Avis de Soutenance

Monsieur Felipe MACHADO DE FREITAS

Génie électrique

Soutiendra publiquement ses travaux de thèse intitulés

Métamatériaux Magnétiques Résonants pour les Systèmes Inductifs : Modélisation, Conception et Contrôle du Champ Proche

Travaux dirigés par Monsieur Arnaud BREARD et Monsieur Christian VOLLAIRE

Cotutelle avec l'université "CEFET MG" (Brésil)

Soutenance prévue le ***vendredi 04 décembre 2026*** à 14h00

Lieu : 36 Avenue Guy de Collongue, 69134, Ecully

Salle : Amphi. 203, Bât W1

Composition du jury proposé

M. Arnaud BREARD	Professeur des universités	Ecole Centrale de Lyon	Directeur de thèse
M. Xavier MARGUERON	Professeur des universités	Centrale Lille, L2EP	Rapporteur
Mme Marcela SILVA NOVO	Associate professor	Universidade Federal da Bahia (UFBA) / Escola Politécnica — Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação	Rapporteure
M. Glaucio LOPES RAMOS	Associate professor	Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ) / Campus Alto Paraopeba (CAP) — Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Mecatrônica (DETEM)	Examinateur
Mme Ursula DO CARMO RESENDE	Full professor	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) / Departamento de Engenharia Elétrica (DEE)	Examinatrice
M. Olivier CHADEBEC	Directrice de recherche	G2Elab (UMR CNRS 5269 / Grenoble INP)	Examinateur
M. Christian VOLLAIRE	Professeure des universités	Ecole Centrale de Lyon	Co-directeur de thèse
M. Sandro TRINDADE MORDENTE GONÇALVES	Full professor	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) / Departamento de Engenharia Elétrica (DEE)	Directeur de thèse
M. Loris PACE	Ecole Centrale de Lyon	Invité	

Mots-clés : métamatériaux magnétiques résonants, systèmes inductifs, transfert de puissance sans fil, modes collectifs, contrôle du champ magnétique, électronique de puissance VHF

Résumé :

Cette thèse étudie les métamatériaux magnétiques résonants pour le contrôle des interactions magnétiques en champ proche dans les systèmes inductifs fonctionnant dans les gammes MHz et VHF. L'augmentation de la fréquence de fonctionnement permet de réduire les dimensions des composants passifs et de favoriser l'intégration des systèmes, mais intensifie également les problématiques liées au couplage magnétique et aux champs de fuite générés par les composants inductifs. Une méthodologie de modélisation et de conception fondée sur des circuits équivalents et des formulations semi-analytiques est développée. Les structures finies sont représentées comme des réseaux de résonateurs magnétiquement couplés, établissant un lien entre la géométrie des cellules, leurs paramètres électriques, les inductances mutuelles, les courants induits et la distribution du champ magnétique. La formulation matricielle obtenue permet l'analyse de structures comportant plusieurs résonateurs avec un coût de calcul réduit par rapport aux simulations électromagnétiques tridimensionnelles complètes. L'analyse modale montre que la réponse des réseaux finis fortement couplés ne peut pas être décrite uniquement à partir de la fréquence de résonance d'une cellule isolée. Les interactions mutuelles donnent naissance à des modes collectifs caractérisés par différentes fréquences propres et distributions spatiales de courant. Deux formulations complémentaires pour l'extraction de la perméabilité magnétique effective sont également développées, reliant la description microscopique des courants induits à une interprétation macroscopique de la réponse magnétique. Les modèles proposés sont validés par des simulations électromagnétiques et des résultats expérimentaux. La méthodologie est d'abord appliquée aux systèmes de transfert de puissance sans fil. Les résultats montrent que les structures résonantes peuvent modifier le couplage effectif entre les bobines Tx et Rx et, par conséquent, l'efficacité du transfert. L'étude d'une métasurface finie 5 × 5 met en évidence le rôle des modes collectifs dans la distribution spatiale du couplage. En présence d'un désalignement latéral, la redistribution des courants entre les cellules voisines introduit des chemins de couplage supplémentaires, contribuant à réduire la sensibilité du système au désalignement du récepteur. Dans une seconde application, une encapsulation fondée sur un métamatériau magnétique résonant est proposée pour confiner le champ magnétique généré par des inductances imprimées. La structure est intégrée dans un convertisseur continu-continu Class-E² fonctionnant à 30 MHz et comparée expérimentalement à des solutions à base de ferrite et de cuivre. L'encapsulation proposée permet une réduction d'environ 72 % du champ magnétique au point central situé à 5 mm au-dessus de l'inductance. L'inductance encapsulée présente également la plus faible résistance série (380 mΩ) et le facteur de qualité le plus élevé (Q = 50) parmi les configurations étudiées. La validation sur le convertisseur complet montre que ce confinement peut être obtenu sans compromettre son rendement, avec un rendement maximal mesuré de 61,61 % pour le prototype A. Les analyses thermiques et de compatibilité électromagnétique montrent néanmoins que la réduction locale du champ et la réduction globale des émissions électromagnétiques constituent deux objectifs distincts. Dans l'ensemble, les résultats montrent que l'amélioration du couplage dans les systèmes de transfert de puissance sans fil et le confinement du champ autour des composants inductifs peuvent être interprétés comme différents régimes d'un même mécanisme reposant sur des résonateurs magnétiquement couplés. L'approche développée fournit ainsi un outil efficace pour l'analyse, la conception et l'optimisation de métamatériaux magnétiques résonants destinés au contrôle du champ proche dans les systèmes inductifs.

Summary:

This thesis investigates resonant magnetic metamaterials for controlling near-field magnetic interactions in inductive systems operating in the MHz and VHF frequency ranges. Increasing the operating frequency enables reductions in passive component size and facilitates system integration, but also intensifies challenges related to magnetic coupling and stray magnetic fields generated by inductive components. A modeling and design methodology based on equivalent circuits and semi-analytical formulations is developed. Finite structures are represented as networks of magnetically coupled resonators, establishing a link between cell geometry, electrical parameters, mutual inductances, induced currents, and magnetic-field distribution. The resulting matrix formulation enables the analysis of structures containing multiple resonators at a reduced computational cost compared with full three-dimensional electromagnetic simulations. Modal analysis shows that the response of strongly coupled finite arrays cannot be described solely from the resonant frequency of an isolated cell. Mutual interactions give rise to collective modes characterized by different eigenfrequencies and spatial current distributions. Two complementary formulations for extracting the effective magnetic permeability are also developed, linking the microscopic description of induced currents to a macroscopic interpretation of the magnetic response. The proposed models are validated through electromagnetic simulations and experimental results. The methodology is first applied to wireless power transfer systems. The results show that resonant structures can modify the effective coupling between the Tx and Rx coils and, consequently, the power transfer efficiency. The study of a finite 5 × 5 metasurface highlights the role of collective modes in the spatial distribution of coupling. Under lateral misalignment, the redistribution of currents among neighboring cells introduces additional coupling paths, thereby contributing to reduced system sensitivity to receiver misalignment. In a second application, an encapsulation based on a resonant magnetic metamaterial is proposed to confine the magnetic field generated by printed inductors. The structure is integrated into a Class-E² DC–DC converter operating at 30 MHz and experimentally compared with conventional ferrite- and copper-based solutions. The proposed encapsulation achieves an approximately 72% reduction in the magnetic field at the central point located 5 mm above the inductor. The encapsulated inductor also exhibits the lowest series resistance (380 mΩ) and the highest quality factor (Q = 50) among the configurations investigated. Validation on the complete converter demonstrates that this field confinement can be achieved without compromising converter efficiency, with a maximum measured efficiency of 61.61% for prototype A. Thermal and electromagnetic compatibility analyses nevertheless show that local magnetic-field reduction and overall electromagnetic-emission reduction are distinct objectives. Overall, the results demonstrate that coupling enhancement in wireless power transfer systems and magnetic-field confinement around inductive components can be interpreted as different operating regimes of the same fundamental mechanism based on magnetically coupled resonators. The developed approach thus provides an efficient tool for the analysis, design, and optimization of resonant magnetic metamaterials for near-field control in inductive systems.