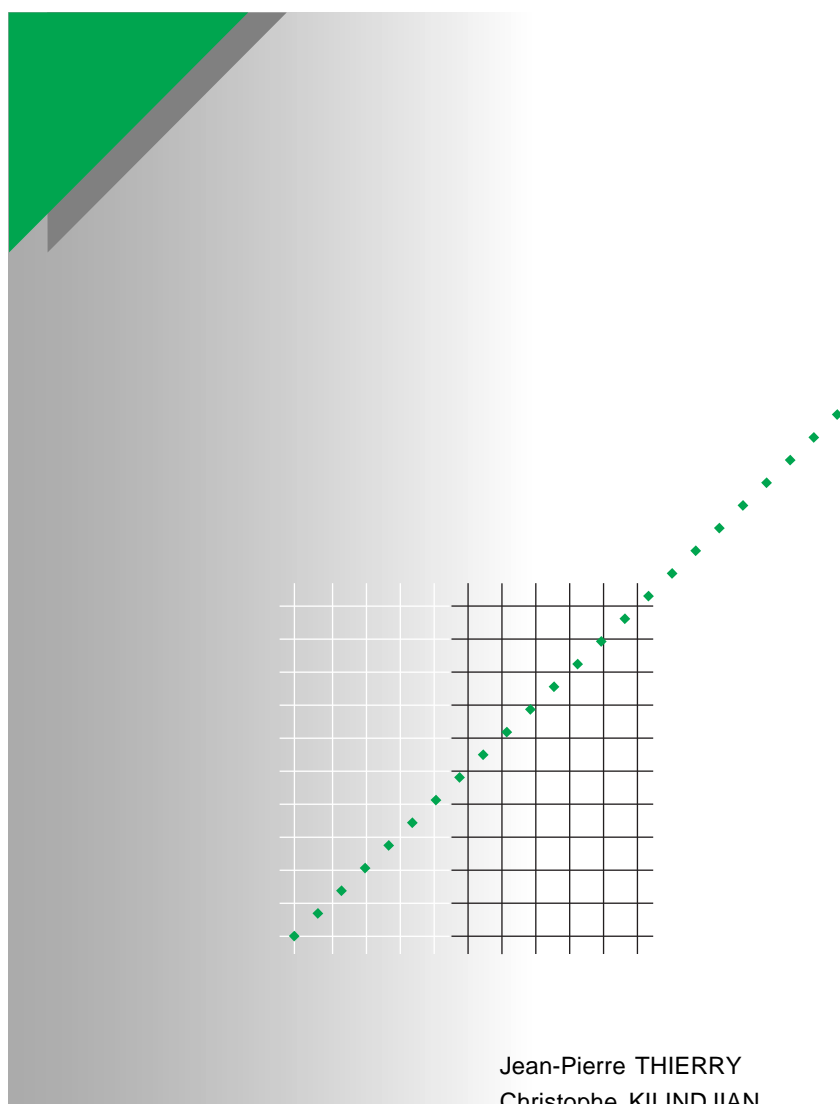


Cuaderno Técnico nº 162

Los esfuerzos electrodinámicos en los juegos de barras de BT

Merlín Gerín
Modicon
Square D
Telemecanique



Jean-Pierre THIERRY
Christophe KILINDJIAN

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» del **Grupo Schneider**.

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 162 de Schneider Electric».



Jean-Pierre THIERRY

Ingeniero diplomado del CESI (Centre d'Etudes Supérieures Industrielles) y del CNAM (Conservatoire National Des Arts et Métiers), trabaja desde el principio en la siderurgia (automatismo de laminados y control de fluidos).

Después de algunos años consagrados a la elaboración y puesta a punto de medios de ensayo de vibraciones mecánicas, entra en Telemecanique en 1969.

Se encarga, primero, de la sección de estudios; después es responsable técnico de proyectos de productos nuevos. Por último tiene la responsabilidad del desarrollo de canalizaciones eléctricas prefabricadas.



Christophe KILINDJIAN

Es ingeniero diplomado por la Ecole Supérieure d'Energie et des Matériaux de Orleans.

Entra en Merlin Gerin en 1986 y trabaja en el servicio técnico de la unidad de cuadros de BT.

Responsable de los estudios de base, se ocupa especialmente de los problemas de intercambio térmico y de esfuerzos electrodinámicos en la equipos de BT.

cuaderno técnico nº 162

los esfuerzos electrodinámicos en los juegos de barras de BT

Por: Jean-Pierre Thierry
Cristophe Kilindjian

Trad.: Dr. M. Cortes

Edición francesa: febrero 93
Versión española: enero 2000

Los esfuerzos electrodinámicos en los juegos de barras en BT

Índice

1 Introducción	p. 5
2 Esfuerzos electrodinámicos entre dos conductores: origen y cálculos	
Observaciones preliminares	p. 5
Origen y métodos de cálculo	p. 5
Cálculo para dos conductores filiformes paralelos de longitud infinita	p. 7
Influencia de la forma de los conductores	p. 7
Conductores de poca longitud	p. 8
Conductores no rectilíneos	p. 8
Cálculo en el caso de configuraciones complejas	p. 8
3 Esfuerzos electrodinámicos en un JdB trifásico cuando hay un defecto bi o trifásico	
Repaso sobre el establecimiento de las corrientes de cortocircuito	p. 10
Fuerza máxima en un JdB trifásico	p. 11
Los fenómenos de resonancia	p. 12
4 Aplicación a los JdB trifásicos en BT	
Caso de los JdB en los cuadros de BT	p. 13
Caso de las canalizaciones prefabricadas del tipo Canalis y Victa Dis	p. 17
5 Conclusión	p. 21
6 Bibliografía	p. 21

La importancia que ha tomado el concepto de seguridad industrial (seguridad de las personas y los bienes, disponibilidad de la energía eléctrica, fiabilidad y facilidad de mantenimiento de los productos) recae cada vez más sobre el diseño de los materiales eléctricos utilizados en la industria (procesos de fabricación...) o el sector terciario (hospitales ...). Así, su seguridad de funcionamiento contribuye, normalmente en una gran proporción, a la seguridad del conjunto de la instalación, como es el caso de los cuadros eléctricos de BT y las líneas prefabricadas de transporte entre transformadores y cuadros.

Esta búsqueda de la seguridad necesita estudios a fin de dominar desde el momento del diseño el comportamiento de sus componentes, teniendo en cuenta el entorno y las solicitudes que pueden presentarse durante su funcionamiento. Uno de estos estudios ha sido ya objeto de un Cuaderno Técnico (comportamiento térmico de los cuadros de BT). La resistencia a los esfuerzos electrodinámicos es el segundo de ellos.

Los diseñadores encontrarán en el presente Cuaderno Técnico los cálculos que hay que hacer para tener en cuenta estos esfuerzos, especialmente para la determinación de los juegos de barras -JdB- en BT (prefabricados bajo envoltorio para la distribución de energía y en los cuadros).

Pero el cálculo solo no es suficiente: los resultados deben de ser válidos en los ensayos con valores reales, por lo que se hace una rápida presentación de los ensayos normalizados.

1 Introducción

En las instalaciones de BT, el problema de la respuesta a las fuerzas electrodinámicas se centra en los circuitos de potencia. Depende, sobretodo, de la intensidad de corriente de defecto pero también de la forma de los conductores, de su disposición relativa y del sistema de fijación. Puede resolverse por cálculo, pero sólo la validación por un ensayo del valor real permite obtener un documento que reconozca la conformidad con las exigencias de las normas y/o del cliente.

Las altísimas corrientes que pueden aparecer en el momento de un

cortocircuito entre los diferentes conductores de una instalación de BT (conductores macizos de tipo barra, cables...) generan unas fuerzas considerables (varios miles de daN/m).

Su determinación es pues necesaria para dimensionar mecánicamente los conductores en sí mismos y las estructuras que los soporten, para que resistan cualesquier esfuerzo, sean las que sean las protecciones situadas aguas arriba y abajo (las normas exigen ensayos de resistencia electrodinámica de una duración de un segundo).

El cálculo exacto de los fuerzas electrodinámicas es a menudo complejo teniendo en cuenta la forma de los conductores y de las estructuras asociadas.

Sin embargo, algunas aproximaciones permiten obtener, en la mayor parte de los casos, resultados válidos a partir de fórmulas simples.

Después de recordar algunos cálculos sobre esfuerzos electrodinámicos en geometrías simples, este cuaderno aborda el caso de juegos de barras en cuadros y las canalizaciones prefabricadas en las que se usan estas fórmulas.

2 Esfuerzos electrodinámicos entre dos conductores: origen y cálculos

El problema de la resistencia de los conductores a los esfuerzos electrodinámicos no es nuevo, como lo demuestra el número de publicaciones al respecto. Sin embargo, para un teórico, el problema está siempre de actualidad por la aplicación de los modernos métodos digitales que permiten resolverlo en el caso de configuraciones complejas de conductores: de ahí esta nueva síntesis, objeto del presente capítulo.

Observaciones preliminares

La aplicación de las fórmulas necesita respetar los puntos siguientes:

- en todas las fórmulas interviene el producto de las intensidades $I_1 \cdot I_2$ que circulan por cada uno de los dos conductores, reaccionando el uno sobre el otro. En el caso de que sus valores sean idénticos, este producto se sustituye por el término I^2 ,
- las intensidades que aparecen en

las fórmulas corresponden al valor de cresta de las corrientes que circulan por cada uno de los conductores.

Ahora bien, los valores que se usan normalmente son los valores eficaces I_{ef} ; en este caso, I_{ef} debe multiplicarse por un coeficiente que se definirá en el capítulo 3º,

- las fuerzas se expresan en valor absoluto, sin precisar su dirección, que depende del sentido de los campos y las corrientes. Lo normal es que se expresen como fuerza por unidad de longitud,
- los conductores son de materiales amagnéticos y suficientemente alejados de cualquier elemento magnético susceptible de modificar la distribución del campo magnético que ellos crean,
- no se tienen en cuenta los fenómenos de efecto pelicular y de proximidad, que pueden modificar muy sensiblemente la repartición de la corriente en el interior de los conductores macizos.

Origen y métodos de cálculo

Hace un centenar de años que se demostraron experimentalmente y se comprendieron las acciones mutuas entre dos elementos de corriente o entre un campo magnético y una corriente eléctrica (trabajos de Oersted, de Ampère...). Esto permite construir un cuadro teórico que integra estos fenómenos dinámicos entre conductores recorridos por corrientes eléctricas.

Se conoce el sentido de los esfuerzos electrodinámicos (repulsión, si las corrientes en los conductores circulan en sentidos opuestos y atracción, en caso contrario) y sus valores se obtienen por la aplicación de las leyes del magnetismo.

Existen, de hecho, dos grandes métodos de cálculo de los esfuerzos electrodinámicos:

El primer método consiste en calcular el campo magnético creado por una

corriente eléctrica en un punto del espacio, deduciendo después la fuerza resultante ejercida sobre un conductor colocado en dicho punto y recorrido por una corriente eléctrica (eventualmente diferente a la primera).

Se recurre, para el cálculo del campo (cuadro de la **figura 1**), o bien a la ley de Biot y Savart :

$$(1) \vec{dB} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot i \cdot \frac{d\vec{l} \wedge \vec{u}}{r^2}$$

o bien al teorema de Ampère:

$$(2) \oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot I$$

y, para el cálculo del esfuerzo electrodinámico, a la ley de Laplace:

$$(3) d\vec{f} = i \cdot d\vec{l} \wedge \vec{B}$$

El segundo método está basado sobre el cálculo de la variación de energía potencial de un circuito; utiliza el teorema de Maxwell (**figura 1**):

$$(4) F_x = i \cdot \frac{\delta \Phi}{\delta x}$$

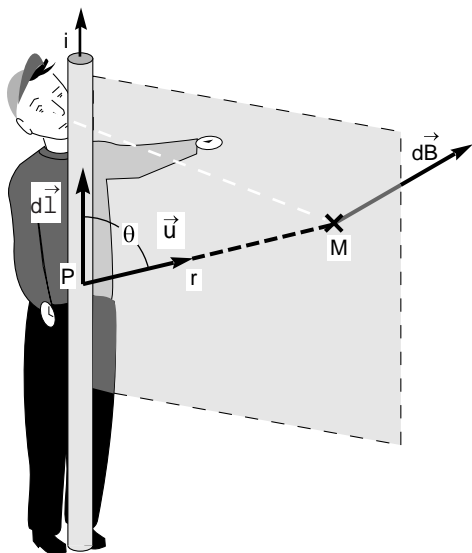
Ley de Biot y Savart

Cada elemento de un circuito recorrido por una corriente i , de una longitud $d\vec{l}$, produce, en un punto M, un campo $d\vec{B}$, tal que:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot i \cdot \frac{d\vec{l} \wedge \vec{u}}{r^2},$$

Este campo es:

- perpendicular al plano definido por el elemento $d\vec{l}$, y que contiene el punto P y el punto M,
- orientado hacia la izquierda de un observador colocado sobre el elemento, con su mirada dirigida hacia el punto M y circulándole la corriente desde sus pies hacia su cabeza (regla del Sr. Ampère),
- de módulo $|d\vec{B}|$, siendo \vec{u} el vector director de \vec{PM} .



Teorema de Ampère

Deducido de la fórmula de Biot y Savart, se enuncia del modo siguiente:

sea I la intensidad que recorre un conductor que atraviesa una superficie cualquiera de perímetro C , la circulación del campo magnético a lo largo de C viene dada por la ecuación:

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot I$$

Ley de Laplace

Cuando un circuito recorrido por una corriente de intensidad i , está situado en un campo magnético \vec{B} , cada elemento $d\vec{l}$, del circuito queda sometido a una fuerza:

$$d\vec{f} = i \cdot d\vec{l} \wedge \vec{B}$$

Cuando \vec{B} tiene por origen un circuito eléctrico, la ley aplicada a cada uno de los campos, muestra el esfuerzo que se ejerce entre ellos:

$$d\vec{f} = i_1 \cdot d\vec{l} \wedge \vec{B}_2 = i_2 \cdot d\vec{l} \wedge \vec{B}_1$$

Teorema de Maxwell

El trabajo de los esfuerzos electromagnéticos, ejercido durante el desplazamiento de un conductor indeformable, recorrido por una corriente constante y colocado en el seno de un campo magnético, tiene la expresión:

$w = i \cdot \Phi$, donde Φ es el flujo del campo magnético abarcado durante el desplazamiento.

Expresada esta fórmula en su forma elemental de trabajo, permite obtener fácilmente las componentes F_x , F_y y F_z de la resultante \vec{F} de las fuerzas electromagnéticas:

$$dw = i \cdot d\Phi = \int d\vec{f} \cdot d\vec{l} = \vec{F} \cdot d\vec{l}, \text{ de donde:}$$

$$F_x = i \cdot \frac{\delta \Phi}{\delta x}, \text{ y lo mismo para } F_y \text{ y } F_z.$$

Fig. 1: Recuerdo de las leyes físicas.

En función de la forma del sistema de conductores considerado, y según la dificultad de los cálculos, se puede utilizar uno de estos tres caminos:

(1) + (3), (2) + (3) o (4).

Sin embargo los resultados obtenidos pueden diferir ligeramente según los pasos utilizados, por el hecho de que las hipótesis de partida de estas leyes no son las mismas.

Cálculo para dos conductores filiformes paralelos de longitud infinita

Para las geometrías simples, como son los conductores rectilíneos filiformes, la aplicación de las leyes de Biot y Savart y de Laplace conduce a la fórmula clásica de los esfuerzos electrodinámicos entre dos líneas de corriente:

$$F/l = 2 \cdot 10^{-7} \cdot I_1 \cdot I_2 / d$$

con:

F/l en **N/m**,

I_1 e I_2 en **A**,

d en **m**,

(El coeficiente 2×10^{-7} resulta de la relación $\mu_0/4\pi$).

Como esta fórmula sirve de base a lo largo de este estudio es importante concretar las hipótesis para las que esta expresión es válida.

- los conductores se reducen a una línea de corriente y su sección, a un punto. En la práctica, esta condición se da por válida para conductores de cualquier sección si la distancia entre estos dos conductores es mucho mayor que la mayor de las dimensiones transversales de los conductores (10 veces, por ejemplo),
- los conductores se consideran como rectilíneos e infinitamente largos. En la práctica esta condición se puede considerar como satisfactoria si su longitud es al menos 15 ó 20 veces mayor que su sección.

Siempre que no se cumple alguna de estas hipótesis, hay que aplicar un coeficiente corrector.

Influencia de la forma de los conductores

Esta fórmula de F/l no es aplicable más que a líneas de corriente; ahora bien, en el caso de conductores macizos, no siempre se cumple. En este caso, la influencia de la forma del conductor se puede determinar considerando la sección del conductor como una superposición de líneas de corriente que interactúan entre ellas. Dwight ha efectuado esta aproximación para el caso de un conductor de sección rectangular.

El coeficiente corrector que ha obtenido, normalmente denominado k , se puede determinar por cálculo. Sin embargo, siendo el cálculo de k relativamente complejo, se determina normalmente su valor sobre las curvas, en forma de S de la **figura 2**.

La ecuación es, entonces, de la forma:

$$F/l = 2 \cdot 10^{-7} \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot (k/d)$$

con:

F/l en **N/m**,

I_1 e I_2 en **A**,

d en **m**.

En la tabla de la **figura 3**, se presentan unos ejemplos de los esfuerzos soportados por dos barras paralelas durante un cortocircuito.

El mismo camino se puede seguir para cualquier forma de conductor. Pero esto lleva rápidamente a cálculos cargantes. A menudo, en la ecuación precedente, el término (k/d) se sustituye por $1/D$, donde D representa la distancia entre los conductores, corregida la influencia de su forma.

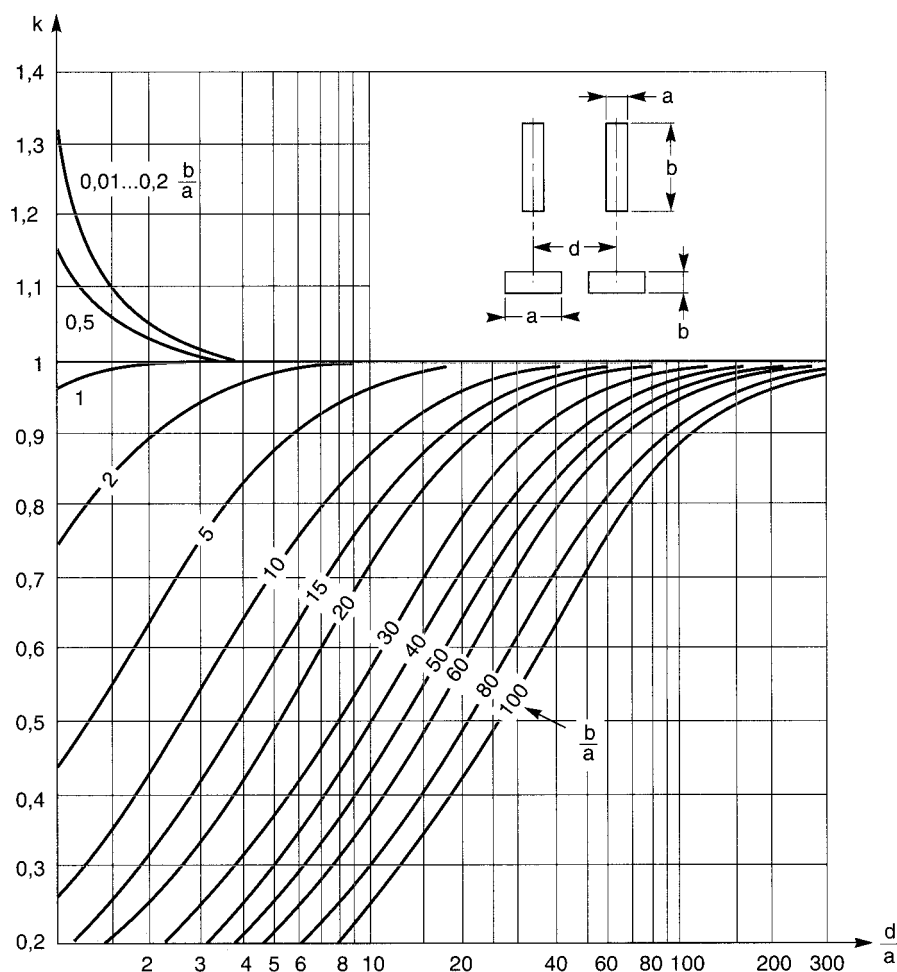


Fig. 2: Variación de k en función de las razones b/a y d/a (ábaco de Dwight).

Estos coeficientes son igualmente útiles para una línea trifásica formada por varios conductores por fase; este caso es el objeto del **capítulo 3**.

Conductores de poca longitud

■ conductores de la misma longitud
Incluso cuando los conductores son de longitud inferior a 15 ó 20 veces su entreeje d , la fuerza resultante es:

$$F = 2 \cdot 10^{-7} \cdot I^2 \cdot \frac{1}{D} \left[\sqrt{1 + \frac{d^2}{l^2}} - \frac{d}{l} \right]$$

■ conductores de longitud desigual (**figura 4**)

En este caso, la fuerza resultante es:

$$F = 2 \cdot 10^{-7} \cdot I^2 \cdot \frac{1}{D} [C_1 + C_2]$$

siendo:

$$C_1 = \sqrt{\left(1 + \frac{c_1}{l}\right)^2 + \frac{d^2}{l^2}} - \sqrt{\frac{c_1^2}{l^2} + \frac{d^2}{l^2}}$$

y

$$C_2 = \sqrt{\left(1 + \frac{c_2}{l}\right)^2 + \frac{d^2}{l^2}} - \sqrt{\frac{c_2^2}{l^2} + \frac{d^2}{l^2}}$$

Los valores de C_1 y C_2 se pueden encontrar en el ábaco de la **figura 5**.

Si los conductores no están enfrentados en toda su longitud, o sea, el uno sobrepasa al otro, la fórmula se puede aplicar con c_1 o c_2 negativo.

Observación

En el caso de que $c/l = 0$, se aplica la ecuación F del párrafo anterior. El valor de la expresión entre [] viene dado directamente por la lectura de la curva correspondiente en la gráfica de la **figura 5**.

Conductores no rectilíneos

Es, por ejemplo, el caso de los conductores que presentan un codo (**figura 6**). Cada rama puede interactuar, una sobre otra, cuando pasa una corriente importante.

El conductor b puede pivotar alrededor del punto O del conductor fijo a . La fuerza F toma el valor:

$$F = 2 \cdot 10^{-7} \cdot I^2 \cdot \frac{a}{b} \cdot l \left[\frac{b}{a} + \sqrt{1 + \frac{b^2}{a^2}} \right]$$

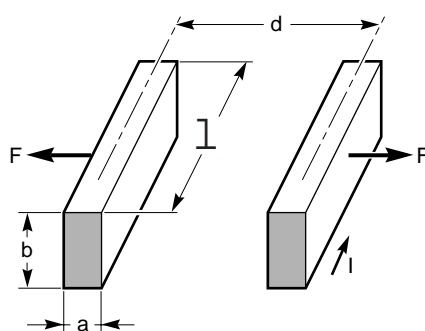
$$\frac{1 - \cos \alpha}{\sin \alpha}$$

Esta fórmula no se puede usar más que para el siguiente intervalo de valores de a y de b :

$$1 < \frac{a}{b} < 10$$

Cálculo en el caso de configuraciones complejas

Las configuraciones de los juegos de barras consideradas hasta ahora en este estudio eran esencialmente unidimensionales, o bidimensionales en el caso de conductores que forman un ángulo. En estos casos, los métodos de cálculo de los esfuerzos electrodinámicos llevan a unas fórmulas relativamente simples.



características fuerzas

a	b	d	l	k	I	F
mm	mm	mm	m		kA	daN/m
5	80	100	1	0,91	35	224
5	80	100	1	0,91	50	1170

Fig. 3: Características necesarias para el cálculo de las fuerzas F entre dos conductores de la misma longitud. Ejemplos de fuerzas soportadas por dos barras paralelas en un cortocircuito.

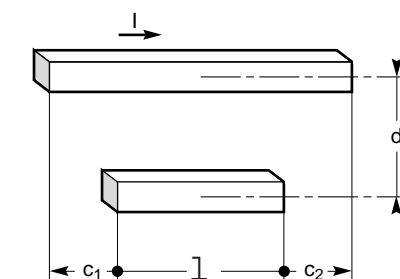


Fig. 4: Aspecto de dos conductores de longitudes desiguales.

$$C = \sqrt{\left(1 + \frac{c}{l}\right)^2 + \frac{d^2}{l^2}} - \sqrt{\frac{c^2}{l^2} + \frac{d^2}{l^2}}$$

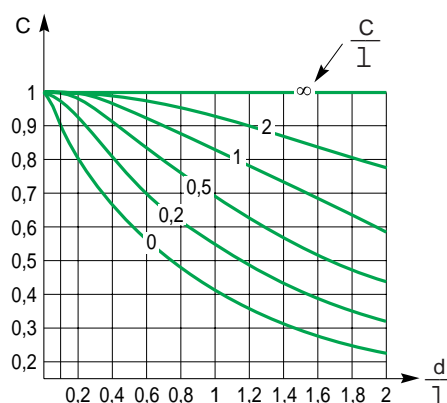


Fig. 5: Cálculo y variación de C en función de las razones c/l y d/l .

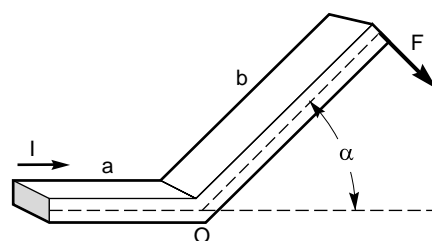


Fig. 6: Aspecto de dos conductores que forman un codo.

Pero existen numerosas maneras de disponer los conductores o de añadirles un entorno «perturbador», para las que las fórmulas precedentes no son aplicables.

Estas disposiciones se designan bajo el término de «configuraciones complejas».

Entonces, pueden aparecer, separada o conjuntamente, tres tipos de problemas:

- que los conductores en estudio no estén todos en un mismo plano, con lo que tendremos un problema tridimensional;

- que los conductores estén en las proximidades de masas metálicas capaces de modificar el espectro del campo magnético a su alrededor;

- que los conductores estén dispuestos de tal manera que pueda ser necesario tener en cuenta los fenómenos del efecto pelicular y de proximidad. Estos últimos pueden modificar de manera importante la distribución de la corriente en el interior de los conductores macizos.

El cálculo de los esfuerzos electrodinámicos, para los tres tipos de problemas citados anteriormente, sigue el método general mencionado en el párrafo «origen y método de cálculo»; a saber, en un primer paso, se calcula el valor y la distribución del campo magnético en cada punto del sistema; después, los esfuerzos sobre los conductores. La cuestión es, por tanto, separar los dos problemas, el magnético y el mecánico.

Así pues, las leyes físicas fundamentales utilizadas son las mismas, pero la dificultad para

resolver los casos simples reside en la realización de los cálculos. En efecto, la disposición tridimensional obliga a hacer una aproximación numérica.

En estos últimos años, se han desarrollado muchos métodos para resolver numéricamente los problemas planteados por las ecuaciones diferenciales. En particular, el método de los elementos finitos, inicialmente desarrollado para problemas de mecánica, se ha extendido a numerosos campos, especialmente el del electromagnetismo.

Resumiendo, para definir lo que puede hacer el cálculo, este método consiste en descomponer el sistema estudiado en un cierto número de elementos, constituidos y relacionados entre ellos por unos puntos llamados nudos. Las magnitudes que nos interesan (campo magnético y fuerzas) se determinan numéricamente en cada nudo, efectuando un muestreo en las ecuaciones (de Maxwell y de la elasticidad) que ellas verifican.

Así el valor de cada magnitud estudiada no se conoce exactamente en todos los puntos del sistema sino sólo a nivel de los nudos. De ahí la importancia de tener una buena correspondencia entre estos nudos y el sistema real y, por tanto, de tener una buena malla. Prácticamente, llevar a cabo un cálculo con este método comporta las etapas siguientes:

- elección del tipo de análisis (ej: magnetismo...);

- elección del tipo de elementos para describir el sistema;

- definición de la geometría del sistema y campo de aplicación del cálculo para resolver los puntos cerrados;

- elección de los parámetros de la malla y campo de aplicación del cálculo para el tipo de elementos elegidos; a este nivel el sistema estudiado no es más que un conjunto de nudos;

- definición de las condiciones límite para resolver las ecuaciones;

- ejecución del cálculo;

- explotación de los resultados.

Existen numerosos programas de cálculo en el mercado que se diferencian por el tipo de problemas que pueden resolver y por la fiabilidad de los resultados que suministran. Por ejemplo, Merlin Gerin ha escogido el programa ANSYS y Telemecanique ha escogido Flux 2D, porque:

- permiten tratar problemas muy diferentes (térmicos, mecánicos, electromagnéticos...),

- son evolutivos, así sus nuevas versiones permiten emparejar diferentes problemas (magnético y mecánico o mecánico y térmico...).

Es verdad que estos métodos pueden parecer pesados y requerir una inversión importante. Pero, con un buen dominio de los problemas ligados a las técnicas de creación de modelos, permiten valorar rápidamente el comportamiento de un sistema o de una de sus partes, sin que sea necesario hacerlo por ensayos. Esto es especialmente conveniente cuando, en las fases de diseño y de puesta a punto, se tiene en cuenta el coste de un programa de ensayos.

3 Esfuerzos electrodinámicos en un JdB trifásico cuando hay un defecto bi o trifásico

La toma en consideración de las especificaciones de los juegos de barras (JdB) trifásicos durante el diseño de los JdB de los cuadros BT y de las canalizaciones prefabricadas, así como las ligadas al establecimiento y a la naturaleza del defecto se hace añadiendo un coeficiente a las fórmulas presentadas en el **capítulo 2**.

Estas especificaciones son:

- la disposición de las fases, las unas respecto a las otras (conductores por capa...),
- el desfase entre las corrientes de cada fase, una respecto a la otra,
- el tipo de cortocircuito (bifásico o trifásico),
- las características del establecimiento del cortocircuito (régimen simétrico o asimétrico),
- el valor cresta de la intensidad,
- la forma y tipo de corriente alterna y, por tanto, de los fenómenos vibratorios que produce.

En lo que sigue de este párrafo el estudio se refiere solamente a

juegos de barras en capas, con lo que las fases 1, 2 y 3 están dispuestas en un mismo plano y con la misma separación entre fases.

A partir del análisis de la evolución de las fuerzas electrodinámicas en función del tiempo y de los diferentes parámetros que se citarán, el objetivo que se busca es determinar el valor máximo de estas fuerzas y el conductor mecánicamente más solicitado.

Siendo los esfuerzos electrodinámicos de la corriente proporcionales al cuadrado de su amplitud máxima, se impone hacer un estudio de las corrientes de cortocircuito.

Repaso sobre el establecimiento de las corrientes de cortocircuito

El objetivo de este párrafo es el de recordar y de precisar:

- los diferentes tipos de cortocircuito que pueden producirse en un sistema trifásico,

■ las nociones de régimen simétrico y asimétrico,

■ el proceso a seguir para determinar la expresión de las corrientes de cortocircuito, así como los parámetros de los que dependen.

Tipos de cortocircuito

En una red trifásica, son cuatro y están representados en la **figura 7**.

Expresión de las corrientes de cortocircuito en el caso de un defecto trifásico

A continuación sólo se tratan los defectos trifásicos simétricos y los bifásicos aislados, que presentan la ventaja, cuando son en régimen equilibrado, de comportarse como una o dos redes monofásicas independientes.

Sea un defecto como el que aparece en el esquema monofásico de la **figura 8**, en el que R y $L\omega$ son las componentes de la impedancia de la red; fijando como origen del tiempo el instante donde se produce el cortocircuito, la f.e.m. (e) del generador tiene el valor:

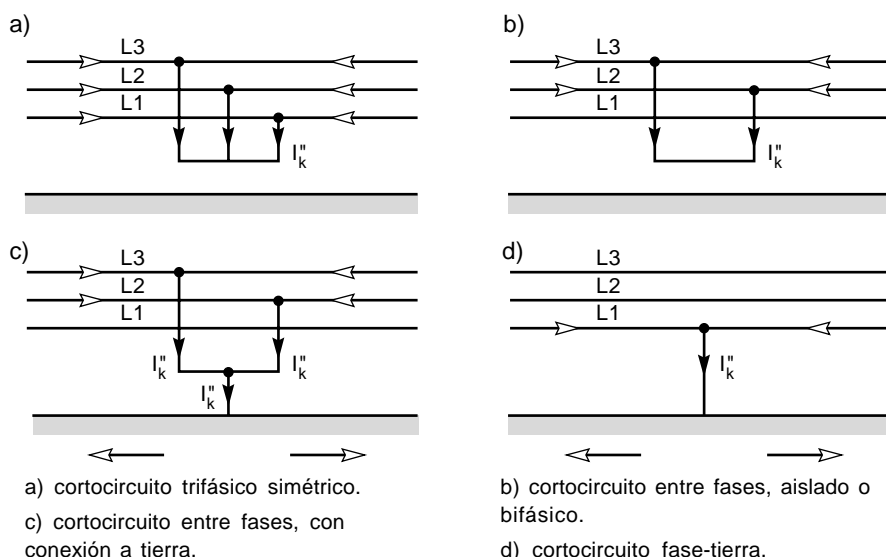


Fig. 7: Los diversos cortocircuitos y sus corrientes. El sentido de las flechas que representan las corrientes es arbitrario (CEI 909).

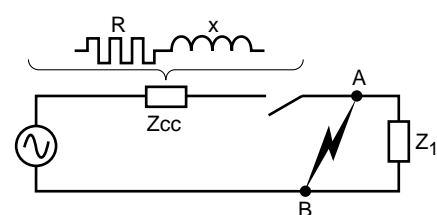


Fig. 8: Esquema monofásico equivalente durante un defecto trifásico (CEI 909).

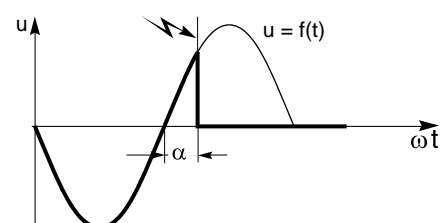


Fig. 9: representación de α , llamado ángulo de establecimiento.

$$e = \sqrt{2} \cdot E \cdot \sin(\omega \cdot t + \alpha)$$

siendo α el llamado ángulo de establecimiento (**figura 9**), y que corresponde al decalaje en el tiempo, entre un cero de la f.e.m. y el instante de establecimiento del cortocircuito.

La ley de OHM aplicada al circuito da:

$$e = R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt}$$

Si la corriente es nula antes del establecimiento del cortocircuito, la solución de esta ecuación es:

$$i(t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot [\sin(\omega \cdot t + \alpha - \varphi) + \sin(\varphi - \alpha) \cdot e^{-t/\tau}]$$

siendo:

$$\varphi = \arctg \frac{L \cdot \omega}{R} \quad (\text{ángulo de impedancia}),$$

$$\tau = \frac{L}{R}$$

$$I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + L^2 \cdot \omega^2}}$$

La ecuación siguiente reúne el conjunto de factores que expresan la variación de la corriente en función del tiempo:

$$K = [\sin(\omega \cdot t + \alpha - \varphi) + \sin(\varphi - \alpha) \cdot e^{-t/\tau}]$$

El término K se puede calcular también con la ayuda de la fórmula aproximada definida por la CEI 909:

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

La desviación respecto al valor exacto es inferior al 0,6%.

El análisis de esta función permite definir los regímenes, simétrico y asimétrico, de un defecto (Cuaderno Técnico n° 158).

En el caso de un sistema trifásico, la corriente en cada una de las fases es de la forma:

$$i_1(t) = \sqrt{2} \cdot I_{\text{eff},3\text{fases}} \cdot [\sin(\omega \cdot t + \alpha - \varphi) + \sin(\varphi - \alpha) \cdot e^{-t/\tau}]$$

que puede también escribirse:

$$i_1(t) = \sqrt{2} \cdot I_{\text{eff},3\text{fases}} \cdot K$$

donde $I_{\text{eff},3\text{fases}}$ representa la intensidad eficaz simétrica en las tres fases en régimen permanente.

Teniendo en cuenta su desfase relativo:

■ i_2 es igual a i_1 , sustituyendo α por $(\alpha + 2\pi/3)$,

■ i_3 igual a i_1 , sustituyendo α por $\alpha - 2\pi/3$.

En definitiva, las fuerzas electrodinámicas dependen por tanto:

■ del instante inicial del cortocircuito (representado por el valor de α);

■ de las características del circuito (representado por el valor de φ);

■ del desfase de las fases ($2\pi/3$).

Fuerza máxima en un JdB trifásico

Un JdB trifásico comporta habitualmente tres conductores juntos. Así, cada uno de ellos sufre, en un instante t, una fuerza que resulta de la suma algebraica de las interacciones que hay con los otros dos. Estos conductores no pueden tener más que dos posiciones relativas: exterior o central:

■ posición exterior, por ej., la fase 1:

$$F_1(t) = F_{2 \rightarrow 1}(t) + F_{3 \rightarrow 1}(t)$$

$$F_1(t) = \text{cte} \cdot [i_1(t) \cdot i_2(t) + i_1(t) \cdot i_3(t)/2],$$

■ posición central, por ej., la fase 2:

$$F_2(t) = F_{1 \rightarrow 2}(t) - F_{3 \rightarrow 2}(t)$$

$$F_2 = \text{cte} \cdot [i_1(t) \cdot i_2(t) - i_2(t) \cdot i_3(t)]$$

Ahora bien, como deja prever el párrafo precedente, existen numerosos casos a considerar para expresar las corrientes, según los valores de α y φ , y la naturaleza del cortocircuito.

En efecto, en el dimensionamiento de los JdB, sólo hay que utilizar el valor de los esfuerzos máximos, y éste corresponde a la corriente más elevada, que se produce cuando $\alpha = 0$.

Nota :

$F_{a \rightarrow b}$ = acción (fuerza) del (de los) conductor(es) de la fase a sobre el (los) conductor(es) de la fase b.

Caso de un cortocircuito trifásico

Los efectos sobre los conductores son de la forma:

$$F_1 = \text{cte} \cdot [i_1(t) \cdot i_2(t) + i_1(t) \cdot i_3(t)/2]$$

$$F_2 = \text{cte} \cdot [i_1(t) \cdot i_2(t) - i_2(t) \cdot i_3(t)]$$

El esfuerzo máximo sobre los conductores, en cada instante, viene determinado por los valores del tiempo que anulan las derivadas de estas expresiones respecto al tiempo:

$$dF_1/dt = 0$$

y

$$dF_2/dt = 0,$$

de donde, después de algunos cálculos, con

$$I_{\text{máx},3\text{fases}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{eff},3\text{fases}} \cdot K$$

las dos ecuaciones quedan:

$$\blacksquare F_{1\text{máx},3\text{fases}} =$$

$$= 2 \cdot 10^{-7} \cdot \mathbf{0,808} \cdot (\sqrt{2} \cdot I_{\text{eff},3\text{fases}} \cdot K)^2 \cdot 1/d$$

(caso de uno de los conductores exteriores del JdB trifásico).

$$\blacksquare F_{2\text{máx},3\text{fases}} =$$

$$= 2 \cdot 10^{-7} \cdot \mathbf{0,866} \cdot (\sqrt{2} \cdot I_{\text{eff},3\text{fases}} \cdot K)^2 \cdot 1/d$$

(caso del conductor central del JdB trifásico).

Nótese que:

■ respecto a la fórmula citada en el **capítulo 2**

$$F/I = 2 \cdot 10^{-7} \cdot I_1 \cdot I_2/d$$

el coeficiente correctivo suplementario, según la posición del conductor considerado, vale 0,808 ó 0,866. El esfuerzo máximo se produce, pues, sobre el conductor central.

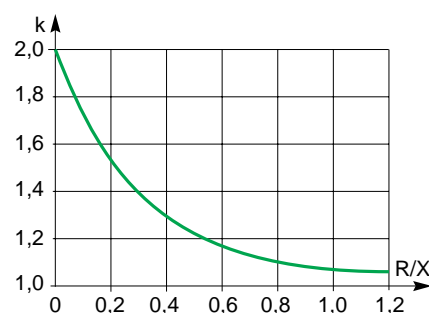


Fig. 10: Variación del factor k en función de la razón R/X.

■ en la práctica, el coeficiente K permite tener en cuenta las características del circuito (R y L); su valor está comprendido entre 1 y 2 (figura 10).

Caso de un cortocircuito bifásico

En este caso, $i_1 = -i_2$, y utilizando las fórmulas precedentes es posible demostrar que las fuerzas electrodinámicas máximas se alcanzan cuando $\alpha = 0$ (régimen asimétrico) :

$$F_{2\text{máx},2\text{fases}} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot (\sqrt{2} \cdot I_{\text{ef},2\text{fases}} \cdot K)^2 \cdot 1/d$$

Observaciones

El esfuerzo máximo no se produce en el cortocircuito bifásico, como se admite frecuentemente.

En efecto

$$\frac{F_{2\text{máx},3\text{fases}}}{F_{2\text{máx},2\text{fases}}} = \frac{0,866 \cdot I_{\text{ef},3\text{fases}}^2}{I_{\text{ef},2\text{fases}}^2}$$

o, en régimen de distribución trifásico:

$$I_{\text{ef},2\text{fases}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{\text{ef},3\text{fases}}$$

de ahí la relación:

$$\frac{F_{2\text{máx},3\text{fases}}}{F_{2\text{máx},2\text{fases}}} \approx 1,15.$$

A menudo los organismos de control exigen unos ensayos en bi y trifásica con corrientes de valores idénticos. Tales condiciones de ensayos no corresponden a unas características de distribución real y conducen a unos esfuerzos bifásicos superiores a los esfuerzos trifásicos.

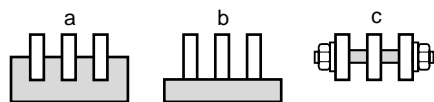


Fig. 11: Los diferentes modos de fijación de los JdB, por engastado (a), por apoyo simple (b), y mixto (c).

Los fenómenos de resonancia

Los esfuerzos que aparecen cuando hay un cortocircuito, no constituyen nunca un fenómeno estático. Se trata en efecto de grandes vibraciones de una frecuencia doble de la red o de sus múltiplos. Los conductores, como poseen siempre una cierta elasticidad, pueden, entonces, ponerse a vibrar. Si la frecuencia de vibración corresponde a una frecuencia natural del conjunto de conductores, pueden aparecer fenómenos de resonancia. En estos casos, los esfuerzos resultantes en los conductores pueden ser mucho más importantes que los producidos por los esfuerzos debidos al valor cresta de la corriente. Conviene determinar la relación entre los esfuerzos real y estático que sufre el conductor.

Esta relación, expresada típicamente por V_σ , se llama factor de esfuerzo. Además de las características mecánicas de los conductores, es necesario tener en cuenta cómo están fijados al equipo que los recibe (cuadro BT, bandeja...). Es, pues, necesario razonar sobre «la estructura del JdB».

Existen dos modos clásicos de fijar los JdB: engastado y con apoyo simple. Pero, como en realidad estos son los elementos aislantes que soportan los conductores, se deduce de estos dos, un nuevo modo mixto (figura 11).

El número de parámetros a considerar es importante y vuelve complejo el estudio completo de estos fenómenos.

El punto de partida de tal estudio es la ecuación general aplicada a un conductor suponiendo que tenga un comportamiento elástico:

$$F(t) = M \frac{\delta y^2}{\delta t^2} + \lambda \frac{\delta y}{\delta t} + E \cdot J \frac{\delta y^4}{\delta x^4}$$

siendo:

M = masa del conductor por unidad de longitud,

J = momento de inercia de la sección perpendicular al eje del conductor,

E = módulo de elasticidad,

λ = coeficiente de amortiguación,

y = desviación de un punto del conductor en relación a su posición de equilibrio, o deflexión,

x = distancia de un punto de conductor en relación a un apoyo fijo,

t = tiempo.

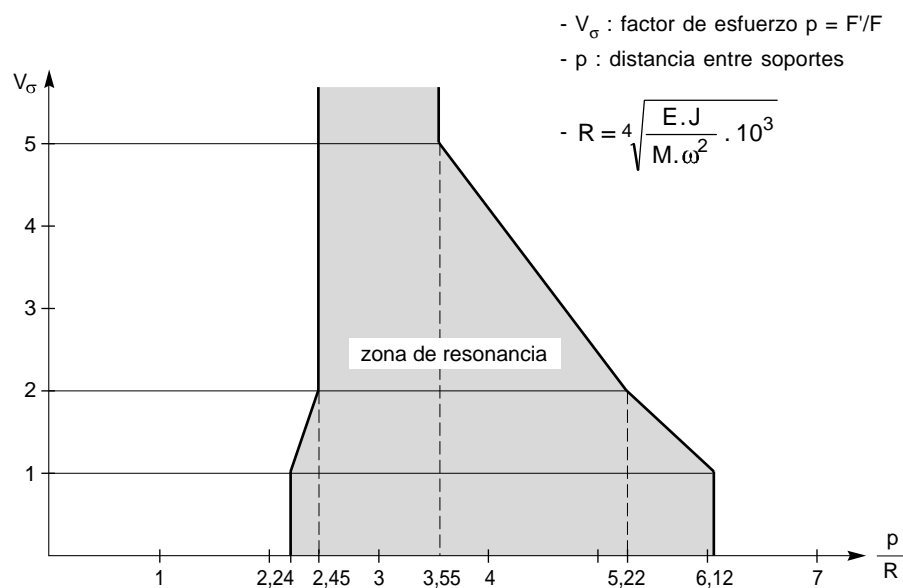


Fig. 12: Factor de esfuerzo V_σ a prever en función de la razón p/R .

donde $F(t) = F_0 \cdot \sin(2\omega t)$

siendo:

F_0 = amplitud de la fuerza,

ω = la pulsación de la red ($\omega = 2\pi f$).

Las soluciones son de la forma:

$y = cte \cdot F_k(t) \cdot G_k(x)$

donde las funciones $F_k(t)$ y $G_k(x)$

dependen respectivamente del tiempo y de la variable espacio, pero también:

- de los modos de fijación,
- de la fuerza electrodinámica ligada al régimen de cortocircuito (simétrico o asimétrico).

El estudio completo ha sido realizado por Baltensperger, y lleva a una expresión de frecuencias propias de la resonancia del conductor:

$$\omega_{rk} = \frac{S_k^2}{p^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J}{M}}$$

siendo:

S_k = coeficiente que es función de los modos de fijación, por ejemplo, para una barra empotrada por sus extremos:

$$S_k = (4 \cdot k - 1) \cdot \pi / 2,$$

k = rango de la frecuencia de resonancia,

p = separación entre soportes.

En la práctica se constata que, las frecuencias propias de los conductores para una sección dada, dependen de la separación longitudinal de los soportes.

El cálculo tiene, pues, por objeto examinar si el factor esfuerzo, resultante de la separación escogida para los soportes, es admisible para la frecuencia propia del conductor o del conjunto de conductores, de donde se obtiene un coeficiente R , homogéneo con una longitud:

$$R = 4 \sqrt{\frac{E \cdot J}{M \cdot \omega^2}} \cdot 10^3$$

El gráfico de la **figura 12** indica el factor de esfuerzo $V\sigma$ a prever en función de la razón p/R , siendo p la distancia entre los soportes; esta distancia p debe ser escogida para que la razón esté fuera de la zona sombreada, para un factor $V\sigma$ admisible.

4 Aplicación a los JdB trifásicos en BT

En este capítulo, los autores precisan cómo se tienen en cuenta las consideraciones teóricas precedentes en el caso de dos equipamientos de BT: uno, los cuadros de BT, y otro, las canalizaciones eléctricas prefabricadas del tipo Canalis y Victa Dis.

Caso de los JdB en los cuadros de BT

El JdB trifásico de un cuadro eléctrico BT está constituido por un conjunto de conductores reagrupados en fases y mantenidos en su sitio por los soportes.

Está caracterizada por:

- la forma de los conductores,
- la disposición de las fases, unas respecto a las otras,
- la disposición de los conductores de una misma fase,
- el tipo de soporte y el modo de fijación de los conductores (barras aislantes, peines, varillas aislantes...).

Los diferentes elementos que constituyen el sistema de JdB deben de estar dimensionados de tal manera que puedan resistir los esfuerzos electrodinámicos que aparecen en un cortocircuito (**figura 13**).

En la práctica, el calcular este dimensionado es lo mismo que calcular la distancia entre soportes, o su número, para una tecnología dada de JdB y de soportes.

Práctica de cálculo

La metodología a seguir está resumida en el diagrama siguiente:

I. Definición de los datos de partida.
II. Cálculo de las fuerzas.
III. Cálculo de la distancia entre soportes a partir de las fuerzas sobre el conductor más solicitado.
IV. Cálculo de la distancia entre soportes a partir de las fuerzas sobre los soportes.
V. Determinación de la distancia máxima entre soportes, y verificación del comportamiento en vibración del JdB.

Los detalles de cada paso se presentan a continuación, para el caso de un JdB formado por varias barras de sección rectangular por cada fase.

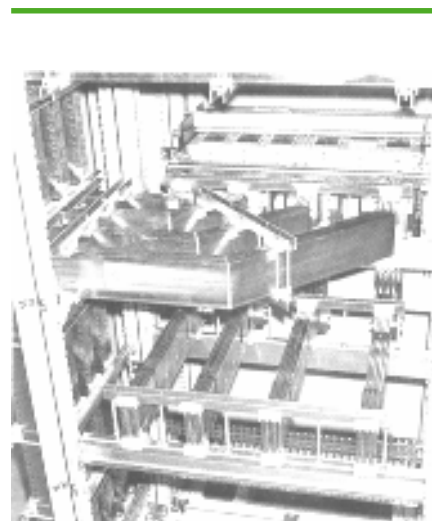


Fig. 13: JdB de un cuadro de BT Masterbloc, previsto para soportar los efectos de una corriente de cortocircuito de 80 kA (Merlin Gerin).

I - datos de partida para efectuar los cálculos

- dimensión y forma de un conductor: (por ejemplo, para una barra, su grosor a y su anchura b en m),
- número de conductores por fase: n ,
- valor eficaz de la corriente de cortocircuito: I_{cc} en kA ,
- naturaleza del defecto: bi o trifásico.
- distancia entre ejes de fase: d_f en m .

- modo de fijación de los conductores en los soportes (engastados o sólo apoyados).

Este dato se tiene en cuenta un coeficiente β :

$\beta = \beta_1$ para el conjunto de los conductores de una fase,

$\beta = \beta_2$ para un conductor perteneciente a 1 fase,

- límite elástico de un conductor:

$R_{p0,2}$ en N/m^2

($R_{p0,2} = 125 \times 10^6 N/m^2$ para el aluminio tipo 1050 y

$R_{p0,2} = 250 \times 10^6 N/m^2$ para el cobre).

- características de los soportes: resistencia mecánica R_m (en N/m^2) según la naturaleza de las sollicitaciones, y la sección del soporte sollicitado S_m (en m^2).

II - cálculo de las fuerzas

Cada conductor de fase sufre un esfuerzo debido a las acciones entre fases y a las de otros conductores de la misma fase. La fuerza máxima se ejerce sobre los conductores externos de la fase central.

Este conductor está sometido:

- por una parte, al esfuerzo resultante de las otras dos fases:

$$F_1/l = cte \cdot 2 \cdot 10^{-7} \cdot k_1 \cdot (2,2 \cdot I_{cc})^2 / d_f$$

(fuerza por unidad de longitud del JdB en N/m)

siendo:

$cte = 1 \text{ ó } 0,87$ según que se trate de un defecto bi o trifásico.

k_1 = coeficiente de Dwight, que tiene en cuenta la forma del conjunto de los conductores de la fase.

Este coeficiente, parametrizado por

las razones altura (h) / anchura de una fase (l') y d_f / anchura de una fase, puede calcularse o leerse en los ábacos.

I_{cc} = valor eficaz de la corriente de cortocircuito en kA .

d_f = distancia entre ejes de fases en m .

El coeficiente multiplicador 2,2 permite calcular el valor pico de la corriente de cortocircuito.

- por otra parte, (están sometidos) a la fuerza de atracción (corriente en el mismo sentido) resultante de los otros conductores de la fase considerada (figura 14), si éstos están unidos mecánicamente:

$$F_2/l = \sum_i F_{2 \rightarrow i} / l \text{ (en N/m)}$$

ecuación de la misma forma que la precedente, pero teniendo en cuenta los tres parámetros siguientes:

$d_{1 \rightarrow i}$ = entre-eje del conductor 1 al conductor i en m ,

n = número de conductores por fases,

k_2 = coeficiente de Dwight, para el conductor de la fase.

III - cálculo de la distancia entre soportes a partir de las tensiones sobre el conductor más sollicitado

El conductor más sollicitado debe soportar la fuerza:

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 =$$

$$= \frac{\beta_1 \cdot (F_1/l) \cdot d_1^2}{8 \cdot Z} + \frac{\beta_2 \cdot (F_2/l) \cdot d_1^2}{8 \cdot Z_0}$$

siendo:

F_1/l y F_2/l = fuerzas en N/m ,

d_1 = distancia entre dos soportes en m ,

aquí: $b = h$

$$k_1 = f(h, l', d_{fas})$$

$$k_2 = f(a, b, d')$$

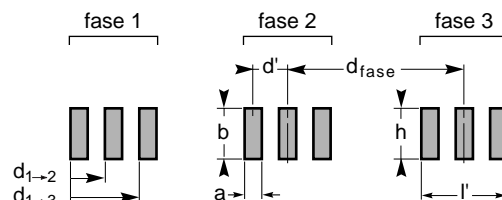


Fig. 14: Parámetros tenidos en cuenta en el planteamiento de la ecuación de la fuerza de atracción entre conductores de un JdB.

Z_0 = módulo resistente de una barra en m^3 ,

Z = módulo resistente de una fase en m^3 ,

$\beta_1 = 0,73$ (coeficiente para el caso de apoyo simple),

$\beta_2 = 0,5$ (coeficiente para el caso de engaste).

Estos valores son válidos para una configuración de JdB dado: las barras de una misma fase están engastadas, y los tres grupos de las fases, apoyados (figura 15).

Criterio «deformación de JdB»:

La barra que sufre la fuerza mayor no debe deformarse. Sin embargo, se acepta una ligera deformación residual, según un coeficiente q definido por la norma CEI 865.

En la fórmula precedente aparece d_1 . Esta distancia entre los soportes se puede determinar a partir de un valor de fuerza, a nivel de los conductores, que no se sobrepase que $\sigma = q \cdot R_{p0,2}$ (por ejemplo $q = 1,5$).

IV - cálculo de la distancia entre soportes a partir de las fuerzas en los soportes

Los soportes deben, por tanto, resistir los esfuerzos debidos a la fuerza F_1 .

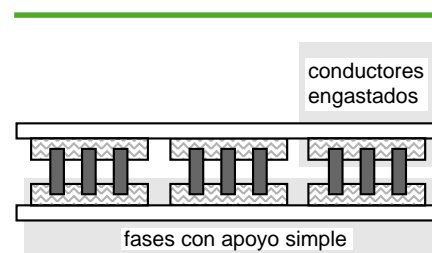


Fig. 15: Configuración de un JdB, con coeficientes $\beta_1 = 0,73$ (apoyo simple) y $\beta_2 = 0,5$ (engastado).

Ejemplo de cálculo

I. definición de los datos de partida

- conductores: barras planas de cobre
grosor **a = 5 mm**; anchura **b = 100 mm**;
fijación: **barras engastadas**
- cada fase está formada por **n = 3** barras
separadas 5 mm ($d' = 10$ mm)
- distancia entre ejes de fase **$d_f = 95$ mm**
- fallo **trifásico lcc = 80 kA ef.**
- límite de elasticidad del cobre **$R_{p0,2} = 250 \times 10^6$ N/m²**
- resistencia mecánica del soporte **$R_m = 100 \times 10^6$ N/m²**
- sección del soporte solicitada
en tracción **$S_m = 150 \times 10^{-6}$ m²**

II. cálculos de los esfuerzos

■ entre fases

$F_{1/1} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot cte \cdot k_1 \cdot (2,2 \cdot lcc)^2 \cdot 1/d_f$
 $cte = 0,87$ defecto trifásico
 k_1 : coeficiente de Dwight, función de las razones
 $b/(2n - 1) \cdot a$ y $d_f/(2n - 1) \cdot a$
 $k_1 (100/5 \cdot 5, 95/5 \cdot 5) = 0,873$

■ entre barras de una misma fase, especialmente,

sobre las exteriores de la fase central $F_{2/1} = \sum_i F_{2 \rightarrow i / 1}$

1 índice de la primera barra
 $i = 2$ y 3 índice de las otras dos barras de la fase
 $F_{2 \rightarrow i / 1} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot k_{2 \rightarrow i / 1} \cdot (2,2 \cdot lcc/n)^2 \cdot 1/d$
 $d_{1 \rightarrow i}$: distancia entre el eje de barras 1 e i
 $k_{2 \rightarrow i / 1}$: coeficiente de Dwight, función de las
razones b/a y $d_{1 \rightarrow i} / a$
 $k_{2 \rightarrow 1 / 2} (100/5, 10/5) = 0,248$
 $k_{2 \rightarrow 1 / 3} (100/5, 20/5) = 0,419$

$$F_{1/1} = 2 \times 10^{-7} \times 0,87 \times 0,873 \times (2,2 \times 80 \times 10^3)^2 \times 1/95 \times 10^{-3}$$

$$F_{1/1} = 49530 \text{ N/m} = \mathbf{4953 \text{ daN/m}}$$

$$F_{2/1} = 2 \times 10^{-7} \times (2,2 \times 80 \times 10^3/n)^2 \times [0,248/10 \times 10^{-3} + 0,419/20 \times 10^{-3}]$$

$$F_{2/1} = 31490 \text{ N/m} = \mathbf{3149 \text{ daN/m}}$$

III. cálculo de la distancia entre soportes a partir de los esfuerzos sobre el conductor más solicitado (límite de elasticidad del conductor)

$\sigma = \beta_1 \cdot (F_{1/1}) \cdot d_1^2/8 \cdot Z + \beta_2 \cdot (F_{2/1}) \cdot d_1^2/8 \cdot Z_0$
 $\sigma = 1,5 \cdot R_{p0,2}$
 $d_1^2 = 1,5 \cdot R_{p0,2} / [\beta_1 \cdot (F_{1/1})/8 \cdot Z + \beta_2 \cdot (F_{2/1})/8 \cdot Z_0]$
 $\beta_1 = \beta_2 = 0,5$
 $Z_0 = b \cdot a^2/6 = 4,2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3$
 $Z = n \cdot Z_0 = 3 \cdot Z_0 = 1,25 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$

$$d_1^2 = 1,5 \times 250 \times 10^6 / [0,5 \times (49530)/8 \times 1,25 \times 10^{-6} + 0,5 \times (31490)/8 \times 4,2 \times 10^{-7}]$$

$$d_1 = 0,229 \text{ m} = \mathbf{229 \text{ mm}}$$

IV. cálculo de la distancia entre soportes a partir de los esfuerzos sobre los soportes (límite de elasticidad de los soportes)

$d_2 = R_m \cdot S_m/(F_{1/1})$
 $\alpha = 0,5$

$$d_2 = 100 \times 10^6 \times 150 \times 10^{-6} / (0,5 \times 49530)$$

$$d_2 = 0,604 \text{ m} = \mathbf{604 \text{ mm}}$$

V. determinación de la distancia máxima entre los soportes

$d = \text{mínimo entre } d_1 \text{ y } d_2$

$$\mathbf{d < 229 \text{ mm}}$$

Criterio «rotura del soporte»:

$$d_2 = \frac{R_m \cdot S_m}{\alpha \cdot F1/1}$$

siendo:

α = constante cuyo valor depende del modo de fijación y del número de soportes.

V - determinación de la distancia máxima entre soportes, y verificación del comportamiento del JdB durante la vibración

Para resistir a los esfuerzos electrodinámicos, hay que colocar los soportes a una distancia d igual al valor más pequeño de d_1 y de d_2 :

$$d \leq \min(d_1, d_2).$$

Además es necesario verificar que esta distancia no conlleve fenómenos de resonancia.

Este recordatorio de cálculo sigue a las recomendaciones de la norma CEI 865 (1986) que trata del cálculo de los efectos de las corrientes de cortocircuito tanto en los aspectos térmicos como mecánicos.

Estos cálculos no sustituyen los ensayos con valores reales, pero son indispensables para el diseño de nuevos productos y para responder a casos específicos.

valor eficaz
de corriente de
cortocircuito
(kA)

$\cos \varphi$

n

$I \leq 5$	0,7	1,5
$5 < I \leq 10$	0,5	1,7
$10 < I \leq 20$	0,3	2
$20 < I \leq 50$	0,25	2,1
$50 < I$	0,2	2,2

Fig. 16: Valor normalizado del coeficiente n que liga el valor de cresta con el valor eficaz de corriente de cortocircuito; n corresponde al

coeficiente $\sqrt{2} \cdot K$ definido en el capítulo 3 (CEI 439-1).

Normas y ensayos

Para los equipos de BT, existen dos categorías de ensayos:

- ensayos de puesta a punto, como apoyo al diseño,
- ensayos de certificación.

En este último caso, estos ensayos forman parte de un conjunto de ensayos llamados «ensayos tipo», cuyos informes muy a menudo se exigen para definir el producto como un «Conjunto de Serie» (C.S.).

Esta denominación requiere, pues, unos ensayos y pasa a tener así una garantía suplementaria para los usuarios. Pero, a pesar de todas estas exigencias, los fabricantes desarrollan tales productos que les permiten revalorizar su «saber hacer».

Los ensayos tipo definidos por las normas CEI 439-1 (1992) y -2 (1987) o NF 63-421 (1991) son respectivamente siete en la (439-1) y diez en la (439-2).

En lo que se refiere a soportar los cortocircuitos, objeto de este documento, estas normas precisan las condiciones de ensayo a respetar, así como el valor normalizado del coeficiente que relaciona el valor de pico al valor eficaz de la corriente de cortocircuito (**figura 16**).

Cuando el sistema considerado difiere poco del sistema de referencia (C.S.), se llama «Conjunto Derivado en Serie» (C.D.S.) y su calificación puede hacerse por cálculo a partir de una estructura C.S.

En cuanto a cómo soporten los equipos C.D.S la corriente de cortocircuito, hay un método de extrapolación definido por el informe técnico CEI 1117 (1992).

Una certificación completa respecto a soportar las corrientes de cortocircuito, necesita tres ensayos:

- un ensayo de resistencia a las corrientes de cortocircuito trifásico;
- un ensayo a la corriente de cortocircuito entre el neutro y la fase más próxima. Hay que mencionar que, si el neutro tiene la misma sección que las otras fases y si la distancia entre el neutro y la fase la

más próxima es idéntica a la distancia entre fases, este ensayo corresponde a un cortocircuito bifásico;

- un ensayo de resistencia al cortocircuito entre una fase y el conductor de protección.

Para cada uno de ellos, el fabricante debe de precisar el valor eficaz de la corriente de cortocircuito y su duración, generalmente 1s, para verificar la fatiga térmica ligada a la corriente de cortocircuito.

En cuanto al valor de la corriente de cortocircuito para el ensayo trifásico, hay que distinguir dos valores: **el valor supuesto y el valor real o de paso**.

La diferencia entre ellos se debe al hecho de tener en cuenta o no la impedancia del JdB, en el momento de contrastar; en práctica:

- contraste realizado, bajo una tensión igual a la tensión de empleo, a la entrada del cuadro \Rightarrow valor supuesto de I_{cc} ;

- contraste hecho, a muy baja tensión, en extremo del JdB, en el punto de cortocircuito \Rightarrow valor real.

Está claro que, para un mismo valor previsto de la intensidad de corriente de cortocircuito, el segundo caso es mucho más apremiante. La diferencia puede ser, según el circuito, del 20 al 30%.

En el caso del ensayo fase-neutro, el valor de la corriente de cortocircuito corresponde al 60% de la corriente (supuesta o real) del ensayo trifásico.

Una tendencia actualmente tomada por numerosos fabricantes (incluido Merlin Gerin y Telemecanique) es realizar estos ensayos en corriente real. Además, para que estos ensayos sean representativos de los efectos más desfavorables durante un cortocircuito, hay que respetar los puntos siguientes:

- presencia de un régimen asimétrico, al menos en una de las tres fases;
- presencia de, al menos, una junta o brida sobre el juego de barras ensayado;
- realización de un cortocircuito sujeto con tornillos;

■ tener en cuenta los fenómenos vibratorios, manteniendo el defecto durante, al menos, diez alternancias, o sea 200 ms a 50 Hz; esta duración es siempre de 1s para verificar en el mismo tiempo la fatiga térmica. (CEI 439-1).

Las diferentes etapas de estos ensayos son:

- contraste del circuito cortocircuitando las salidas del transformador;
- cableado del JdB al transformador de la planta;
- montaje del cortocircuito (pieza específica ligando todas las barras) sobre el JdB;
- ensayo en tiempo corto (alrededor 10 ms) para determinar la impedancia del JdB;
- ensayo obligado de 1s sobre el conjunto.

Caso de las canalizaciones prefabricadas del tipo Canalis y Victa Dis

La construcción de los juegos de barras trifásicas prefabricadas del tipo Canalis y Victa Dis destinadas al transporte y a la distribución de

corriente (**figura 17**) se hace según las normas de fabricación y de acuerdo con las normas específicas de las que las principales son la CEI 439-1 y 2 (Internacional) y UL 857 (Estados Unidos).

Diseño

Las técnicas aplicadas difieren en función de los márgenes de intensidad considerados, especialmente para corrientes mayores de 100 A.

Actualmente existen tres modelos principales de:

- clásica,
- sandwich,
- en plancha.
- diseño clásico (de 100 a 800 A)

Los conductores están colocados emplazados en una envolvente metálica y sostenidos a intervalos regulares por aisladores en forma de peine (**figura 18**).

Los esfuerzos electrodinámicos que se desarrollan durante los cortocircuitos siguen las leyes antes explicadas y se manifiestan en una deflexión de los conductores entre aislantes que hace vibrar el conjunto.

Para determinar la forma y la sección de los conductores hay que buscar la mejor solución de equilibrio entre:

- el calentamiento de los conductores;
- la caída de tensión admisible;
- el coste de fabricación.

Todo ello, con la obligación de que, por una parte, la deflexión de los conductores, en cuanto a la resistencia mecánica, sea elástica, y no una deformación permanente, una vez pasado el cortocircuito; y, por otra, que no se reduzca de manera anormal el nivel de aislamiento (entre fases o entre fases y tierra), durante el período transitorio en el que aparecen los fenómenos electrodinámicos en un cortocircuito.

En la práctica esto se consigue ajustando la separación entre aisladores.

- diseño sandwich y ventilado (de 1000 a 5000 A)

Por encima de una cierta intensidad -1000 A- y para mantenerse en unas dimensiones y unas condiciones de intercambios térmicos aceptables para la canalización, la corriente de una misma fase queda repartida entre varios conductores. Existen

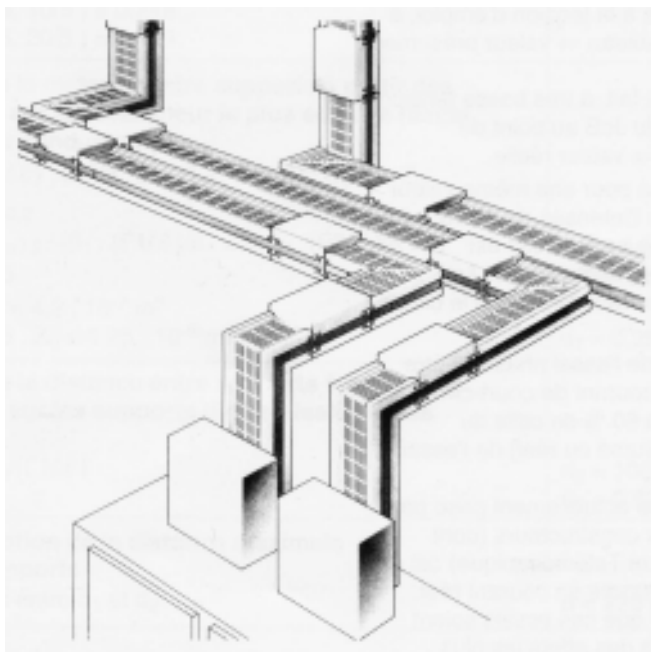


Fig. 17: JdB prefabricado de distribución eléctrica 3000 A Canalis (Telemecanique).

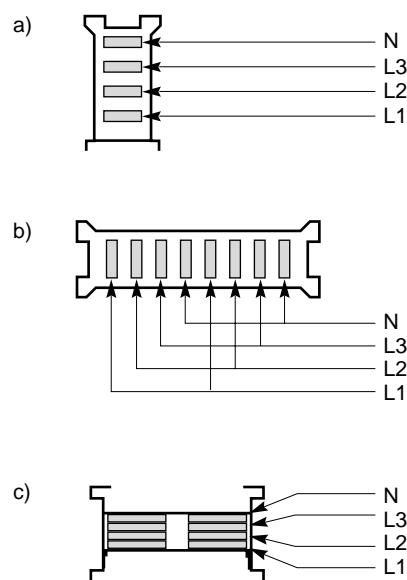


Fig. 18: Diferentes diseños de JdB trifásicos prefabricados: clásico (a), sandwich (b), y en plancha (c).

canalizaciones sandwich de hasta cinco conductores por fase.

En este caso se ofrecen dos soluciones a los proyectistas:

- sea dejar reagrupados los conductores de una misma fase,
- sea intercalar los conductores elementales de fases de manera ordenada (1-2-3) + (1'-2'-3') para desembocar en la configuración llamada sandwich (figura 18).

Este tipo de diseño se adapta muy bien a la distribución horizontal de corriente.

■ diseño con planchas y no ventilada (de 1000 a 5000 A).

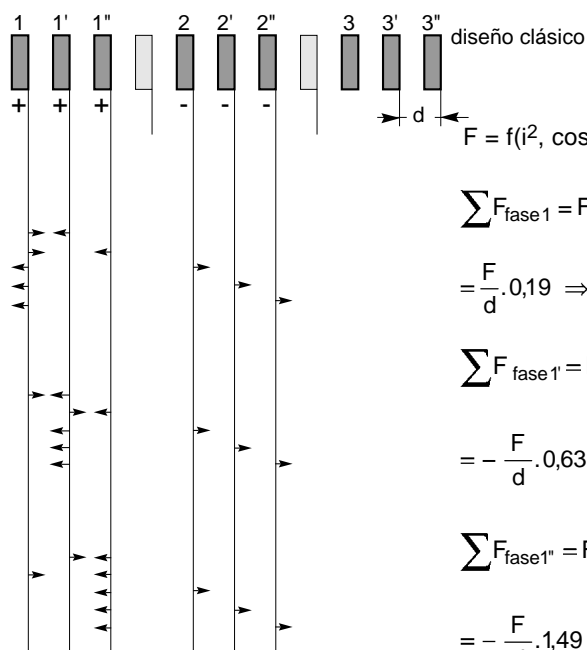
En esta disposición, los conductores, de sección rectangular y revestidos de una capa aislante, se mantienen en contacto a todo lo largo de la canalización, como en un cable (figura 18). La sujeción de los conductores permite asegurar el intercambio térmico necesario.

Para facilitar la fabricación, los conductores son generalmente de un grosor constante y sólo su anchura varía según la intensidad nominal de

los JdB (hasta alrededor de 250 mm). Para intensidades elevadas, se necesitan dos o tres conductores por fase, pero no montados en sandwich.

Los esfuerzos electrodinámicos (cargas repartidas) cuando hay un cortocircuito quedan equilibrados, en estos JdB, por la reacción de la chapa de la envolvente.

Por su comportamiento térmico, este tipo de diseño es muy adecuado para el transporte de corriente, tanto vertical como horizontal.



$F = f(i^2, \cos \varphi)$ siendo $i = I/3$

$$\sum F_{\text{fase1}} = F \cdot \left[\left(\frac{1}{d} \cdot 0,42 \right) + \left(\frac{1}{2 \cdot d} \cdot 0,62 \right) - \left(\frac{1}{4 \cdot d} \cdot 0,83 \right) - \left(\frac{1}{5 \cdot d} \cdot 0,87 \right) - \left(\frac{1}{6 \cdot d} \cdot 0,92 \right) \right] =$$

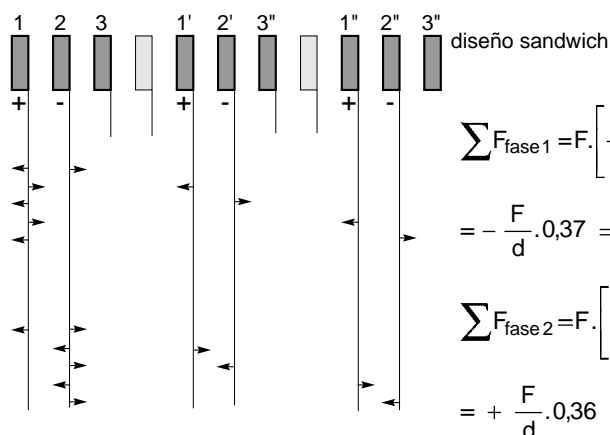
$$= \frac{F}{d} \cdot 0,19 \Rightarrow K1 = 0,19$$

$$\sum F_{\text{fase1'}} = F \cdot \left[\left(-\frac{1}{d} \cdot 0,42 \right) + \left(\frac{1}{d} \cdot 0,42 \right) - \left(\frac{1}{3 \cdot d} \cdot 0,75 \right) - \left(\frac{1}{4 \cdot d} \cdot 0,83 \right) - \left(\frac{1}{5 \cdot d} \cdot 0,87 \right) \right] =$$

$$= -\frac{F}{d} \cdot 0,63 \Rightarrow K1' = 0,63$$

$$\sum F_{\text{fase1''}} = F \cdot \left[\left(-\frac{1}{d} \cdot 0,42 \right) - \left(\frac{1}{2 \cdot d} \cdot 0,62 \right) - \left(\frac{1}{2 \cdot d} \cdot 0,62 \right) - \left(\frac{1}{3 \cdot d} \cdot 0,75 \right) - \left(\frac{1}{4 \cdot d} \cdot 0,83 \right) \right] =$$

$$= -\frac{F}{d} \cdot 1,49 \Rightarrow K1'' = 1,49$$



$$\sum F_{\text{fase1}} = F \cdot \left[-\left(\frac{1}{d} \cdot 0,42 \right) + \left(\frac{1}{4 \cdot d} \cdot 0,83 \right) - \left(\frac{1}{5 \cdot d} \cdot 0,87 \right) + \left(\frac{1}{8 \cdot d} \cdot 1 \right) - \left(\frac{1}{9 \cdot d} \cdot 1 \right) \right] =$$

$$= -\frac{F}{d} \cdot 0,37 \Rightarrow K1 = 0,37$$

$$\sum F_{\text{fase2}} = F \cdot \left[+\left(\frac{1}{d} \cdot 0,42 \right) - \left(\frac{1}{3 \cdot d} \cdot 0,75 \right) + \left(\frac{1}{4 \cdot d} \cdot 0,83 \right) - \left(\frac{1}{7 \cdot d} \cdot 0,97 \right) + \left(\frac{1}{8 \cdot d} \cdot 1 \right) \right] =$$

$$= +\frac{F}{d} \cdot 0,36 \Rightarrow K2 = 0,36$$

Fig. 19: Solicitación mecánica sobre los conductores elementales de las fases 1 y 2.

Distribución de los esfuerzos electrodinámicos

Este párrafo, a partir de un ejemplo simple y concreto, permite visualizar y cuantificar las diferentes fuerzas que soportan los conductores.

La estructura estudiada tiene las características siguientes:

- $I_n = 3000$ A,
- tres conductores por fase, o sea, 1000 A por conductor,
- sección de los conductores = 90 x 6 mm,
- material = aluminio o cobre,
- distancia entre ejes de los conductores = 18 mm.

Los cálculos presentados, bajo forma de cuadro (figura 19) valoran los esfuerzos mecánicos en los conductores elementales (según el sentido de la corriente) de las fases 1 y 2, en el caso de un cortocircuito

bifásico fase 1/fase 2, con corrección de la incidencia geométrica siguiendo el ábaco de Dwight.

Conclusiones parciales

Con la disposición clásica, se constata un aumento y una gran dispersión de los esfuerzos aplicados a los conductores elementales, mientras que, para la disposición sandwich, los esfuerzos son sensiblemente iguales sobre cada conductor elemental.

En este ejemplo, la diferencia de esfuerzos mecánicos está en una relación de 1 a 5 en favor de la disposición sandwich.

Por otro lado, esta disposición tiene otra ventaja en cuanto a la caída de tensión: el «sandwich» de las fases produce una disminución de la resultante de la inducción magnética y, por tanto, de la reactancia..., luego también, de la caída de tensión.

Derivaciones y conexión

Se utilizan dos tecnologías diferentes para sacar la corriente en las derivaciones, o para hacerla llegar hasta las bridas de conexión de una línea prefabricada de transporte y distribución: la tecnología «con tornillo» y la tecnología «con contactos a presión».

■ tecnología «con tornillo»

Las conexiones se hacen desde pletinas roscadas especiales previstas en el diseño del material.

Los límites prácticos de esta tecnología son:

- 1250 A, en las derivaciones,
- hasta 6000 A para la conexión.

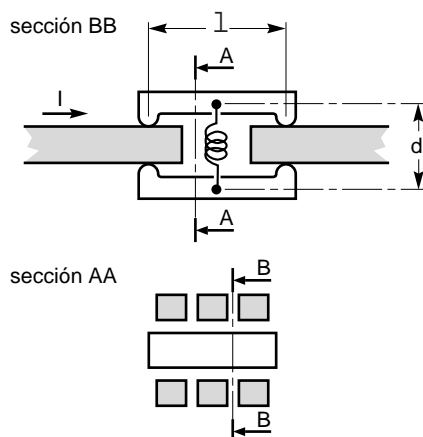
Nota :

Ciertos montajes de codos articulados en un mismo plano usan este principio de la tecnología «con tornillo».

■ tecnología «con contactos a presión»

La toma o conducción de corriente se hace a partir de unos dedos de contacto colocados en paralelo.

En una primera aproximación, la corriente se reparte entre el total de contactos en paralelo. Cada punto de contacto soporta una fuerza estática F (desarrollada por un resorte exterior) cuyo valor resulta de un compromiso entre el nivel de la resistencia eléctrica de contacto deseada para



En los cálculos, se consideran las fuerzas sobre cada semi-pinza, de sección transversal $a \times b$, que forma el conjunto de pinzas elementales.

Si n es el número de pinzas en paralelo, la fuerza de repulsión total sobre la semi-pinza es:

$$F_r = 2 \cdot n \cdot 3 \cdot 10^{-7} \cdot (I_2 n)^2.$$

La fuerza de atracción que hay que compensar es:

$$F_a = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{I}{2}\right)^2 \cdot k \cdot \frac{1}{d} \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{d^2}{l^2}} - \frac{d}{l}\right)$$

k es el coeficiente de forma, que hay que ver en el ábaco de la figura 2, para un conductor de sección total $a \times b$.

Al escribir que $F_a \geq F_r$, para que haya compensación, resulta que:

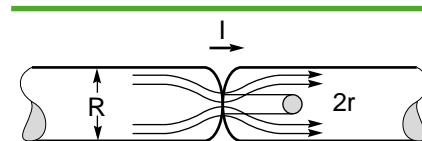
$$\frac{1}{d} \geq \sqrt{\left(\frac{3}{n \cdot k} + 1\right)^2} - 1$$

Por ejemplo, para $k = 0,8$, la razón l/d debe de alcanzar:

4,6	para	1 pinza	($n = 1$)
2,7	para	2 pinzas	($n = 2$)
1,4	para	5 pinzas	($n = 5$)
0,95	para	10 pinzas	($n = 10$)

Parece interesante aumentar el número n de pinzas en paralelo pero rápidamente queda limitado por consideraciones tecnológicas y también por las diferencias de resistencia y reactancia entre pinzas contiguas vecinas; esto no permite un reparto igual de la corriente entre ellas como supone el valor calculado de l/d .

Por tanto, hay que tomar un margen de seguridad sobre el valor calculado de l/d , tanto mayor cuanto más piezas haya en paralelo. En la práctica hay dos aplicaciones que tengan hasta 2×12 contactos en paralelo, que pueden soportar corrientes de corta duración admisibles del orden de 50 kA RMS - 1 s.



Fuerza F de repulsión que se ejerce entre estos dos conductores:

$$F = 10^{-7} \ln \frac{R}{r} \cdot I^2$$

(\ln = logaritmo neperiano, y r radio de la zona de contacto calculado con la fórmula de R. Holm).

Fig. 21: Ejemplo de estrechamiento de las líneas de corriente en las proximidades del contacto entre los elementos conductores cilíndricos.

asegurar el paso de la corriente nominal sin calentamientos anormales, y la resistencia mecánica a las fuerzas de rozamiento cuando los conductores se dilatan.

En este sentido, hay que destacar el interés de lubricar los contactos elásticos o, si se usan pletinas de contacto adicionales, utilizarlas de las que tienen una mezcla de plata/grafito.

Esta tecnología se usa siempre en las siguientes instalaciones de corriente:

- de 16 a 400 A, en las derivaciones,
- de 40 a 1000 A, para las conexiones.

■ resistencia a los esfuerzos electrodinámicos

En la fijación «con tornillo» se obliga a soportar a los diferentes elementos de la estructura citada las mismas tensiones de los esfuerzos electrodinámicos que para los JdB en cuadros BT; en la tecnología «con contactos a presión» se aprovechan estos esfuerzos.

La disposición generalmente aplicada a los dedos de contacto o «lengüetas» se representa en el dibujo de la **figura 20**, en la que se ve claramente cómo las corrientes que circulan por las lengüetas opuestas son del mismo sentido. Los esfuerzos electrodinámicos (cargas repartidas) desarrollados a lo largo de las pletinas y calculados según los métodos anteriormente descritos, van entonces en el sentido de atracción. De este modo ayudan a las fuerzas de contacto y se oponen al efecto de repulsión de los contactos que tiene por origen el estrechamiento de las líneas de corriente en las proximidades de la zona de contacto (**figura 21**): es el **principio autocompensador** (**figura 20**).

Ensayos de los esfuerzos electrodinámicos

Los ensayos de tipo, propios de las canalizaciones, están definidos en las normas CEI 439-2 y NF C 63-411.

La diferencia importante respecto a los «cuadros BT» reside en las

condiciones de ensayo al cortocircuito. Estas condiciones detallan que los ensayos deben de realizarse sobre una línea instalada de longitud máxima de seis metros que tenga, al menos, una junta con bridas y un codo (ver croquis de la **figura 22**).

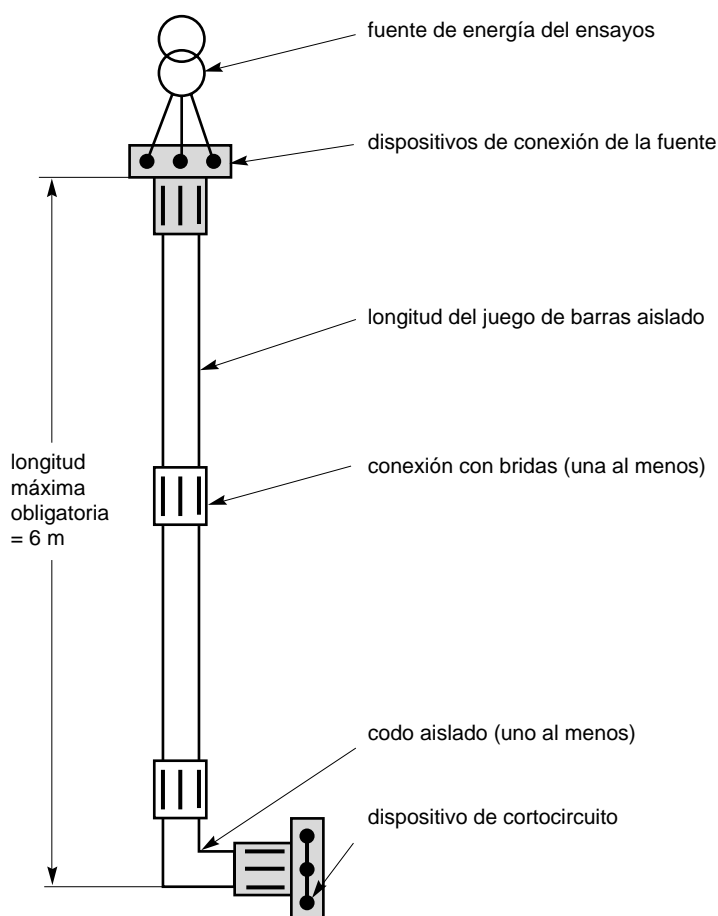


Fig. 22: Croquis de una línea de JdB prefabricada tal como la definen las normas para los ensayos de tipo.

5 Conclusión

En caso de cortocircuito, los importantes fuerzas electrodinámicas que aparecen y el perjuicio material que pueden producir justifican la importancia dada a la resistencia mecánica de los juegos de barras. Importancia tanto mayor cuanto que, la insuficiente resistencia mecánica de los mismos, necesita, por lo menos, su sustitución y, por tanto, la parada de la instalación.

De ahí la importancia que tiene para instaladores y/o usuarios el escoger unos equipamientos que tengan la máxima garantía (C.S.) o que estén constituidos por elementos estandar modificados, montados en fábrica y verificados (C.D.S.).

En los dos casos, la importancia de los ensayos es evidente. Pero estos ensayos necesitan grandes inversiones. Inversiones que sólo los grandes fabricantes pueden soportar

teniendo en cuenta la infraestructura que necesitan y su propio coste.

A partir de estos tipos verificados, las modificaciones de diseño son, a pesar de todo, posibles; es entonces cuando, en una cierta medida, la aproximación por el cálculo y el «saber hacer» de un constructor, pueden suplir la aproximación mediante la experimentación.

6 Bibliografía

Normas

■ CEI 439-1: Conjunto de aparataje de baja tensión. Reglas para los conjuntos de serie y los conjuntos derivados de serie.

■ CEI 439-2: Conjunto de aparataje de baja tensión. Reglas particulares para las canalizaciones prefabricadas. (NF C 63-411)

■ CEI 865: Cálculo de los efectos de las corrientes de cortocircuito.

■ CEI 909: Cálculo de corrientes de cortocircuito en las redes trifásicas de corriente alterna.

■ CEI 909-1: Informe técnico.

Continuación de la CEI 909.

■ CEI 1117: Informe técnico.

Método para determinar el comportamiento ante los cortocircuitos de los conjuntos de la aparataje derivados de serie.

Cuadernos Técnicos Merlin Gerin

■ Estudio térmico de los cuadros eléctricos de BT. CT n° 145. C. KILINDJIAN.

■ Seguridad de funcionamiento y cuadros eléctricos BT. CT n° 156. O. BOUJU.

■ Cálculo de corrientes de cortocircuito. CT n° 158. R. CALVAS, B. DE METZ-NOBLAT, A. DUCLUZAUX, y G. THOMASSET.

Publicaciones diversas

■ Elektrodynamische Beanspruchung von parallelen Leitern o Efectos electrodinámicos en líneas paralelas. P. BALTENS-PERGER. Boletín Schweiz Elektrotechn Verein n° 25, 1944.

■ Los juegos de barras en perfil en las instalaciones de primera y segunda categoría. R. ROLS.

Artículo en cuatro partes aparecido en la Revista del Aluminio, n° 212, 213, 214, 215 de 1954.

■ Transporte de grandes intensidades de corriente alterna en BT y MT. - 2ª parte. P. BEIGBEDER. Boletín de estudios y realizaciones n° 43, 1957.

■ Cálculo de instalaciones de juegos de barras trifásicas en cuanto a su resistencia a los esfuerzos electrodinámicos. R. MASCARIN. Revista General de Electricidad. RGE, agosto 1957.

■ Establecimiento de fórmulas que permiten determinar la fuerza lineal en caso de cortocircuito que afecta a un juego barras trifásico dispuesto en capa. R. MASCARIN. Revista General de la Electricidad. RGE, marzo 1959.

■ Über den Einfluß von Resonanzerscheinungen auf die mechanische Kurzschlußfestigkeit von biegesteifen Stromleitern. P. SIEBER. AEG Mitteilungen n° 49, 1959.

■ Mechanical forces on current-carrying conductors. E.D. CHARLES. Procedimientos IEE, vol. 110, n° 9. Septiembre 1963.

■ Esfuerzos electrodinámicos que aparecen en los centros de transformación en el momento del cortocircuito. G. SCHAFFER. Revue Brown Boveri, 1970.