

Chambres de coupure sous vide à contacts

créant un champ magnétique axial

Dr Harald Fink, Dr Markus Heimbach, Dr Wenkai Shang

Aujourd'hui, dans de nombreuses applications MT, le vide s'est largement substitué aux autres milieux d'extinction de l'arc comme l'huile ou le SF₆. Parmi les avantages des chambres de coupure sous vide nous citerons leur compacité, l'absence de maintenance, leur longue durée de vie et leur excellente compatibilité environnementale.

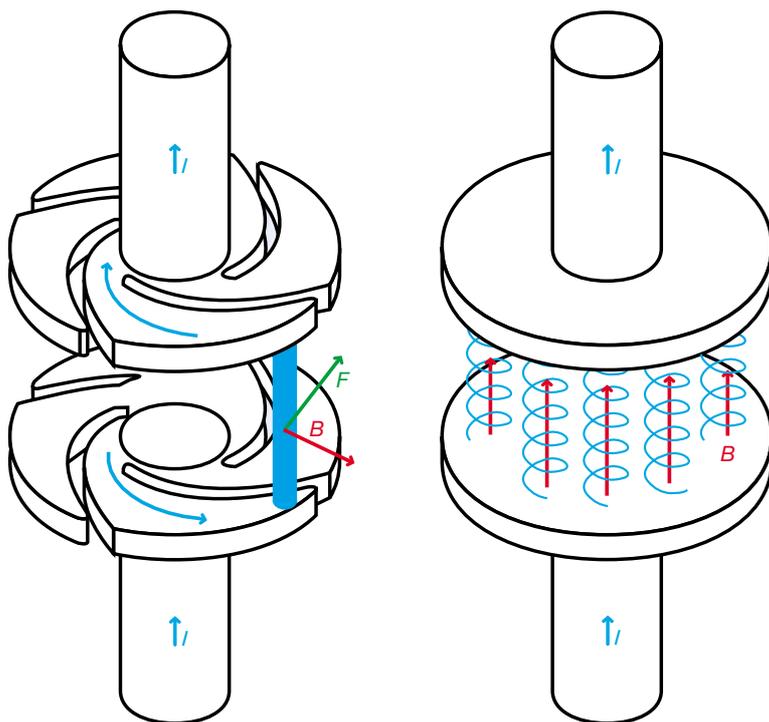
L'entreprise ABB Calor Emag Mittelspannung GmbH développe et fabrique des chambres de coupure sous vide depuis le début des années 80 [1]. À Ratingen, en Allemagne, les ingénieurs R&D utilisent les outils et les logiciels de simulation les plus avancés pour optimiser la conception et les fonctionnalités des chambres de coupure. Leurs récents travaux ont permis de concevoir une nouvelle gamme de chambres de coupure sous vide pour contacteurs et interrupteurs [2], et de mettre au point un tout nouveau procédé de fabrication des contacts.

Le nouveau site de production, terminé en 1999, témoigne de la volonté de l'entreprise de fournir des produits de haute qualité à moindre coût, tout

Le vide, milieu de coupure éprouvé des appareils de connexion, présente de nombreux avantages par rapport aux autres milieux, plus particulièrement pour les applications moyenne tension (MT). Pendant longtemps, ABB a équipé les chambres de coupure sous vide de ses disjoncteurs de contacts produisant un champ magnétique radial. De nouvelles chambres de coupure à contacts créant un champ magnétique axial permettent d'interrompre avec une grande fiabilité des courants de court-circuit de 63 kA, voire plus.

1 Une partie de la gamme des chambres de coupure sous vide proposée par ABB





2 Principe de fonctionnement d'un contact créant un champ magnétique radial (contact en spirale, gauche) et d'un contact créant un champ magnétique axial (droite)

B Induction magnétique

F Force électromagnétique azimutale

I Courant

en renforçant ses capacités de production.

Fonctionnement des systèmes de contacts des chambres de coupure

Lorsque les contacts parcourus par le courant se séparent, l'explosion du dernier pont métallique provoque la formation d'un arc de vapeur métallique. Cet arc, exclusivement constitué par la vaporisation du matériau du contact, est entretenu par l'apport externe d'énergie jusqu'au passage suivant à zéro du courant où intervient l'extinction finale de l'arc. La chambre de coupure sous vide retrouve alors son pouvoir de sectionnement et peut donc supporter la tension transitoire de rétablissement. Pour garantir l'extinction lors du passage à zéro du courant, l'érosion des contacts par l'arc doit être minimale lorsque le courant le

plus fort les traverse. A des courants de l'ordre de 10 kA, l'arc dans le vide commence à se contracter, ce qui se traduit dans un premier temps sous la forme de taches anodiques. Cette contraction, qui dépend en partie du matériau des contacts, provoque un afflux d'énergie vers ces derniers, ce qui réduit le pouvoir d'extinction de l'intervalle dans le vide après le passage à zéro du courant. On peut améliorer le pouvoir de coupure en modifiant la forme du contact. (Les champs magnétiques générés dépendent de la géométrie des contacts et en la modifiant on peut agir sur le comportement de l'arc.) Jusqu'à une date récente, ABB dotait systématiquement les chambres de coupure sous vide de ses disjoncteurs de contacts en spirale. Ces contacts génèrent un champ magnétique radial, qui crée une force électrodynamique azimutale agissant sur l'arc

contracté **2**. Ce dernier parcourt la surface du contact à une vitesse élevée de 70–150 m/s [3] qui limite l'érosion du contact et améliore de manière significative le pouvoir de coupure [4].

Le pouvoir de coupure des chambres sous vide peut également être amélioré en utilisant des systèmes de contacts qui génèrent un champ magnétique axial. L'application d'une induction magnétique parallèlement au flux de courant dans l'arc réduit considérablement le mouvement des porteurs de charge perpendiculairement à ce flux. Cette réduction se vérifie tout particulièrement dans le cas des électrons dont la masse est inférieure à celle des ions. Les électrons gravitent autour des lignes de force magnétiques **2** de sorte que la contraction de l'arc est décalée vers des courants plus élevés. L'arc allumé présente une forme diffuse. L'apport d'énergie aux électrodes se trouve ainsi amoindri, ce que reflète également une tension d'arc inférieure à celle avec des contacts générant un champ magnétique radial.

L'avantage du système de contacts à champ radial réside dans sa structure physique simple; un autre avantage des contacts en spirale, à l'état fermé, est de permettre le passage du courant directement via la tige de la chambre. On réduit par là-même les pertes d'énergie dans la chambre de coupure à courant nominal.

Dans de nombreux systèmes de contacts à champ axial, le champ magnétique est généré par une bobine placée derrière les contacts. La résistance de la chambre de coupure s'en trouve accrue et les pertes ohmiques supplémentaires en service réduisent l'intensité du courant nominal. Étant donné que le refroidissement par convection est impossible dans le vide, une chambre de coupure ne peut dissiper les pertes thermiques que par les conducteurs cuivre. Comme nous l'avons déjà souligné, l'arc de forme diffuse des systèmes de contacts à champ

axial confère un excellent pouvoir de coupure aux courants de court-circuit, plus particulièrement à partir de 63 kA. Dans cette plage de courants de court-circuit, les systèmes de contacts à champ

axial, plus complexes, sont mieux adaptés et plus performants que les contacts à champ radial traditionnels. L'emploi de contacts à champ axial présente également un intérêt certain dans des domaines comme les réseaux de fréquence assignée de $16^{2/3}$ Hz (ex., applications de traction). Du fait de la durée d'arc extrêmement longue, l'installation de chambres de coupure sous vide à contacts à champ axial s'avère indispensable dans ces réseaux pour des niveaux de courant aussi faibles que 31,5 kA.

Les nouveaux systèmes de contacts créant un champ magnétique axial

ABB a développé deux nouveaux systèmes de contacts à champ axial pour la coupure de courants de court-circuit élevés. Les deux systèmes de contacts ont été dimensionnés à l'aide de programmes de calculs basés sur la méthode des éléments finis. Des simulations en régimes stationnaire, quasi-stationnaire et transitoire ont été réalisées. Les ingénieurs R&D ont également pris en comp-

te des paramètres non linéaires des matériaux tels que la perméabilité du matériau ferromagnétique.

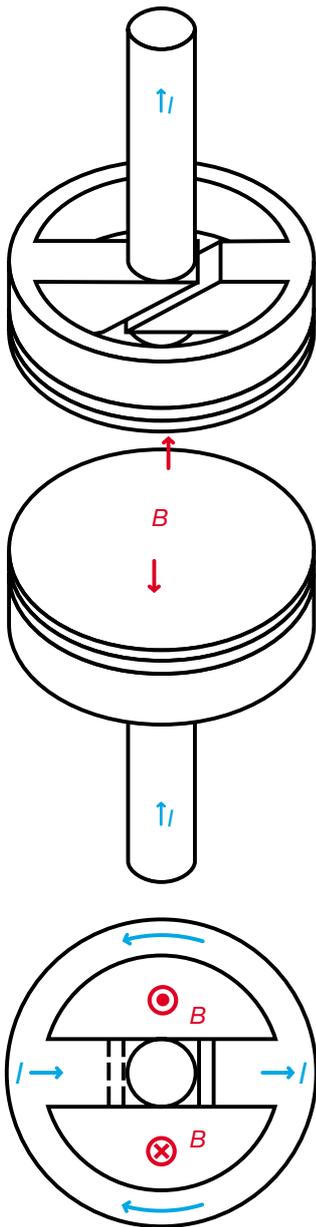
Système de contacts créant un champ magnétique axial bipolaire

La figure 3 présente le principe de fonctionnement du système de contacts à champ axial bipolaire. Des bobines générant un champ magnétique axial bipolaire dans l'intervalle de contact sont placées derrière chacune des pastilles de contact.

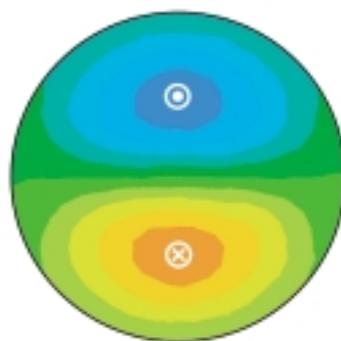
L'induction magnétique au centre de l'intervalle de contact de ce système est illustrée en 4. La surface est divisée en deux zones identiques, où existent les mêmes conditions. Elles ne se distinguent que par le sens de l'induction magnétique. Sur la ligne de séparation des deux zones, l'induction magnétique est nulle, tandis qu'elle est relativement élevée sur leurs bords externes.

Système de contacts créant un champ magnétique axial quadripolaire

Le principe de base du nouveau système de contacts quadripolaire est illustré en 5. À la différence du système de contacts bipolaire, le premier n'utilise pas de bobines pour créer le champ magnétique axial. Il le génère par le biais d'un montage hybride constitué d'un circuit magnétique et de fentes pratiquées dans la pastille de contact. Le flux est guidé au travers du matériau ferromagnétique du circuit magnétique. Les pièces polaires sont disposées de telle sorte que le flux traverse l'intervalle de contact quatre fois par révolution, générant ainsi un champ magnétique axial quadripolaire. Les fentes dans la pastille de contact forcent une partie du courant à former une boucle lorsque les contacts sont ouverts, ceci pour fournir de l'énergie aux racines de l'arc sur l'électrode. La formation de cette boucle renforce le champ magnétique.

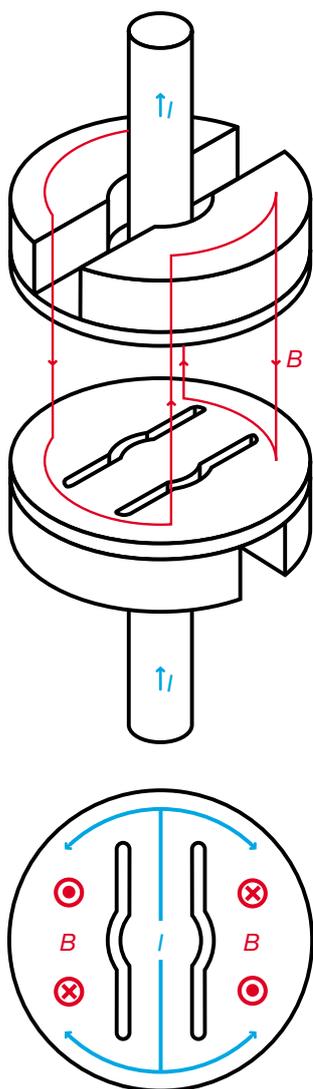


3 Principe de fonctionnement du système de contacts générant un champ magnétique axial bipolaire. Les bobines placées derrière chacune des pastilles de contact génèrent un champ magnétique axial bipolaire dans l'intervalle de contact.
B Induction magnétique
I Courant



4 Répartition de l'induction magnétique dans le plan médian entre les contacts d'un système bipolaire

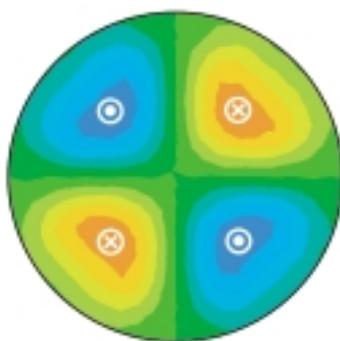
La figure 6 illustre l'induction magnétique au centre de l'intervalle de contact du système de contacts quadripolaire. On distingue quatre zones; dans chacune d'elles, les conditions d'induction magnétique sont identiques, mais leur sens diffère. Dans le cas du système de contacts quadripolaire, l'induction



5 Principe de fonctionnement des contacts d'un système quadripolaire. Le champ magnétique axial est créé par le biais d'un montage hybride constitué d'un circuit magnétique et de fentes pratiquées dans la pastille de contact.
B Induction magnétique
I Courant

magnétique à l'intersection des quatre zones est nulle. Comme dans les systèmes de contacts bipolaires, le champ magnétique axial est relativement intense sur les régions externes de l'intervalle de contact.

Les principaux paramètres de dimensionnement des contacts à champ magnétique axial sont la valeur, la répartition et le rapport de phase du champ magnétique axial. En ce qui concerne ce dernier paramètre, il faut noter que l'idéal serait d'éviter tout déphasage entre le courant élevé et le champ magnétique qu'il engendre. En raison des pertes inhérentes du système de contacts, cet idéal ne sera cependant jamais atteint. Le principal paramètre des pertes est le courant de Foucault produit dans la pastille de contact par l'induction magnétique changeante. Ce phénomène, avec le déphasage, sont ensemble responsables de la réduction du champ magnétique axial. Étant donné que seules sont concernées les zones délimitées par les courants de Foucault et parcourues dans un sens par les lignes du champ magnétique, elles sont moins



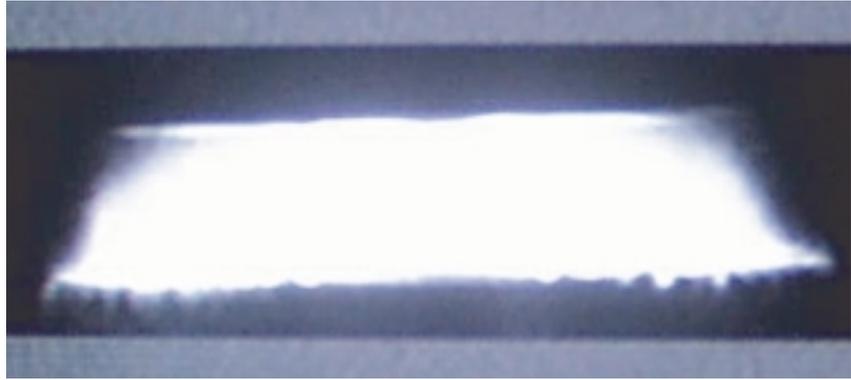
6 Répartition de l'induction magnétique dans le plan médian entre les contacts d'un système quadripolaire

étendues que dans les systèmes de contacts unipolaires [5]. Les pertes dues aux courants de Foucault sont de ce fait également moindres. Les effets néfastes de ces courants sur la valeur et le rapport de phase de l'induction magnétique sont par conséquent limités, tant dans le système de contacts bipolaire que dans le système quadripolaire.

Etudes expérimentales et essais

En complément des études théoriques, des essais optiques furent réalisés afin d'observer le comportement de l'arc des systèmes de contacts. La figure 7 illustre l'arc de vapeur métallique dans le vide du système de contacts quadripolaire observé avec une caméra CCD hautes performances. On distingue l'arc proche de la valeur de crête d'une demi-onde de 50 Hz avec une valeur de courant efficace de 31,5 kA (diamètre des contacts: 68,5 mm). Les essais ont été réalisés dans une chambre d'essai sous vide très poussé. Comme prédit par les calculs théoriques, l'arc a une forme diffuse. Par conséquent, l'échauffement provoqué par l'arc dans le vide est réparti relativement uniformément sur les pastilles de contact. Du fait de la forme diffuse de l'arc, l'érosion des contacts, qui réduit considérablement le pouvoir de coupure, est notablement moindre. Les premières étapes de la contraction de l'arc sont visibles sur l'électrode du haut, c'est-à-dire l'anode. Ce phénomène reste cependant marginal du fait du dimensionnement adéquat du champ magnétique. Dans le cas du système de contacts bipolaire, le comportement de l'arc est similaire: il reste également diffus, jusqu'aux valeurs de courant plus élevées. Au cours de nombreux essais, on a pu observer que l'arc dans le vide prend naissance en un point unique, à savoir le dernier pont métallique, avant de se propager en 2 à 3 ms sur toute la surface des contacts, indépendamment de la polarité de l'induction magnétique.

7 Arc dans le vide sous l'effet d'un champ magnétique axial quadripolaire ($I = 31,5$ kA; photographie prise au voisinage de la valeur de crête du courant; diamètre des contacts: 68,5 mm; anode en haut, cathode en bas)



Ce comportement est identique pour les deux types de système de contacts.

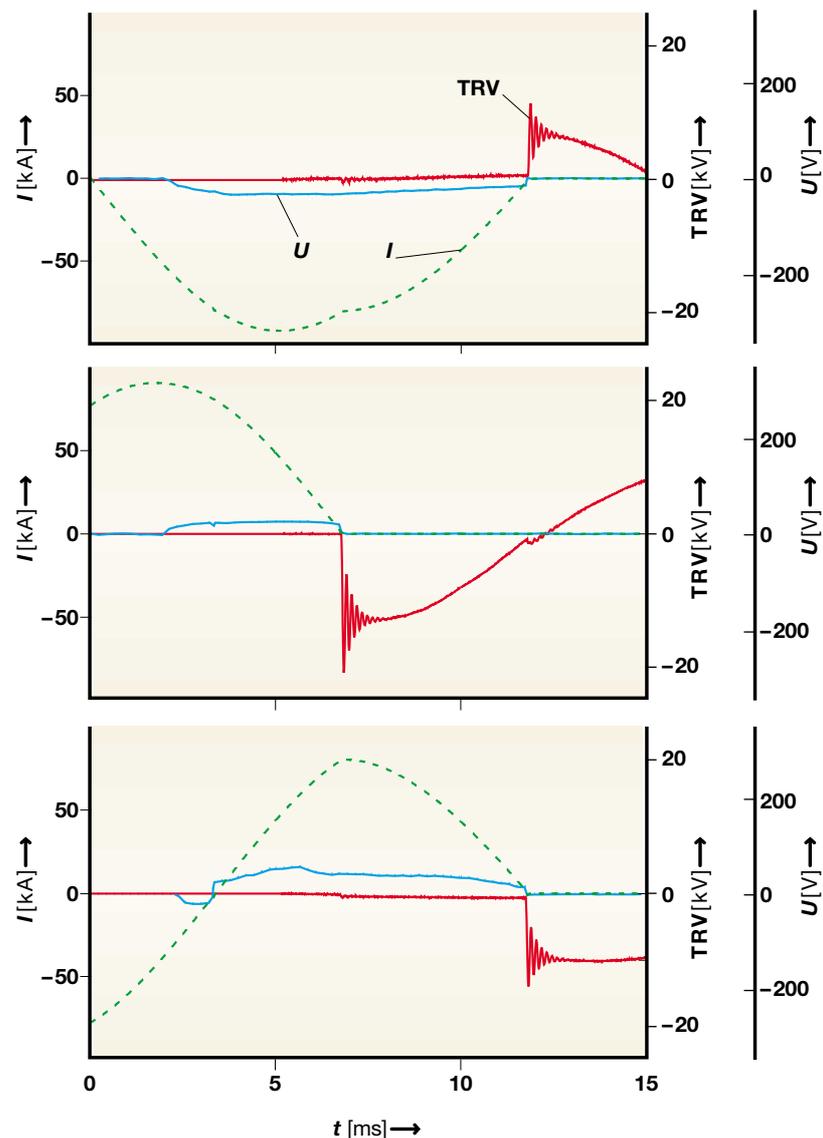
C'est ce comportement de l'arc qui fait que les systèmes de contacts créant un champ magnétique axial sont les mieux adaptés aux courants de court-circuit élevés. La figure 8 montre la manœuvre de coupure sur un courant de court-circuit de 12 kV/63 kA par les contacts bipolaires selon CEI 60056 [6] (diamètre des contacts: 100 mm).

La régularité de la courbe de la tension d'arc indique que l'arc dans le vide reste diffus malgré la valeur crête très élevée du courant de 90 kA. Le disjoncteur à vide coupe le courant dès que possible. Les deux systèmes de contacts (diamètre des contacts: 100 mm) offrent une bonne tenue aux essais de coupure sous 12 kV/63 kA. Les disjoncteurs à vide équipés de systèmes de contacts à champ magnétique axial décrits ont été soumis 25 fois de suite à des courants de 63 kA et, à chaque fois, ils ont éteint l'arc de manière fiable.

Les figures 9 et 10 montrent les surfaces des contacts des systèmes bipolaire et quadripolaire après plus de 20 coupures sous un courant de 63 kA (diamètre des contacts: 100 mm). Dans les deux cas, on note simplement une légère fusion de la surface des contacts, ce qui indique que la fin de la durée de vie électrique n'est pas encore atteinte. En observant les parties fondues, on s'aperçoit que l'arc suit les lignes de champ de l'induction magnétique. Sur les contacts du système bipolaire, on observe une fusion plus importante en deux points; dans le cas des contacts du

8 Oscillogramme de la coupure d'un courant de court-circuit triphasé de 12 kV/63 kA (symétrique) avec un système de contacts bipolaire (diamètre des contacts: 100 mm)

TRV Tension transitoire de rétablissement I Courant de court-circuit
 U Tension d'arc



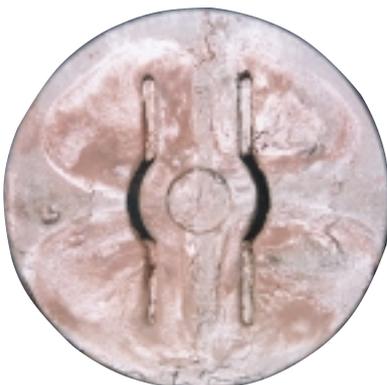


9 Surface des contacts d'un système bipolaire après plusieurs coupures du courant de court-circuit (63 kA; diamètre des contacts: 100 mm)

système quadripolaire, on distingue quatre points. Si l'on compare avec les figures 4 et 6 qui montrent l'induction magnétique axiale dans l'intervalle de contact, on voit clairement que la fusion suit la répartition de l'induction, ce qui valide la précision des résultats des travaux théoriques.

En comparant le système de contacts bipolaire au système quadripolaire, on remarque que ce dernier peut générer le

10 Surface des contacts d'un système quadripolaire après plusieurs coupures du courant de court-circuit (63 kA; diamètre des contacts: 100 mm)



champ magnétique axial sans bobine. À l'état fermé, le courant parcourt directement la tige de la chambre et les contacts, comme c'est le cas dans les contacts en spirale. Donc, l'aptitude à conduire le courant assigné est comparable. Cependant, supposant des conducteurs de tailles identiques, la résistance de la chambre de coupure est supérieure dans le cas des systèmes de contacts bipolaires. De ce fait, pour de nombreuses applications de courants forts, le courant assigné plus élevé exige un système plus onéreux pour dissiper les pertes thermiques. Les systèmes de contacts bipolaires sont donc particulièrement avantageux dans des applications de tensions assignées à partir de 36 kV. Pour ce qui est des systèmes quadripolaires, la plus grande mobilité des contacts que ces applications exigent ne permet pas un guidage aussi précis du flux magnétique dans l'intervalle de contact. Cela vient du fait que, dans ce cas, le flux peut également circuler, via les entrefers, entre les pièces polaires derrière les pastilles de contact et former ainsi un circuit fermé.

Les nouveaux contacts générant un champ magnétique axial permettent d'utiliser les chambres de coupure sous vide pour couper des courants de court-circuit très élevés (ex., à proximité immédiate des bornes des générateurs). L'arc restant sous forme diffuse, même à des courants élevés, toute la surface des contacts peut être exploitée, ce qui contribue à la compacité de la chambre de coupure et à son moindre coût.

Bibliographie

- [1] H. Fink, D. Gentsch, G. Pilsinger, W. Shang: *Vakuumkammern für zuverlässige Mittelspannungsschaltgeräte. Elektrizitätswirtschaft* 96 (1997) 13, 749–752.
- [2] B. Fink, D. Gentsch, M. Heimbach: *Nouvelles chambres d'interruption à vide pour contacteurs et interrupteurs à coupure en charge. Revue ABB* 3/1999, 32–36.
- [3] E. Dullni: *Motion of high-current vacuum arcs on spiral-type contact. IEEE Trans. on Plasma Science, vol 17, 1989, 875–879.*
- [4] H. Fink, D. Gentsch, M. Heimbach, G. Pilsinger, W. Shang: *New developments of vacuum interrupters based on RMF and AMF technologies. XVIIIth Int. Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Eindhoven, Netherlands, 1998, 463–466.*
- [5] B. Fenski, M. Heimbach, M. Lindmayer, W. Shang: *Characteristics of a vacuum switching contact based on bipolar axial magnetic design. IEEE Trans. on Plasma Science, vol 27, 1999, 949–953.*
- [6] CEI 60056: *Disjoncteurs à courant alternatif à haute tension. 1987.* ■

Adresse des auteurs

Dr Harald Fink

Dr Markus Heimbach

Dr Wenkai Shang

ABB Calor Emag Mittelspannung GmbH

D-40472 Ratingen/Allemagne

E-mail: markus.heimbach@de.abb.com.

Fax: +49 2102 12 1118