



Influence de la géométrie du conducteur sur la température dans un poste sous enveloppe métallique

Nesrine Rebzani, Edith Clavel, Philippe Marty, Nazmir Presser

► To cite this version:

Nesrine Rebzani, Edith Clavel, Philippe Marty, Nazmir Presser. Influence de la géométrie du conducteur sur la température dans un poste sous enveloppe métallique. Symposium de Génie Électrique 2014, Jul 2014, Cachan, France. <hal-01065350>

HAL Id: hal-01065350

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01065350>

Submitted on 18 Sep 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Influence de la géométrie du conducteur sur la température dans un poste sous enveloppe métallique

Nesrine REBZANI^{1,2,3}, Edith CLAVEL², Philippe MARTY³, Nazmir PRESSER⁴

¹ Dept. R&D Siemens T&D, E T HP GS, Grenoble

² Laboratoire de génie électrique de Grenoble (G2Elab), St Martin d'Hères

³ Laboratoire des écoulements géophysiques et industriels (Legi), Université Joseph Fourier, Grenoble

⁴ Dept. R&D Siemens AG, E T HP GS, Berlin

RESUME – Réduire l'augmentation de température (échauffement) due au passage du courant dans les appareils électriques haute tension et notamment dans les postes sous enveloppe métallique (PSEM) est nécessaire pour en améliorer les performances. Une géométrie spécifique de conducteur est proposée dans cette étude pour réduire l'échauffement, en améliorant les transferts thermiques dans le PSEM. L'efficacité de cette géométrie a été évaluée expérimentalement.

MOTS-CLES – Réduction de température, convection, conducteur ouvert, PSEM, haute tension, effet Joule

1. Introduction

L'augmentation de la consommation d'énergie mondiale impose aux appareils électriques haute tension d'être plus performants pour qu'y circulent des courants nominaux plus importants. Pour améliorer leurs performances, une meilleure optimisation des phénomènes thermiques dans les appareils est nécessaire. En effet, l'échauffement dans ces appareils, et notamment dans les postes sous enveloppe métallique (PSEM), est contrôlé par une norme CEI 62271 qui spécifie des valeurs maximales de température et d'échauffement à ne pas dépasser pour assurer le bon fonctionnement du PSEM.

Les transferts thermiques dans les appareils électriques ont principalement été étudiés dans la littérature avec des outils d'éléments finis, utilisés pour calculer la répartition du courant et les augmentations de température dans ces appareils. Ces outils ont notamment été appliqués aux PSEM [1][2], aux disjoncteurs [3] et à des jeux de barres isolés à l'air [4].

L'augmentation de température est due à la puissance dissipée par effet Joule dans les pièces constituant le PSEM. L'objectif de cette étude est d'améliorer les transferts thermiques entre ces pièces et l'air ambiant. Toutefois, la solution proposée doit être passive, pour des raisons de facilité de mise en place et d'utilisation, et doit préserver la compacité du PSEM, qui est sa particularité.

A l'issue de cette étude, la solution proposée est une géométrie de conducteur permettant l'amélioration du transfert convectif dans le PSEM. Cette géométrie a tout d'abord été choisie en se basant sur des observations faites lors de précédents essais expérimentaux. Elle a ensuite été dimensionnée à l'aide d'un outil d'éléments finis et ses performances ont été mesurées expérimentalement.

2. Modèle

2.1 Description du modèle étudié

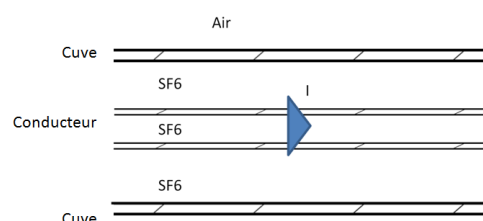


Figure 1 : Schéma du modèle étudié, composé de deux cylindres concentriques contenant du SF6

Pour cette étude, on se concentre sur un module composant le PSEM : jeu de barre monophasé que l'on peut représenter par un modèle simplifié composé de deux cylindres concentriques contenant du SF6 (**Figure 1**). Le cylindre intérieur (conducteur) est un cylindre creux dans lequel circule un courant alternatif et le cylindre extérieur (cuve) est entouré d'air ambiant. Tous deux sont composés d'un alliage d'aluminium.

2.2 Analyse thermique

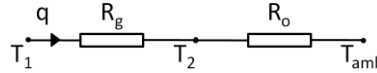


Figure 2 : Circuit électrique équivalent modélisant les transferts de chaleur entre le conducteur et l'air ambiant

On étudie les transferts thermiques dans le modèle à l'aide du circuit électrique équivalent représenté **Figure 2**. Dans ce circuit, la température T_1 correspond à la température du conducteur, T_2 celle de la cuve et T_{amb} la température ambiante. Les résistances thermiques R_g et R_o caractérisent respectivement les transferts thermiques entre le conducteur et la cuve et les transferts entre la cuve et l'air ambiant. On néglige la conduction dans l'aluminium. Enfin, le flux q représente le flux de chaleur traversant les cylindres allant du conducteur jusqu'à l'air ambiant. Ce flux s'exprime (1) :

$$q = (T_1 - T_2) / R_g = (T_2 - T_{amb}) / R_o \tag{1}$$

Suite à une augmentation du courant nominal à pression constante, on obtient les expressions de T_1 et T_2 suivantes :

$$T_{2f} = (I_f / I_i)^2 \cdot (T_{2i} - T_{amb}) + T_{amb} \qquad T_{1f} = (I_f / I_i)^2 \cdot (T_{1i} - T_{2i}) + T_{2f} \tag{2}$$

Suite à une augmentation de pression à courant constant, on obtient les expressions de T_1 et T_2 suivantes :

$$T_{2f} = T_{2i} \qquad T_{1f} = (R_{gf} / R_{gi}) \cdot (T_{2f} - T_{amb}) + T_{2f} \tag{3}$$

Où l'indice i caractérise les températures avant l'augmentation de courant (ou de pression) et l'indice f après l'augmentation de courant (ou de pression).

3. Dimensionnement de la géométrie du conducteur

Suite à des mesures expérimentales de températures dans des jeux de barres monophasés en fonctionnement, on observe que la température du gaz au centre du conducteur est environ 15°C plus élevée que la température du gaz à l'extérieur du conducteur. On choisit alors de développer une géométrie de conducteur avec une ouverture verticale (**Figure 3**) qui devrait permettre d'extraire la chaleur du gaz au centre du conducteur en améliorant le transfert convectif.

On dimensionne la géométrie représentée **Figure 3** à l'aide d'un outil d'éléments finis. Pour cela, on fait varier la largeur de l'ouverture s et l'épaisseur du conducteur t , à diamètre constant d . On cherche une valeur de s et de t permettant d'accroître le transfert convectif mais sans générer trop de pertes par effet Joule. On teste les épaisseurs : 15 mm et 20 mm et les largeurs d'ouverture: 15 mm , 10 mm et 7 mm .

Dans l'outil d'éléments finis, on injecte, pour chaque configuration testée, un courant alternatif de fréquence 50 Hz ayant pour valeur nominale $I = 4000\text{ A}$ et on obtient la répartition de courant représentée (**Figure 4**) :

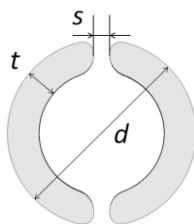


Figure 3 : Schéma de la géométrie étudiée pour réduire la température dans les PSEM

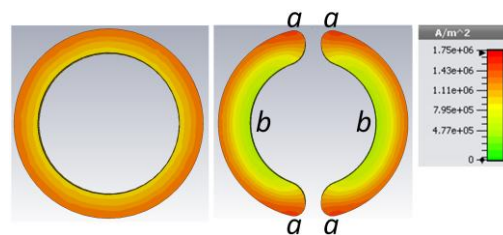


Figure 4 : Répartition de la densité de courant dans la section du conducteur standard (gauche) et dans la section du conducteur fendu (droite)

Figure 4, on retrouve bien l'effet de peau, non négligeable à cette fréquence et pour ces dimensions de conducteur. On observe également une répartition du courant non axisymétrique dans le cas du conducteur fendu due aux effets de proximité. On regarde également la puissance dissipée par effet Joule dans le conducteur, pour les différentes configurations testées (**Tableau 1**). On observe bien qu'augmenter la section de passage du courant à géométrie fixée permet de réduire la puissance dissipée. On remarque également que la puissance dissipée dans le conducteur standard est moins importante que celle dissipée dans le conducteur fendu, bien que la section de passage du courant dans le conducteur standard est 18% moins élevée que dans la configuration 4 du conducteur fendu. La puissance dissipée par la configuration 4 du conducteur fendu étant proche de celle dissipée par le conducteur standard, on choisit cette configuration pour la suite de l'étude.

Tableau 1. Puissance dissipée par les différentes géométries testées, calculée avec l'outil d'éléments finis

Géométrie		Épaisseur	Largeur de l'ouverture	Puissance dissipée
1	Standard	15 mm	-	127 W.m ⁻¹
2	Fendue	15 mm	10 mm	133.6 W.m ⁻¹
3		20 mm	15 mm	132 W.m ⁻¹
4		20 mm	10 mm	128.6 W.m ⁻¹
5		20 mm	7 mm	126.6 W.m ⁻¹

4. Analyse expérimentale

Des mesures de température ont été réalisées pour vérifier et quantifier la réduction de température induite par le conducteur fendu. Le montage expérimental est composé d'un conducteur dans une cuve remplie de SF6 sous pression. Un courant alternatif est injecté dans le conducteur. La température dans le montage est mesurée par des thermocouples placés sur le conducteur, la cuve et dans le SF6. La précision de ces thermocouples après la pose est de 2 °C. Les mesures sont effectuées à deux courants nominaux 4000 A et 5000 A, et à deux pressions 4.7 bars et 6 bars.

On teste trois configurations (**Figure 5**). Tout d'abord, on effectue les mesures de température dans le montage avec un conducteur standard de section S_1 (a), puis avec un conducteur fendu de section S_2 (b) dont les dimensions correspondent à la configuration 4 du **Tableau 1**. Comme il a été spécifié précédemment, la section de passage du courant du conducteur standard S_1 est 18 % moins importante que celle du conducteur fendu S_2 . Pour n'observer que l'influence de l'ouverture sans variation de section de passage du courant, on effectue également des mesures de température sur le conducteur fendu avec du ruban adhésif obstruant l'ouverture (c) pour empêcher la circulation du gaz entre l'intérieur et l'extérieur du conducteur.

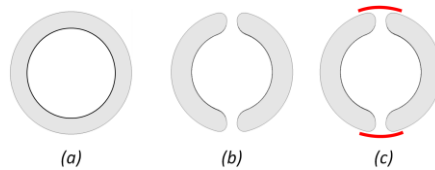


Figure 5 : Schéma des géométries de conducteur testées expérimentalement (a) conducteur standard, (b) conducteur fendu, (c) conducteur fendu avec du ruban adhésif obstruant l'ouverture

5. Résultats

Tableau 2. Différence de température sur le conducteur et la cuve, entre les essais effectués à 5000 A et ceux à 4000 A

Différence de température $T_{5000A} - T_{4000A}$	Conducteur standard		Conducteur fendu	
	4.7 bars	6 bars	4.7 bars	6 bars
Conducteur	19.4 K	18.4 K	16.6 K	15.8 K
Cuve	8.8 K	8.9 K	8.8 K	9.0 K

Tableau 3. Différence de température sur le conducteur et la cuve, entre les essais effectués à 4.7 bars et ceux à 6 bars

Différence de température $T_{4.7bars} - T_{6bars}$	Conducteur standard		Conducteur fendu	
	4000 A	5000 A	4000 A	5000 A
Conducteur	4.4 K	5.5 K	2.3 K	2.8 K
Cuve	1.1 K	1.1 K	0.6 K	0.3 K

Les résultats des expériences sont résumés dans les **Tableau 2** et **Tableau 3**. Les valeurs représentées **Tableau 2** correspondent à la différence entre les températures moyennes mesurées sur le conducteur et la cuve durant les essais à 5000 A et les essais à 4000 A. Les valeurs représentées **Tableau 3** correspondent à la différence entre les températures moyennes mesurées sur le conducteur et la cuve durant les essais à 4.7 bars et les essais à 6 bars.

5.1 Influence du courant et de la pression

Tout d'abord, à géométrie et pression constantes, on observe qu'une augmentation du courant nominal entraîne une augmentation de l'élévation de température du conducteur entre 16 K et 19 K et de la cuve d'environ 9 K. Cette tendance est en accord avec celle donnée par le circuit électrique équivalent (**Figure 2**). D'un point de vue quantitatif, T_{1f} et T_{2f} sont calculées à partir des équations (2), dans la configuration du conducteur standard et du conducteur fendu, à 4.7 bars et 6 bars. La différence de température maximale obtenue entre les températures calculées et les températures mesurées est de l'ordre de 2% pour T_{2f} (ce qui est inférieur à l'erreur de mesure) et de 3.5 % pour T_{1f} . La différence

entre les valeurs analytiques et expérimentales de T_{lf} est principalement due au transfert thermique par rayonnement pris en compte sous la forme de T et non de T^4 dans le circuit électrique équivalent.

Ensuite, à géométrie et courant constants, on observe qu'une augmentation de pression entraîne une diminution de l'élévation de température du conducteur entre 2 K et 5 K, mais n'a pas d'influence sur l'élévation de température de la cuve. Ceci est en accord avec la tendance prédite par le circuit électrique équivalent (**Figure 2**).

5.2 Influence de la géométrie

Le **Tableau 4** permet de comparer les températures mesurées avec les différents conducteurs. La première ligne représente la différence entre la température moyenne du conducteur mesurée durant l'essai avec le conducteur fendu T_b et celle mesurée durant l'essai avec le conducteur standard T_a . La deuxième ligne représente la différence entre la température moyenne du conducteur mesurée durant l'essai avec le conducteur fendu à l'ouverture obstruée T_c et celle mesurée durant l'essai avec le conducteur standard T_a .

Tableau 4. Différence de température sur le conducteur entre les trois configurations testées

Différence de température	4.7 bars		6 bars	
	4000 A	5000 A	4000 A	5000 A
$T_b - T_a$	-8.1 K	-11.1 K	-6.0 K	-8.6 K
$T_c - T_a$	-1.8 K	-1.8 K		

Ces expériences montrent que les températures sont moins élevées avec le conducteur fendu qu'avec le conducteur standard entre 8 K et 11 K à 4.7 bars et 6 K et 9 K à 6 bars. Ceci représente une réduction de température de 18 % à 4.7 bars et de 15 % à 6 bars et constitue une réduction importante pour cette application. On observe également que la réduction de température augmente quand la pression diminue, alors qu'elle reste globalement constante quand le courant nominal augmente.

On observe également que les températures mesurées sont moins élevées de 1.8 K avec le conducteur fendu à l'ouverture obstruée qu'avec le conducteur standard. Cette différence de température est inférieure à l'erreur de mesure. On peut alors considérer que la température est similaire dans les deux configurations. Par conséquent, la réduction de température obtenue avec le conducteur fendu est essentiellement due à l'ouverture verticale qui améliore le transfert convectif entre le gaz à l'intérieur et à l'extérieur du conducteur.

6. Conclusion

Une nouvelle géométrie de conducteur comportant une ouverture verticale a été étudiée pour réduire l'augmentation de température due à la circulation du courant dans un PSEM. Les dimensions de ce conducteur fendu ont été déterminées à l'aide d'un outil d'éléments finis. Puis, les performances de ce conducteur ont été évaluées lors d'essais expérimentaux qui montrent une réduction de température entre 15 % et 18 % en comparaison avec le conducteur standard. Ces expériences ont également montré que cette réduction de température est essentiellement due à l'ouverture verticale qui améliore le transfert convectif. Cette nouvelle géométrie de conducteur permet donc, à conditions de pression et de géométrie identiques, la circulation d'un courant nominal plus important dans le PSEM.

Cette nouvelle géométrie conductrice peut encore être optimisée par une étude numérique du champ de température. De plus, prendre en compte les transferts thermiques durant le processus de développement du PSEM permettrait d'en améliorer davantage les performances.

7. Références

- [1] S.W. Kim, H.H. Kim, S.C. Hahn, K.Y. Park, Y.J. Shin W.P. Song, JB Kim, and I.H. Shin, "Coupled finite-element-analytic technique for prediction of temperature rise in power apparatus", *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 38, pp. 921-924, 2002
- [2] J.K. Kim, J.Y. Lee, S.B. Wee, and S.C. Hahn, "A novel coupled magneto-thermal-flow analysis for temperature rise prediction of power apparatus", *Electrical Machines and Systems, 2008. ICEMS 2008. International Conference on. IEEE, 2008*, pp. 585-588
- [3] Z. Geng, X. Lin, J. Xu, and F. Song, "Three-Dimensional Magneto-Thermal Fields Analysis and Test of 1100kV GIS Disconnecter." *Electromagnetic Field Problems and Applications (ICEF), 2012 Sixth International Conference on. IEEE, 2012* pp. 1-4
- [4] S.L. Ho, Y. Li, X. Lin, E.D.C Lo, K.W.E. Cheng, and K.F. Wong, "Calculations of eddy current, fluid, and thermal fields in an air insulated bus duct system." *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 43, pp. 1433-1436, 2007