



Université Claude Bernard



## DIPLÔME NATIONAL DE DOCTORAT

(Arrêté du 25 mai 2016)

Date de la soutenance : **13 Novembre 2019**

Nom de famille et prénom de l'auteur : **Monsieur FOUINEAU Alexis.**

Titre de la thèse : « **Méthodologies de conception de Transformateurs Moyenne Fréquence pour application aux réseaux haute tension et réseaux ferroviaires** ».



Les Transformateurs Moyenne Fréquence (TMF) sont une technologie innovante par rapport aux transformateurs basse fréquence, avec la promesse d'une réduction de volume et d'une augmentation du rendement. Cette thèse s'intéresse en particulier à leur conception pour des applications haute tension forte puissance, telles que les réseaux haute tension et moyenne tension à courant continu, ainsi que les réseaux ferroviaires. Dans ces applications, les TMF sont utilisés au sein de convertisseurs pouvant générer des contraintes spécifiques à prendre en compte durant leur conception : signaux non-sinusoidaux, tension de polarisation, valeurs d'inductances cibles.

De plus, les choix technologiques actuellement disponibles pour la réalisation des TMF sont nombreux, et aucun de ces choix ne fait actuellement consensus quelle que soit l'application visée. Des tendances ont pu être identifiées à l'aide d'un outil de classification des designs de TMF issus de la littérature. Ainsi, les technologies les plus prometteuses ont été sélectionnées et retenues pour la suite. A partir de ces technologies, une méthodologie de conception permettant de concevoir et comparer rapidement et ce de façon semi-automatique des TMF avec différents choix technologiques a été mise en place. Elle est constituée de trois étapes : pré-design, design analytique et validation. Le design analytique complet du TMF avec différents choix technologiques est réalisé à l'aide d'un outil de conception automatisée développé durant cette thèse, que nous avons nommé SUITED (**SU**pergrid **I**nstitute **T**ransform**E**r **D**esign). Cette méthodologie requiert des modèles et données pour chacun des composants et phénomènes du TMF.

Concernant le noyau magnétique, une revue et une sélection de modèles issus de la littérature ont été effectuées pour l'évaluation de l'inductance magnétisante et des pertes magnétiques. De plus, des caractérisations magnétiques ont permis de mettre en évidence l'impact de certains procédés technologiques sur les niveaux de pertes de noyaux magnétiques en matériau nanocristallin, qui est un excellent candidat pour les TMF. Au niveau des bobinages, des modèles analytiques pour calculer le champ magnétique, l'inductance de fuite et les effets de peau et de proximité ont été développés et comparés avec ceux de la littérature ainsi que des simulations. Ces nouveaux modèles s'avèrent obtenir une meilleure précision sur les géométries de

TMF considérées que ceux de la littérature. De plus, une nouvelle méthode d'évaluation des capacités parasites de bobinages à spires rectangulaires a été mise en place et validée avec succès. Des schémas thermiques équivalents ont été identifiés pour différentes géométries de TMF. Les résistances thermiques de conduction, convection et radiation sont calculées à partir de modèles détaillés. En particulier, l'anisotropie des matériaux est prise en compte pour la conduction thermique, et les coefficients de convection sont évalués via des corrélations différentes pour chaque face du TMF. Les schémas thermiques sont ensuite résolus de façon itérative et analytique pour prendre en compte les non-linéarités des résistances thermiques tout en optimisant le temps de calcul nécessaire.

Enfin, l'ensemble de la méthodologie de conception mise en place a été appliqué sur trois cas d'études correspondant à des applications cibles : haute tension, moyenne tension et ferroviaire. Les résultats obtenus montrent effectivement la performance et la nécessité de cette approche.

---

**Mots-clés :** Transformateur de Puissance, Transformateur Moyenne Fréquence, Modélisation, Conception, Electromagnétisme, Noyau Magnétique, Bobinage, Thermique