

Contribution à l'optimisation de circuits thermoconvectifs

Nelu Cristian Chereches¹⁾

¹⁾ Université de Reims Champagne – Ardenne et Université Technique "Gh. Asachi" de Iasi

- ▶ **Date de soutenance:** 07.02.2006
- ▶ **Directeur de Thèse:** NICOLAE ȚĂRANU, Faculté de Génie Civil, Université Technique "Gh. Asachi" de Iasi, Roumanie

JACQUES PADET, Faculté des Sciences, Université de Reims, France

- ▶ **Président:** CHERIFA ABID, Ecole Polytechnique Universitaire de Marseille I.U.S.T.I. Marseille, France

▶ **Jury:**

- RENATO COTTA, Université Fédérale de Rio de Janeiro, Brésil
- NADIM EL WAKIL, Faculté des Sciences, Université de Reims, France
- SYLVAIN LALOT, Université de Valenciennes, France
- VALENTIN PAVEL, Faculté de Génie Civil, Université Technique "Gh. Asachi" de Iasi, Roumanie

Résumé

L'objectif de cette étude est l'analyse de l'écoulement d'un fluide ainsi que le transfert de chaleur par convection dans un circuit thermoconvectif à plusieurs canaux de refroidissement. Il s'agit d'un transformateur électrique de puissance triphasé en colonnes immergé dans un bain d'huile minérale à l'intérieur d'une cuve.

L'étude que nous avons menée a été initiée par la société *Electroputere Craiova* (Roumanie) spécialisée par la construction des équipements électrotechniques destinés principalement à la production et à la distribution d'énergie électrique. Elle concerne un transformateur électrique de puissance de 40 MVA fabriqué par cette société. D'un autre côté, ce travail intéresse également le groupe EDF (*Electricité de France*) dont le domaine d'activité est surtout la production, la



Contribution à l'optimisation de circuits thermoconvectifs

distribution et la commercialisation de l'électricité pour savoir quelle est la limite de l'utilisation d'un transformateur afin de pouvoir l'exploiter au maximum de ses performances et vérifier les spécifications techniques données par le constructeur, d'autant plus que l'investissement dans un transformateur électrique de puissance est important et qu'il faut bien le rentabiliser.

Durant le fonctionnement normal d'un transformateur électrique de puissance, une chaleur importante se dégage à l'intérieur à cause des pertes dans ses différentes parties actives (enroulements primaire et secondaire ainsi que le noyau) à la fois par effet Joule et par les courants de Foucault. Ceci nécessite un refroidissement adapté afin de le protéger tout en préservant son rendement et sa durée de vie. Pour évacuer cette chaleur, plusieurs canaux de refroidissement sont prévus à l'intérieur des parties actives et qui sont traversés par une huile minérale choisie pour ses caractéristiques électriques et thermiques. Généralement, pour les grands transformateurs, l'entrée et la sortie de l'huile se font sur le côté de la cuve ; l'huile entre par la partie inférieure de la paroi, traverse les parties actives du transformateur où elle gagne de la chaleur dégagée par conduction et par convection avant de sortir par la partie supérieure. L'écoulement de l'huile à l'intérieur du transformateur peut se faire naturellement à cause de la différence de la masse volumique comme il peut être aidé par un équipement tel qu'une pompe.

Certaines limites concernant les températures maximales admissibles à l'intérieur du transformateur ont été fixées par les normes internationales définies par la CEI (Commission Electrotechnique Internationale). Ces limites ont été définies afin d'assurer un bon fonctionnement du transformateur avec une durée de vie moyenne de 20 ans tout en préservant ses différentes composantes électriques ainsi que les propriétés thermophysiques de l'huile. Il est admis qu'un fonctionnement permanent avec une température du point chaud de 98 °C à une température ambiante de 20 °C conduit à une vitesse normale de la vitesse de dégradation. Par contre, cette vitesse de dégradation doublera pour chaque augmentation de 6 °C de la température du point le plus chaud.

De plus, durant le fonctionnement normal d'un transformateur électrique, des phases transitoires peuvent survenir lorsqu'il est soumis à des surcharges résultant de la variation de la puissance appelée qui peut avoir des fluctuations instantanées, journalières et saisonnières. D'un autre côté, la valeur moyenne de la puissance augmente au cours des années en raison du développement de la consommation de l'énergie électrique. Par conséquent, lorsqu'on passe d'un régime de charge à un autre, ce sont principalement les pertes électriques dans les enroulements qui varient, ce qui augmente davantage la température des composantes du transformateur ainsi que celle de l'huile.



N.C. Chereches

Les conséquences d'une augmentation de la température du point chaud au-dessus de la limite imposée à l'intérieur du transformateur, due à un refroidissement insuffisant se traduisent par :

- une réduction globale de la performance thermique du transformateur et de son rendement ;
- une dégradation de ses différentes composantes et des propriétés thermophysiques de l'huile ;
- une réduction de sa durée de vie ;
- une dépense d'énergie entraînant un surcoût d'investissement.

Dans ce contexte, le constructeur s'intéresse à prévoir l'apparition des points chauds, à les localiser et à réduire leur température sous les limites définies par les normes tout en dépensant moins d'énergie. Les essais en grandeur réelle sont lents et coûteux car ils nécessitent la construction d'un prototype et son installation ainsi que sa mise en service. De plus, ils ne permettent pas de changer tous les paramètres, ce qui limite les possibilités d'optimisation et réduit leur portée.

D'où l'intérêt de notre travail qui consiste dans un premier temps à réaliser une étude numérique nous permettant de faire une analyse paramétrique et de nous aider à avoir une idée de la configuration la plus adéquate et la plus rentable pour optimiser le transfert de chaleur, diminuer la température du point chaud tout en assurant une bonne compréhension des phénomènes thermiques et dynamiques mis en jeu pendant le fonctionnement d'un transformateur électrique. Dans un deuxième temps, vu la complexité du problème et afin d'approfondir l'analyse, on a choisi de faire une étude analytique sur un seul canal pour déterminer l'espacement optimal et trouver des critères pour distinguer les différents régimes convectifs. De plus, vu les dimensions du transformateur, ces études ont été réalisées sur deux plaques planes verticales à la place d'une section annulaire.

Le modèle thermoconvectif est représenté par la colonne du milieu du transformateur composé d'un noyau entouré de deux enroulements dans une géométrie axisymétrique où l'entrée et la sortie de l'huile se font selon l'axe de révolution. La discrétisation du domaine du calcul utilise un maillage structuré non uniforme, serré près des parois et un peu plus large ailleurs, et la modélisation thermique et dynamique du problème a été faite par le logiciel de calcul FLUENT, basé sur la méthode des volumes finis, dans une géométrie bidimensionnelle axisymétrique.

Dans un premier temps, différentes configurations géométriques ont été conçues et étudiées en régime permanent avec différentes vitesses de l'huile à l'entrée lorsque le transformateur fonctionne à charge nominale. L'objectif est de trouver la meilleure configuration avec la vitesse optimale permettant d'améliorer l'échange de chaleur en assurant un bon refroidissement tout en maintenant les températures



Contribution à l'optimisation de circuits thermoconvectifs

maximales sous les limites imposées à moindre coût. Ce travail a été divisé en deux parties abordant les deux conditions aux limites utilisées : densités de flux imposées sur les surfaces des parties actives ou sources internes de chaleur imposées à l'intérieur des ces éléments. Dans chaque cas, une analyse détaillée des phénomènes physiques thermiques et dynamiques observés à l'intérieur du modèle couplée à une étude comparative des résultats ont été faites afin de choisir les solutions les mieux adaptées à l'optimisation du transfert de chaleur. Ainsi, l'analyse des résultats ont montré qu'afin d'assurer un refroidissement efficace du transformateur où la température du point chaud ne dépassera pas la limite maximale, un écoulement dirigé est une bonne solution dans un système multicanaux.

Afin de valider les modélisations numériques, des essais expérimentaux ont été effectués sur un transformateur réel après une heure de fonctionnement en régime de charge nominal : la température de l'huile est mesurée dans la partie supérieure du transformateur et les températures de l'enroulement primaire et secondaire sont déterminées par la méthode de variation de la résistance électrique en suivant une loi empirique établie expérimentalement. Ainsi, les résultats obtenus ont montré un bon accord avec les calculs numériques, ce qui justifie les approximations faites dans la modélisation.

Ensuite l'étude a été portée sur la modélisation thermique et dynamique du transformateur en régime transitoire lorsqu'il est soumis à une surcharge de 60 % au dessus de la charge nominale. Une première étude porte sur la comparaison des évolutions temporelles de la température du point chaud en utilisant successivement les hypothèses des densités de flux et des sources volumiques. Cette comparaison montre que l'hypothèse d'une densité de flux sur les surfaces qui était justifiée dans le régime permanent n'est plus valable dans le régime transitoire. Ensuite, une deuxième étude comparative des résultats a été faite à différents instants afin d'apporter les explications physiques liées à ce régime.

Par la suite, des études plus fondamentales ont été abordées afin de mieux comprendre les phénomènes thermiques et dynamiques mis en jeu pendant le fonctionnement d'un transformateur électrique. Le calcul a été conduit analytiquement pour trouver la distance optimale entre deux plaques planes verticales soumises à des densités de flux uniformes dans un écoulement laminaire ascendant en convection mixte. La grande majorité des études d'optimisation ont porté sur les régimes de convection naturelle ou forcée mais, à notre connaissance, il n'existe aucune donnée dans la littérature concernant l'optimisation en convection mixte. A la suite de cette étude, la distance optimale a été calculée pour chaque canal du transformateur et comparée avec la largeur utilisée dans le calcul.

La dernière partie de notre étude apporte des éléments nouvelles de réponse à la question: quand peut-on dire que l'on est en convection naturelle, forcée ou mixte?



N.C. Chereches

L'analyse a été conduite sur un écoulement interne laminaire en convection mixte entre deux plaques planes parallèles permettant de faire des calculs analytiques tout en étant physiquement représentative. Deux conditions aux limites ont été considérées : température ou densité de flux uniforme. Pour sélectionner la nature du régime convectif, on a proposé plusieurs critères basés sur la comparaison de différentes grandeurs dynamiques. Ainsi, on a montré que dans chaque cas les transitions sont gouvernées par un seul paramètre, le coefficient de poussée thermique $RiRe$, mais que les valeurs numériques de ce groupement sans dimension dépendent du critère considéré.

Mots-clés : transformateur électrique, refroidissement, optimisation, écoulement laminaire, convection mixte, régime permanent, régime transitoire.

