puede soportar el cable a proteger:

$$\int i^2 \cdot dt \leq k^2 \cdot S^2 \quad (\text{figuras 2, 3 y 4})$$

donde S es la sección de los conductores y k una constante calculada a partir de diferentes factores de corrección que dependen del modo de instalación, de los circuitos contiguos, naturaleza del suelo, ...

Para más detalles prácticos se recomienda consultar la norma UNE 20 460 o la Guía de la Instalación Eléctrica de Schneider Electric (bibliografía).

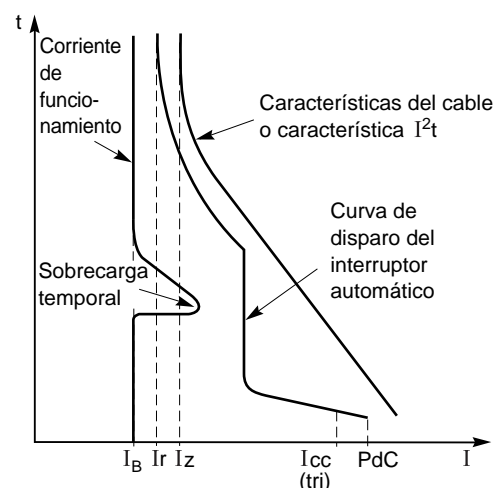


Fig. 3: Protección de un circuito por interruptor automático.

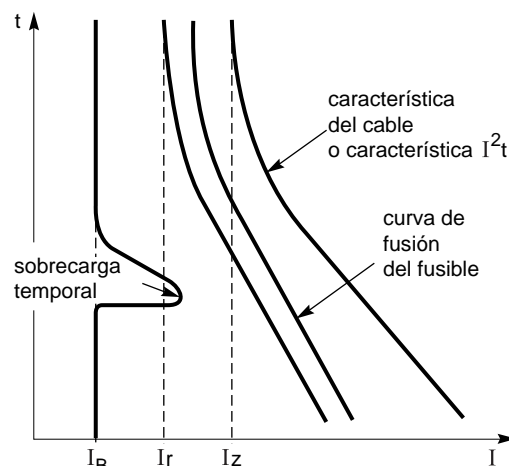


Fig. 4: Protección de un circuito por un fusible aM.

1.1 Los principales defectos de cortocircuito

En las instalaciones eléctricas pueden producirse diferentes tipos de cortocircuitos.

Características de los cortocircuitos

Las principales características de los cortocircuitos son:

- su duración: autoextinguible, fugaz, permanente,
- su origen:
 - originados por factores mecánicos (rotura de conductores, conexión eléctrica accidental entre dos conductores producida por un objeto conductor extraño, como herramientas o animales),
 - debidos a sobretensiones eléctricas de origen interno o atmosférico,

□ causados por la degradación del aislamiento provocada por el calor, la humedad o un ambiente corrosivo,

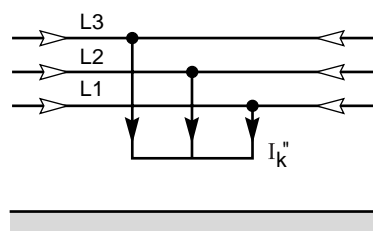
■ su localización: dentro o fuera de una máquina o un cuadro eléctrico.

Desde otro punto de vista, los cortocircuitos pueden ser:

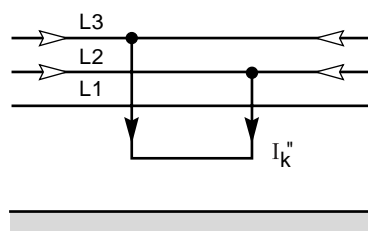
- monofásicos: 80% de los casos,
- bifásicos: 15% de los casos. Los de este tipo, suelen degenerar en trifásicos,
- trifásicos: en origen, sólo el 5% de los casos.

En la **figura 5** se representan estos diferentes tipos de cortocircuitos.

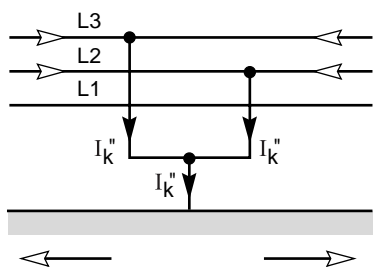
a) cortocircuito trifásico simétrico



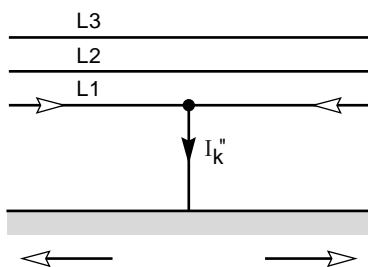
b) cortocircuito entre fases, aislado



c) cortocircuito entre fases, con puesta a tierra



d) cortocircuito fase-tierra



—> corriente de cortocircuito,
—< corrientes de cortocircuito parciales en los conductores de tierra.

Para los cálculos, estas diferentes corrientes (I_k'') se distinguen por sus índices.

Fig. 5: Los diferentes cortocircuitos y sus corrientes. El sentido de las flechas indicando las corrientes es arbitrario (CEI 909).

Consecuencias de los cortocircuitos

Depende de la naturaleza y duración de los defectos, del punto de la instalación afectado y de la magnitud de la intensidad:

- según el lugar del defecto, la presencia de un arco puede:
 - degradar los aislantes,
 - fundir los conductores,
 - provocar un incendio o representar un peligro para las personas.
- según el circuito afectado, pueden presentarse:
 - sobreesfuerzos electrodinámicos, con:
 - deformación de los JdB (juegos de barras),
 - arrancado o desprendimiento de los cables;
 - sobrecalentamiento debido al aumento de pérdidas por efecto Joule, con riesgo de deterioro de los aislantes;

■ para los otros circuitos eléctricos de la red afectada o de redes próximas:

- bajadas de tensión durante el tiempo de la eliminación del defecto, de algunos milisegundos a varias centenas de milisegundos;
- desconexión de una parte más o menos importante de la instalación, según el esquema y la selectividad de sus protecciones;
- inestabilidad dinámica y/o pérdida de sincronismo de las máquinas;
- perturbaciones en los circuitos de mando y control;
- etc.

1.2 Establecimiento de la intensidad de cortocircuito

Una red simplificada se reduce a una fuente de tensión alterna constante, un interruptor, una impedancia Z_{cc} , que representa todas las impedancias situadas aguas arriba del interruptor, y una impedancia Z_s de la carga (figura 6).

En realidad, la impedancia del generador está compuesta de todo lo que hay aguas arriba del cortocircuito, incluidas las redes de las diversas tensiones (AT, BT) y el conjunto de conductores serie, con sus diferentes secciones y longitudes.

En el esquema de la figura 6, con el interruptor cerrado, circula por la red la intensidad de servicio I_s .

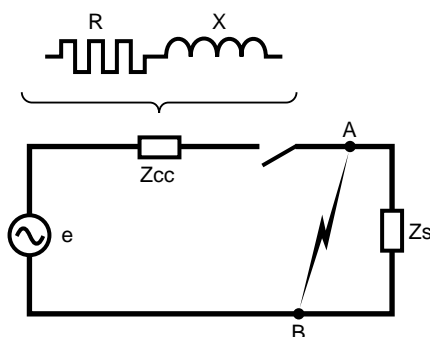


Fig. 6: Esquema simplificado de una red.

Cuando se produce un defecto de impedancia despreciable entre los puntos A y B, aparece una intensidad de cortocircuito, I_{cc} , muy elevada, limitada únicamente por la impedancia Z_{cc} .

La intensidad I_{cc} se establece siguiendo un régimen transitorio en función de las reactancias X y de las resistencias R que son las componentes de la impedancia Z_{cc} :

$$Z_{cc} = \sqrt{R^2 + X^2}$$

En una distribución de potencia, la reactancia $X = L\omega$ es generalmente mucho mayor que la resistencia R , y la razón R/X está entre 0,10 y 0,3. Este valor sigue siendo prácticamente igual para valores bajos del $\cos \phi_{cc}$ (factor de potencia durante el cortocircuito), o sea:

$$\cos \phi_{cc} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}}$$

Sin embargo, el régimen transitorio de establecimiento de una corriente de cortocircuito depende normalmente de la distancia del punto de defecto a los alternadores. Esta distancia no implica necesariamente una distancia geográfica, sino que se sobreentiende que las impedancias de los alternadores son inferiores a las de las conexiones entre ellos y el punto de defecto.

Defecto alejado de los alternadores

Es el caso más frecuente. Entonces, el régimen transitorio es el resultante de la aplicación a un circuito autoinductivo de una tensión:

$$e = E \cdot \sin(\omega \cdot t + \alpha)$$

Así, la intensidad i es la suma de dos componentes: $i = i_a + i_c$.

■ La una (i_a) es alterna y senoidal:

$$i_a = I \cdot \sin(\omega \cdot t + \alpha),$$

en donde:

$$I = \text{intensidad máxima} = \frac{E}{Z_{cc}}$$

α = ángulo eléctrico que caracteriza el desfase en el tiempo entre el instante inicial del defecto y el origen de la onda de tensión.

■ La otra (i_c) es una componente unidireccional:

$$i_c = -I \cdot \sin \alpha \cdot e^{-\frac{R}{L} t}$$

Su valor inicial depende de α , y su amortiguamiento es tanto más rápido cuanto mayor es la relación R/L .

En el instante inicial del cortocircuito, i es nula por definición (puesto que el valor de la intensidad de servicio I_s es despreciable), por lo que:

$$i = i_a + i_c = 0$$

La **figura 7** nos muestra la representación gráfica de i mediante la suma algebraica de los valores de las ordenadas de sus 2 componentes, i_a e i_c .

La **figura 8** presenta los dos casos extremos posibles de establecimiento de una corriente de cortocircuito I_{cc} , que, para facilitar la comprensión, se representan con una tensión alterna monofásica.

El factor $e^{-\frac{R}{L} t}$ es tanto mayor cuanto menor es el amortiguamiento de la componente unidireccional, es decir, la razón R/L o R/X . Es pues necesario calcular i_p para determinar el poder de cierre de los interruptores automáticos a instalar y también para definir los esfuerzos electrodinámicos que deberá soportar el conjunto de la instalación.

Su valor se deduce del valor eficaz de la corriente de cortocircuito simétrica I_a mediante la relación:

$$i_p = K \cdot \sqrt{2} \cdot I_a, \text{ en la que el coeficiente } K \text{ viene}$$

dado por la curva de la **figura 9** en función de la razón R/X o R/L .

Defecto en la proximidad de los alternadores

Cuando el defecto se produce muy cerca del alternador que alimenta el circuito afectado, la variación de la impedancia del alternador, que ahora pasará a ser preponderante, provoca la amortiguación de la corriente de cortocircuito.

En efecto, en este caso, el régimen transitorio de establecimiento de la corriente se complica por la variación de la f.e.m. (fuerza electromotriz) resultante del cortocircuito. Como simplificación, consideramos el valor de la f.e.m. constante, pero la reactancia interna

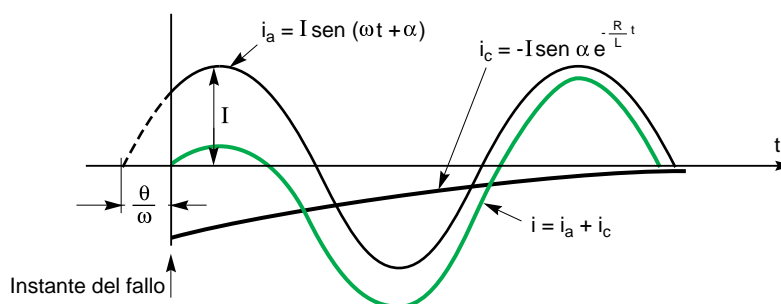
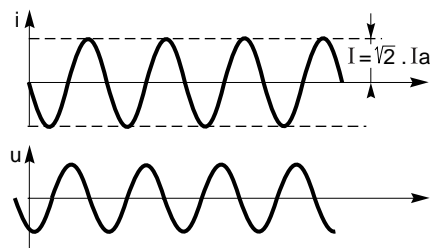
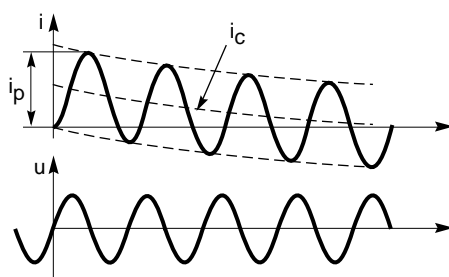


Fig. 7: Representación gráfica y descomposición de la corriente de un cortocircuito producido en un punto alejado del alternador.

a) simétrico



b) asimétrico



Puesto que el instante de aparición del defecto o de cierre está caracterizado, con relación al valor de la tensión de la red, por su ángulo de desfase α (aparición del defecto), la tensión se puede expresar como: $u = E \sin(\omega t + \alpha)$.

La evolución de la corriente es de la forma:

$$i = \frac{E}{Z} \left[\sin(\omega t + \alpha - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{R}{L}t} \right]$$

con sus dos componentes: una alterna senoidal, desfasada φ respecto a la tensión, y la otra, unidireccional, tendiendo a 0 cuando t tiende a infinito.

De donde, los dos casos extremos de α son:

■ $\alpha = \varphi \approx \frac{\pi}{2}$, o «régimen simétrico» (a):

La corriente de defecto es de la forma:

$$i = \frac{E}{Z} \sin \omega \cdot t, \text{ que, desde el principio, tiene los}$$

mismos valores que en régimen permanente, con un valor pico E/Z .

■ $\alpha = 0$ «régimen asimétrico» (b).

La corriente de defecto es de la forma:

$$i = \frac{E}{Z} \left[\sin(\omega \cdot t - \varphi) - \sin \varphi \cdot e^{-\frac{R}{L}t} \right]$$

Así, su primer valor de cresta, i_p , es función de φ y por tanto, de la relación $R/X = \cos \varphi$ del circuito.

Fig. 8: Presentación gráfica de los dos casos extremos de una corriente de cortocircuito, simétrica y asimétrica.

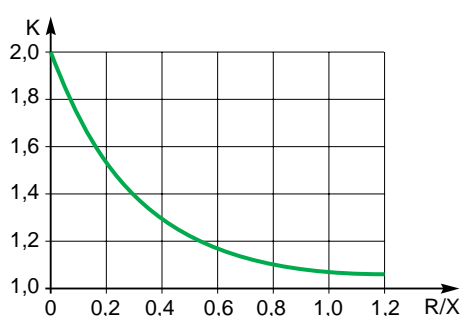


Fig. 9: Variación del factor K en función de R/X o R/L (CEI 909).

de la máquina como variable; esta reactancia evoluciona en tres etapas o estados:

■ **el subtransitorio:** corresponde a los 10 ó 20 primeros milisegundos del defecto,

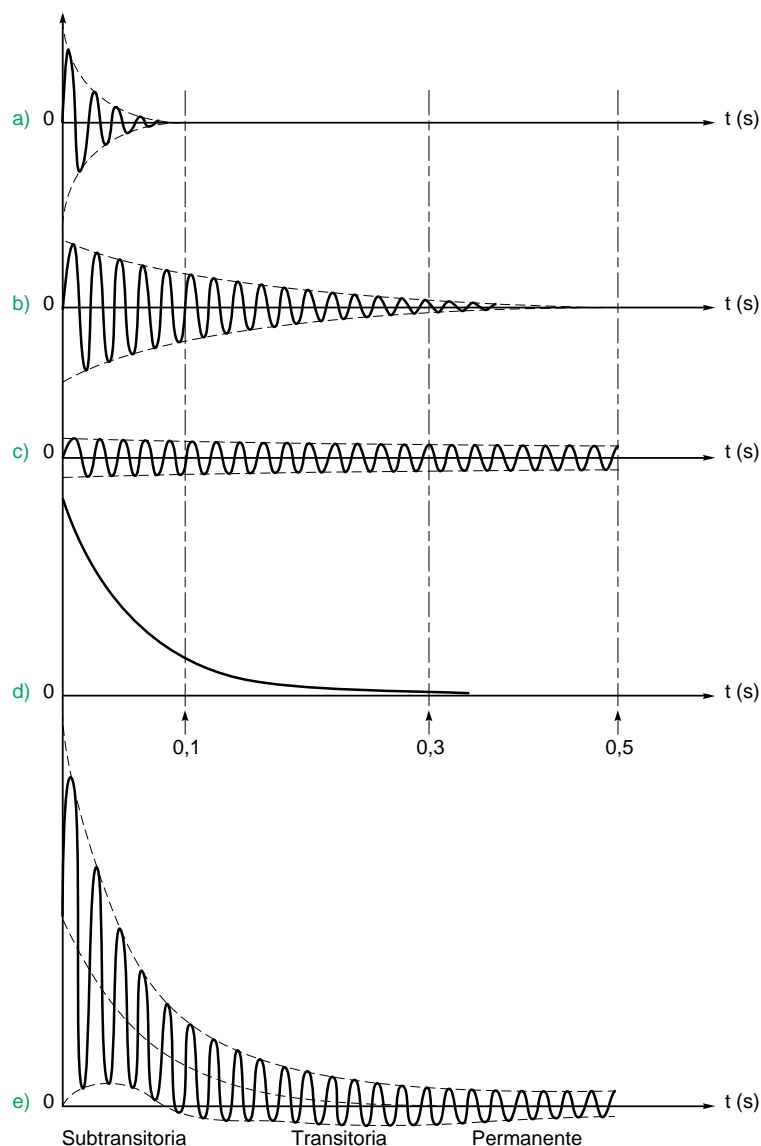
■ **el transitorio:** a continuación del anterior y que se prolonga hasta 500 milisegundos,

■ y después, **el permanente** o reactancia síncrona.

Nótese que esta reactancia, a cada período, va tomando un valor cada vez mayor, según el orden indicado: la reactancia subtransitoria es inferior a la transitoria y ésta inferior a la permanente. Esta intervención sucesiva de las tres reactancias provoca una disminución progresiva de la intensidad de cortocircuito,

- las tres componentes alternas (subtransitoria, transitoria y permanente),
- y, cuarta, la componente unidireccional que resulta del establecimiento de la corriente en el circuito (inductivo).

■ en BT, como consecuencia de la velocidad de actuación de los aparatos de corte, el conocimiento de la corriente de cortocircuito subtransitoria, denominada I_k'' , y de la



a) la reactancia subtransitoria
b) la reactancia transitoria
c) la reactancia permanente
d) la componente unidireccional

Nótese que la reactancia del alternador disminuye más deprisa que la componente unidireccional. Este fenómeno, poco frecuente, puede representar serios problemas de corte y, además, provocar la saturación de los circuitos magnéticos ya que la corriente no pasa por cero sino después de varios periodos.

amplitud máxima de cresta asimétrica, i_p , es suficiente para la determinación del poder de corte (PdC) de los aparatos de protección y de los esfuerzos electrodinámicos que soportará el circuito,

■ por el contrario, en distribución BT de potencia y en MT, es frecuente utilizar la corriente de cortocircuito transitoria si la ruptura o interrupción se produce antes de que llegue a aparecer la corriente de cortocircuito permanente. En este caso, es interesante introducir la corriente de cortocircuito cortada, denominada I_b , que es la que determina el PdC de los interruptores automáticos temporizados o retardados. I_b es el valor de la

corriente de cortocircuito en el instante del corte efectivo, y, por tanto, después de un tiempo t desde el establecimiento del cortocircuito, siendo $t = t_{\min}$. El tiempo t_{\min} [tiempo muerto mínimo] es la suma del retardo (temporización) mínimo de funcionamiento del relé de protección y del tiempo de apertura más corto del interruptor automático al que está asociado. Se trata del menor tiempo transcurrido entre la aparición de la corriente de cortocircuito y la primera separación de los contactos de uno de los polos del aparato de maniobra.

La **figura 11** representa las diferentes corrientes de cortocircuito así definidas.

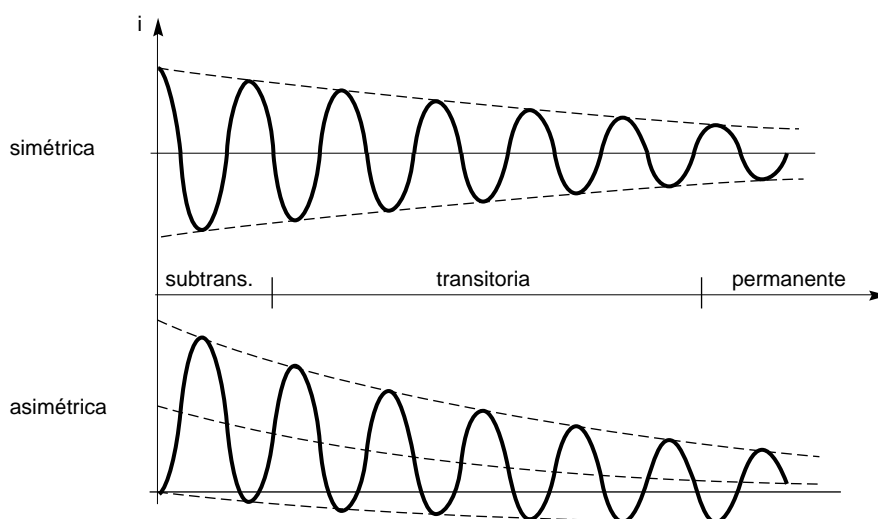


Fig. 11: Las corrientes de un cortocircuito cerca de un alternador (trazado esquemático).

1.3 Normas y cálculos de las I_{cc}

Las normas proponen diversos métodos:

■ La guía práctica C 15-105 que completa la NF C 15-100 (instalaciones BT alimentadas en corriente alterna) presenta cuatro métodos:

□ el método de las «impedancias», que permite calcular las corrientes de defecto en cualquier punto de una instalación, con una precisión aceptable. Consiste en sumar separadamente las diferentes resistencias y reactancias del bucle del defecto, añadiendo

después también los generadores, hasta el punto considerado, calculando también la impedancia correspondiente. La I_{cc} se obtiene aplicando la ley de Ohm:

$$I_{cc} = U_n / \sum(Z)$$

Para aplicar este método es imprescindible conocer todas las características de los diferentes elementos del bucle de defecto (fuentes y conductores).

□ el método de «composición», que se puede utilizar cuando no se conocen las características de la alimentación. La impedancia aguas arriba del circuito considerado se calcula a partir una estimación de la corriente de cortocircuito en su origen.

El $\cos \varphi_{cc} = R/Z$ se toma igual tanto en el origen del circuito como en el punto del defecto. En otras palabras, consiste en admitir que las impedancias elementales de dos partes sucesivas de la instalación tienen los valores de sus argumentos suficientemente próximos como para justificar la sustitución de las sumas vectoriales de las impedancias por sumas algebraicas de las mismas. Esta aproximación permite obtener el valor del módulo de las corrientes de cortocircuito, con una aproximación suficiente para calcular el circuito.

Este método aproximado sólo se aplica a instalaciones de potencia inferior a 800 kVA.

□ el método llamado «convencional», que permite calcular las corrientes de cortocircuito mínimas y las corrientes de defecto en el extremo de una red, sin conocer las impedancias o la I_{cc} de la instalación aguas arriba del circuito considerado.

Se basa en la hipótesis de que la tensión en el origen del circuito, durante el tiempo de cortocircuito o defecto, es igual al 80% de la tensión nominal.

Este método no tiene en cuenta la resistencia de los conductores para secciones importantes; se aplica un coeficiente corrector para incluir su inductancia (1,5 para 150 mm², 1,20 para 185 mm², ...).

Este método se usa sobre todo para los circuitos finales suficientemente alejados de las fuentes de alimentación (red o grupo).

□ el método llamado «simplificado» (detallado en la misma guía) que, utilizando unas tablas

con diversas hipótesis simplificadas, da directamente, para cada sección de conductor:

- la corriente asignada del dispositivo, que asegura la protección contra las sobrecargas,
- las longitudes máximas de conductores protegidos contra contactos indirectos,
- las longitudes admisibles, teniendo en cuenta las caídas de tensión.

En realidad, estas tablas están confeccionadas con los resultados de los cálculos obtenidos al aplicar los métodos de composición y convencional.

Este método permite además determinar las características de un circuito que forma parte de una instalación ya existente cuyas características no se conocen suficientemente. Se aplica directamente a las instalaciones BT, y con coeficientes correctores, si la tensión no es 230/400 V.

■ La norma CEI 909 (VDE 0102) se aplica a todas las redes, radiales o malladas, hasta 230 kV.

Basada en el teorema de Thevenin, consiste en calcular una fuente de tensión equivalente en el punto de cortocircuito, para, seguidamente, determinar la corriente en este mismo punto. Todas las alimentaciones de la red y las máquinas sincrónicas y asíncronas se sustituyen por sus impedancias (directa, inversa y homopolar). Con este método se desprecian todas las capacidades de línea y las admitancias en paralelo de las cargas no giratorias, salvo las del sistema homopolar.

■ Existen otros métodos que utilizan el principio de superposición y necesitan un cálculo previo de la corriente de carga. Merece especial mención la norma CEI 865 (VDE 0103) que se basa en el cálculo de la corriente de cortocircuito térmicamente equivalente.

1.4 Métodos presentados en este Cuaderno Técnico

En este Cuaderno Técnico se estudian particularmente dos métodos de cálculo de corrientes de cortocircuito en redes radiales:

■ uno, de uso reservado a redes BT, consiste en el método de las impedancias. Es interesante por la precisión que permite obtener y por su aspecto didáctico puesto que

necesita que se tengan en cuenta la casi totalidad de las características del circuito considerado,

■ el otro, utilizado sobre todo en AT, es el de la CEI 909; se emplea por su precisión y su aspecto analítico. Más técnico, emplea el principio de las componentes simétricas.

1.5 Las hipótesis de partida

Para estos cálculos de corrientes de cortocircuito se necesitan hipótesis que justifiquen la validez de las expresiones empleadas. Normalmente, estas hipótesis, simplificadoras y que introducen aproximaciones justificadas, hacen más comprensibles los fenómenos físicos y, por tanto, el cálculo de las corrientes de cortocircuito, manteniendo una precisión aceptable y por exceso.

Las hipótesis empleadas en este Cuaderno Técnico son:

- la red considerada es radial y su tensión nominal está comprendida entre la BT y la AT (sin rebasar los 230 kV, límite impuesto por la norma CEI 909),
- la corriente de cortocircuito, al producirse un cortocircuito trifásico, se supone establecida simultáneamente en las tres fases,
- durante el cortocircuito, el número de fases afectadas no se modifica: un defecto trifásico

sigue siendo trifásico y un defecto fase-tierra sigue siendo fase-tierra,

- durante todo el tiempo del cortocircuito, tanto las tensiones que han provocado la circulación de corriente como la impedancia de cortocircuito no varían de forma significativa,
- los reguladores o conmutadores de tomas de los transformadores se suponen situados en posición intermedia (en el caso de un cortocircuito alejado de los alternadores, podemos ignorar las posiciones reales de los conmutadores de tomas de los transformadores),
- no se tienen en cuenta las resistencias de arco,
- se desprecian todas las capacidades de las líneas,
- se desprecian las corrientes de carga,
- se tienen en cuenta todas las impedancias homopolares.

2 Cálculo de las I_{cc} por el método de las impedancias

2.1 I_{cc} según los diferentes tipos de cortocircuito

Cortocircuito trifásico

Es el defecto que corresponde a la unión de las tres fases. La intensidad de cortocircuito I_{cc_3} es:

$$I_{cc_3} = \frac{U / \sqrt{3}}{Z_{cc}}$$

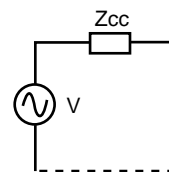
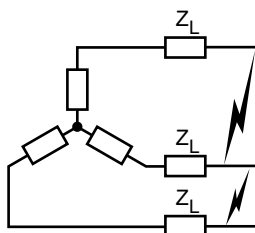
siendo:

U (tensión compuesta entre fases) la que corresponde a la tensión de vacío del transformador, cuyo valor es superior entre un

3% y 5% a la tensión en bornes de la carga. Por ejemplo, en las redes a 390 V, la tensión compuesta que se considera es $U = 410$ V, y como tensión simple, $U / \sqrt{3} = 237$ V.

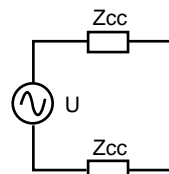
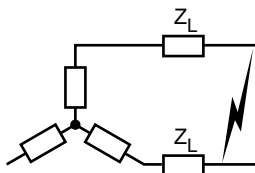
El cálculo de la intensidad de cortocircuito se reduce entonces al cálculo de la impedancia Z_{cc} , impedancia equivalente a todas las impedancias (de la fuente y las líneas) recorridas por I_{cc} desde el generador hasta el punto de defecto (figura 12). Es, de hecho, la impedancia «directa» por fase:

Defecto trifásico



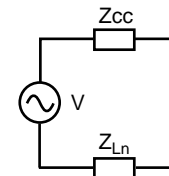
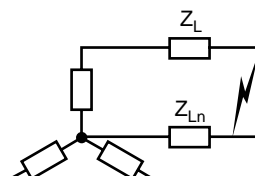
$$I_{cc_3} = \frac{U / \sqrt{3}}{Z_{cc}}$$

Defecto bifásico



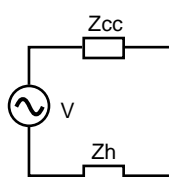
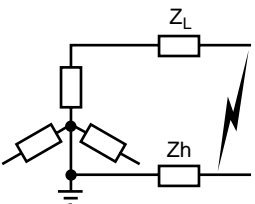
$$I_{cc_2} = \frac{U}{2 \cdot Z_{cc}}$$

Defecto monofásico



$$I_{cc_1} = \frac{U / \sqrt{3}}{Z_{cc} + Z_{Ln}}$$

Defecto a tierra



$$I_{cc_n} = \frac{U / \sqrt{3}}{Z_{cc} + Z_h}$$

Fig. 12: Las diferentes corrientes de cortocircuito.

$$Z_{cc} = \sqrt{(\sum R)^2 + (\sum X)^2}$$

siendo:

$\sum R$ = suma de todas las resistencias en serie,

$\sum X$ = suma de todas las reactancias en serie.

Se considera normalmente que el defecto trifásico es el que provoca las corrientes más elevadas. En efecto, la corriente de defecto, en el esquema equivalente a un sistema polifásico, sólo está limitada por la impedancia de una fase bajo la tensión simple de la red. El cálculo de I_{cc3} es pues indispensable para elegir los materiales (intensidades y esfuerzos electrodinámicos máximos a soportar).

Cortocircuito bifásico aislado

Corresponde a un defecto entre dos fases, alimentado por una tensión compuesta U .

La intensidad I_{cc2} que circulará es inferior a la provocada por un defecto trifásico:

$$I_{cc2} = \frac{U}{2 \cdot Z_{cc}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{cc3} \approx 0,86 I_{cc3}$$

Cortocircuito monofásico aislado

Corresponde a un defecto entre una fase y el neutro, alimentado por una tensión simple

$$V = U / \sqrt{3}$$

La intensidad I_{cc1} , que circulará en este caso será:

$$I_{cc1} = \frac{U / \sqrt{3}}{Z_{cc} + Z_{LN}}$$

En algunos casos concretos de defecto monofásico, la impedancia homopolar del generador es menor que Z_{cc} (por ejemplo, en los bornes de un transformador en conexión estrella-zig zag o de un alternador en régimen subtransitorio). En este caso, la intensidad monofásica puede llegar a ser mayor que la de un defecto trifásico.

Cortocircuito a tierra (monofásico o bifásico)

Este tipo de defecto provoca la intervención de la impedancia homopolar Z_0 .

Salvo en presencia de máquinas rotativas, en las que la impedancia homopolar se encuentra reducida, la intensidad I_{cc} que circulará es siempre inferior a la del defecto trifásico.

El cálculo de esta intensidad puede ser necesario según el régimen de neutro (esquema de conexión a tierra) para la elección de los niveles de regulación de los dispositivos de protección homopolar (AT) o diferencial (BT).

Tabla resumen de las corrientes de cortocircuito (figura 12).

2.2 Determinación de las diversas impedancias de cortocircuito

El principio de este método está basado en determinar las corrientes de cortocircuito a partir de la impedancia que representa el «circuito» recorrido por la corriente del defecto. Esta impedancia se calcula una vez se han totalizado separadamente las diferentes resistencias y reactancias del circuito del defecto, incluida la fuente de alimentación, hasta el punto considerado.

(Los números ① permiten relacionar las explicaciones del texto con el ejemplo incluido al final del capítulo).

Impedancias de la red

■ impedancias de la red aguas arriba

En la mayor parte de los cálculos no se va más allá del punto de suministro de energía. El conocimiento de la red aguas arriba se limita generalmente a las indicaciones

facilitadas por el distribuidor, es decir, únicamente a la potencia de cortocircuito S_{cc} (en MVA) en el punto de conexión a la red.

La impedancia equivalente a la red aguas arriba es:

$$\textcircled{1} \quad Z_a = \frac{U^2}{S_{cc}}$$

siendo U la tensión compuesta de la red, en vacío.

La resistencia y la reactancia del circuito aguas arriba se deducen a partir de R_a/Z_a en AT, mediante:

$$R_a/Z_a \approx 0,3 \text{ en } 0,6 \text{ kV,}$$

$$R_a/Z_a \approx 0,2 \text{ en } 20 \text{ kV,}$$

$$R_a/Z_a \approx 0,1 \text{ en } 150 \text{ kV,}$$

ahora bien: $X_a = \sqrt{Z_a^2 - R_a^2}$, de donde:

$$\frac{X_a}{Z_a} = \sqrt{1 - \left(\frac{R_a}{Z_a}\right)^2}$$

② Para 20 kV, se tiene por tanto que

$$\frac{X_a}{Z_a} = \sqrt{1 - (0,2)^2} = 0,980$$

$$X_a = 0,980 Z_a,$$

y de ahí la aproximación $X_a \approx Z_a$.

■ Impedancia interna del transformador

Esta impedancia se calcula a partir de la tensión de cortocircuito u_{cc} expresada en %:

$$\textcircled{3} Z_T = u_{cc} \cdot \frac{U^2}{S_n}$$

siendo:

U = tensión compuesta, en vacío, del transformador,

S_n = potencia aparente del transformador,

$U \cdot u_{cc}$ = tensión que debemos aplicar al primario del transformador para que el secundario sea recorrido por la intensidad nominal I_n , estando los bornes del secundario BT en cortocircuito.

Para los transformadores de distribución MT/BT, las normas (HD 428.1S1) fijan los valores de u_{cc} (figura 13). Es importante destacar que la precisión de estos valores influye directamente en el cálculo de la I_{cc} , puesto que un error de $x\%$ sobre u_{cc} induce a un error del mismo orden ($x\%$) sobre Z_T .

④ En general $R_T \ll X_T$, del orden de 0,2 X_T y la impedancia interna de los transformadores puede asimilarse a la reactancia X_T . Para pequeñas potencias, es necesario el cálculo de Z_T ya que la relación R_T/X_T es mayor. Entonces, esta resistencia se calcula a partir de las pérdidas por efecto Joule (W) en los arrollamientos:

$$W = 3 \cdot R_T \cdot I_n^2 \Rightarrow R_T = \frac{W}{3 \cdot I_n^2}$$

Notas:

⑤

□ cuando se conectan en paralelo n transformadores de potencias iguales, sus valores de impedancia interna y de resistencia o de reactancia deben dividirse por n ,

□ debe prestarse una atención especial a los transformadores especiales: por ejemplo, los transformadores de grupos rectificadores tienen valores de u_{cc} que llegan normalmente al 10 ó 12%, para limitar la corriente de cortocircuito.

Al tomar en cuenta la impedancia aguas arriba del transformador y la impedancia interna de éste, la corriente de cortocircuito se expresa por:

$$I_{cc} = \frac{U}{\sqrt{3} (Z_a + Z_T)}$$

En primera aproximación, Z_a y Z_T son asimilables a sus reactancias respectivas. En este caso, la impedancia de cortocircuito Z_{cc} es igual a su suma algebraica.

En este caso, la impedancia de la red aguas arriba puede despreciarse, con lo que el valor de la corriente es:

$$I'_{cc} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z_T}$$

El error relativo es:

$$\frac{\Delta I_{cc}}{I_{cc}} = \frac{I'_{cc} - I_{cc}}{I_{cc}} = \frac{Z_a}{Z_T} = \frac{U^2 / S_{cc}}{u_{cc} \cdot U^2 / S_n}$$

o sea:

$$\frac{\Delta I_{cc}}{I_{cc}} = \frac{100}{u_{cc}} = \frac{S_n}{S_{cc}}$$

La figura 14 indica el nivel de error, por exceso, que representa el hecho de despreciar la impedancia de la red aguas arriba en el cálculo de I_{cc} . Esta gráfica muestra claramente que podemos despreciar esta impedancia para redes en las que la potencia de cortocircuito S_{cc} es importante con relación a la potencia S_n del transformador. Por ejemplo: con $S_{cc}/S_n = 300$, el error es del orden del 5%.

■ Impedancia de las conexiones

La impedancia de las conexiones Z_L depende de sus componentes, resistencia y reactancia unitarias, y de su longitud.

□ la resistencia unitaria R_L de las líneas áreas, cables y juegos de barras se calcula con la ecuación:

$$R_L = \frac{\rho}{S}$$

| | | | | | | |
|---|-------|-----|------|------|------|------|
| Potencia del transformador MT/BT (en kVA) | ≤ 630 | 800 | 1000 | 1250 | 1600 | 2000 |
| Tensión de cortocircuito u_{cc} (en %) | 4 | 4,5 | 5 | 5,5 | 6 | 7 |

Fig. 13: Tensión de cortocircuito u_{cc} normalizada para los transformadores MT/BT de distribución pública.

donde:

S = sección del conductor,

ρ = su resistividad, teniendo en cuenta que el valor a adoptar depende de la corriente de cortocircuito calculada, máxima o mínima.

⑥ La tabla de la **figura 15** da estos valores para cada uno de los casos probables.

En realidad, en BT y para conductores de sección inferior a 150 mm², sólo se tiene en cuenta el valor de la resistencia ($R_L < 0,15 \text{ m}\Omega/\text{m}$, siendo $S > 150 \text{ mm}^2$).

□ la reactancia unitaria de las líneas aéreas, cables y juegos de barras, se calcula mediante:

$$X_L = L \cdot \omega = \left[15,7 + 144,44 \log \left(\frac{d}{r} \right) \right]$$

expresada en m Ω /km para un sistema de cables monofásicos o trifásicos en triángulo, con dimensiones en mm de:

r = radio de los conductores,

d = distancia media entre los conductores;

aquí, Log = logaritmo decimal.

Para las líneas aéreas, la reactancia crece ligeramente con la separación entre

conductores (como $\log \left(\frac{d}{t} \right)$) y, por tanto, con

la tensión de utilización.

⑦ Valores medios que se pueden recordar:

X = 0,3 Ω /km (líneas BT o MT),

X = 0,4 Ω /km (líneas MT o AT).

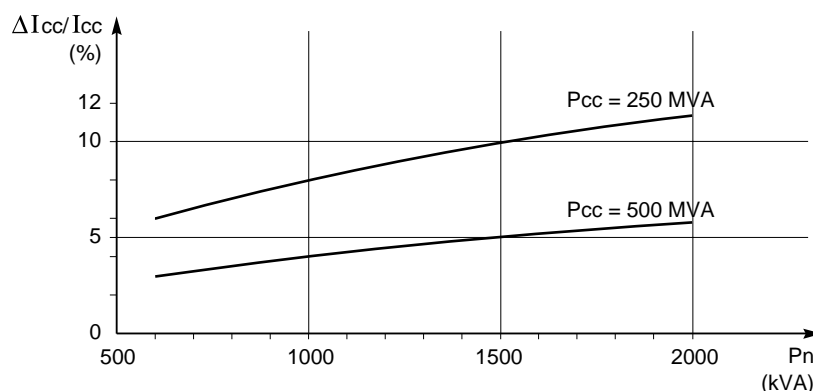


Fig. 14: Error previsto en el cálculo de la corriente de cortocircuito cuando se desprecia la impedancia de la red aguas arriba Z_a .

| Regla | Resistividad (*) | Valor de la resistividad ($\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$) | | Conductores afectados |
|--|---------------------------|--|----------|---|
| | | Cobre | Aluminio | |
| Corriente máxima de cortocircuito | $\rho_1 = 1,25 \rho_{20}$ | 0,0225 | 0,036 | FASE-N |
| Corriente mínima de cortocircuito | $\rho_1 = 1,5 \rho_{20}$ | 0,027 | 0,043 | FASE-N |
| Corriente de defecto en los esquemas TN e IT | $\rho_1 = 1,25 \rho_{20}$ | 0,0225 | 0,036 | FASE-N (**) PE-PEN |
| Caída de tensión | $\rho_1 = 1,25 \rho_{20}$ | 0,0225 | 0,036 | FASE-N (*) |
| Corriente de sobreintensidad para la verificación de las sollicitaciones térmicas de los conductores | $\rho_1 = 1,5 \rho_{20}$ | 0,027 | 0,043 | Fase-Neutro PEN-PE si incorporado en un mismo cable multiconductores |
| | $\rho_1 = 1,5 \rho_{20}$ | 0,0225 | 0,036 | PE separado |


(*) ρ_{20} resistividad de los conductores a 20 °C: 0,018 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ para el cobre y 0,029 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ aluminio.

(**) N la sección del conductor de neutro es inferior a la de los conductores de fase.



Fig. 15: Valores de la resistividad ρ de los conductores a tomar en consideración según la corriente de cortocircuito calculada, máximo o mínimo.



Para los cables, según su sistema de instalación, la tabla de la **figura 16** recoge los diversos valores de reactancia en BT.

Los valores medios a aplicar son:

– 0,08 mΩ/m para cable trifásico (); en

MT, este valor es un poco mayor, pudiendo estar comprendido entre 0,1 y 0,15 Ωm/m,

⑧ – 0,09 mΩ/m para cables unipolares contiguos (en línea  o en triángulo ),

⑨ – 0,15 mΩ/m, por defecto, para JdB () o cables unipolares separados (); para los JdB prefabricados, tipo «sandwich» (como el Canalis de Telemecanique) esta reactancia es mucho menor).

Notas:

□ la impedancia de las conexiones cortas entre el punto de distribución y el transformador MT/BT puede despreciarse si se admite un error, en exceso, en la corriente de cortocircuito; error tanto mayor cuanto mayor sea la potencia del transformador,

□ la capacidad de los cables respecto a tierra (modo común), de 10 a 20 veces mayor que la de las líneas, debe de tenerse en cuenta en los casos de defecto a tierra. A título indicativo, la capacidad de un cable trifásico MT, de 120 mm² de sección, es del orden de 1 μF/km; pero la corriente capacitiva se mantiene baja, del orden de unos 5 A/km para una tensión de 20 kV.

■ la resistencia o la reactancia de las conexiones pueden despreciarse.

Si una de las magnitudes R_L o X_L es mucho menor que la otra, puede despreciarse, siendo despreciable el error sobre la impedancia; por

ejemplo, con una relación de 3 entre R_L y X_L , el error sobre Z_L es del 5,1%.

La utilización de las curvas de R_L y de X_L de la **figura 17** permite deducir las secciones de los cables para las que la impedancia puede considerarse igual a la resistencia o a la reactancia.

Ejemplos:

□ 1^{er} caso: cable trifásico, a 20 °C, con conductores de **cobre**.

Su reactancia es igual a 0,08 mΩ/m.

Las curvas de R_L y de X_L (**figura 17**) nos muestran que la impedancia Z_L admite dos asíntotas: la recta R_L para las secciones pequeñas y la recta $X_L = 0,08$ mΩ/m para las mayores. Para éstas es posible considerar

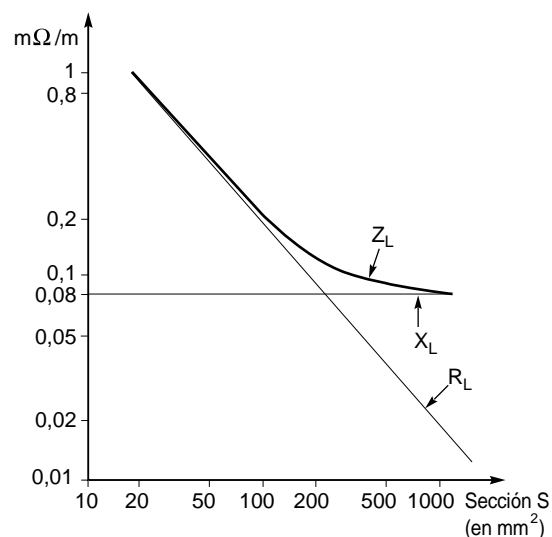


Fig. 17: Impedancia Z_L de un cable trifásico, a 20 °C, con conductores de cobre.






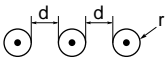
| Tipo de instalación | Juego de barras | Cable trifásico | Cables unipolares separados | Cables unipolares colocados en triángulo | 3 cables en línea juntos | 3 cables en línea separados «d»: |
|--|---|---|---|--|---|---|
| | | | | | | d = 2r d = 4r |
| Esquema |  |  |  |  |  |  |
| Reactancia unitaria valores extremos en mΩ/m | 0,15 | 0,08 | 0,15 | 0,085 | 0,095 | 0,145 0,19 |
| Reactancia unitaria valores extremos en mΩ/m | 0,12-0,18 | 0,06-0,1 | 0,1-0,2 | 0,08-0,09 | 0,09-0,1 | 0,14-0,15 0,18-0,20 |

Fig. 16: Valores de la reactancia de los cables según el tipo de instalación.

que la curva de la impedancia Z_L se confunde con sus asíntotas. La impedancia del cable en cuestión es entonces comparable, con un error inferior al 5,1%, a:

- una resistencia, para las secciones menores de 74 mm²,
- una reactancia, para las secciones mayores de 660 mm².

□ 2º caso: cable trifásico, a 20 °C, pero con conductores de **aluminio**.

Como en el caso anterior, la curva de impedancia Z_L , se confunde con sus asíntotas, pero sólo para inferiores a 120 mm² o superiores a 1000 mm² (curvas no representadas).

Impedancia de las máquinas giratorias

■ Alternadores síncronos

Las impedancias de las máquinas se expresan generalmente bajo la forma de un porcentaje, como:

$I_{cc} / I_n = 100 / x$ (donde x es equivalente a la u_{cc} de los transformadores), o sea:

$$⑩ \quad Z = \frac{x}{100} \cdot \frac{U^2}{S_n} \quad \text{donde}$$

U = tensión compuesta del alternador en vacío,
S_n = potencia aparente (en VA) del alternador.

⑪ Además, para valores bajos de R/X, del orden de 0,05 a 0,1 en AT-A y de 0,1 a 0,2 en BT, los valores de la impedancia Z y de la reactancia X se confunden. Los valores de x vienen dados en la tabla de la **figura 18** para los turboalternadores de rotor liso y para los

alternadores «hidráulicos» de polos salientes (de baja velocidad).

Al analizar esta tabla puede sorprender que las reactancias permanentes de cortocircuito rebasen el valor del 100% (lo que supone que $I_{cc} < I_n$). Pero la intensidad de cortocircuito es esencialmente inductiva y requiere toda la energía reactiva que puede suministrar el inductor, también él sobreexcitado, precisamente cuando la intensidad nominal transporta sobre todo la potencia activa entregada por la turbina de arrastre (cos φ de 0,8 a 1).

■ Motores y compensadores asíncronos

El comportamiento de estas máquinas en cortocircuito es semejante al de los alternadores;

⑫ Suministran a la red una intensidad que es función de su reactancia en % (**figura 19**).

■ Motores asíncronos

Un motor asíncrono, separado bruscamente de la red, mantiene en sus bornes una tensión que se amortigua en pocas centésimas de segundo.

Cuando en sus bornes se produce un cortocircuito, el motor genera una intensidad que se amortigua mucho más rápidamente, con una constante de tiempo de aproximadamente:

□ 2/100 segundos para los motores a jaula simple de hasta 100 kW,

□ 3/100 segundos para los motores de doble jaula y además, de más de 100 kW,

□ de 3 a 10/100 segundos para los grandes motores MT (1000 kW) de rotor bobinado.

| | Reactancia subtransitoria | Reactancia transitoria | Reactancia permanente |
|---------------------------------|---------------------------|------------------------|-----------------------|
| Turboalternadores | 10-20 | 15-25 | 150-230 |
| Alternadores de polos salientes | 15-25 | 25-35 | 70-120 |

Fig. 18: Valores de las reactancias de alternadores en %.

| | Reactancia subtransitoria | Reactancia transitoria | Reactancia permanente |
|---------------------------|---------------------------|------------------------|-----------------------|
| Motores de alta velocidad | 15 | 25 | 80 |
| Motores lentos | 35 | 50 | 100 |
| Compensadores | 25 | 40 | 160 |

Fig. 19: Reactancias en % de motores y compensadores síncronos.

El motor asíncrono es, pues, ante un cortocircuito, un generador al que podemos atribuir una impedancia (sólo subtransitoria) del 20% al 25%.

Nos encontramos con el problema que plantea la existencia de gran cantidad de motores de pequeña potencia unitaria que se hallan instalados en las redes industriales. Es difícil prever el número medio de motores en servicio que aportarán energía en el momento de un cortocircuito. Resulta un trabajo arduo e inútil calcular las corrientes individuales de cada uno de los motores, teniendo en cuenta sus impedancias de conexión. Por ello, es habitual (sobre todo en EE.UU.) considerar globalmente la contribución a la corriente total de defecto del conjunto de los motores asíncronos de una instalación BT.

⑬ Se comparan con una fuente única, que aporta al JdB una intensidad igual a I_{dm}/I_n veces la suma de las intensidades nominales de todos los motores instalados.

Otras impedancias

■ Condensadores

Una batería de condensadores, en paralelo, situada en la proximidad del punto del defecto, se descarga incrementando también la intensidad de cortocircuito.

Esta descarga oscilante amortiguada se caracteriza por una primera cresta de alto valor, que se suma a la primera cresta de la corriente de cortocircuito, si bien su frecuencia es muy superior a la de la red. Pero, según la coincidencia del instante inicial del defecto con la onda de tensión, pueden presentarse dos casos extremos:

□ si este instante coincide con un cero de tensión, la corriente de descarga de cortocircuito es asimétrica, con un primer pico de amplitud máxima,

□ por el contrario, si este instante coincide con un máximo de la tensión, la batería de condensadores entrega una intensidad que se superpone al primer pico de la corriente de defecto, de pequeño valor, puesto que es simétrica.

Por esto es poco probable que, salvo en caso de baterías muy potentes, esta superposición provoque una primera cresta de valor mayor que la corriente de cresta de un defecto asimétrico.

Por tanto, para calcular el valor máximo de la corriente de cortocircuito, no es necesario tener en cuenta la aportación de las baterías de condensadores.

Pero sin embargo, hemos de preocuparnos de los efectos de las baterías al elegir la tecnología de los interruptores automáticos.

En efecto, al abrir el circuito, los condensadores modifican considerablemente la frecuencia propia de ese circuito, por lo que inciden notablemente en los fenómenos de ruptura.

■ Aparamenta

⑭ Ciertos aparatos (interruptores automáticos, contactores con bobina de soplado, relés térmicos directos...) presentan una impedancia que puede tener su importancia. Esta impedancia sólo debe de tenerse en cuenta, para los cálculos de I_{cc} , si estos aparatos están situados inmediatamente aguas arriba de los que deben de cortar el cortocircuito detectado y de los que se quedan cerrados (interruptores automáticos selectivos).

⑮ Por ejemplo: para los interruptores automáticos BT, es correcto tomar un valor de 0,15 mΩ para su reactancia y despreciar la resistencia.

Para los aparatos de corte hay que hacer una distinción según la velocidad de apertura o corte:

□ ciertos aparatos abren muy rápidamente y reducen notablemente las corrientes de cortocircuito, son los llamados «rápidos-limitadores»; con ellos, los esfuerzos electrodinámicos y la solicitaciones térmicas que se presentan en la instalación son notablemente inferiores a los teóricos,

□ los otros aparatos, como los interruptores automáticos con retardo a la apertura, no tienen esta ventaja.

■ Arco de defecto

La corriente de cortocircuito atraviesa normalmente un arco, en el punto del defecto, cuya resistencia es apreciable y muy variable: de hecho, la caída de tensión en un arco de defecto varía entre 100 y 300 V.

En AT, este valor es despreciable respecto a la tensión de la red y el arco no tiene una influencia reductora notable de la intensidad de cortocircuito.

En BT, por el contrario, la corriente real de un defecto a través de un arco es tanto más limitada respecto al valor teórico calculado (defecto franco) cuanto más baja es la tensión de la red.

⑯ Por ejemplo, el arco creado durante un cortocircuito entre conductores o en un JdB puede reducir la intensidad de la corriente de cortocircuito presunta entre un 20% y un 50%

e incluso más del 50% para tensiones nominales interiores a 440 V. Este fenómeno tan favorable en BT para el 90% de los defectos, no puede sin embargo tenerse en cuenta para la determinación del poder de corte ya que el 10% de los defectos se producen de manera que el aparato ha de cortar un defecto franco, prácticamente sin arco. Por el contrario, hay que tenerlo en cuenta en el cálculo de la corriente mínima de cortocircuito.

■ Impedancias diversas

Hay otros elementos que pueden presentar impedancias no despreciables.

Es el caso de los filtros antiarmónicos y bobinas de choque, destinadas a limitar las corrientes de cortocircuito, que evidentemente deben de tenerse en cuenta en el cálculo, y también los transformadores de corriente de primario bobinado cuya impedancia varía según el calibre y la construcción.

2.3 Relaciones entre las impedancias de los diferentes niveles de tensión de una instalación

Impedancias en función de la tensión

La potencia de cortocircuito S_{cc} en un punto determinado de la red, viene definida por:

$$S_{cc} = U \cdot I \sqrt{3} = \frac{U^2}{Z_{cc}}$$

Esta expresión de la potencia de cortocircuito implica, por definición, que S_{cc} es invariable, en un punto determinado de la red, cualquiera que sea la tensión.

Y la expresión:

$$I_{cc3} = \frac{U}{\sqrt{3} Z_{cc}} \text{ implica que todas las}$$

impedancias deben de calcularse refiriéndolas a la tensión del punto del defecto, lo que puede comportar cierta complicación y ser fuente de errores para cálculos en redes con dos valores de tensión. Así, la impedancia de una línea AT ha de multiplicarse por el cuadrado de la inversa de la relación de transformación, para el cálculo de un defecto, lado BT del transformador:

$$Z_{BT} = Z_{AT} \left(\frac{U_{BT}}{U_{AT}} \right)^2$$

Un método simple permite evitar estas dificultades: el denominado «de las impedancias relativas» propuesto por H. Rich.

Cálculo de las impedancias relativas

Se trata de un método de cálculo que permite establecer una relación entre las impedancias de los diferentes niveles de tensión de una instalación eléctrica.

Este método se apoya sobre la convención siguiente: las impedancias (en ohmios) se dividen por el cuadrado de la tensión compuesta (en voltios) a la que es llevada la

red en el punto donde están conectadas; se obtienen valores de impedancias relativas.

■ Para las líneas y los cables, las resistencias y las reactancias relativas son:

$$R_R = \frac{R}{U^2} \text{ y } X_R = \frac{X}{U^2}$$

expresando R en ohmios y U en voltios.

■ Para los transformadores, la impedancia se expresa a partir de sus tensiones de cortocircuito u_{cc} y de sus potencias nominales S_n :

$$Z = \frac{U^2}{S_n} \times \frac{u_{cc}}{100}$$

■ Para las máquinas rotativas, la fórmula es idéntica, pero representado x la impedancia en %.

■ Para el conjunto, una vez compuestas todas las impedancias relativas, la potencia de cortocircuito se establece con:

$$S_{cc} = \frac{1}{\sum Z_R}$$

de donde se deduce la intensidad de defecto I_{cc} en el punto considerado, en el que la tensión de vacío es U :

$$I_{cc} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \sum Z_R}$$

$\sum Z_R$ representa la composición vectorial (y no la suma algebraica) de todas las impedancias relativas aguas arriba.

Por tanto $\sum Z_R$ es la impedancia relativa de la red aguas arriba, vista desde el punto de tensión U .

Así, S_{cc} es la potencia de cortocircuito en VA en el punto de tensión U .

Por ejemplo, si se considera el esquema simple de la **figura 20**:

En el punto A:
$$S_{cc} = \frac{U_{BT}^2}{Z_T \left(\frac{U_{BT}}{U_{AT}} \right)^2 + Z_C}$$

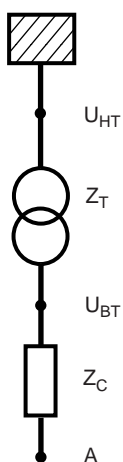


Fig. 20: Cálculo de S_{cc} en el punto A.

de donde

$$S_{cc} = \frac{1}{\frac{Z_T}{U_{AT}^2} + \frac{Z_C}{U_{BT}^2}}$$

Ejemplo de cálculo para una red con las impedancias de los generadores, red aguas arriba y transformador de alimentación y las conexiones eléctricas:

Problema

Se trata de una red a 20 kV que alimenta, a través de una línea aérea de 2 km, un centro de transformación de MT/BT y un alternador de 1 MVA que alimenta, en paralelo con la red, el JdB de este centro de transformación. Dos transformadores MT/BT, de 1000 kVA, en paralelo, alimentan el JdB de BT; a este JdB están conectadas 20 derivaciones, iguales, como la del motor M. Estos 20 motores de 50 kW están alimentados por cables idénticos y están todos en servicio en el momento del defecto.

Hay que determinar el valor de I_{cc} en los diferentes puntos de defecto señalados sobre el esquema de la red (**figura 21**):

Red aguas arriba

$U_1 = 20$ kV
 $P_{cc} = 500$ MVA

Línea aérea

3 cables, 50 mm², cobre, longitud = 2 km

Alternador

1 MVA
 $X_{subt} = 15\%$

2 transformadores

1000 kVA
secundario 237/410 V
 $u_{cc} = 5\%$

Cuadro General BT

juego de barras, 3 barras,
400 mm² por fase, de cobre, longitud = 10 m

Derivación 1

3 cables, 400 mm², aluminio unipolares
separados en una capa, longitud = 80 m

Cuadro derivación BT

Derivación 2

3 cables 35 mm², en cobre, trifásico
longitud = 30 m

Motor

50 kW (rendimiento: 0,9 cos ϕ : 0,8)
 $u_{cc} = 25\%$

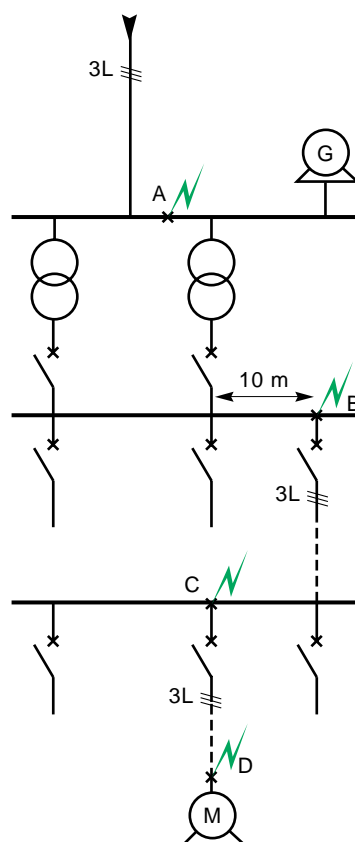


Fig. 21: El problema: calcular I_{cc} en los puntos A, B, C y D.

Solución

| Sector | Cálculos | | Resultados | |
|---|--|-----|------------|------|
| (los números ⊗ remiten a la explicación del texto) | | | | |
| 20 kV↓ | | | X (Ω) | R(Ω) |
| 1. Red aguas arriba | $Z_a = (20 \times 10^3)^2 / 500 \times 10^6$ | ① | | |
| | $X_a = 0,98 Z_a$ | ② | 0,78 | |
| | $R_a = 0,2 Z_a \approx 0,2 X_a$ | | | 0,15 |
| 2. Red aérea (50 mm ²) | $X_{c_a} = 0,4 \times 2$ | ⑦ | 0,8 | |
| | $R_{c_a} = 0,018 \times \frac{2000}{50}$ | ⑥ | | 0,72 |
| 3. Alternador | $X_A = \frac{15}{100} \times \frac{(20 \times 10^3)^2}{10^6}$ | ⑩ | 60 | |
| | $R_A = 0,1 X_A$ | ⑪ | | 6 |
| 20 kV↑ | | | X (Ω) | R(Ω) |
| Defecto en A | | | | |
| 4. Transformadores | $Z_T = \frac{1}{2} \times \frac{5}{100} \times \frac{410^2}{10^6}$ | ③ ⑤ | | |
| | $X_T \approx Z_T$ | | 4,2 | |
| | $R_T = 0,2 X_T$ | ④ | | 0,84 |
| 410 kV↓ | | | | |
| 5. Interruptor automático | $X_d = 0,15$ | ⑮ | 0,15 | |
| 6. Juego de barras (3 x 400 mm ²) | $X_B = 0,15 \times 10^{-3} \times 10$ | ⑨ | 1,5 | |
| | $R_B = 0,0225 \times \frac{10}{3 \times 400}$ | ⑥ | | ≈ 0 |
| Defecto en B | | | | |
| 7. Interruptor automático | $X_d = 0,15$ | | 0,15 | |
| 8. Derivación 1 con cables (3 x 400 mm ²) | $X_{c_1} = 0,15 \times 10^{-3} \times 80$ | | 12 | |
| | $R_{c_1} = 0,036 \times \frac{80}{3 \times 400}$ | ⑥ | | 2,4 |
| Defecto en C | | | | |
| 9. Interruptor automático | $X_d = 0,15$ | | 0,15 | |
| 10. Derivación 2 | $X_{c_1} = 0,09 \times 10^{-3} \times 30$ | ⑧ | 2,7 | |
| | $R_{c_2} = 0,0225 \times \frac{30}{35}$ | | | 19,2 |
| Defecto en D | | | | |
| 11. Motor 50 kW con cables (35 mm ²) | $X_m = \frac{25}{100} \times \frac{410^2}{[50 / (0,9 \times 0,8)] 10^3}$ | ⑫ | 605 | |
| | $R_m = 0,2 X_m$ | | | 168 |

Fig. 22: Cálculo de las impedancias.

- en A, en el JdB MT, de impedancia despreciable,
- en B, en el JdB BT, a 10 m de los transformadores,
- en C, en el JdB de un cuadro secundario BT,
- en D, en bornes de uno de los motores M.

La corriente de retorno de los motores se calcula en C y B y también en D y A.

Para este ejemplo, las reactancias X y las resistencias R se calculan para los valores de tensión de la instalación (**figura 22**); no se usa el método de las impedancias relativas.

I - Defecto en A (JdB MT)

(elementos afectados: 1, 2 y 3)

La impedancia «red + línea» está en paralelo con la del alternador; pero la de éste último, de valor mayor, podemos despreciarla:

$$X_A = 0,78 + 0,8 \approx 1,58 \, \Omega$$

$$R_A = 0,15 + 0,72 \approx 0,87 \, \Omega$$

$$Z_A = \sqrt{R_A^2 + X_A^2} \approx 1,80 \, \Omega$$

de donde

$$I_A = \frac{20 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 1,80} \approx 6415 \, \text{A}$$

I_A es la «Icc permanente». Cálculo de esta Icc (valor máximo asimétrico):

$$\frac{R_A}{X_A} = 0,55$$

que corresponde a un valor $k = 1,2$ según la curva de la **figura 9**. Con ello Icc:

$$1,2 \times \sqrt{2} \times 6415 = 10887 \, \text{A}.$$

II - Defecto en B (JdB del cuadro general BT)

[elementos afectados: (1, 2, 3) + (4, 5, 6)]

Las reactancias X y las resistencias R calculadas en MT han de «trasladarse» a la red BT, multiplicándolas por el cuadrado de la razón de las tensiones (17), o sea:

$$(410/20000)^2 = 0,42 \times 10^{-3}$$

de donde

$$X_B = [(X_A \cdot 0,42) + 4,2 + 0,15 + 1,5] \times 10^{-3}$$

$$X_B = 6,51 \text{ m}\Omega$$

y

$$R_B = [(R_A \cdot 0,42) + 0,84] \times 10^{-3}$$

$$R_B = 1,2 \text{ m}\Omega$$

Este cálculo permite observar, por una parte, la poca influencia del valor de la impedancia de la red aguas arriba de MT respecto a la de los dos transformadores en paralelo, y por otra, que la impedancia de los diez metros del JdB BT no es despreciable.

$$Z_B = \sqrt{R_B^2 + X_B^2} \approx 6,62 \text{ m}\Omega$$

$$I_B = \frac{410}{\sqrt{3} \times 6,62 \times 10^{-3}} \approx 35758 \, \text{A}$$

$$\frac{R_B}{X_B} = 0,18 \text{ que, según la tabla de la figura 9,}$$

corresponde a un valor de $k = 1,58$, por ello, Icc:

$$1,58 \times \sqrt{2} \times 35758 \approx 79900 \, \text{A}.$$

Además, si tenemos en cuenta el arco de defecto (recuérdese el cálculo (16)), I_B variará entre un máximo de 28606 A y un mínimo de 17880 A.

III - Defecto en C (JdB del cuadro secundario BT)

[elementos afectados: (1, 2, 3) + (4, 5, 6) + (7, 8)]

Hay que añadir a X_B y a R_B las reactancias y resistencias del interruptor automático y de los cables.

$$X_C = (X_B + 0,15 + 12) \times 10^{-3} = 18,67 \text{ m}\Omega$$

y

$$R_C = (R_B + 2,4) \times 10^{-3} = 3,6 \text{ m}\Omega$$

Estos valores nos permiten entender la importancia de los cables en la limitación de la Icc.

$$Z_C = \sqrt{R_C^2 + X_C^2} \approx 19 \text{ m}\Omega$$

$$I_C = \frac{410}{\sqrt{3} \times 19 \times 10^{-3}} \approx 12459 \, \text{A}$$

$$\frac{R_C}{X_C} = 0,19 \text{ que, sobre la curva de la figura 9,}$$

nos da $k = 1,55$, y por tanto Icc:

$$1,55 \times \sqrt{2} \times 12459 \approx 27310 \, \text{A}.$$

IV - Defecto en D (motor BT)

[elementos afectados: (1, 2, 3) + (4, 5, 6) + (7, 8) + (9, 10)]

Hay que añadir a X_C y a R_C las reactancias y resistencias del interruptor automático y los cables.

$$X_D = (X_C + 0,15 + 2,7) \times 10^{-3} = 21,52 \text{ m}\Omega$$

y

$$R_D = (R_C + 19,2) \cdot 10^{-3} = 22,9 \text{ m}\Omega$$

$$Z_D = \sqrt{R_D^2 + X_D^2} \approx 31,42 \text{ m}\Omega$$

$$I_D = \frac{410}{\sqrt{3} \times 31,42 \times 10^{-3}} \approx 7534 \text{ A}$$

$$\frac{R_D}{X_D} = 1,06 \text{ que, al trasladarlo sobre la curva}$$

de la **figura 9**, nos da $k \approx 1,05$. Por tanto, I_{cc} :
 $1,05 \times \sqrt{2} \times 7534 \approx \mathbf{11187 \text{ A}}$

Observamos que, en cada uno de los niveles de cálculo efectuados, la incidencia de los interruptores es despreciable respecto a los otros elementos de la red.

V - Las corrientes de retorno de los motores

Generalmente es más rápido considerar a los motores como generadores independientes que aportan sobre el defecto una «corriente de retorno» que se superpone a la corriente de defecto de la red.

■ Defecto en C

La intensidad aportada por un motor se calcula a partir de la impedancia «motor + cable»:

$$(605 + 2,7) \cdot 10^{-3} \approx 608 \text{ m}\Omega$$

$$R_M = (168 + 19,2) \cdot 10^{-3} \approx 188 \text{ m}\Omega$$

$$Z_M = 636 \text{ m}\Omega$$

de donde

$$I_M = \frac{410}{\sqrt{3} \times 636 \times 10^{-3}} \approx 372 \text{ A}$$

con lo que, para los 20 motores:

$$I_{MC} = 7440 \text{ A.}$$

En vez de este cálculo, podemos estimar (⑬)

la intensidad aportada por los motores, multiplicando por I_{dem}/I_n veces la intensidad nominal (95 A), es:

$(4,8 \times 95) \times 20 = 9120 \text{ A}$, valor que permite asegurar una protección por exceso respecto a la de I_{MC} : 7440 A.

De la relación $R/X = 0,3$ resulta $k = 1,4$ y, por tanto:

$$I_{cc} = 1,4 \times \sqrt{2} \times 7440 = \mathbf{14730 \text{ A}}$$

Así, la intensidad de cortocircuito (subtransitoria) sobre el JdB BT pasa de 12459 A a 19899 A e I_{cc} de 27310 A a 42040 A.

■ Defecto en D

La impedancia a considerar es 1/19 (19 motores en paralelo) de Z_M , incrementada por la de un cable.

$$X_{MD} = \left(\frac{608}{19} + 2,7 \right) \cdot 10^{-3} = 34,7 \text{ m}\Omega$$

$$R_{MD} = \left(\frac{188}{19} + 19,2 \right) \cdot 10^{-3} = 29 \text{ m}\Omega$$

$$Z_{MD} = 45 \text{ m}\Omega$$

de donde

$$I_{MD} = \frac{410}{\sqrt{3} \times 45 \times 10^{-3}} = 5260 \text{ A}$$

con lo que, en D, en total, tendremos:

$$7534 + 5260 = 12794 \text{ A}_{eficaces}, \text{ y una } I_{cc} \approx \mathbf{19900 \text{ A.}}$$

■ Defecto en B

Como hemos considerado en el «defecto en C», la intensidad aportada por un motor se calcula a partir de la impedancia «motor + cable»:

$$X_M = (605 + 2,7 + 12) \cdot 10^{-3} = 620 \text{ m}\Omega$$

$$R_M = (168 + 19,2 + 2,4) \cdot 10^{-3} \approx 189,6 \text{ m}\Omega$$

$$Z_M = 648 \text{ m}\Omega$$

de donde

$$I_M = \frac{410}{\sqrt{3} \times 648 \times 10^{-3}} \approx 365 \text{ A}$$

De donde, para los 20 motores: $I_{MB} = 7300 \text{ A}$.

Aquí se puede utilizar también el método de aproximación que se ha utilizado antes, (4,8 veces la intensidad nominal de un motor: 95 A) o sea 9120 A, cifra que cubre, por exceso, la calculada de I_{MB} (7300 A).

También aquí, la razón R/X es de 0,3 de donde $k = 1,4$ e

$$I_{cc} = 1,4 \times \sqrt{2} \times 7300 = \mathbf{14453 \text{ A.}}$$

También la intensidad de cortocircuito (subtransitoria) del cuadro general de BT pasa de 35758 A a 43058 A e I_{cc} de 79900 A a **94353 A**.

Pero, además, si se tiene en cuenta el arco de defecto, I_{cc} se reduce a un valor comprendido entre 45,6 y 75 kA.

■ Defecto en A (lado MT)

Antes de calcular las impedancias equivalentes, es mucho más simple estimar, por exceso, la corriente de retorno aportada por los motores en A, multiplicando el valor ya

calculado en B por la razón de transformación BT/MT ⑰, o sea:

$$7300 \times \frac{410}{20 \times 10^3} = 150 \text{ A}$$

Este valor es despreciable, comparado con los 6415 A antes calculado.

Cálculo aproximado del defecto en D

Este cálculo aprovecha todas las aproximaciones ya utilizadas en los cálculos anteriores como las indicadas en 15 y 16.

$$\Sigma X = 4,2 + 1,5 + 12 + 0,15$$

$$\Sigma X = 17,85 \text{ m}\Omega = X'_D$$

$$\Sigma R = 2,4 + 19,2 = 21,6 \text{ m}\Omega = R'_D$$

$$Z'_D = \sqrt{R'^2_D + X'^2_D} \approx 28,02 \text{ m}\Omega$$

$$I'_D = \frac{410}{\sqrt{3} \times 28,02 \times 10^{-3}} \approx 8448 \text{ A}$$

con lo que Icc:

$$\sqrt{2} \times 8448 \approx \mathbf{11945 \text{ A.}}$$

Para conocer Icc (valor máximo asimétrico) hay que añadirle al valor anterior la contribución de los motores en servicio en el momento del defecto, tomando 4,8 veces el valor de su intensidad nominal (95 A) ⑬:

$$\begin{aligned} I_{cc} &= 11945 + (4,8 \times 95 \times \sqrt{2} \times 20) \\ &= 24842 \text{ A} \end{aligned}$$

Por tanto, comparado con el resultado obtenido con el cálculo completo (19900 A), el cálculo aproximado permite una evaluación rápida con una desviación que favorece la seguridad.

3 Cálculo de las Icc en las redes radiales con la ayuda de las componentes simétricas

3.1 Interés de este método

El cálculo con la ayuda de las componentes simétricas resulta particularmente útil para el caso de defectos en redes trifásicas desequilibradas, porque las impedancias clásicas, R y X, llamadas «cíclicas» no se pueden utilizar debido, por ejemplo, a los fenómenos magnéticos. Por tanto, es necesario este tipo de cálculo:

- si se trata de un sistema no simétrico de tensiones y corrientes (vectores de Fresnel

con módulos diferentes y con desfases diferentes de 120°); es el caso de un cortocircuito monofásico (fase-tierra), bifásico, o bifásico con tierra,

- si la red tiene sobre todo máquinas rotativas y transformadores especiales (conexión estrella-estrella neutro, por ejemplo).

Este método es aplicable a cualquier tipo de red de distribución radial y para cualquier tensión.

3.2 Repaso de la teoría de las componentes simétricas

Como el teorema de Leblanc que dice que un campo alterno rectilíneo de amplitud senoidal equivale a dos campos rotativos de sentidos inversos, la definición de las componentes simétricas se basa en la equivalencia entre un sistema trifásico desequilibrado y la suma de tres sistemas trifásicos equilibrados: directo, inverso y homopolar (figura 23).

Para el cálculo de las corrientes de defecto se utiliza el principio de superposición.

Para la explicación que sigue, el sistema se define tomando la corriente \bar{I}_1 como referencia de rotación, con:

- $\bar{I}_1 \bar{d}$ como su componente directa,
- $\bar{I}_1 \bar{i}$ como su componente inversa,
- $\bar{I}_1 \bar{o}$ como su componente homopolar, y que utiliza el operador,

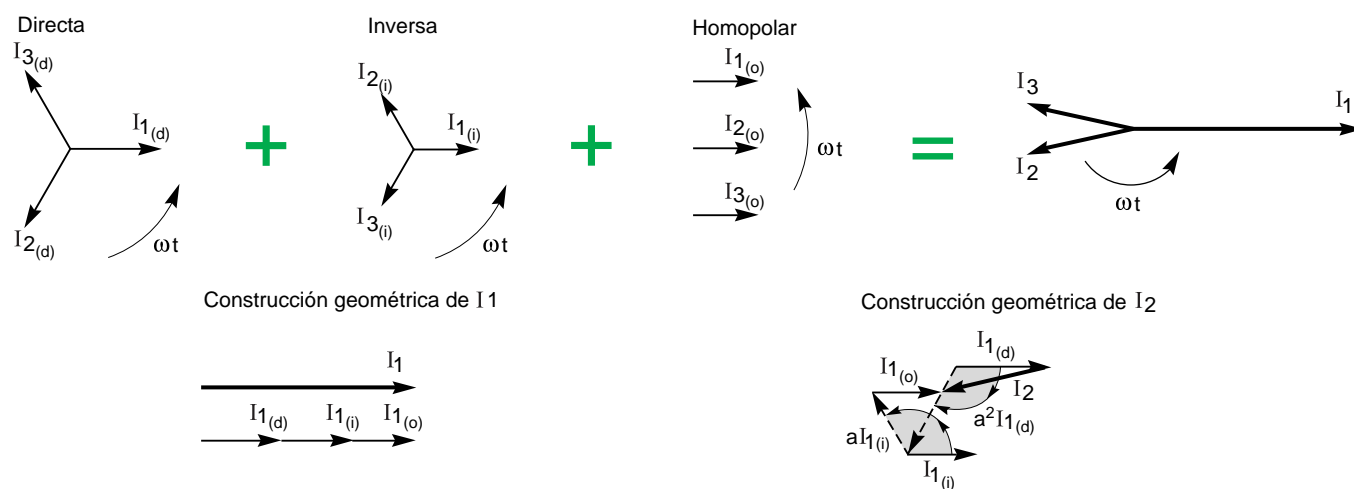


Fig. 23: Construcción gráfica de la suma de tres sistemas trifásicos: directo, inverso y homopolar.

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \text{ entre } \bar{I}_1, \bar{I}_2, \bar{I}_3.$$

Este principio, aplicado a un sistema de corrientes, se verifica mediante la construcción gráfica (figura 23). Por ejemplo, la suma gráfica de vectores da, para \bar{I}_2 , el siguiente resultado:

$$\bar{I}_2 = a^2 \cdot \bar{I}_d + a \cdot \bar{I}_1 + \bar{I}_0.$$

Las corrientes \bar{I}_1 e \bar{I}_3 se expresan de la misma forma, obteniéndose el sistema:

$$\begin{cases} \bar{I}_1 = \bar{I}_d + \bar{I}_1 + \bar{I}_0 \\ \bar{I}_2 = a^2 \cdot \bar{I}_d + a \cdot \bar{I}_1 + \bar{I}_0 \\ \bar{I}_3 = a \cdot \bar{I}_d + a^2 \cdot \bar{I}_1 + \bar{I}_0 \end{cases}$$

Estas componentes simétricas de corriente están relacionadas con las componentes simétricas de tensión por las impedancias correspondientes:

$$Z_d = \frac{V_d}{I_d}, \quad Z_i = \frac{V_i}{I_i}, \quad Z_o = \frac{V_o}{I_o}$$

Estas impedancias se definen a partir de las características de los diferentes elementos (indicados por los constructores) de la red

eléctrica estudiada. Con estas características hay que resaltar que $Z_i \approx Z_d$ salvo para las máquinas rotativas, cuando Z_o varía según los elementos (figura 24).

Para profundizar en este tema, recomendamos el Cuaderno Técnico nº 18, en el que se hace una presentación más detallada de este método de cálculo de las corrientes de defecto franco e impedante.

| Elementos | | Zo |
|-------------------------|---------------|-------------------|
| Transformador | | |
| (visto lado secundario) | | |
| Sin neutro | | ∞ |
| Yyn o Zyn | flujo libre | ∞ |
| | flujo forzado | 10 a 15 Xd |
| Dyn o YNyn | | Xd |
| primario D o Y + zn | | 0,1 a 0,2 Xd |
| Máquina | | |
| Síncrona | | $\approx 0,5 Z_d$ |
| Asíncrona | | ≈ 0 |
| Línea | | $\approx 3 Z_d$ |

Fig. 24: Característica homopolar de los diferentes elementos de una red eléctrica.

3.3 Cálculo según la CEI 60909

La norma CEI 60909 define y presenta un procedimiento, que pueden usar los ingenieros no especializados, que utiliza las componentes simétricas.

Se aplica a redes eléctricas con una tensión de servicio que sea inferior a 230 kV.

Desarrolla el cálculo de las corrientes de cortocircuito máximas y mínimas. Las primeras, las máximas, permiten determinar las características que hay que asignar a los materiales eléctricos. Las segundas, las mínimas, son necesarias para ajustar el calibre de las protecciones de sobreintensidad.

Esta norma se completa, para su aplicación sobre redes BT, con la guía CEI 781.

Procedimiento

1– Cálculo de la tensión equivalente en el punto de defecto, igual a: $c \cdot U_n / \sqrt{3}$.

Se introduce un factor c de la tensión porque es necesario para tener en cuenta:

- las variaciones de tensión en el espacio y en el tiempo,
- los cambios eventuales en las conexiones de los transformadores,
- el comportamiento subtransitorio de los alternadores y de los motores.

Según los cálculos a efectuar y los márgenes de tensión considerados, los valores normativos de este factor de tensión están indicados en la figura 25.

2– Determinación y suma de las impedancias equivalentes, directa, inversa y homopolar, aguas arriba del punto de defecto.

3– Cálculo de la corriente de cortocircuito inicial, con ayuda de las componentes simétricas. En la práctica, según el tipo de

| Tensión nominal U_n | Factor de tensión c para el cálculo de Icc máx. Icc mín. | |
|--------------------------|--|----------|
| | Icc máx. | Icc mín. |
| BT | | |
| 230 - 400 V | 1 | 0,95 |
| Otros | 1,05 | 1 |
| AT | | |
| 1 a 230 kV | 1,1 | 1 |

Fig. 25: Valores del factor de tensión c (CEI 909).

defecto, las fórmulas a emplear para el cálculo de Icc están indicadas en la tabla de la **figura 26**.

4- A partir del valor de Icc (I_k''), se calculan otras magnitudes como Icc de cresta, Icc permanente o, incluso, Icc permanente máxima.

Influencia de la distancia de separación entre el defecto y el alternador

Con este método de cálculo es conveniente todavía distinguir dos casos:

- el de los cortocircuitos alejados de los alternadores, que corresponde a las redes en

las que las corrientes de cortocircuito no tienen componente alterna amortiguada. Es generalmente el caso de circuito BT, salvo los que tienen receptores de gran consumo alimentados por centros de transformación de abonado AT-A/AT-B.

■ el de los cortocircuitos próximos a los alternadores (**figura 11**), que corresponde a las redes para las que las corrientes de cortocircuito tienen componentes alternas amortiguadas. Este caso se presenta generalmente en AT, pero, alguna vez puede también presentarse en BT cuando, por ejemplo, un grupo de socorro alimenta derivaciones preferentes o prioritarias.

Estos dos casos tienen como diferencias notables:

- para los cortocircuitos alejados de los alternadores se presenta igualdad:
- por una parte, entre los valores de corrientes de cortocircuito inicial (I_k''), permanente (I_k) y cortada (I_b) por una parte ($I_k'' = I_k = I_b$),
- y, por otra, entre las impedancias directa (Z_d) e inversa (Z_i) o sea ($Z_d = Z_i$),

| Tipo de de cortocircuito | I_k'' Caso general | Defecto alejado de los generadores |
|---|--|--|
| Trifásico (Z_t cualquiera) | $= \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} Z_d }$ | $= \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} Z_d }$ |
| En los dos casos, la corriente de cortocircuito sólo depende de Z_d . Generalmente Z_d se reemplaza por Z_k : impedancia de cortocircuito en el punto del defecto con $Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2}$, donde R_k es la suma de las resistencia de una fase conectadas en serie, X_k es la suma de las reactancias de una fase conectadas en serie | | |
| Bifásico aislado ($Z_t = \infty$) | $= \frac{c \cdot U_n}{ Z_d + Z_i }$ | $= \frac{c \cdot U_n}{2 Z_d }$ |
| Monofásico | $= \frac{c \cdot U_n \sqrt{3}}{ Z_d + Z_i + Z_o }$ | $= \frac{c \cdot U_n \sqrt{3}}{ 2 Z_d + Z_o }$ |
| Bifásico a tierra (Z_{cc} entre fases = 0) | $= \frac{c \cdot U_n \sqrt{3} Z_i }{ Z_d \cdot Z_i + Z_i \cdot Z_o + Z_d \cdot Z_o }$ | $= \frac{c \cdot U_n \sqrt{3}}{ Z_d + 2 Z_o }$ |

Datos de la tabla

- tensión eficaz compuesta de la red trifásica = U
- impedancia de cortocircuito = Z_{cc}
- corriente de cortocircuito en valor modular = I_k''
- impedancia de tierra = Z_t
- impedancias simétricas = Z_d, Z_i, Z_o

Fig. 26: Valores de las corrientes de cortocircuito en función de las impedancias directa, inversa y homopolar de una red (CEI 909).

■ en cambio, para los cortocircuitos próximos a los alternadores, se produce la desigualdad siguiente: $I_k < I_b < I_k''$; no siendo además necesariamente Z_d igual a Z_i .

Hay que destacar, además, que los motores asíncronos pueden también alimentar un cortocircuito, pudiendo alcanzar su aportación el 30% del valor de I_{cc} de la red durante los treinta primeros milisegundos: la ecuación $I_k'' = I_k = I_b$ no es, entonces, cierta.

Condiciones a respetar para el cálculo de las corrientes de cortocircuito máxima y mínima

■ El cálculo de las corrientes de cortocircuito máximas tiene en cuenta los puntos siguientes:

□ el factor de tensión c a aplicar corresponde al cálculo de cortocircuito máximo,

□ de todas las hipótesis y aproximaciones citadas en este documento (CEI 909) sólo deben considerarse las que nos conducen a un cálculo por exceso,

□ las resistencias R_L de las líneas (líneas aéreas, cables, conductores de fase y neutro) hay que considerarlas a una temperatura de 20 °C.

■ Para el cálculo de las corrientes de cortocircuito mínimas, hay que:

□ aplicar el valor del factor de tensión c correspondiente a la tensión mínima autorizada para la red,

□ elegir la configuración de la red y, en ciertos casos, la alimentación mínima para generadores y líneas de alimentación de la red, de tal manera que nos conduzcan al valor mínimo de la corriente de cortocircuito en el punto del defecto,

□ tener en cuenta la impedancia de los JdB, de los transformadores de corriente, etc.,

□ ignorar los motores,

□ considerar las resistencias R_L a la temperatura más elevada previsible:

$$R_L = \left[1 + \frac{0,004}{\theta_C} (\theta_e - 20 \text{ °C}) \right] \times R_{L20}$$

donde R_{L20} es la resistencia a la temperatura de 20 °C y θ_e la temperatura (en °C) admisible para el conductor al acabar el cortocircuito.

El factor 0,004 / °C se aplica al cobre, al aluminio y a las aleaciones de aluminio.

3.4 Ecuaciones de las diferentes corrientes

Corriente de cortocircuito inicial I_k''

El cálculo de las diferentes corrientes de cortocircuito iniciales I_k'' se efectúa por aplicación de las fórmulas de la tabla de la **figura 26**.

Valor de cresta i_p de la corriente de cortocircuito

El valor de cresta i_p de la corriente de cortocircuito, en las redes no malladas, puede calcularse, cualquiera que sea la naturaleza del defecto, a partir de la fórmula:

$$i_p = K \cdot \sqrt{2} I_k'', \text{ donde:}$$

I_k'' = corriente de cortocircuito inicial,

K = factor, función de la relación R/X del circuito, que se determina sobre la curva de la **figura 9**, o también puede calcularse por la fórmula aproximada:

$$K = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \frac{R}{X}}$$

Corriente de cortocircuito cortada I_b

El cálculo de la corriente de cortocircuito cortada I_b sólo es necesario en el caso de un

defecto cercano a los alternadores y cuando la protección queda asegurada por interruptores automáticos retardados.

Recordamos que esta corriente sirve para determinar el poder de corte de los interruptores automáticos.

Esta corriente puede calcularse, con una buena aproximación, con la ayuda de la siguiente fórmula:

$I_b = \mu \cdot I_k''$, en la que:

μ = factor función del tiempo muerto mínimo t_{min} y de la razón I_k''/I_r (**figura 27**) que relaciona la influencia de las reactancias subtransitoria y transitoria con I_r = corriente asignada del alternador.

Corriente de cortocircuito permanente I_k

Como la amplitud de la corriente de cortocircuito permanente I_k , depende del estado de saturación del circuito magnético de los alternadores, su cálculo es menos preciso que el de la corriente simétrica inicial I_k'' .

Los métodos de cálculo propuestos podemos considerarlos como encaminados a obtener una estimación suficientemente precisa de los valores superior e inferior para el caso en que

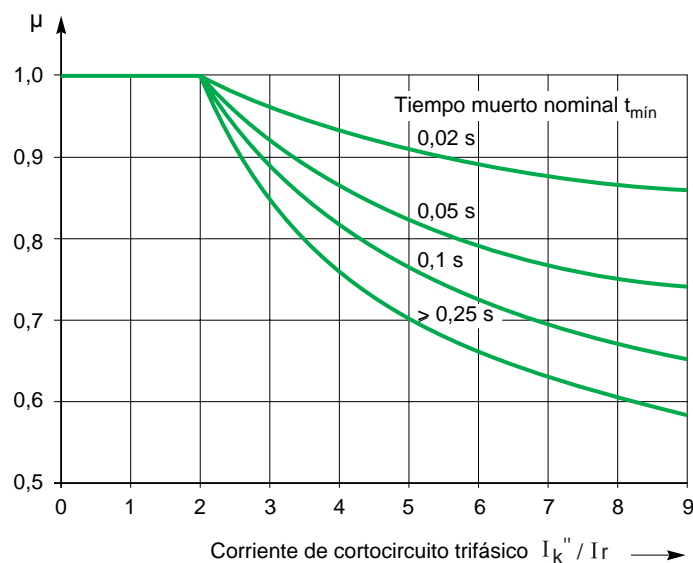


Fig. 27: Factor μ para el cálculo de la corriente de cortocircuito cortada I_b (CEI 909).

el cortocircuito es alimentado por un alternador o por una máquina síncronica. Así:

■ la corriente máxima de cortocircuito permanente máxima, bajo la máxima excitación del generador síncrono, nos viene dada por:

$$I_{k_{m\acute{a}x}} = \lambda_{m\acute{a}x} \cdot I_r$$

■ la corriente de cortocircuito mínima permanente se obtiene para una excitación constante (mínima) en vacío de la máquina síncrona. Y nos viene dada por:

$$I_{k_{m\acute{a}n}} = \lambda_{m\acute{a}n} \cdot I_r$$

donde

I_r = valor asignado de corriente en los bornes del alternador,

λ = factor dependiente de la inductancia de saturación $X_d \text{ sat}$.

Los valores de $\lambda_{m\acute{a}x}$ y $\lambda_{m\acute{a}n}$ se obtienen mediante la **figura 28** para los turboalternadores y mediante la **figura 29** para las máquinas de polos salientes.

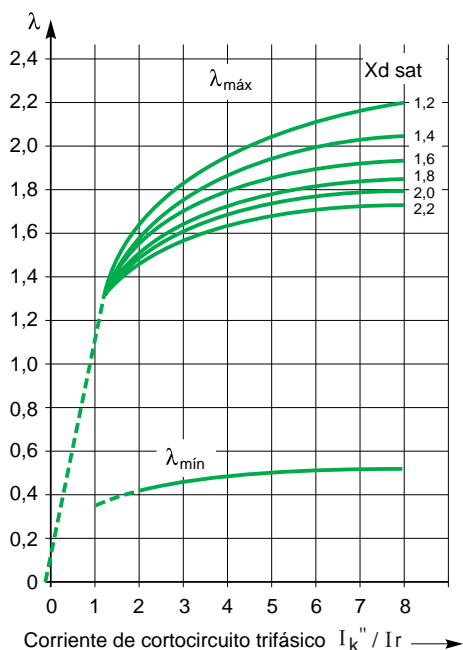


Fig. 28: Factores $\lambda_{m\acute{a}x}$ y $\lambda_{m\acute{a}n}$ para turboalternadores (CEI 60 909).

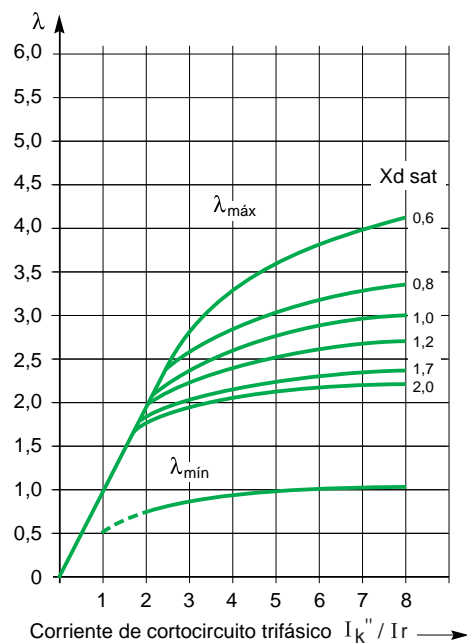


Fig. 29: Factores $\lambda_{m\acute{a}x}$ y $\lambda_{m\acute{a}n}$ para turboalternadores de polos salientes (CEI 60 909).

3.5 Ejemplo de cálculo

Problema:

Cuatro redes, tres de 5 kV y una de 15 kV, están alimentadas por una red de 30 kV a través de los transformadores del centro de transformación E (figura 30).

Para construir la línea GH se pide determinar el poder de ruptura del interruptor automático M. Se sabe que:

- las tomas de tierra sólo son las de los secundarios de los transformadores del centro de transformación E,
- para una línea de 30 kV, la reactancia es de $0,35 \Omega/\text{km}$ en regímenes directo e inverso, y de $3 \times 0,35 \Omega/\text{km}$ en régimen homopolar;
- la reactancia de cortocircuito de los transformadores es del 6% para el centro E y del 8% para los otros,
- el coeficiente c multiplicador de U se toma de 1,
- todas las cargas conectadas sobre los puntos F y G son esencialmente pasivas,
- todas las resistencias son despreciables comparadas con las reactancias.

Solución:

■ a partir del esquema directo e inverso (figura 31) podemos escribir:

$$a = \frac{U^2}{S_{cc}} = \frac{30^2}{290} \Rightarrow j 3,1 \Omega$$

$$b = u_{cc} \cdot \frac{U^2}{S_n} = \frac{6}{100} \times \frac{30^2}{10} \Rightarrow j 5,4 \Omega$$

$$c1 = 0,35 \times 40 \Rightarrow j 14 \Omega$$

$$c2 = 0,35 \times 30 \Rightarrow j 10,5 \Omega$$

$$c3 = 0,35 \times 20 \Rightarrow j 7 \Omega$$

$$c4 = 0,35 \times 15 \Rightarrow j 5,25 \Omega$$

$$d = u_{cc} \cdot \frac{U^2}{S_n} = \frac{8}{100} \times \frac{30^2}{8} \Rightarrow j 9 \Omega$$

$$e = \frac{U^2}{S} \times 0,6 = \frac{30^2}{6} \times 0,6 \Rightarrow j 90 \Omega$$

$$f = u_{cc} \cdot \frac{U^2}{S_n} = \frac{8}{100} \times \frac{30^2}{4} \Rightarrow j 18 \Omega$$

$$g = \frac{U^2}{S} \times 0,6 = \frac{30^2}{2} \times 0,6 \Rightarrow j 270 \Omega$$

■ sobre el esquema homopolar (figura 32) hay que indicar que:

□ los arrollamientos en triángulo de los transformadores del centro de transformación E «detienen» las corrientes homopolares y, por tanto, la red no las «ve»,

□ del mismo modo, a causa de sus arrollamientos en triángulo, los transformadores de los centros de transformación F, H y G no ven las corrientes homopolares, y, por tanto, presentan una impedancia infinita sobre el defecto.

$$b' = b1 = j 5,4 \Omega$$

$$c'1 = 3 \times c1 = j 42 \Omega$$

$$c'2 = 3 \times c2 = j 31,5 \Omega$$

$$c'3 = 3 \times c3 = j 21 \Omega$$

$$c'4 = 3 \times c4 = j 15,75 \Omega$$

$$d' = \infty$$

$$f' = \infty$$

■ ahora, podemos estudiar dos esquemas simplificados:

□ línea GH abierta (figura 33)

$$Z_d = Z_i = j 17,25 \Omega$$

El detalle del cálculo se ve en la figura 34. Un cálculo similar para la impedancia homopolar daría como resultado:

$$Z_o = j 39,45 \Omega$$

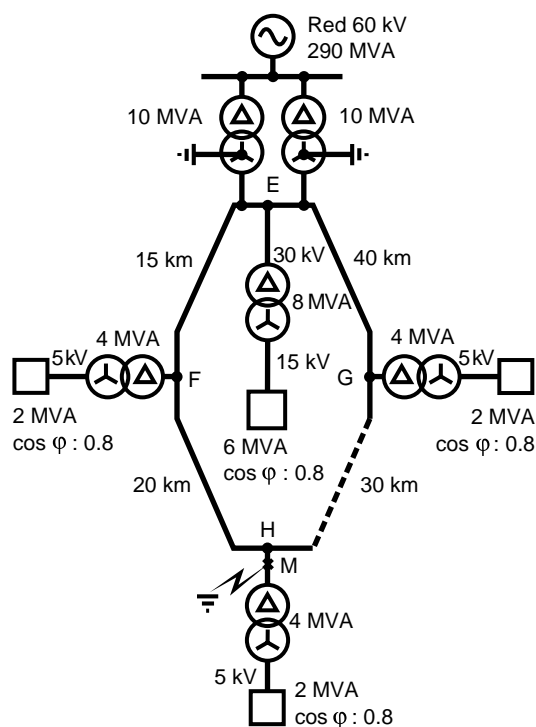


Fig. 30.

Las corrientes de cortocircuito se calculan, según la tabla de la **figura 26**:

$$I_{cc3} = \frac{c \cdot U_n}{|Z_d| \sqrt{3}} \approx 1,104 \text{ kA}$$

$$I_{cc1} = \frac{c \cdot U_n \sqrt{3}}{|Z_d + Z_i + Z_o|} \approx 0,773 \text{ kA}$$

Nota: la red AT tiene un coeficiente $c = 1,1$.

□ la línea GH cerrada (**figura 35**)

$$Z_d = Z_i = j 13,05 \Omega$$

$$Z_o = j 27,2 \Omega$$

$$I_{cc3} = 1,460 \text{ kA}$$

$$I_{cc1} = 1,072 \text{ kA}$$

En función del valor máximo de la corriente de cortocircuito ($I_{cc3} = 1,460 \text{ kA}$), el interruptor automático de línea en el punto M debe dimensionarse a:

$$P.U.I. \cdot \sqrt{3} = 30 \times 1,460 \times \sqrt{3}$$

$$P \approx 76 \text{ MVA.}$$

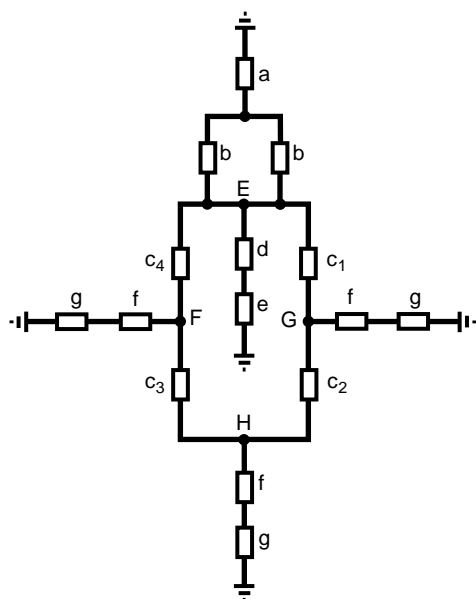


Fig. 31.

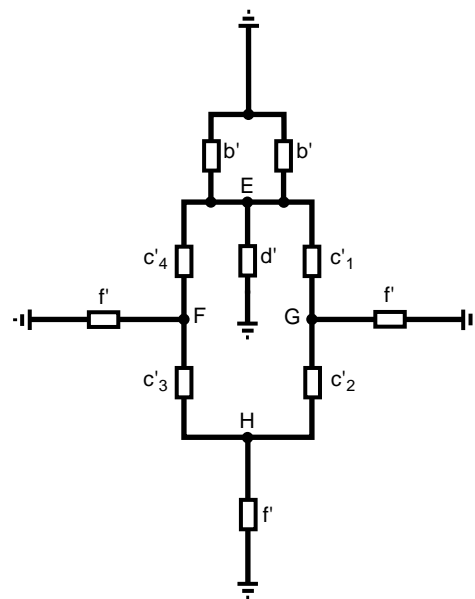
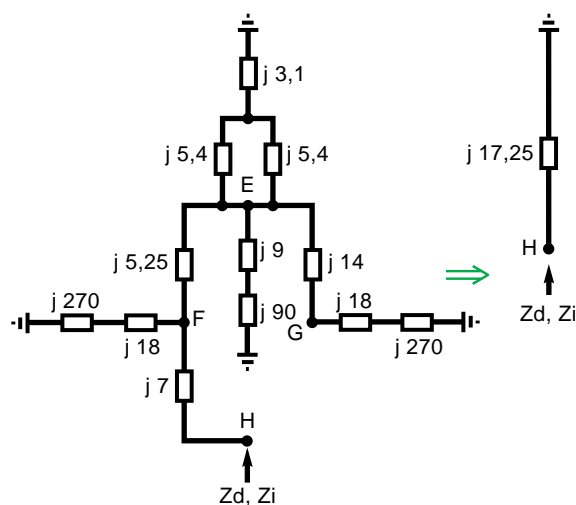


Fig. 32.

Esquema directo e inverso



Esquema homopolar

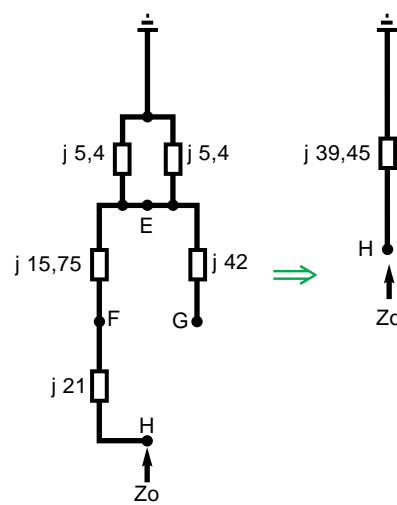


Fig. 33.

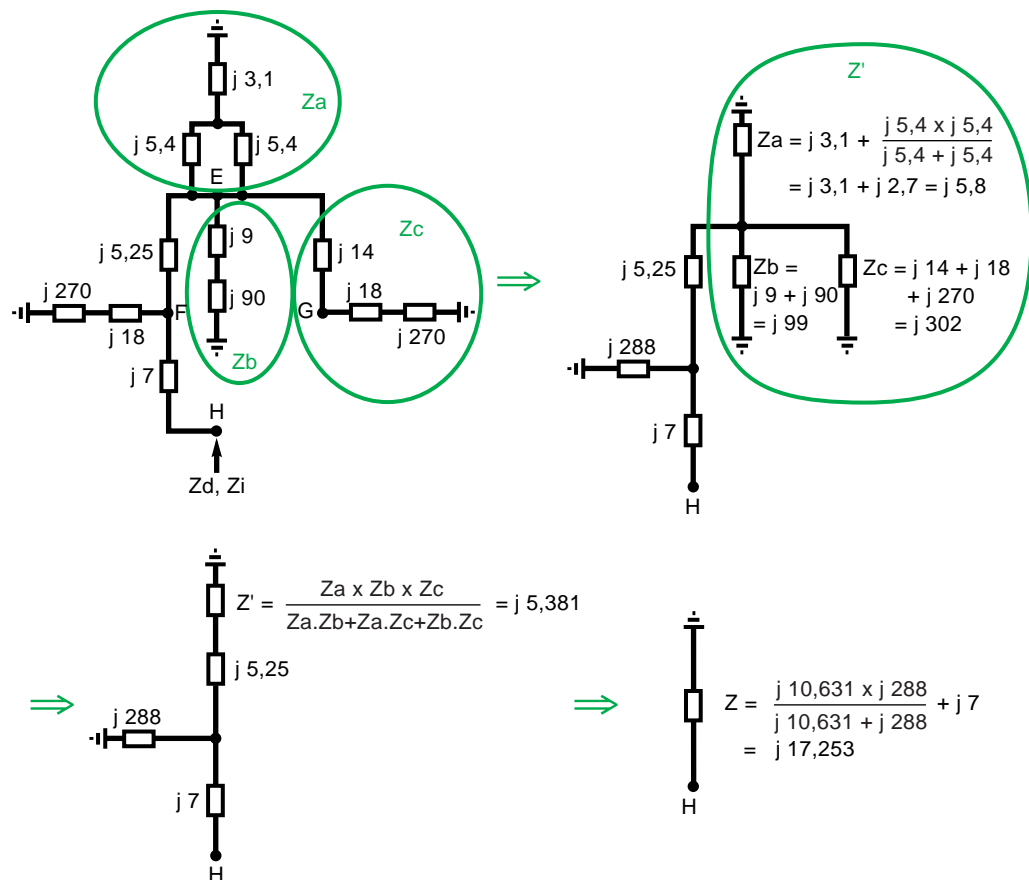


Fig. 34.

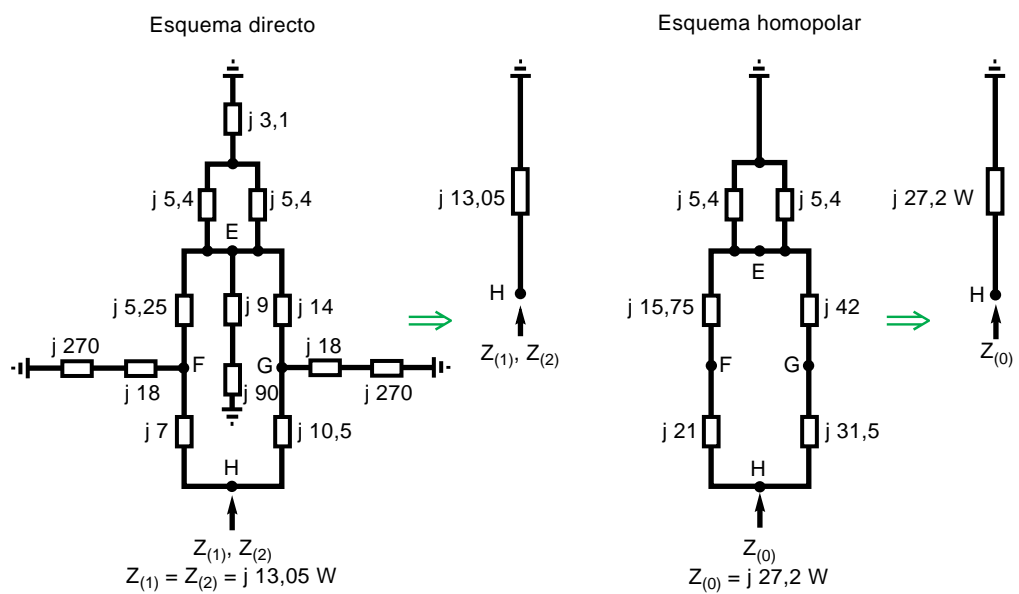


Fig. 35.

4 Cálculos por ordenador y conclusión

Para el cálculo de la corriente de cortocircuito se han desarrollado diferentes métodos que tienen cabida en las normas... y evidentemente también en este Cuaderno Técnico.

Varios de estos métodos normalizados se han diseñado de tal manera que la corriente de cortocircuito se puede calcular a mano o con una simple calculadora. Pero desde que apareció la posibilidad de realizar cálculos científicos con ordenador, en el año 1970, los diseñadores de instalaciones eléctricas han desarrollado programas para sus propias necesidades, al principio para grandes ordenadores y después para ordenadores medianos. Su utilización está reservada a iniciados, porque es delicada.

Estos programas de aplicación se han adaptado enseguida a los ordenadores personales (PC) de uso mucho más fácil. Así actualmente, para el cálculo de las Icc en BT hay numerosos programas conformes con las

normas existentes, como el Ecodial, creado y comercializado por Schneider Electric.

Todos estos programas de cálculo de corrientes de cortocircuito sirven especialmente para determinar el poder de corte y de cierre de los mecanismos así como la resistencia electromecánica de los equipos.

También hay otros muchos programas de cálculo que utilizan los especialistas diseñadores de redes, por ejemplo, para el estudio del comportamiento dinámico de redes eléctricas.

Este tipo de programas permiten simulaciones temporales precisas de los fenómenos y su utilización alcanza el comportamiento electromecánico completo de las redes y de las instalaciones.

Con todo, no es menos cierto que todos estos programas, aunque muy perfeccionados, son sólo herramientas. Su uso, para ser eficaz, necesita por tanto un profesional competente con estudios, «saber-hacer» y experiencia.

Bibliografía

Normas

- CEI 60909: Cálculos de las corrientes de cortocircuito en redes trifásicas de corriente alterna.
- CEI 60781: Guía de aplicación para el cálculo de corrientes de cortocircuito en la redes BT radiales.

Cuadernos Técnicos

- Análisis de las redes trifásicas en régimen perturbado con la ayuda de las componentes simétricas. Cuaderno Técnico nº 18.
B. DE METZ-NOBLAT.
- Puesta a tierra del neutro en la redes industriales AT. Cuaderno Técnico nº 62.
F. SAUTRIAU.
- Técnicas de corte de los interruptores automáticos BT. Cuaderno Técnico nº 148.
R. MOREL.

Publicaciones diversas

- Guide de l'installation électrique (édition 1997). Realización Schneider Electric.
- Les réseaux d'énergie électrique (2ª parte).
R. PELISSIER. Dunod éditeur.