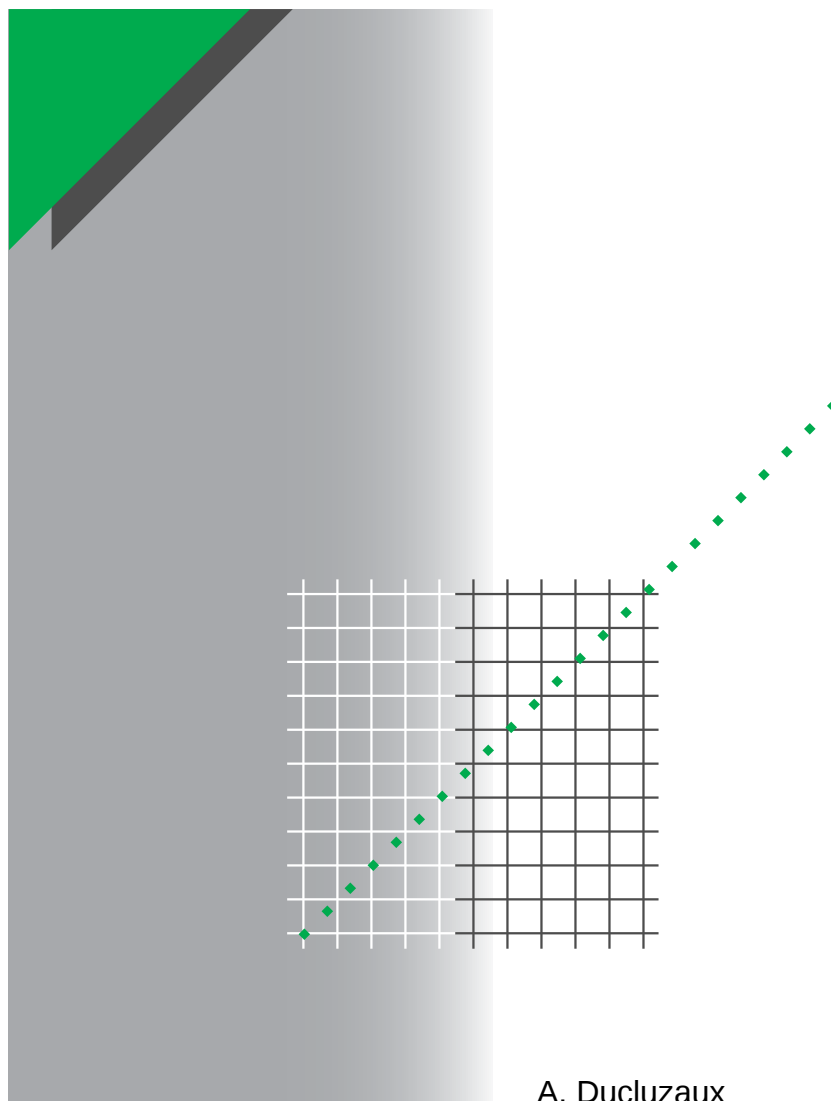


Cuaderno Técnico nº 083

Pérdidas suplementarias en los conductores de grandes intensidades por los efectos pelicular y de proximidad



Merlín Gerín

Telemecanique

Square D

Eunea

A. Ducluzaux

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**.

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 083 de Schneider Electric».

Cuaderno Técnico nº 083

Pérdidas suplementarias en los conductores de grandes intensidades por los efectos pelicular y de proximidad

André DUCLUZAUX

Ingeniero ESME en 1950, licenciado en ciencias en 1951, entró en Merlin Gerin en 1952.

Empezó participando en los estudios sobre cuadros prefabricados de BT y después en la puesta a punto de la aparamenta para estaciones de ensayo de potencia. En 1960, como jefe de la oficina técnica de estudios para los interruptores automáticos BT de gran intensidad, desarrolló los interruptores DA; después se encargó de investigaciones en BT. En 1969 pasó a ser responsable de proyecto del departamento de Investigaciones Generales. Fue entonces cuando desarrolló estudios más profundos sobre el efecto pelicular y de proximidad para el desarrollo de aparatos y de juegos de barras de gran intensidad, resumiendo en este documento práctico, la mayor parte de los datos obtenidos.

Trad.: José M^a Giró

Original francés: enero 1977

Versión española: setiembre 2003



Pérdidas suplementarias en los conductores de grandes intensidades por los efectos pelicular y de proximidad

Toda variación de intensidad de una corriente en un conductor modifica la sección de paso implicada. Este Cuaderno Técnico analiza las consecuencias de los efectos pelicular y de proximidad en las canalizaciones eléctricas para grandes intensidades.

Habría que tener más presentes estos fenómenos al diseñar ciertos juegos de barras, porque es evidente que esta particularidad, frecuentemente pasada por alto, implica un sobredimensionamiento de los conductores, elevadas pérdidas de energía y, por tanto, un mal rendimiento general de la explotación.

Índice

1	Introducción	p. 4
2	Efecto pelicular	
	2.1 Generalidades	p. 6
	2.2 La cáscara ficticia	p. 8
	2.3 El efecto pelicular en los conductores cilíndricos	p. 9
	2.4 El efecto pelicular en un conductor de sección rectangular	p. 10
3	Efectos de proximidad	
	3.1 El efecto directo de proximidad	p. 12
	3.2 El efecto inverso de proximidad	p. 13
	3.3 El efecto inducido de proximidad	p. 14
4	Resistencia efectiva de los juegos de barras	
	4.1 Juegos de barras planos	p. 15
	4.2 ¿Calentamiento mínimo o pérdidas adicionales reducidas?	p. 16
	4.3 Juegos de barras con perfiles especiales	p. 17
	4.4 Resistividad del metal: ¿cobre o aluminio?	p. 18
	4.5 Influencia de la frecuencia	p. 19
5	Efectos pelicular y de proximidad en régimen transitorio	p. 20
6	Conclusiones	p. 21
	Bibliografía	p. 22

1 Introducción

Hace poco más de un siglo (1873) que los técnicos en electricidad conocen esta propiedad de las corrientes alternas de circular preferentemente por la periferia de los conductores macizos.

Por sí misma, esta propiedad no es perjudicial si no produce pérdidas adicionales. En un conductor macizo, todo se reduce a pérdidas y calentamiento, como si la resistencia efectiva, en corriente alterna, fuese superior a la resistencia real en corriente continua.

El aumento de resistencia, del orden de un 10 a un 20% para conductores calculados para 2000 A, crece mucho más deprisa que el aumento de sección para el transporte de grandes intensidades.

De aquí se deducen dos inconvenientes:

- Se malgasta energía eléctrica por las pérdidas adicionales, de las que los industriales se percatan al poco tiempo, puesto que representa un lujo que sobrepasa el simple aspecto financiero.

- Se malgasta también materia prima, cobre o aluminio, por la cantidad de más de metal que hay que utilizar y del que se hace un mal uso como conductor eléctrico.

Las pérdidas de energía en las canalizaciones eléctricas, relativamente cortas, de los equipos de distribución no se suelen tomar en consideración más que por sus consecuencias físicas: el calentamiento y la evacuación de las calorías. En una instalación en baja tensión, el aspecto económico del rendimiento energético nunca se puede pensar que no tiene

importancia: un cálculo sencillo nos dice que un juego de barras de 1000 mm², que transporta 2000 A, disipa, en un año de utilización permanente, una energía cuyo coste es igual al precio del cobre con el que está fabricado.

Según lo dicho, unas pérdidas adicionales, por efecto pelicular, de un 10%, representan el precio del cobre para todo el tiempo de vida de la instalación (20 años con un factor de utilización del 0,5).

Por otra parte, la ley de Kelvin dice que la sección de cobre (o de aluminio) que es rentable dar al juego de barras es aquella en la que se igualan, por una parte, el coste de las pérdidas anuales por efecto Joule y, por otra, los costes anuales de amortización del cobre y de otros elementos de la construcción que sean proporcionales al peso del cobre.

El delimitar perfectamente estos problemas técnicos de diseño de materiales entra naturalmente en la vocación de Schneider Electric, constructor de apartamentada y de equipos de distribución. Pero la misión de un fabricante no se limita a la simple producción, sino que debe aportar su experiencia técnica a los usuarios para facilitarles la instalación y utilización juiciosa de los materiales.

El objeto de este estudio será, por tanto, recordar el principio y las consecuencias del efecto pelicular y de proximidad y ordenar los datos prácticos útiles para los instaladores de canalizaciones eléctricas de gran intensidad. Estos efectos empiezan a notarse para los conductores que se usan para 1600 a 2000 A, pero resultan muy importantes a partir de 4000 ó 5000 A.

2 Efecto pelicular

Se usa la expresión de «efecto pelicular», que es traducción del francés «effect de peau» y «effect peliculaire» o «effect Kelvin»; en alemán

«Stromverdrängung», que literalmente significa: desplazamiento de la corriente.

2.1 Generalidades

El aumento de la densidad de corriente en la periferia de los conductores macizos en corriente alterna es el aspecto más negativo del efecto pelicular, pero esto no explica suficientemente el aumento de la resistencia efectiva.

Una explicación que se da frecuentemente es que la inductancia de la zona central de un conductor es mayor que la de la zona periférica; y estando esta inductancia ligada a la variación de flujo abarcado, es un máximo para el filete de corriente central.

Para equilibrar las caídas de tensión inductivas entre los diversos filetes, circula una corriente más elevada por los filetes periféricos. Estas diferentes corrientes están también más o menos defasadas, siendo su suma aritmética superior a la corriente total medida provocando pérdidas adicionales por efecto Joule; todo esto es como decir que la resistencia efectiva ha aumentado.

Para acercarse más a este efecto pelicular cuantitativamente y con todas sus consecuencias, es necesario pasar por los razonamientos matemáticos desarrollados por Lord Kelvin en 1889 [1]⁽¹⁾ y basados en las ecuaciones de propagación establecidas por Maxwell algunos años antes.

Estas demostraciones, que superan el nivel de este Cuaderno, están ampliamente detalladas en [3], [9], [13], [14], [20], [24]; aquí, con la ayuda de diagramas vectoriales simples, nos contentaremos con evidenciar el efecto pelicular y sus consecuencias con un razonamiento cualitativo basado en las corrientes inductivas parásitas (corrientes de Foucault⁽²⁾).

Consideremos un conductor rectangular macizo (figura 1) y fijémonos en una parte del mismo

como formada por tres elementos: el 1º y 3º en la periferia y el 2º en el centro.

En corriente continua, la intensidad total I que lo atraviesa es la suma de 3 intensidades iguales en cada elemento:

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

En corriente alterna se superponen a estas 3 corrientes una corrientes inducidas.

El 3º elemento, recorrido por I_3 , induce, en el rectángulo formado por 1 y 2, una fem e_3 , que produce una intensidad i_3 defasada α (casi $\pi/2$).

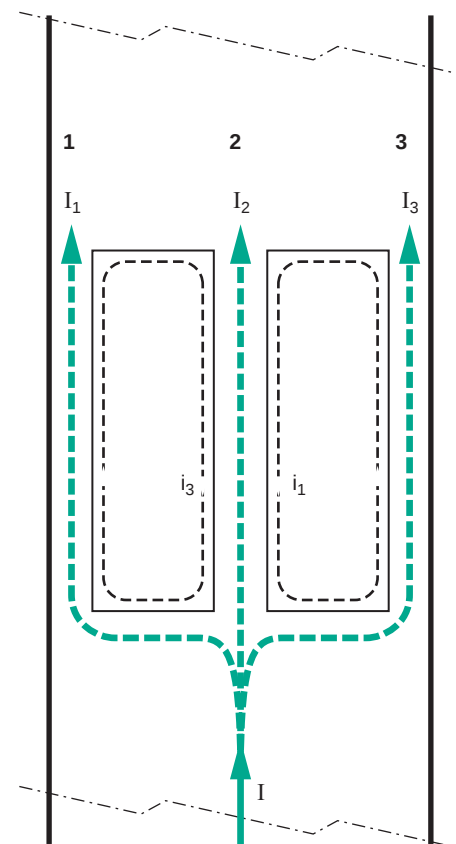


Fig. 1.

(1) Las cifras entre [] se refieren a la bibliografía.

(2) Los técnicos franceses de la electricidad, en honor de Foucault, dieron su nombre a las corrientes inducidas cuando son parásitas; en otros idiomas se llaman corrientes «en torbellino», «eddy-current» o «wirbelstrom».

La intensidad resultante I'_1 , en el elemento 1, es:

$$\vec{I}'_1 = \vec{I}_1 + \vec{i}_3.$$

Se comprueba, en el diagrama vectorial de la **figura 2**, que I'_1 tiene una intensidad mayor que I_1 , y está adelantada respecto a I_1 , que es el vector considerado en fase con la tensión U existente entre los extremos con el mismo potencial de los 3 elementos. De la misma forma, en el 3^{er} elemento, se tendrá, habrá:

En cambio, la intensidad resultante I'_2 en el elemento central 2 resultará disminuida por las dos corrientes inducidas i_1 e i_3 :

El diagrama de la **figura 3** indica que la intensidad resultante I'_2 es muy inferior en amplitud a I_2 y defasada en retraso.

En la **figura 4**, la intensidad total I en el conjunto del conductor aparece como la suma vectorial de las intensidades parciales en los 3 elementos considerados:

Trasladando este razonamiento al conjunto de elementos de corriente de un conductor macizo y no sólo a 3, la tendencia general del fenómeno sigue siendo la misma; hay una variación $\frac{R_a}{R_c} = \frac{I_2}{I_1} + \frac{I_3}{I_1}$ progresiva de intensidad y defasaje de los

elementos de corriente desde la periferia hacia el centro.

Así se han aclarado las causas y consecuencias del efecto pelicular que se refieren a las diversas magnitudes eléctricas y físicas:

■ Densidad de corriente

La densidad en la periferia es mayor que la densidad de corriente media ($I'_1 > I_1$).

La densidad de corriente en el centro es menor que la media ($I'_2 < I_2$).

■ Intensidad

La suma de las amplitudes de las intensidades de los diferentes elementos es mayor que la intensidad total (**figura 4**).

■ Pérdidas

Por tanto, las pérdidas reales por efecto Joule son mayores, lo que suele expresarse considerando que la resistencia efectiva en corriente alterna R_a es mayor que la verdadera resistencia en corriente continua R_c , de ahí estas pérdidas adicionales.

En la práctica, la tasa por efecto pelicular o coeficiente de aumento de la resistencia o de pérdidas adicionales, se expresa con la razón:

■ Defasaje

La intensidad en la periferia está defasada, respecto a la tensión en bornes del conductor, en adelanto y la intensidad del centro, en

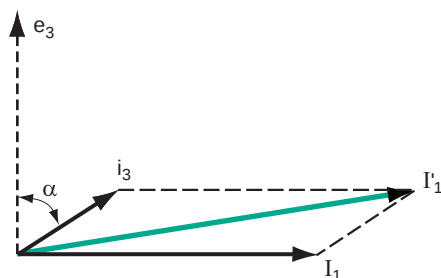


Fig. 2.

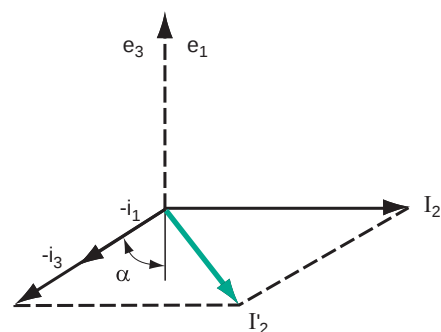


Fig. 3.

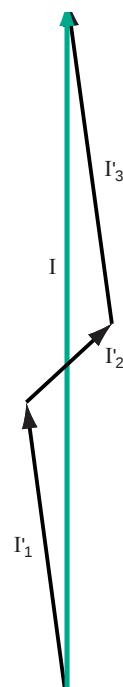


Fig. 4.

retardo; el desfase en el centro puede alcanzar y aún sobrepasar $\pi/2$, en el momento que la intensidad que hay en el centro del conductor, se sustrae de la intensidad total que circula, convirtiéndose en parásita.

■ Inductancia

La inductancia efectiva de un conductor en ca se compone de 2 términos:

El primero, L_1 , es la inductancia de los elementos del circuito exterior al conductor; el segundo, L_2 , es la propia inducción interna que resulta del campo interno. L_2 depende del reparto de corriente en el interior y, como este reparto heterogéneo consiste en un aumento de la densidad en la periferia, el término L_2 disminuye. El efecto pelicular disminuye, por tanto, la inductancia efectiva de un conductor.

■ Permeabilidad

El razonamiento precedente se basa en el fenómeno de la inducción. Por tanto, interviene la permeabilidad del medio, tiene, aquí, su papel clásico: el efecto pelicular se nota mucho más en los conductores de material magnético de gran permeabilidad.

■ Frecuencia

El aumento del efecto pelicular con la frecuencia es consecuencia de que su origen está ligado a la inducción y ésta es proporcional a la variación de flujo.

■ Resistividad

Cuanto mayor sea la resistividad del conductor, menor será la corriente inducida y, por tanto, el efecto pelicular será menos pronunciado.

2.2 La cáscara ficticia

Buscando simplificar la interpretación del efecto pelicular, Boucherot [2] propuso en 1905 la noción de «cáscara o envolvente ficticia» denominada también «espesor de la piel» o «profundidad de penetración».

Desde el punto de vista del efecto Joule, todo sucede como si la totalidad de la corriente que transporta el conductor circulara por una cáscara periférica o vaina, de espesor δ , siendo la densidad de corriente en ella uniforme y nula en el interior.

$$\delta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{10\rho}{\mu f}}$$

siendo:

δ : el espesor de la cáscara, expresada en m,
 ρ : la resistividad expresada en Ω/m ,
 μ : la permeabilidad que vale $4\pi \cdot 10^{-7}$ en el vacío,
 f : la frecuencia, expresada en Hz.

En realidad, la densidad decrece siguiendo una ley exponencial desde la periferia hasta el centro del conductor. A una profundidad δ , la densidad es todavía $1/e = 0,367$, como indica la **figura 5**.

La noción de cáscara ficticia supone que la

densidad media en la cáscara es igual a $\frac{1}{\sqrt{2}}$

veces la densidad periférica.

En la práctica, conociendo los tres valores ρ , μ y f , la cáscara o profundidad de penetración permite entender muy fácilmente si el metal del conductor se está usando adecuadamente.

A 50 Hz, el cobre tiene una envolvente de 8,5 mm y el aluminio de 10,5 mm, lo que significa que será un despilfarro de material utilizar pletinas rectangulares o cilíndricas de diámetro superior a 16 mm en cobre o 20 en aluminio.

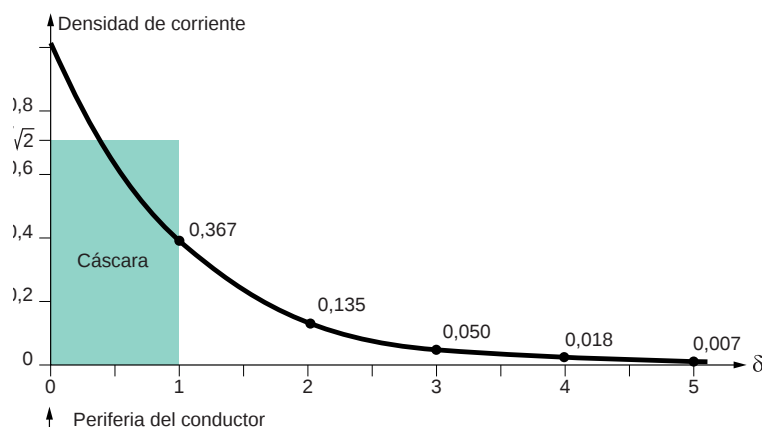


Fig. 5: Disminución de la densidad de corriente en el interior de un conductor.

Para el acero, la envolvente es del orden de 1 mm, cuando no está saturado, lo que demuestra que es inútil emplear conductores de acero de más de 2 mm, excepto por razones mecánicas.

Hay que destacar que una saturación progresiva hace penetrar más profundamente la corriente en los conductores de acero, lo que ha permitido ciertos diseños originales como resistencia variable [7].

2.3 El efecto pelicular en los conductores cilíndricos

Para esta forma particular, los cálculos son menos complejos y los resultados más precisos. En general, el único dato de interés es la razón

$$K = \frac{R_a}{R_c} \text{ o coeficiente de pérdidas adicionales}$$

que pone en evidencia, cuando vale más de 1, una geometría inadecuada del conductor. Se han propuesto varias fórmulas empíricas, pero la de Levasseur [6] es especialmente simple y da errores inferiores al 2 %:

$$K = \sqrt[6]{\left(\frac{3}{4}\right)^6 + \left(\frac{S}{p\delta}\right)^6} + 0,25$$

donde S es la sección del conductor, p su perímetro, δ el espesor de la película o envolvente.

Mediante las tablas y gráficos publicados, damos en la **figura 6** los resultados interpretados después de los trabajos originales de Dwight [3].

Para cada forma, caracterizada por la razón grosor/diámetro, se tiene el valor de K en función de la resistencia Rc en corriente continua. Las curvas son válidas para cualquier resistividad del metal (amagnético). La frecuencia de referencia es 50 Hz; para cualquier otro valor, hay que reemplazar el valor

$$\text{de } R_c \text{ por: } R_c \frac{50}{f}.$$

Los conductores cilíndricos de gran sección que se utilizan en la práctica, son tubos o cables trenzados.

En un cable trenzado, la división en hilos flexibles, no modifica en absoluto el efecto pelicular, como se podría pensar por analogía con la fragmentación de las planchas finas en los circuitos magnéticos de acero. En las planchas, las corrientes de Foucault son transversales, pero en los cables son longitudinales. La división en múltiples hilos de un cable de gran

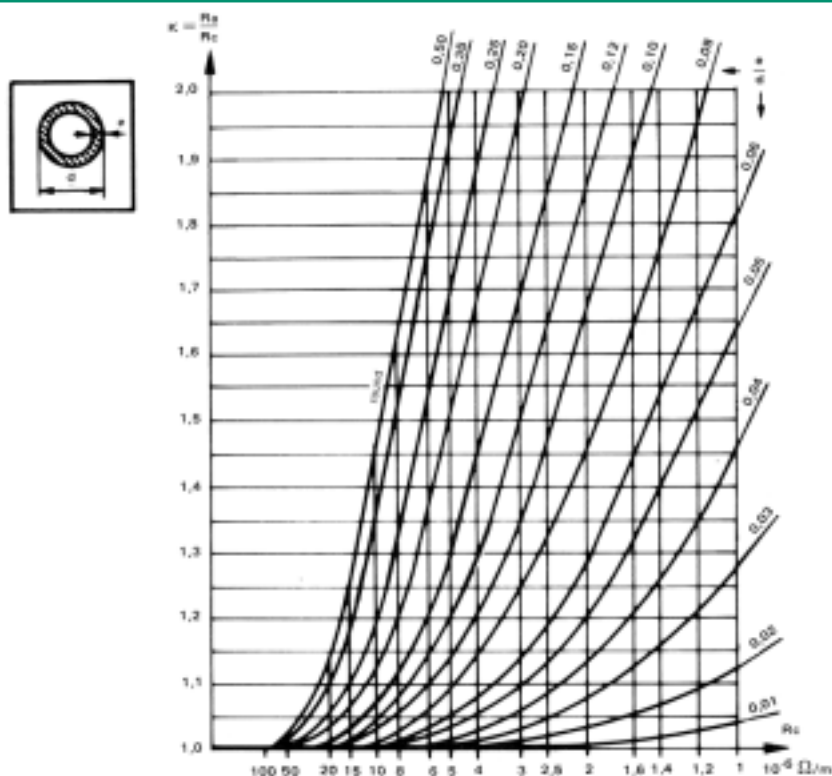


Fig. 6: Coeficiente de pérdidas suplementarias por efecto pelicular en los conductores cilíndricos.

sección podría ser utilizada para reducir su coeficiente K, si los cables estuvieran regularmente permutados, es decir, arrollados tanto en el interior como en la periferia.

En realidad, es raro que se utilicen secciones superiores a 400 mm² en cobre o 500 mm² en aluminio, para las que todavía se utiliza el metal en un 95%.

2.4 El efecto pelicular en un conductor de sección rectangular

En este caso, los cálculos son mucho más complejos y resultan imprecisos, teniendo en cuenta las hipótesis sobre la distribución del campo magnético; los autores reseñados (ver bibliografía), normalmente han completado sus resultados con experimentos, también muy delicados.

De una forma cualitativa, la **figura 7**, sacada del importante estudio de Schwenkhagen [5] y confirmada por Renand [13], muestra la importancia del fenómeno en una barra de cobre de 100 x 10 mm a 50 Hz.

Las curvas indican, para cada punto del interior situado en el eje, la densidad de corriente relativa respecto a la densidad media y el defasaje respecto a la tensión.

Fijar el valor del coeficiente K de pérdidas adicionales, sea por cálculos o experimentalmente, hay que hacerlo con precaución, vistos los valores propuestos para la barra de cobre de 100 x 10 mm: 1,19 - 1,18 - 1,15 - 1,14 - 1,05 - 1,008. Después de nuestras propias comprobaciones pensamos que el valor más probable para el coeficiente será 1,15.

La **figura 8**, que se obtiene de un programa informático propuesto por Silvester [19], permite obtener un conjunto de valores satisfactorios del coeficiente K para cualquier conductor rectangular.

Como en la **figura 6**, las curvas se han trazado en función de la resistencia R_c en corriente continua y para alterna de 50 Hz.

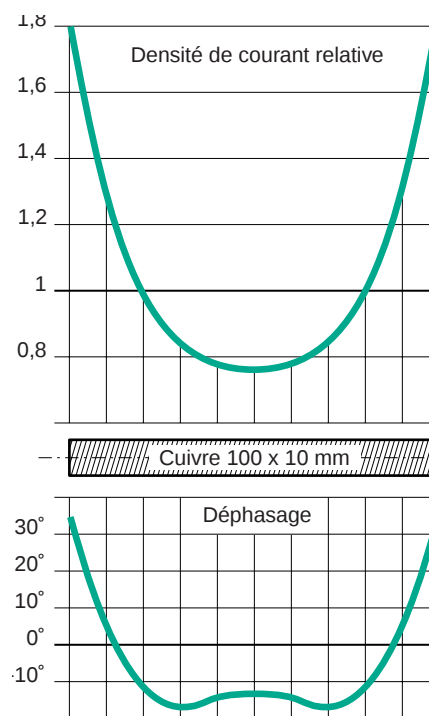


Fig. 7: Densidad de corriente y defasaje en una barra rectangular.

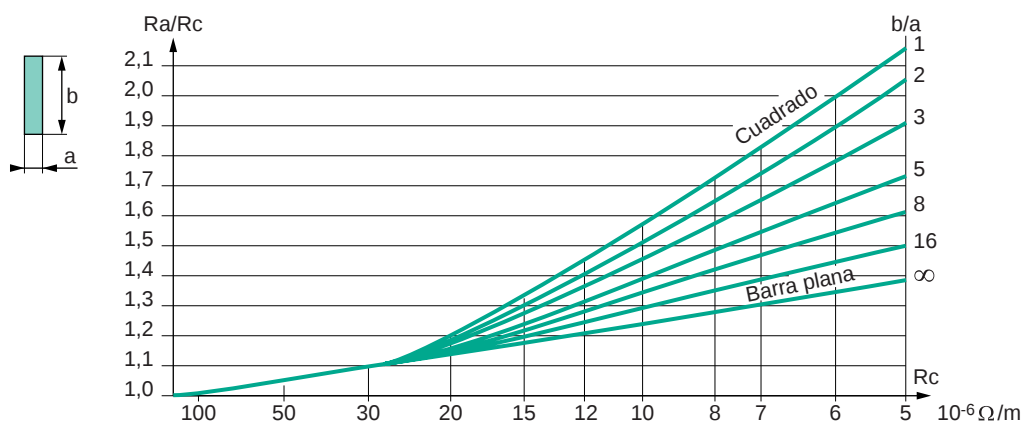


Fig. 8: Coeficiente de pérdidas adicionales por efecto pelicular en los conductores rectangulares.

3 Efectos de proximidad

En lo dicho hasta aquí, los conductores en los que se ha observado el efecto pelicular estaban solos, fuera de la influencia de cualquier campo magnético que no fuera el suyo propio. Desde el momento en que otro conductor se encuentre cerca del cable estudiado, la hipótesis ya no es válida; el campo de cada uno perturba la distribución de la corriente en el otro por el «efecto de proximidad».

Bajo la expresión de «efecto de proximidad», se engloban tres fenómenos simultáneos, que, para mayor claridad, nos parece necesario disociar a pesar de su semejanza:

- El efecto directo de proximidad: es la influencia mutua sobre las densidades de corriente respectivas de conductores próximos, recorridos por corrientes del mismo sentido.
- El efecto inverso de proximidad: es la influencia mutua sobre las densidades de corriente respectivas de conductores próximos, recorridos por corrientes opuestas.
- El efecto inducido de proximidad: se refiere a los fenómenos originados por la acción de la corriente que circula por un conductor y las corrientes de circulación que se inducen en las piezas metálicas situadas en las proximidades del conductor.

En realidad, en un juego de barras trifásico con varias barras por fase, estos efectos están imbricados, como muestra el ensayo de calentamiento expuesto en la **figura 9**: el juego de barras en cuestión tiene, por fase, 4 barras de cobre de 80 x 6 mm, separadas entre sí 6 mm y a una distancia entre fases de 60 mm.

En un punto de la vertical de cada una de las 12 barras, se representa el incremento de temperatura respecto al ambiente para una intensidad de 2500 A.

En esta gráfica se pueden observar varios de los aspectos citados, aún admitiendo que los calentamientos no representan exactamente las correspondientes densidades de corriente.

En concreto hay que destacar que:

- las dos barras interiores (6 y 7) de la fase central se calientan menos que las exteriores, a pesar de estar, éstas últimas, mejor refrigeradas.
- el efecto de proximidad asimétrico, resultante del defasaje de 120° en trifásica, se presenta entre las barras 4 y 5 a un lado, y 8 y 9 al otro.

Este ensayo deja muy claro que la noción de calentamiento medio en un juego de barras es ambiguo, puesto que se tienen valores tan dispares como 36° y 53°, que sobrepasan, con mucho, los errores de medida.

Analicemos ahora los 3 efectos de proximidad separadamente antes de valorar realmente los dos primeros, que nos interesan particularmente cuando se unen al efecto pelicular.

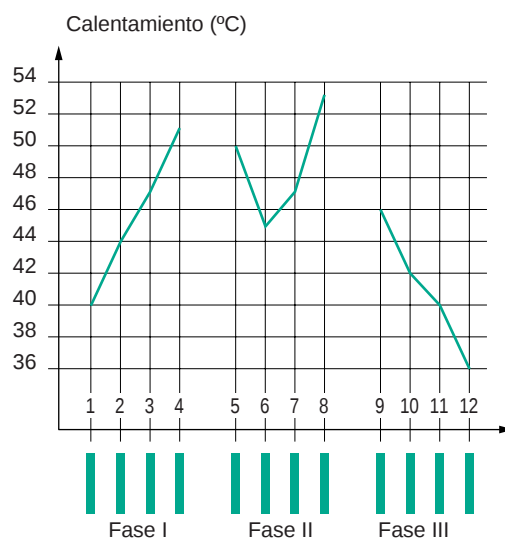


Fig. 9: Calentamiento de un juego de barras trifásico.

3.1 El efecto directo de proximidad

Consideremos un conductor macizo de sección cuadrada (**figura 10**). Por el efecto pelicular, en (a) la densidad de corriente es mayor en la periferia.

Partamos longitudinalmente el conductor en dos mitades (b); no aparece ninguna modificación en el reparto de la corriente. Alejemos progresivamente cada una de las partes (c); a medida que la distancia aumenta, el campo magnético de cada una se modifica y la densidad de corriente en las caras enfrentadas va creciendo, hasta llegar a ser igual a las de las caras opuestas, para una distancia de 2 a 3 veces el lado del cuadrado.

Este efecto se manifiesta, superpuesto al efecto pelicular, en los juegos de barras en los que cada fase está formada por varias barras, eléctrica y geométricamente en paralelo.

La **figura 11**, extraída de [5], se refiere a un grupo de 4 barras de cobre, de 100 x 10 mm, separadas 10 mm. Las curvas superiores dan la densidad de corriente relativa en cada punto del eje; las curvas inferiores indican el defasaje, en adelanto o en retraso, respecto a la tensión en los extremos. En cada caso, una curva se refiere a las barras exteriores y la otra, a las interiores.

Sorprende constatar la importante disparidad de densidades de corriente, con una razón de 8 a 1, así como que el defasaje sobrepase los 90° en el centro de las barras interiores.

La **figura 12** se refiere a un grupo de cinco barras de 80 x 10 mm, separadas entre sí 10 mm [13]; las curvas trazadas sobre el corte son las líneas que unen los puntos con la misma densidad de corriente.

Hay que señalar cómo, en un paquete de barras próximas, el reparto de corriente difiere poco del que se obtendría por el simple efecto pelicular en un conductor macizo de idénticas dimensiones exteriores.

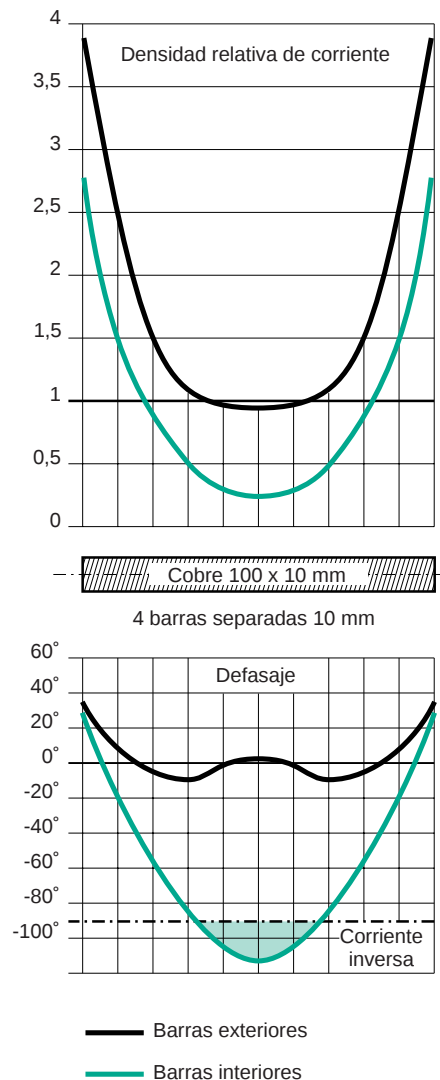


Fig. 11: Densidad de corriente y defasaje en un grupo de 4 barras.

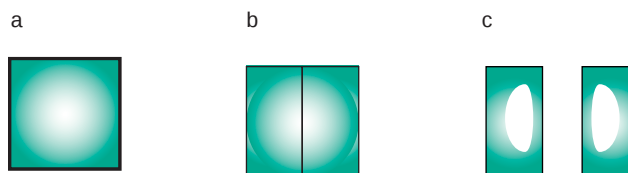


Fig. 10.

Cuanto mayor sea el número de barras en paralelo, menos se sobrecargan las barras interiores respecto a las exteriores. Esta distribución desigual de la corriente, y por tanto del calentamiento, se compensa parcialmente con una mejor ventilación de las barras externas, las más cargadas.

Con una separación suficiente de las barras, del orden de 3 veces su dimensión mayor, el efecto de proximidad desaparece totalmente; pero, para distancias intermedias, se produce una sensible disminución del coeficiente de pérdidas K, lo que también demuestran los ensayos y cálculos efectuados sobre 4 barras de 80 x 10 mm, separadas de 10 a 40 mm.

Separación (mm)	10	20	40
$K = \frac{R_a}{R_c}$	1,65	1,53	1,38

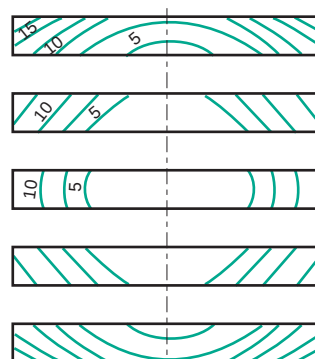


Fig. 12: Densidad de corriente en un grupo de 5 barras.

3.2 El efecto inverso de proximidad

Este efecto, muy similar pero inverso respecto al anterior y que se manifiesta entre dos conductores próximos recorridos por corrientes opuestas (**figura 13**), produce un aumento de la densidad de corriente en las caras enfrentadas, que son las partes de conductor en las que la inductancia es mínima.

En el conexionado de aparatos de gran intensidad, este efecto aparece cuando los conductores de una misma fase forman una lazada o bucle. Las barras interiores (A) del lazo o tramo (**figura 14**) resultan más cargadas que las barras exteriores (C).

En los juegos de barras trifásicos, el efecto de proximidad inversa es perceptible en BT cuando las fases están próximas; sea el que sea el orden de las fases, siempre hay dos fases próximas recorridas por corrientes opuestas durante una fracción del período.

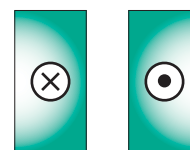


Fig. 13.



Fig. 14.

3.3 El efecto inducido de proximidad

En las piezas metálicas próximas situadas en la proximidad de conductores atravesados por una corriente alterna elevada se inducen corrientes que provocan a pérdidas adicionales, de ahí el aumento indirecto de la resistencia efectiva del circuito inductor. Simultáneamente su inductancia disminuye.

Cuando la pieza es de acero, las pérdidas internas son todavía mayores por efecto de la histéresis. Ésta es la razón por la que no se puede poner alrededor de un conductor monofásico suelta una protección de acero cuando transporta más de unos 100 A, bajo el riesgo de que la brida pueda llegar a más de 100°C.

Se puede ampliar esta información con algunos datos numéricos que figuran en [15], [18] y [22], sobre casos típicos de piezas metálicas de acero o aluminio, situadas en la proximidad de los conductores.

Las citadas corrientes inducidas no siempre son parásitas, el campo que inducen se opone, por definición, al campo inductor principal. Así una placa de aluminio próxima a un juego de barras juega un papel de pantalla magnética, reduciendo un poco el campo al otro lado.

Este efecto es especialmente acusado cuando cada fase de una conexión de gran intensidad (5000 a 30000 A) está encerrada en una canaleta tubular de aluminio; si las envolventes están conectadas entre sí, circula por ellas una corriente casi igual a la principal. De ello se deduce una supresión del campo en el exterior y en consecuencia de los efectos electrodinámicos entre las fases.

El diseño de juegos de barras bajo canaletas sobrepasa el objeto de este estudio; el lector podrá ampliar los datos en las publicaciones que se citan [15] y [16].

4 Resistencia efectiva de los juegos de barras

4.1 Juegos de barras planos

La construcción de juegos de barras pasa la mayor parte de veces por la yuxtaposición de varias barras planas en paralelo para cada fase. Por razones prácticas, se establece entonces una separación entre barras igual a su espesor, de ahí el efecto pelicular y de proximidad explicados anteriormente.

Si hacemos referencia a los resultados de estudios publicados, la precisión de las cifras de estos efectos conjugados es muy imprecisa. En

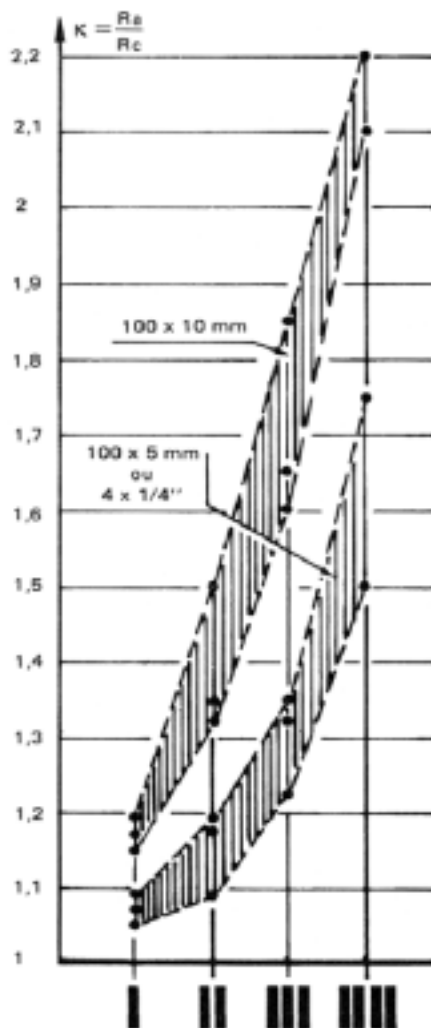


Fig. 15: Coeficiente de pérdidas adicionales en los grupos de barras planos.

la **figura 15**, se da un orden de magnitud del coeficiente K de pérdidas adicionales para dos secciones de barras de cobre, uno de 100 x 5 y otro de 100 x 10 mm.

Para cada grupo de 1, 2, 3 ó 4 barras, el conjunto de los puntos correspondientes a cada resultado publicado delimita la zona rayada donde se sitúa el valor probable de K.

A falta de otros documentos más precisos, la búsqueda del coeficiente K de un grupo de barras de dimensiones cualesquiera se puede hacer a partir de las curvas de la **figura 8**, aplicando a una barra única la misma altura y tomando como anchura la dimensión mayor del grupo. La resistencia Rc es entonces equivalente a la del conjunto de barras en paralelo.

El coeficiente K encontrado con este método lo es en exceso; pero esta extrapolación no es válida más que para barras espaciadas, al menos, una distancia igual a su espesor.

En efecto, una separación adecuada y una disposición juiciosa llevan a una reducción del coeficiente de pérdidas; así en la **figura 16** [22] se indican los coeficientes K para grupos de 3, 4, 6 y 8 barras de 100 x 6 mm; las barras próximas están separadas 6 mm, las barras más alejadas, 60 mm.

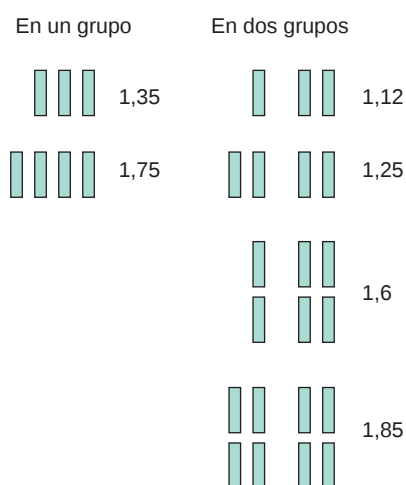


Fig. 16: Coeficiente de pérdidas suplementarias en grupos de 3 a 8 barras planas según su disposición.

La ganancia relativa sobre las pérdidas es de un 20% para tres barras y de un 40% para cuatro barras, según que estén en un solo grupo o en dos.

Rara vez se utilizan 5 barras agrupadas, debido al elevado coeficiente de pérdidas a causa de la peor utilización de la barra central.

Se ha propuesto también disponer las cuatro barras de una fase siguiendo las medidas de un cuadrado, solución que permite encontrar la ventaja del conductor cilíndrico, pero los soportes y derivaciones resultan considerablemente más difíciles.

Todas estas indicaciones se refieren al efecto pelicular unido con el efecto directo de proximidad que se manifiestan en un grupo de varias barras de la misma fase; en trifásica, si la distancia entre las barras próximas de dos fases diferentes es inferior a dos veces la altura de estas barras, el efecto inverso de proximidad se superpone a los efectos precedentes.

Para conocer el coeficiente K que expresa el correspondiente aumento de pérdidas, se podrá ir a la norma DIN 43 671 [23], que indica un coeficiente K4 para barras de 5 ó 10 mm de espesor, o a la referencia [24], donde las distancias medias geométricas de las diversas formas de conductores permiten el cálculo en cuestión.

Una disposición especialmente interesante en trifásica es el juego de barras «sandwich», entrelazadas o permutadas [11]; las barras de

cada una de las fases no están dispuestas en grupos independientes por fases, sino intercaladas. En la **figura 17** se puede ver un juego de barras de dos barras por fase (J, R, V). Hay anulación del efecto de proximidad; la densidad de corriente en cada barra es casi idéntica y el coeficiente K es algo mayor que 1.

Hay dos inconvenientes que limitan la generalización de este tipo de barras: una mayor complejidad de conexonado y fijación, y la dificultad de conseguir un buen aislamiento entre fases, incluso en baja tensión.

Otra ventaja añadida es la reducción de los esfuerzos electrodinámicos al que se une una disminución, de unas diez veces, de la inductancia por fase; esta última propiedad del juego de barras «sandwich» tiene un efecto favorable sobre la caída de tensión inductiva en servicio normal, pero implica un crecimiento del valor de la corriente de cortocircuito.

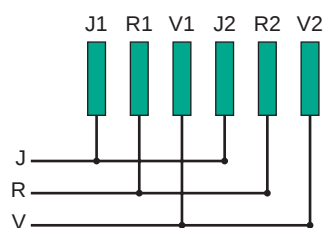


Fig. 17.

4.2 ¿Calentamiento mínimo o pérdidas adicionales reducidas?

Hasta aquí, los efectos citados han sido analizados bajo el único aspecto del aumento de la resistencia efectiva en corriente alterna, o sea, de las pérdidas adicionales por efecto Joule. La consecuencia normal (del efecto Joule) es un aumento de temperatura en los conductores; pero esto se encuentra normalmente compensado por una disposición que favorece la refrigeración por convección o radiación.

Ahora bien, el calentamiento es, por ahora, el único criterio importante tenido en cuenta para el dimensionamiento de una canalización de gran intensidad, pero un calentamiento mínimo no está siempre unido a un menor coeficiente de pérdidas: refiriéndonos a la **figura 15**, el coeficiente K es sensiblemente igual para una barra de 100 x 10 mm o para dos barras de

100 x 5 mm, pero una superficie de refrigeración mayor permite, en este último caso, con un calentamiento igual, la circulación de una intensidad un 10% mayor cuyas pérdidas son un 20% mayores. Otro ejemplo característico es el conductor tubular cuya forma óptima garantiza un coeficiente K próximo a la unidad; pero este tubo tiene la superficie de enfriamiento menor (sin ventilación forzada en el interior) y se constata, en la **figura 18**, que está lejos de ser el conductor que transporta la mayor corriente posible para un calentamiento y sección idéntica a otras configuraciones.

El diseñador de una canalización de gran intensidad tendrá a veces interés en escoger una tecnología no solamente por su calentamiento, sino también por sus pérdidas globales.



I	1	1,18	1,25	1,28	1,50	1,54	1,57	1,71
K	1,75	1,25	1,05	1,1	1,08	1,15	1,3	1,1
P	1,75	1,75	1,65	1,8	2,4	2,7	3,2	3,2

Fig. 18: Comparación de perfiles de la misma sección total.

4.3 Juegos de barras con perfiles especiales

Cuando la intensidad a transportar sobrepasa los 4 ó 5 000 A, los juegos de barras planos se convierten en poco adecuados o difíciles de adaptar al espaciamiento indicado en la **figura 16**. Se utilizan entonces perfiles especiales que satisfacen mejor y simultáneamente dos criterios:

- enfriamiento eficaz,
- pérdidas reducidas.

Hace falta, además, que estos cables tengan una buena resistencia a los esfuerzos electrodinámicos de cortocircuito y sean prácticos de instalar.

- El perfil con doble U enfrentada, muy empleado, responde correctamente a estas condiciones (**figura 19**).
- El perfil con ángulos simétricos, más eficaz todavía en el plano eléctrico y térmico, es algo menos práctico.
- Se puede encontrar también, especialmente en USA, donde está normalizado [21], un perfil cuadrado con ángulos redondeados, cuyo coeficiente de pérdidas es casi igual al de un tubo y cuya refrigeración es mucho mejor por los agujeros hechos de forma alternativa en las dos caras horizontales.
- Hay un constructor europeo que utiliza también un perfil en forma de V, de ángulo interior de 120°, montado en conjuntos de 2, 3 ó 4 por fase [17].

La elección entre estos diferentes perfiles es un compromiso entre:

- el calentamiento (para la misma sección),
- la resistencia electrodinámica,
- las dimensiones,
- la facilidad de conexionado,
- la sencillez de los soportes aislantes,
- las pérdidas,
- el coste del metal utilizado.

Una clasificación basada en el criterio más importante, el calentamiento, se da en la **figura 18** (y después en [25]).

Todos estos perfiles o conjuntos tienen la misma sección total, 4 in² ó 2850 mm² de cobre. Para un mismo calentamiento, la cifra «I» indica para cada uno la intensidad relativa admisible respecto al caso más desfavorable de cuatro barras juntas. La clasificación cambia si se toma como base el coeficiente K, de pérdidas adicionales, o también si se toman las pérdidas totales, P, obtenidas por la multiplicación de K por I².

Las conclusiones permiten, por sí mismas, la comparación entre los tres criterios.

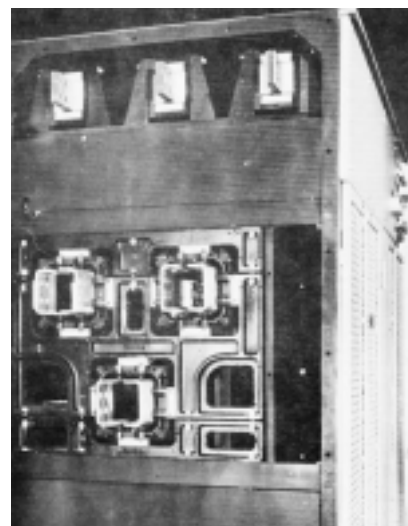


Fig. 20: Juegos de barras trifásico de 5 000 A, con resistencia electrodinámica de 250 kA de cresta, del transatlántico «France».

¿Una paradoja del electromagnetismo?

De las leyes del electromagnetismo, se deduce que dos conductores próximos, recorridos por corrientes del mismo sentido, se atraen; en cambio, el efecto de proximidad directo implica una densidad de corriente más elevada en las partes más alejadas de los dos conductores, como si los filetes de corriente más elementales se «repelieran».

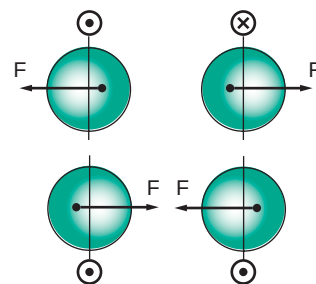
La misma contradicción se vuelve a encontrar entre el efecto de proximidad inversa, que hace, por semejanza, que «se atraigan» los filetes de corriente a pesar de que las fuerzas repulsivas entre las corrientes opuestas. La paradoja no es más que aparente, pues los dos fenómenos son de naturaleza muy diferente.

El efecto de proximidad entraña una «sobredensidad» de corriente en la zona de inductancia mínima, concatenando el flujo mínimo; por el contrario, los esfuerzos electrodinámicos actúan para aumentar la energía electromagnética acumulada en el circuito por la inductancia que aumenta de forma proporcional. Otras características diferencian todavía más estos dos fenómenos:

El efecto de proximidad es independiente del valor de la corriente y no se manifiesta más que en régimen variable; depende de la resistividad y de la frecuencia, al revés que para los esfuerzos electrodinámicos.

Sin embargo, hay que señalar todavía una consecuencia de esta analogía:

El punto de aplicación de las fuerzas de repulsión o atracción no es el centro geométrico de los conductores sometidos a los efectos de proximidad, sino que se desplaza hacia las zonas de máxima densidad; esto hay que tenerlo en cuenta en los cálculos de los esfuerzos electrodinámicos entre conductores próximos.



4.4 Resistividad del metal: ¿cobre o aluminio?

El conjunto de consideraciones anteriores suponía que el metal utilizado era el cobre; ahora bien, los efectos pelicular y de proximidad están todavía más acentuados cuando la resistividad es baja.

Un conductor de cobre tendrá, por tanto, un coeficiente de pérdidas más elevado que el mismo conductor en aluminio, pero este último tendrá que tener una sección 1,6 veces mayor para conseguir la misma resistencia (en corriente continua), perdiendo entonces su ventaja respecto al conductor de cobre porque, para una geometría y resistencia R_c iguales, los dos conductores tienen el mismo coeficiente K .

En la práctica, la sustitución de cobre por aluminio no se hace por la resistencia o caída de tensión iguales, sino por el mismo calentamiento, lo que obliga a multiplicar la sección por 1,4 ó 1,5 solamente, teniendo en cuenta una refrigeración mejor para superficies de dimensiones mayores.

En resumen, con un calentamiento igual, el conductor de aluminio tiene un coeficiente de pérdidas mejor que el de cobre equivalente, pero éste, no lo olvidemos, provoca pérdidas totales mayores que hará falta evacuar y también pagar.

El precio por kg y la densidad menor del aluminio son factores decisivos que determinan la elección preferente de este metal para canalizaciones de gran intensidad.

4.5 Influencia de la frecuencia

Aunque en los datos precedentes, se ha tenido en cuenta sólo la frecuencia industrial de 50 Hz, su precisión relativa, permite llegar hasta los 60 Hz.

Las curvas de las **figuras 6 y 8**, que dan el coeficiente de efecto pelicular para los tubos y barras a 50 ó 60 Hz, son utilizables para cualquier otra frecuencia con una corrección idéntica.

Respecto a otras frecuencias, los 25 Hz ya prácticamente no existen; respecto a 16 2/3 Hz se puede considerar como una corriente continua.

La frecuencia de 400 Hz, adaptada para redes privadas (marina, aviación), tiene serios problemas de efecto pelicular en cuanto la intensidad sobrepasa algunos centenares de amperios; la «capa» de cobre se reduce a 3 mm para esta frecuencia.

En las redes industriales, se pueden superponer, a la frecuencia fundamental, corrientes armónicas de frecuencia múltiplo de 50 Hz (los armónicos más frecuentes son del 3º al 11º). El aumento de resistencia efectiva que provocan estas corrientes produce pérdidas y calentamientos no despreciables.

5 Efectos pelicular y de proximidad en régimen transitorio

Estos efectos son consecuencia de una variación de corriente, y por tanto, de flujo, en un conductor y se manifiestan tanto con una variación periódica, que es el caso de una corriente alterna en régimen permanente, como con una variación transitoria, que es el caso de la aparición brusca de una corriente de cortocircuito elevada.

Sin profundizar demasiado en esta cuestión particular, recordemos que el efecto pelicular tiene una acción desfavorable en el establecimiento de una corriente continua.

El valor de la variación, expresado por el di/dt , es inversamente proporcional a la constante de tiempo L/R del circuito. El efecto pelicular se traduce en una disminución de L y un aumento de R , y por tanto una constante de tiempo transitoria menor y un aumento más rápido de la corriente de cortocircuito.

Esto hay que tenerlo especialmente en cuenta en instalaciones de gran intensidad de corriente continua (electroquímica) que utilizan conductores macizos de gran sección donde el efecto pelicular transitorio puede ser importante.

En las redes de corriente alterna, el que se produzca un cortocircuito se traduce en un régimen asimétrico sobre ciertas fases en razón de una componente continua cuya amortiguación proporcional a L/R será, en este caso, más rápida.

Descubrimiento del efecto pelicular

La anécdota, citada por Aragó, se sitúa alrededor del 1880: un operador aislado del suelo, tiene en la mano una gruesa barra de hierro; la va a utilizar para provocar un ensayo de cortocircuito entre los bornes de una dinamo Gramme de gran intensidad para galvanoplastia. En el momento de hacer contacto, suelta bruscamente la barra que, explica él después, le quema las manos; enseguida coge la barra con precaución — sorprendido — y está prácticamente fría.

¿Qué le pasó en realidad?

Ahora lo sabemos: el efecto pelicular en el acero detecta una corriente que varía muy rápidamente en un extremo muy delgado que, sólo, se calienta instantáneamente, quemando realmente las manos del operador.

Menos de un minuto después, habiéndose difundido en calor por toda la masa de la barra, ésta ya sólo está tibia.

6 Conclusiones

A veces, en las canalizaciones eléctricas de gran intensidad, ante la dificultad de valorarlos con suficiente precisión por ser fenómenos complejos, se olvidan o subestiman los efectos pelicular y de proximidad.

Este estudio ha privilegiado voluntariamente los datos y resultados prácticos respecto a los aspectos teóricos de los problemas; de esta forma se destacan, indirectamente, dos aspectos importantes:

- la relativa imprecisión de los datos publicados sobre la resistencia efectiva de algunos tipos de juegos de barras de uso frecuente. Hoy en día, con la potencia media de cálculo de los ordenadores y medidores electrónicos, se

conseguiría una mayor precisión, si ciertos estudiosos y experimentadores pudieran retomar sus trabajos, que datan, la mayor parte de ellos, de hace varias decenas de años,

- el tener en cuenta los costes de las pérdidas totales para evaluar la rentabilidad del juego de barras a utilizar: pérdidas normales y pérdidas adicionales en corriente alterna. Este estudio técnico-económico puede ayudar a los explotadores de instalaciones que funcionan permanentemente próximas a su intensidad nominal a investigar desde el principio en un juego de barras mejor estudiado y dimensionado para gastar menos en pérdidas de energía eléctrica durante años de funcionamiento.

Bibliografía

- [1] Mathématiques et physique.
Vol. 3, p. 491, 1889. Lord KELVIN.
- [2] Effet de peau.
Bull. S.I.E. 4/1905 y 11/1908.
P. BOUCHEROT.
- [3] Effet de peau dans les conducteurs
tubulaires et rectangulaires.
Trans. AIEE, vol. 37, p. 1379, 1918 y 3/1922.
H.B. DWIGHT.
- [4] Effet de proximité dans les barres et tubes.
Trans. AIEE, vol. 42, p. 830, 1923.
H.B. DWIGHT.
- [5] Recherches sur la répartition du courant
dans les barres rectangulaires.
Arch. Elektr. XVII, p. 537, 1927.
H. SCHWENKHAGEN.
- [6] Calcul rapide de l'effet Kelvin par une
nouvelle formule...
RGE 12/1929, p. 963.
A. LEVASSEUR.
- [7] Courants de Foucault.
Edit. J.B. Baillière, 1933.
P. BUNET.
- [8] Effet de peau dans les conducteurs
rectangulaires.
Electr. Eng., p. 6369/1933.
H.C. FORBES.
- [9] Sur les méthodes de calcul des pertes
supplémentaires...
Bull. SFE, p. 237, 3/1939.
S. KOHN.
- [10] Distribution du courant dans un conducteur
rectangulaire.
Trans. AIEE, vol. 58, p. 687, 1939.
J.L. DALEY.
- [11] Jeux de barres à phases permutées pour
forts courants.
Electr. Eng, n... 2, p. 71, 1943, Trad. MG n° 3689.
L.E. FISHER.
- [12] Résistance effective des conducteurs
rectangulaires...
Trans. AIEE, vol. 66, p. 549, 1947.
H.B. DWIGHT.
- [13] Méthode rapide de mesure... , application à
l'effet pelliculaire.
RGE, p. 5, 1/1948.
J. RENAUD.
- [14] Leçons d'électrotechnique.
Vol. II, p. 833, Ed. Gauthier-Villars, 1949.
J. FALLOU.
- [15] Courants induits dans les gaines de barres.
Trans. AIEE, Vol. 69, 1950, Trad. MG n° 3681.
S.C. KILLIAN.
- [16] Formules pour l'effet de proximité dans les
gaines de barres.
IEEE, Trans., p. 1167, 12, 1964.
H.B. DWIGHT.
- [17] Nouvelles liaisons à forte intensité.
BBC Nachr., p. 7Q, 2/1964, Trad. MG n° 4851.
K. KEIPER.
- [18] Echauffement des pièces en acier au
voisinage des barres à forte intensité
BBC Mitt., 2/1967.
P. KLUGE.
- [19] Résistance et réactance des conducteurs
rectangulaires.
IEEE, Trans. Pow, appar. n° 6, p. 770, 1967.
P. SILVESTER.
- [20] L'effet de peau.
Techniques Philips 1, 1968.
H.B. CASIMIR.
- [21] Standard Handbook for electrical engineers.
10^e éd., sect. 2, 4, 10, 12, Mc Graw Hill, 1969.
D.G. FINK.
- [22] Champ magnétique dans les structures
métalliques au voisinage des conducteurs et
pertes associées.
IEEE trans. Pow, appar., p. 45, 2, 1974.
P. REECE.
- [23] Conducteurs en aluminium, en cuivre.
Normes DIN 43670 et 42671, 1964 et 1973.
- [24] Répartition des courants dans les
conducteurs massifs. Correction de l'effet de
proximité.
Technique de l'ingénieur, D. 673, D. 130.
- [25] Barres omnibus en cuivre.
Centre information du cuivre.
- [26] Conducteurs et enroulements électriques.
Edit. Mc Graw-Hill 1945, reprod. 1976.
H.B. DWIGHT.