



Geeps

Génie électrique et électronique de Paris

LABORATOIRE GEEPS THÈSES 2022



université
PARIS-SACLAY



Alejandro Arroyo Sanchez

Conception et optimisation d'antennes à métasurface pour des applications satcom et communications spatiales

Le XXIème siècle est devenu l'ère la plus exigeante en termes d'information. Dans ce contexte, les télécommunications satellitaires doivent constamment s'adapter pour devenir plus performantes et être en mesure de fournir une grande quantité d'informations via la propagation des ondes électromagnétique de la manière la plus optimale. En effet, la conception d'antennes pouvant focaliser le rayonnement (ou bien suivre les trajectoires des systèmes communicants) avec une très bonne efficacité, sans beaucoup de pertes et pour un faible coût, fait l'objet d'une demande de la part des opérateurs dans beaucoup de laboratoires à travers le monde. Les antennes à métasurface tensorielle modulées s'avèrent une solution potentielle à ces demandes technologiques. Ces antennes sont basées sur l'utilisation de surfaces sur lesquelles sont imprimées des motifs de type métamatériaux. Ces antennes par leur souplesse de conception donnent la possibilité de contrôler le rayonnement grâce au design des éléments unitaires composant la métasurface. Une antenne à ouverture est réalisée de façon à favoriser la transformation d'une onde de surface en onde de fuite. Pour cela, l'antenne est alimentée de façon à exciter des ondes de surfaces qui se propageront à l'interface entre un substrat diélectrique et l'air. Ces ondes de surface excitées induiront des courants surfaciques sur les éléments de la métasurface, qui sont « vus » par ces ondes surfaciques comme une impédance à valeurs variables dépendant de la géométrie et de la périodicité des motifs. Pour fonctionner, ce principe requiert une modulation spatiale sinusoïdale de la surface. Si certaines conditions limites sont satisfaites, l'antenne rayonne dans une direction fixée. Ces conditions sont déterminées grâce à la technique de l'holographie, qui établit une relation entre les propriétés électromagnétiques de l'onde de surface (phase) et celles de l'onde de fuite (onde souhaitée). Des résultats intéressants de recherche ont été obtenus dans les dernières années en suivant ce design d'antenne. Quelques optimisations sont encore nécessaires pour améliorer ces antennes à métasurface. Cette thèse s'inscrit dans ce projet de recherche, et trois propriétés seront investiguées: • L'efficacité en puissance de l'alimentation • La polarisation • L'élargissement de la bande fréquentielle. On évoquera les raisons pour lesquelles ces propriétés sont importantes et l'on présentera, pour chacun de ces problèmes, une solution. Cette solution sera étudiée en détail, modélisée et expérimentalement testée/validée.

Mots-Clés : Antennes, Métasurface, Communication spatiale, Onde de fuite, Bande K, Onde de surface

Efficient design of metasurface antennas for satellite and satcom applications

The XXI century has become the most information-consuming/demanding society era. In this context, satellites' communications must develop more accurate and new technologies capable to provide a huge amount of electromagnetic energy to citizens in an optimum way. Indeed, conceiving antennas that can focus on a determined target (and even follow this target) with a high-efficiency gain, not many losses, and a low-cost profile, is still a challenging area of research among many scientific laboratories in the world. Modulated tensorial metasurface antennas are an interesting solution to these technological requirements. They are based on metamaterials, which provide the possibility to control the desired aperture beam by manipulating their unit cell elements components. An aperture antenna (a desired radiated beam with some technical criteria such as high gain or large bandwidth) is achieved following the physical mechanism of surface wave / leaky wave transformation: whenever the antenna is switched on, surface waves will be appear at the interface. These excited surface waves will be traveling through the substrate medium, interacting with the elements composing the metasurface. These elements will possess different impedances, which depends on the geometry design. This principle requires modulation of the metasurface to 'convert' the surface wave into a desired leaky wave. This is achieved by placing a sinusoidally-modulated surface on the top of a grounded dielectric (patch-like support). If certain electromagnetic conditions are satisfied, leaky waves could be generated and a beam will be radiated away from the surface. Applying holographic techniques, a relation between the phase of the desired radiated field distribution and the phase of the incident surface waves can be established. Interesting results have been achieved following this design procedure. Some improvements in the design process are still required. Metasurface antennas need to achieve greater frequency bandwidth and more stable radiated beams. This thesis is a continuation of the research conducted at L2E/GeePs (Centralesupelec). Three main features will be reviewed: • Power efficiency • Polarization • Bandwidth. Issues concerning these properties will be explained, and for one of each, a solution will be proposed, investigated, tested, and validated.

Keywords : Antenna, Metasurface, Satcom, Leaky-wave, K-band, Surface-wave

Ali Berhil

Modélisation et Réalisation d'une Structure Reconfigurable par Actionneurs à Mémoire de Forme : Contrôle de forme sans Capteur

Les alliages à mémoire de forme (AMF) sont des matériaux intelligents qui ont la capacité de reprendre leur forme initiale par chauffage après une déformation ayant dépassé leur zone élastique. La thèse cherche à exploiter l'effet mémoire de forme des AMF pour réaliser la déformation contrôlable d'une structure mécanique afin d'obtenir une structure reconfigurable. La nouveauté réside dans le fait que les actionneurs AMF ne sont pas insérés dans la surface à déformer, ils sont rapportés. Cela offre la possibilité de réaliser une structure à raideur variable et de bénéficier d'un degré de liberté supplémentaire pour contrôler l'amplitude du déplacement de la structure. Le prototype développé est composé d'un disque. Les actionneurs AMF sont connectés entre des pieds solidaires du disque. Ce prototype a permis d'obtenir plusieurs profils de déformation en fonction des actionneurs AMF activés. Le contrôle en boucle fermée de l'amplitude du déplacement de la structure a été implémenté expérimentalement. Il s'agit d'un contrôle sans capteur de déplacement externe. Ce contrôle sans capteur contribue de manière significative à la miniaturisation du système en éliminant le besoin d'un capteur de position externe, son alimentation électrique ainsi que les problèmes d'accès à la mesure de déplacement dans certaines applications. L'estimation du déplacement de la structure a été réalisée à l'aide de la mesure de la résistivité électrique des actionneurs à mémoire de forme en temps réel. Un contrôleur hybride pour compenser les perturbations externes a été validé expérimentalement. Notre recherche a montré la possibilité de concevoir et de réaliser des structures adaptatives et actives pilotées par des AMF rapportés sur la structure à déformer.

Mots-Clés : Actionneur à Mémoire de Forme, Structure Reconfigurable, Résistivité Electrique des AMF, Contrôle de Déplacement, Contrôle de Forme Sans Capteur

Modeling and Realization of a Reconfigurable Structure by Shape Memory Actuators : Sensorless Shape Control

Shape memory alloys (SMA) are smart materials that have the ability to recover their initial shape by heating after a deformation that exceeds their elastic zone. The thesis seeks to exploit the shape memory effect of SMAs to achieve the controllable deformation of a mechanical structure in order to obtain a reconfigurable structure. The novelty lies in the fact that the shape memory actuators are not inserted into the surface to be deformed, they are attached. This offers the possibility of making a structure with variable stiffness and benefiting from an additional degree of freedom to control the amplitude of the structure displacement. The developed prototype is composed of a disc. Shape memory actuators are connected between beams attached to the disc. This prototype made it possible to obtain several deformation profiles depending on the activated shape memory actuators. The closed-loop control of the displacement amplitude of the structure has been implemented experimentally. This control was without an external displacement sensor. This sensorless control contributes significantly to the miniaturization of the system by eliminating the need for an external position sensor, its power supply as well as the problems of access to the measurement of displacement in certain applications. The estimation of the structure displacement was carried out using the measurement of the electrical resistivity of the shape memory actuators. A hybrid controller to compensate external disturbances has been validated experimentally. Our research has shown the possibility of designing and realizing adaptive and active structures driven by SMAs reported on the structure to be deformed.

Keywords : Shape Memory Actuator, Reconfigurable Structure, Electrical Resistivity of SMAs, Displacement Control, Sensorless Shape Control

Ali Koteiche

Développement de récupérateurs d'énergie sans fil à base de transducteurs magnétoélectriques pour des applications biomédicales

Les technologies de la santé et l'Internet des Objets (IoT) sont deux marchés en pleine croissance, liés par l'interconnexion d'objets nomades pour le « quantified self », où chaque patient peut effectuer ses propres tests physiologiques. À cette fin, l'un des défis technologiques réside dans l'autonomie de la puissance, car l'énergie doit être fournie au système avec un minimum d'interaction de l'extérieur. Par conséquent, le développement d'un récupérateur d'énergie sans fil a un très large éventail d'applications. Dans ce contexte, les matériaux magnétoélectriques (ME) suscitent un intérêt scientifique important en tant que transducteurs d'énergie pour alimenter le système. Les matériaux ME sont des composites laminaires à base de couches piézoélectriques et magnétostrictives, généralement collées ensemble. Lorsque le matériau ME est entraîné par un champ magnétique externe, les éléments magnétostrictifs sont soumis à des contraintes mécaniques et à des mouvements. Ce mouvement est ensuite transféré à l'élément piézoélectrique qui génère une tension entre ses électrodes. Ensuite, l'énergie doit être façonnée (conditionnée) et gérée au niveau du système (gestion de l'alimentation). Pour les récupérateurs d'énergie piézoélectriques, de nombreuses stratégies d'optimisation existent déjà pour maximiser le flux de puissance du transducteur à l'unité de stockage d'énergie. Cette optimisation prend en compte l'impact du circuit de récupération d'énergie sur les performances globales du système. Pourtant, à ce jour, aucune solution optimale n'a été identifiée pour s'adapter aux contraintes spécifiques imposées par les résonateurs magnétoélectriques. La prise en compte de la spécificité des résonateurs magnétoélectriques au niveau du système sera un point clé de cette thèse. La thèse visera donc à étudier et à concevoir l'architecture des systèmes de récupération et de conditionnement d'énergie pour les transducteurs magnétoélectriques.

Mots-Clés : Transfert d'énergie sans fil, Gestion de puissance, Transducteur magnétoélectrique, Puissance limite, Implant, Circuits électroniques

Development of wireless energy harvesters based on magnetolectric transducers for biomedical applications

E-Health and the Internet of Things (IoT) are two growing markets, related to each other by the interconnection of nomadic objects for the “quantified self”, where each patient can perform his own physiological tests. To that purpose, one of the technological challenges lies in the power autonomy, since energy must be supplied to the system with a minimum interaction from the outside. Hence, the development of a wireless energy harvester has a very wide range of applications. In this context, magnetolectric (ME) materials arouse a significant scientific interest as energy transducers to transform electromagnetic energy provided from the outside into electrical energy available to power the system. ME materials are laminar composites based on piezoelectric and magnetostrictive layers, generally glued together. The device is usually connected to an electrical interface via deposited electrodes. When the ME material is driven by an external magnetic field, magnetostrictive elements are subject to mechanical constraints and motion. This motion is then transferred to the piezoelectric element which generates a voltage between its electrodes. Then, the energy must be shaped (conditioned) and managed at the system level (power management). For piezoelectric energy harvesters, many optimization strategies already exist to maximize the power flow from the transducer to the energy storage unit. This optimization takes into account the impact of the energy harvesting circuit on the overall performances of the system. Yet, to this day, no optimal solution has been identified to fit the specific constraints imposed by magnetolectric resonators. Taking into account the specificity of magnetolectric resonators at the system level will be a key point of this thesis. The thesis will thus aim at studying and designing the architecture of energy harvesting and conditioning systems for magnetolectric transducers.

Keywords : Wireless power transfer, Power management circuit, Magnetolectric transducer

Ana Torrealba Istillarte

Étude de l'inter-compatibilité tribologique des différents revêtements dans le domaine de la connectique

Le développement de nouvelles technologies ainsi que l'augmentation constante du nombre d'appareils électroniques engendrent une augmentation du nombre de connecteurs électriques dans les systèmes. Ces connecteurs peuvent être soumis à des vibrations qui génèrent des micro-frottements de l'interface de contact (fretting) et/ou à des cycles d'insertion-extraction qui génèrent des frottements macroscopiques. Ces deux sollicitations peuvent provoquer une usure mécanique et/ou chimique qui peut détériorer l'interface de contact et donc conduire à une dégradation de la résistance de contact. Le fonctionnement du connecteur sous ces sollicitations peut donc être perturbé et la durée de vie du contact peut ainsi être raccourcie. C'est pourquoi, afin de fiabiliser les connexions électriques, les substrats sont revêtus par une ou plusieurs couche(s) métallique(s). Historiquement, le métal le plus utilisé est l'or ; c'est en effet un métal noble donc très résistant à la corrosion et avec des bonnes propriétés tribologiques (résistance à l'usure). Cependant, en raison de son coût, d'autres systèmes de revêtements ont vu le jour pour remplacer les finitions en or épais, tel que les dépôts de palladium-nickel recouverts d'une très fine couche d'or (flashAu) ou les dépôts d'argent avec ou sans cette finition dorée. Mon travail de thèse a consisté à décrire, afin de mieux comprendre, les mécanismes d'usure des quatre revêtements cités précédemment (Au, flashAu/PdNi, Ag et flashAu/Ag) soumis à des frottements micro et macroscopiques et de connaître leur durée de vie sous ces sollicitations. Des configurations symétriques (les deux zones de contact ont le même revêtement) et dissymétriques (les deux zones de contact ont des revêtements différents) ont été étudiées. Suite aux tests de frottements, les contacts ont été analysés à l'aide d'un profilomètre optique afin d'observer et quantifier le déplacement de matière sur le contact usé. Ils ont également été analysés avec un microscope électronique à balayage muni d'une sonde EDS afin de déterminer l'évolution de la composition des traces d'usures. Les comportements des différentes configurations ont été analysés à partir du rapport entre les valeurs des modules de Young et des duretés mesurées par nano indentation. L'ensemble des résultats sur les mécanismes d'usure impliqués permet d'optimiser la durée de vie des connecteurs en adaptant leur conception aux leurs conditions d'utilisation. Ces résultats présentent un intérêt majeur pour l'industrie de la connectique.

Mots-Clés : Connecteurs, Tribologie, Contacts électriques, Fretting, Frottement macroscopique, Revêtements électrolytiques

Study of the tribological inter-compatibility of different plating in the field of connectivity

The development of new technologies as well as the constant increase in the number of electronic devices lead to the increase in the number of electrical connectors in the world. These connectors can be subjected to vibrations that generate micro-friction of the contact interface (fretting) and/or to insertion-extraction cycles that generate macroscopic friction. Both of these stresses cause mechanical and/or chemical wear that can deteriorate the contact interface and thus lead to a degradation of the contact resistance. The operation of connectors under these stresses can therefore be disrupted and the service life of the contact can be shortened. For this reason, in order to make electrical connections more reliable, the substrates are plated with one or several metal layer(s). Historically, the most used metal is gold; it is a noble metal and therefore very resistant to corrosion and with good tribological properties (wear resistance). However, due to its cost, other coating systems have emerged to replace thick gold finishes, such as palladium-nickel deposits covered with a very thin layer of gold (Au flash) or silver deposits with or without this gold finish. My thesis work has consisted in describing and better understanding the wear mechanisms of the four coatings mentioned above (Au, flashAu/PdNi, Ag and flashAu/Ag) subjected to micro and macroscopic friction and to know their life span under these sollicitations. Symmetrical (both contact areas have the same coatings) and asymmetrical (both contact areas have different coatings) configurations have been studied. Following the friction tests, the contacts were analyzed using an optical profilometer in order to observe and quantify the displacement of materials on the worn contact. They were also analyzed with a scanning electron microscope equipped with an EDS probe allowing the identification of the composition of the wear tracks. The behaviours of the different configurations were analyzed in terms of the ratios of the Young modulus and the hardness measured by nano indentation. The results on the different wear mechanisms allow optimizing the lifetime of connectors by adapting their conception to the operating conditions. Such results are of major interest to the connector industry.

Keywords : Connectors, Tribology, Electrical contacts, Fretting, Macroscopic friction, Plating

Antoine Cizeron

Étude et impacts du concept de modularité et de fractionnement des systèmes d'actionnement

Les travaux présentés dans ce manuscrit traitent de la modélisation et du contrôle d'une structure de chaîne de conversion électromécanique fractionnée. Le processus de segmentation étudié offre un degré de liberté supplémentaire dans le choix du calibre en tension de l'électronique de puissance mais induit des couplages magnétiques forts entre les différentes subdivisions du bobinage. Ce principe de segmentation est d'abord étudié de manière élémentaire en considérant deux sous-enroulements d'une même phase de machine électrique. La répartition des composantes fondamentales du courant et les ondulations de courant dues à l'électronique de puissance sont modélisées. Les pertes dans le cuivre et le matériau magnétique sont évaluées analytiquement et expérimentalement en fonction de la répartition du courant entre les deux sous-enroulements. Ensuite, la problématique de l'asservissement indépendant des courants dans les différentes subdivisions de la machine est abordée. Le formalisme dq habituel est étendu aux modes communs et différentiels des structures segmentées. Une preuve de concept a été mise en place et utilisée pour valider la méthode de contrôle proposée.

Mots-Clés : Machine électrique, Électronique de puissance, Segmentation, Multi-Triphasé

Investigation into the impacts of modularity and fractioning in E-drive systems

This thesis deals with the modelling and control issues of a structure enabling a further segmentation of three-phase electric drives. The studied segmentation process offers an additional degree of freedom in terms of voltage rating for power electronics but results in a three-phase system with highly coupled sub-windings. First, the case of a magnetic core with two coils is studied, representing the elementary segmentation of a phase. The fundamental current distribution is modelled as well as the current ripples due to the switching frequency of power electronics converters. The losses in the copper and in the magnetic core are assessed through analytical modelling and experimentation depending on the current distribution between the two coils. Then, for such a segmented motor with highly coupled windings, the true challenge lies in controlling the machine global electromagnetic torque while balancing the power among the different inverters. To tackle this issue, the dq standard synchronous frame is extended to common and differential modes. An experimental setup allows developing a proof of concept which shows the interest of the proposed control method compared to a standard multiple dq-frame method.

Keywords : Motor drive, Power electronics, Segmentation, Multi-Three-Phase

Arbia Haded

Modélisation du réseau basse tension dans la bande de fréquence utilisée par les courants porteurs en ligne en bande étroite

Les CPL sont la technologie retenue pour le développement des systèmes de comptage intelligent en France. Disposer d'outils pour représenter ces systèmes est nécessaire pour identifier les problématiques liées à la propagation des signaux CPL sur les réseaux électriques. Cela nécessite de développer le jumeau numérique d'un système CPL complet réalisant la simulation conjointe du réseau électrique basse tension (BT) et la pile protocolaire CPL dans la gamme de fréquences de 9 à 500 kHz. L'objectif de cette thèse est de développer un outil de calcul de la propagation des signaux CPL sur les réseaux BT. Une bibliothèque de modèles représentant les composants du réseau électrique (câbles, installations clients, générateurs...) dans les fréquences de 9 à 500 kHz est construite selon une approche déterministe. La méthode de calculs développée assemble ces modèles individuels pour représenter les topologies complexes des réseaux BT, puis réalise les calculs de propagation des signaux CPL entre n'importe quelle paire de nœuds émetteur et récepteur. Son implémentation a été validée en comparant les fonctions de transferts calculées avec celles obtenues par deux approches concurrentes ainsi qu'avec des mesures réalisées en laboratoire dans des conditions identiques. Notre simulateur électrique a ensuite été intégré dans la simulation d'un système CPL complet. Grâce à ces travaux, les résultats déterminés par le simulateur électrique sont interprétables par un simulateur télécom mettant en œuvre un modèle de la pile protocolaire CPL G3 complète.

Mots-Clés : Courants Porteurs en Ligne (CPL), Réseau électrique basse tension, Lignes de transmission couplées, Bibliothèque de modèles des composants, Propagation des signaux, Cosimulation, Fonctions de transfert, Standard FMI

Modeling of low voltage distribution grids in the frequency band used for narrow band power line communication

PLC is the technology adopted for the smart metering systems being deployed in France. Tools modeling PLC systems are required to identify the issues related to the propagation of PLC signals on electrical networks. This requires the development of a numerical model of a complete PLC system that simulates both the low-voltage (LV) electrical network and the PLC protocol stack in the frequency range from 9 to 500 kHz. This thesis aims to develop a calculation tool determining the propagation of PLC signals on LV grids. A model library representing all electrical grid components (cables, customer installations, generators...) in the 9 to 500 kHz frequency range is built following a deterministic approach. The calculation method developed assembles these individual models to create LV network topologies and performs then propagation calculations of PLC signals between any pair of transmitter and receiver nodes. Its implementation has been validated by comparing the computed transfer functions against those obtained by two competing approaches as well as with laboratory measurements performed under identical conditions. Our electrical simulator is then integrated into the co-simulation of a complete PLC system. Thanks to this work, the results obtained by the electrical simulator can be interpreted by a telecom simulator implementing a model of the complete G3 PLC protocol stack.

Keywords : Powerline communication (PLC), Low voltage electrical network, Coupled transmission lines, Component models library, Signal propagation, Cosimulation, Transfer functions, FMI standard

Boris Fischer

Modèles pour l'étude et la simulation de guides d'onde à métasurfaces avec symétrie de réflexion glissée

Quand un guide d'onde périodique est invariant après une translation d'une demi-période et une réflexion, il forme une symétrie glissée (SG). Les guides à métasurfaces (MS) avec SG répondent à certaines des exigences contemporaines de systèmes de communications sans fils, de part leur faible dispersion fréquentielle. Cependant, ils sont difficiles à modéliser en raison du fort couplage multi-modal qui naît entre les MS. Dans cette thèse, nous développons de nouveaux outils pour mieux comprendre les propriétés de la SG et pour accélérer la conception de guides plans avec SG. Nous appliquons ces outils pour concevoir un déphaseur reconfigurable intégré avec SG. Une méthode de raccordement multi-modal permet d'obtenir l'équation de dispersion de guides plans avec SG, pour des MS à corrugations et pour des MS à trous. En résolvant cette équation, on trouve un premier mode dont la courbe de dispersion est presque linéaire, en raison de la faible dispersion avec SG lorsque les MS sont proches. Nous montrons que ce comportement est dû à l'impact des harmoniques dans l'équation de dispersion. Cela nous permet de prouver que la courbe de dispersion est linéaire uniquement avec SG. Ces simplifications sont valides lorsque un ou deux modes suffisent à décrire la variation des champs à la surface des corrugations, ce qui est le cas pour des corrugations fines et moyennes. De plus, il est démontré que lorsque l'intervalle entre les MS est petit, le guide à corrugations avec SG a le même comportement dispersif qu'un guide sans SG qui aurait un intervalle double et une demi périodicité. Une méthode d'homogénéisation quasi-statique est développée pour des guides à MS. L'équation de dispersion est simplifiée et résolue dans le régime quasi-statique. On aboutit à une formule analytique de l'indice de réfraction équivalent pour des guides plans à SG, avec corrugations ou avec trous. Cette formule est valide sur une large bande de fréquences, grâce à la faible dispersion fréquentielle. Afin de l'étendre à des formes de trous arbitraires, nous développons une méthode des éléments finis en deux dimensions, afin de pouvoir incorporer les informations modales de ces trous dans la formule. Cette formule ouvre le champ des possibles pour ces guides à MS creuses, rendant concevable l'optimisation rapide de ces structures et l'exploration de nouvelles formes de trous. Cette méthode d'homogénéisation quasi-statique rend également possible l'étude analytique des différences entre guides avec ou sans SG, notamment afin d'observer l'impact des différents paramètres de la structure sur l'indice de réfraction. Ainsi, on démontre que l'on peut contrôler le rapport entre les indices avec ou sans SG en changeant la densité des diélectriques dans le guide. De plus, nous dérivons des expressions analytiques pour les champs quasi-statiques à partir de la formule de l'indice. En intégrant ces champs entre les deux MS, on peut définir une impédance équivalente de Bloch pour des guides avec trous carrés ou circulaires. On arrive à montrer analytiquement que l'impédance de Bloch et la perméabilité relative du matériau de propagation équivalent sont augmentées par la SG. Enfin, la formule d'indice quasi-statique est utilisée pour concevoir un déphaseur à reconfiguration sans contact, basée sur le changement de profondeur des trous. La formule permet de trouver rapidement les trous qui offrent la meilleure sensibilité à ce changement de profondeur. On peut transposer ces études à des MS diélectriques dans lesquelles les trous sont recréés avec des vias métalliques, ce qui facilite la fabrication du guide. Afin de permettre une reconfiguration sans contact, les trous sont fermés par des MS à haute impédance. En éloignant ces MS, on change la profondeur des trous. Cette technologie permet de concevoir un déphaseur de 360° avec faibles pertes. Le prototype inclut une transition conçue pour connecter ce déphaseur à un guide rectangulaire, avec perte d'insertion de 0.4 dB.

Mots-Clés : Métamatériaux, Propagation d'onde, Dispersion, Symétries, Guide d'onde, Electromagnétisme

Models for the analysis and simulation of glide-symmetric metasurface waveguides

A periodic waveguide is glide-symmetric (G-S) when it is invariant after a translation of half a period and a mirroring operation with respect to the propagation plane. G-S metasurface waveguides meet some of the challenges of modern wireless communication systems. Among other features, they offer wide-band behavior for high data rates through reduced frequency dispersion. However, they are difficult to model due to strong multi-modal coupling between the metasurfaces. In this thesis, we develop new modeling tools to better understand the properties of G-S parallel-plate waveguides (PPW) and to accelerate their design. We use these tools for the design of a reconfigurable phase-shifter in integrated glide symmetry (GS). A mode-matching method derives the dispersion equation of corrugated and holey PPWs. Solving this equation yields the Brillouin diagram of the waveguides, in which the first dispersion curve is almost linear due to the low-dispersive behavior of GS. We show that this behavior is due to the impact of the Floquet harmonics in the dispersion equation. This allows us to prove the linearity of the G-S dispersion curve by simplifying all the frequency dependencies in the dispersion equation. This works as long as one or two modes are enough to describe the field variation at the surface of the corrugations, which is the case for small and medium corrugations. Additionally, it is shown that a G-S corrugated PPW with small gap has the same dispersive behavior as a nGS waveguide with half the period and twice the gap. In order to accelerate the parametric studies of G-S

devices, a quasi-static homogenization method is developed for metasurface waveguides. The dispersion equation is simplified and solved in the quasi-static regime. A closed-form formula for the effective refractive index of corrugated and holey PPWs is found. Given the low dispersion of GS, this formula accurately describes the waveguide over a wide band. Additionally, we combine it to an in-house two-dimensional finite-element method in order to incorporate the modal information of arbitrary hole shapes. This formula extends the realm of study for holey metasurface waveguides, opening the door to unusual shapes and to fast structure optimization in terms of density or anisotropy. The second opportunity offered by this quasi-static homogenization technique is analytical insight into the differences between G-S and nGS waveguides. The impact of the different structure parameters on the refractive index can be evaluated analytically. It is shown that the ratio between the G-S and nGS refractive index can be tuned with the dielectrics in the waveguide. Moreover, closed-form expressions of the quasi-static fields are derived. By integrating the transverse fields across the unit cell, an effective Bloch impedance is defined for PPWs with square and circular holes. Combined with the closed-form index formula, we prove analytically that this increases the effective Bloch impedance and the permeability of the effective medium in the G-S waveguide. Finally, the quasi-static index formula is used to design a reconfigurable contactless phase-shifter. This phase-shifter is based on changing the effective hole depth of the holes in the metasurface waveguide. The quasi-static formula helps find the structure that is most sensitive to the hole depth. These findings are transposed to substrate-integrated holes, which allow full integration of the device in dielectric layers and improve its performance. In order to enable contactless reconfiguration, the holes are closed with high-impedance surfaces, that are moved to change the effective hole depth while preventing any leakage. Simulations show that a low-loss 360° phase-shifter can be implemented in a ridge gap waveguide, making use of electromagnetic bandgap technology. The design comprises a special transition, developed to feed the phase-shifter with a rectangular waveguide, with an insertion loss of 0.4 dB.

Keywords : [Metamaterials](#), [Wave propagation](#), [Dispersion](#), [Symmetries](#), [Waveguide](#), [Electromagnetism](#)

Chih-Min Chen

Contribution à l'étude de plasmas froids à pression atmosphérique pour le traitement des substrats biologiques

L'objectif de ces travaux était d'étudier l'interaction entre des plasmas froids à pression atmosphérique et des milieux biologiques en vue d'application de ce type de technologie au secteur biomédical. Dans un premier temps, des sources plasma ont été conçues, réalisées et caractérisées. Il s'agissait de réacteurs mettant en œuvre des décharges sur barrière diélectrique dans différents gaz en flux (air synthétique, argon, avec ou sans apport de vapeur d'eau). L'utilisation de l'argon a permis de sélectionner des conditions dans lesquelles le plasma demeurait confiné dans la zone inter-électrodes (humidité relative supérieure à 95% à température ambiante) ou au contraire se propageait soit en atmosphère libre, soit guidé dans un tube isolant dans lequel circulait le gaz (argon sec). Dans ce dernier cas, le phénomène de propagation a été examiné par des mesures électriques résolues dans le temps et les résultats ont été discutés à l'aide des travaux antérieurs disponibles dans la littérature. Le choix de l'air comme gaz plasmagène a également été considéré en raison des contraintes d'application ne permettant pas systématiquement l'utilisation d'un autre gaz. Deux études spécifiques ont été conduites, l'une susceptible de trouver des applications dans le domaine de la « plasma médecine », l'autre dans le domaine de la lutte contre les épidémies virales. Dans ce dernier cas, les travaux ont porté sur l'inactivation de virus bactériens, ou bactériophages, infectant *Escherichia coli*. Il s'agissait du phage T4, phage à ADN double brin, et du phage MS2, phage à ARN simple brin. Les suspensions de phages ont été diluées dans différentes solutions tampons et déposées sur un substrat de papier hydrosoluble pour être exposées aux différents traitements par plasma froid. L'utilisation originale de ce substrat a permis de résoudre le problème difficile de la récupération des particules de phage après traitement. Ce substrat correspond également à une situation d'application défavorable à ce type de traitement (surface complexe avec diffusion en volume de la suspension, au contraire d'une surface lisse non-adsorbante telle qu'une lamelle de verre), conduisant à obtenir des résultats plus réalistes et transposables à une application réelle. L'inactivation des phages a été quantifiée par comptage de plages de lyse sur culture de *E. coli*. Ainsi, des taux d'inactivation compris entre 0,66 log/min et 2 log/min ont été mesurés suivant le type de phage, la nature de la solution tampon et le type de traitement. L'influence de la température imposée au substrat a également été examinée. Dans le cadre de l'application en plasma médecine, des cellules d'adénocarcinome humain (cancer du poumon) provenant de cinq patients ont été traitées in-vitro à l'aide du réacteur à barrière diélectrique dans deux conditions de fonctionnement déterminées par la composition du gaz d'alimentation : jet de plasma avec de l'argon sec et source d'espèces oxydantes avec de l'argon saturé en vapeur d'eau à température ambiante. A l'issue d'une exposition de 5 minutes au traitement par décharge d'argon humide, 65% des cellules étaient dans un état apoptotique/nécrotique. Pour le traitement par plasma d'argon sec, les tests globaux de prolifération et d'apoptose n'ont pas montré une grande efficacité. Toutefois, le jet de plasma d'argon sec a présenté un effet rapide et localisé sur les cellules cancéreuses, induisant une inhibition de la capacité des cellules à proliférer et à migrer. Ces deux conditions de fonctionnement sont d'intérêt pour l'application clinique, permettant d'avoir un seul dispositif plasma capable de délivrer un traitement très localisé des cellules (jet plasma) ou de transférer des espèces oxydantes sur une plus grande surface conduisant à des mécanismes d'apoptose (décharge d'argon humide).

Mots-Clés : Plasma froid, Décontamination de surface, Bactériophage, Plasma médecine, Décharge sur barrière diélectrique, Cellules cancéreuses

Contribution to the study of atmospheric pressure non-thermal plasma for the treatment of biological substrates

The objective of this work was to study the interaction between non-thermal plasmas at atmospheric pressure and biological media in perspective of the application of this type of technology to the biomedical sector. In a first step, plasma sources were designed, realized, and characterized. These reactors implement dielectric barrier discharges in various gases in flow (synthetic air, argon, with or without water vapor admixture). The use of argon allowed the selection of conditions in which the plasma remained confined in the inter-electrode zone (relative humidity higher than 95% at room temperature) or on the contrary propagated either in free atmosphere or guided in an insulating tube in which the gas was flowing (dry argon). In the latter case, the propagation phenomenon was examined by time-resolved electrical measurements and the results were discussed with the help of previous works available in the literature. The choice of air as reactor feed-gas was also considered because of the application constraints that do not systematically allow the use of another gas. Two specific studies were conducted, one likely to find applications in the field of "plasma medicine", the other in the field of control of viral epidemics. In the latter case, the work focused on the inactivation of bacterial viruses, bacteriophages, infecting *Escherichia coli*. These were phage T4, a double-stranded DNA phage, and phage MS2, a single-stranded RNA phage. The phage

suspensions were diluted in different buffer solutions and deposited on a water-soluble paper substrate to be exposed to different non-thermal plasma treatments. The original use of this substrate solved the difficult problem of phage particle recovery after treatment. This substrate also corresponds to an unfavorable application situation for this type of treatment (complex surface with volume diffusion of the suspension, as opposed to a smooth non-adsorbent surface such as a glass slide), leading to more realistic results that can be transposed to a real application. Phage inactivation was quantified by counting lysis plaques on *E. coli* culture. Thus, inactivation rates ranging from 0.66 log/min to 2 log/min were measured depending on the type of phage, the nature of the buffer solution and the type of treatment. The influence of the temperature imposed on the substrate was also examined. For the plasma medicine application, human adenocarcinoma cells (lung cancer) from five patients were treated in-vitro using the dielectric barrier reactor under two operating conditions determined by the composition of the feed-gas: plasma jet with dry argon and reactive oxidizing species (ROS) source with argon saturated with water vapor at room temperature. After a 5-minute exposure to the humid argon discharge treatment, 65% of the cells were in an apoptotic/necrotic state. For the dry argon plasma treatment, the overall proliferation and apoptosis assays did not show much efficacy. However, the dry argon plasma jet exhibited a rapid and localized effect on the cancer cells, inducing inhibition of the cells' ability to proliferate and migrate. These two operating conditions are of interest for clinical application, allowing to have a single plasma device able to deliver a very localized treatment of cells (plasma jet) or to transfer ROS on a larger surface leading to apoptosis mechanisms (humid argon discharge).

Keywords : Surface decontamination, Bacteriophage, Plasma medicine, Dielectric barrier discharge, Non-Thermal plasma, Cancer cells

Darius Mofakhami

Modélisation multiphysique de l'émission électronique par effet de champ d'une cathode micro/nano-structurée en 3D

Cette thèse développe un modèle d'émission électronique par effet de champ pour simuler l'émission d'électrons par effet tunnel rendue possible par le renforcement de champ électrique au sommet de structures micro/nanométriques distribuées à la surface d'une cathode. Plus spécifiquement, l'étude porte sur l'autoéchauffement des structures émettrices par l'action combinée des effets Joule et Nottingham qui accompagnent l'émission. Lorsque le champ local atteint plusieurs gigavolts par mètre, la boucle de rétroaction positive entre courant et température peut causer la destruction thermique des émetteurs. Ce phénomène réduit la durée de vie des sources d'électrons basées sur des réseaux d'émetteurs et peut être à l'origine d'un claquage électrique dommageable pour les machines opérant sous vide à très haute tension. En résolvant temporellement par la méthode des éléments finis les équations couplées de la chaleur et du courant, les simulations offrent un éclairage nouveau sur l'évolution de l'émission électronique. En particulier, une analyse paramétrique approfondie a permis de mettre en évidence un phénomène de bistabilité thermique, non documenté jusqu'ici. Cette bistabilité est reliée à un emballement de l'effet Joule ensuite amorti par l'effet Nottingham devenu refroidissant. Lorsque l'amortissement est insuffisant, l'instabilité résistive cause la destruction prématurée des émetteurs, comme observé pour le cas d'émetteurs nanométriques en carbone dont les propriétés s'approchent de la situation expérimentale d'une source d'électron actuellement en développement. En parallèle, une étude des interactions électriques et thermiques entre émetteurs proches a abouti sur une méthode efficace de réduction de dimension 3D vers N×2D pour simplifier la simulation de l'autoéchauffement d'un grand nombre N d'émetteurs axisymétriques. Cette méthode pourrait permettre de généraliser la prise en compte de l'autoéchauffement dans ce type de configuration.

Mots-Clés : Modélisation numérique, Émission électronique, Claquage électrique, Matière condensée, Décharge plasma

Multiphysics 3D modelling of the field electron emission from a micro/nano-structured cathode

This thesis develops a field electron emission model to simulate the emission of electrons by quantum tunneling enabled by the local field enhancement around the apex of micro/nanostructures located at a cathode surface. The study focuses more specifically on the self-heating of the emitting structures caused by the combined action of the Joule and Nottingham effects that come along with the electric current. When the local field reaches several gigavolts per meter, the positive feedback loop between current and temperature can cause the thermal destruction of the emitters. This phenomenon reduces the lifetime of electron sources that are based on field emitter arrays and can also be the cause of an electrical breakdown damaging ultra-high-voltage vacuum devices. By solving in time the coupled heat and current equations using a finite element method, the simulations offer new insights into the evolution of the electron emission. In particular, a thorough parametric analysis has unveiled for some specific cases the occurrence of a previously undocumented thermal instability which is related to the inversion of the Nottingham effect. The simulations show that this instability causes the thermal failure to occur sooner for carbon nanometric emitters whose properties approximate the experimental situation of an electron source currently under development. In parallel, a study of the electrical and thermal interactions between nearby emitters enabled us to develop an efficient method of dimension reduction from 3D to N×2D to ease the simulation of the self-heating of a large number N of axisymmetric emitters. This method could help to systematically take into account the emitter self-heating in such configurations.

Keywords : Numerical modelling, Electron emission, Electrical breakdown, Condensed matter physics, Plasma discharge

Elaheh Heydari

Conception et contrôle d'un nouveau circuit de découplage de puissance pulsée pour les systèmes photovoltaïque connecté au réseau

Aujourd'hui, les systèmes photovoltaïques connectés au réseau sont de plus en plus utilisés parmi les systèmes à énergies renouvelables. L'élément clé du système de conversion de puissance est le convertisseur statique connecté au réseau. Pour les applications de faible puissance, le convertisseur monophasé est le meilleur compromis. Les structures de conversion mono-étage permettent d'avoir un rendement plus élevé ainsi qu'un coût et une taille réduits. Cependant, dans des conditions de faible irradiation la tension PV chute, ce qui entraîne l'arrêt de l'onduleur et la perte totale de puissance injectée. Par conséquent, les systèmes à un étage de conversion souffrent d'une plage de fonctionnement réduite. Dans ce travail, nous proposons des solutions pour améliorer le rendement et la fiabilité des systèmes mono-étage connectés au réseau. Pour cela, dans la première partie, un contrôleur basé sur le mode glissant terminal rapide est combiné à un contrôle direct de la puissance. Il est associé à un algorithme de suivi du point de puissance maximale. Les simulations et les résultats expérimentaux sur un banc d'essai de 1kW montrent l'efficacité de la proposition en termes de performance dynamique, de faible distorsion harmonique totale et de robustesse aux variations d'irradiance. Les systèmes mono-étage sont également confrontés à une ondulation de puissance sur le bus continu à la fréquence double de celle du réseau. Ces ondulations de puissance sont néfastes à la durée de vie des panneaux solaires. Ainsi, la deuxième partie de ce travail propose de développer un dispositif qui simultanément réduit les ondulations de puissance et compense la chute de tension. Le dispositif est constitué de deux convertisseurs statiques : un flyback à faible puissance et un pont complet (H-bridge). Le compensateur hybride augmente la plage de fonctionnement de l'onduleur, empêchant son arrêt. Il contribue aussi à augmenter la fiabilité du système. Un banc expérimental de 1kW a été dimensionné et réalisé. Il a permis d'évaluer le dispositif sur plusieurs points de fonctionnement. Les résultats en régime permanent montrent que le compensateur hybride peut simultanément réaliser une atténuation de 85% des ondulations de puissance et une compensation de 20% de la chute de tension. Le dispositif a également de bonnes performances en régime transitoire. Dans la troisième partie de ce travail, la surveillance des modules PV est abordée afin d'augmenter la fiabilité. La méthode proposée est basée sur la spectroscopie d'impédance. Elle ne nécessite pas d'équipement supplémentaire car elle utilise le circuit qui permet d'atténuer les ondulations de puissance. De plus elle ne nécessite pas d'interrompre la production d'électricité. Les résultats de simulation, à l'aide de MATLAB-Simulink®, montrent une réduction de plus de 80% de l'amplitude des ondulations de la tension aux bornes des modules PV. Les résultats montrent que la spectroscopie d'impédance permet d'estimer les paramètres de l'impédance du module PV avec une erreur relative inférieure à 5%. L'évolution de ces paramètres en cours de fonctionnement devrait permettre de surveiller l'état de santé du panneau.

Mots-Clés : Système PV connecté au réseau, Convertisseur à un étage, Compensation de la puissance pulsée, Compensateur de chute de tension, Diagnostic de défaut

Design and control of a new pulsating power decoupling circuit for grid-connected photovoltaic systems

Today, grid-connected photovoltaic systems are becoming an increasingly important part of renewable energy. The power conversion system's heart is the grid-connected interface converter based on power electronics. The single-phase inverter is the best compromise for low power applications as an interface for power conversion. Single-stage systems offer higher efficiency and lower cost and size. However, the PV voltage drops under low irradiance conditions, leading to inverter shut down and the total injected power loss. As a consequence, single-stage systems suffer from a low operating range. This work addresses the critical issues of the single-stage single-phase grid-connected PV system, including reliability and efficiency. A fast terminal sliding mode combined with direct power control is proposed in the first part. It is associated with a maximum power point tracking algorithm with power output. Simulations and experimental results on a 1kW test bench show the proposal's effectiveness in terms of dynamic performance, low total harmonic distortion and robustness to irradiance variations. Single-phase power systems also face pulsating power at twice the mains frequency on the DC bus. This pulsating power should not be transferred to the PV side as it reduces the efficiency of the solar panel. Thus, the second part of this work proposes a dual-function decoupling circuit: it mitigates pulsating power and compensates for the voltage drop. Thanks to the following additional power converters, these objectives are fulfilled: a low power flyback and an H-bridge. The hybrid compensator increases the inverter's operating range, prevents its shutdown, and increases the system reliability. A 1kW experimental bench has been designed to evaluate the proposal for several operating points. The steady-state results show that the hybrid compensator can simultaneously achieve 85% compensation of the pulsating power and 20% compensation of the voltage drop. The

circuit also shows good transient responses. In the third part of this work, monitoring and fault diagnosis of PV modules are addressed to increase system reliability, efficiency, and safety. The proposed fault diagnosis method is based on online PV impedance spectroscopy without additional equipment. It does not require interrupting the power production and uses the pulsating power decoupling circuit as an impedance spectroscopy tool. The simulation results, using MATLAB-Simulink®, show a reduction of more than 80% ripples amplitude of the PV modules terminal voltage. The results also show that impedance spectroscopy can estimate the PV module impedance parameters with a lower than 5% relative error. The evolution of these parameters during operation should make it possible to monitor the health of the panel.

Keywords : Grid-Connected PV system, Single-Stage converter, Pulsating power decoupling, Voltage drop compensator, Fault diagnosis

Guillaume Devos

Approche multi-physique pour l'optimisation du dimensionnement des composants passifs dans les convertisseurs électroniques de puissance aéronautiques

L'électrification croissante des avions dans le cadre du développement de l'avion plus électrique impose de mettre en place de nouvelles méthodologies pour dimensionner les composants électroniques embarqués. Cette thèse se place dans cette perspective et envisage de poser les bases d'une nouvelle méthodologie pour le dimensionnement optimal des composants inductifs. Après avoir défini les spécifications d'une inductance de lissage située en sortie d'un convertisseur Buck, nous avons mis en place un processus de prédimensionnement simple. Basé sur des formulations analytiques, il permet d'obtenir des géométries relativement proches des solutions optimales, dans le but d'initialiser l'algorithme d'optimisation. Un algorithme stochastique d'évolution différentielle est utilisé une première fois avec un modèle analytique de l'inductance, avec pour objectif une réduction de la masse du composant et une maximisation de son rendement. Les solutions obtenues initialisent une deuxième exécution de cet algorithme, avec deux méta-modèles possibles pour la prise en compte des pertes électriques et magnétiques dans les composants. Le premier fait intervenir un modèle simple pour la caractérisation des pertes magnétiques. Les pertes électriques sont quant à elles déterminées à l'aide d'analyses par éléments finis. L'utilisation de réseaux de neurones artificiels permet de limiter le nombre d'analyses par éléments finis nécessaires à une base d'apprentissage restreinte. Le courant étant supposé triangulaire, trois réseaux de neurones distincts sont construits, pour la fréquence fondamentale et les harmoniques de rang 3 et 5. Le deuxième méta-modèle fait intervenir une caractérisation du cycle d'hystérésis liant l'induction au champ d'excitation. Ce cycle permet de connaître les pertes magnétiques mais également la forme réelle du courant. Ceci permet d'estimer plus précisément la valeur des pertes électriques. Le modèle de caractérisation de cycle d'hystérésis n'amenant pas de résultats suffisamment précis, les résultats d'optimisation obtenus à l'aide du premier méta-modèle sont présentés et discutés.

Mots-Clés : Inductance, Optimisation, Simulation numérique, Matériaux ferromagnétiques

Multiphysic approach for the optimization of the sizing of passive component for aeronautical power converters

The growing electrification of aircrafts required for the development of more electrical aircrafts needs new methodologies for the design of embedded electronic components. This thesis fits into this framework, proposing a new methodology for the optimal design of inductors. Firstly, we defined specifications for a smoothing inductor located at the output of a Buck DC/DC converter. Then we developed a simple presizing process. Using only analytical formulations, it gave us a first bunch of geometries relatively close to the optimal solutions. It allowed us to initialize our optimization algorithm. A differential evolution stochastic algorithm is executed with an analytical model of the inductor. It attempts to reduce both the weight of the component and its losses. The solutions we obtained are used to initialize a second algorithm execution. Two possible meta-models can be used to take into account magnetic and electrical losses. The first one uses a simple model for the characterization of magnetic losses. Electrical losses are determined with finite element analysis. The use of an artificial neural network allows a reduction of the number of needed analysis. Current is supposed to be perfectly triangular. Thus, three networks have been built. The first one is dedicated to the fundamental frequency. The other two are dedicated to the 3rd and 5th harmonic. The second meta-model uses a characterization of ferromagnetic hysteresis. Such a model allows an estimation of both magnetic losses and real shape of the current. Knowing the real current flowing through the inductor, we can estimate more precisely the value of electrical losses. The model for the characterization of ferromagnetic hysteresis does not provide sufficiently precise results. Optimization results obtained with the first meta-model are presented and discussed.

Keywords : Inductors, Optimization, Numerical simulations, Ferromagnetic materials

Haiteng Sun

Impact de la conception de machine sur le contrôle sans capteur des entraînements électriques : solutions de modélisation et de contrôle

Les techniques sans capteur pour l'entraînement des machines électriques présentent de plus en plus d'intérêts pour des applications industrielles ou encore pour les systèmes embarqués. Les tendances actuelles tendent à intégrer l'électronique du capteur, les étages de puissance et les unités de commande dans un système unique, qui est ensuite intégré dans l'entraînement. Le retrait des capteurs mécaniques, tels que les capteurs de position et de vitesse, présente l'avantage de réduire les coûts et les volumes utilisés. Les techniques sans capteur peuvent aussi assurer une fonction de diagnostic où il est alors possible de détecter des dysfonctionnements de l'entraînement. Des chercheurs ont proposé plusieurs approches sans capteur au cours des dernières décennies. Ces techniques largement adoptées reposent soit sur l'exploitation de la force électromotrice (FEM), soit sur l'exploitation de l'anisotropie magnétique au sein des machines. En outre, les techniques d'injection de signaux ont pu apporter des solutions aux fonctionnements à basses vitesses. Il faut également spécifier que la précision de détection de la position du rotor dépend fortement de la structure du rotor. Le projet de doctorat vise à élaborer de nouvelles approches pour permettre au contrôle sans capteur d'être appliqué sur un plus large éventail d'applications. L'objectif est de proposer de nouvelles techniques de conception de machine synchrone à aimant permanent permettant d'accroître les performances sans capteur, en particulier à faible vitesse et à forte charge, tout en conservant la qualité du couple produit. Il faudra prendre en compte plusieurs effets comme la saturation magnétique ou l'impact sur le rendement.

Mots-Clés : Conception de machine, Contrôle, Commande, sans capteur mécanique, Optimisation

Design Machine Impact On the Sensorless Control of Electrical Drives : Modeling and Control solutions of PMSM

Sensorless techniques for electrical drives and machines are increasingly gaining importance in industrial and mobility applications thanks to the technological trend of integrating sensor electronics, power stages and control units within a single system that is then embedded within the drive. The removal of mechanical sensors, such as position and speed sensors, comes with the advantage of reduced costs and space. Sensorless techniques can also take on a diagnosis function, thus detecting malfunctioning of the drive that could lead to unexpected or instable behavior. The research community has proposed several sensorless approaches over the past decades. Largely adopted techniques are either based on the exploitation of the back-EMF (Electro Motive Force) or on the exploitation of machine anisotropies. Also, signal injection techniques have found large application both for electrical drives and machines specially in standstill and low speed range. Moreover, the accuracy of the rotor-position detection depends strongly on the rotor saliency, that is, on the geometry of the PMSM rotor. The PhD thesis aims at drafting new guidelines for the path of future research with the focus on successfully bringing this new technology into a wider spectrum of applications. This will be done by focusing in the same time on the design of the machine and the control solutions to improve the sensorless rotor-position detection. In other words, the goal is to propose a new design optimization technique for permanent magnet (PMSM) to increase sensorless performance especially at low speed and high loadings by compromising with torque capability.

Keywords : Sensorless control, Machine design, Design optimization, PMSM

Madjda Bouklachi

Conception et évaluation de bobines flexibles NFC pour la communication et la télé-alimentation de patchs et d'implants de surveillance médicale

Les implants et patchs médicaux sont des systèmes permettant d'effectuer une tâche médicale telle que la mesure d'une constante physiologique. Leur utilisation est de plus en plus répandue car ils contribuent à l'amélioration du suivi médical des patients. Cette thèse concerne l'établissement d'un lien de télé-alimentation et de communication, via la technologie NFC, entre des patchs ou des implants médicaux (pacemakers...) et un lecteur externe. Ceci permet une surveillance médicale distante qui accroît l'autonomie des patients. La télé-alimentation des implants et des patchs se fait par couplage magnétique à 13,56 MHz (NFC). L'optimisation de la forme des éléments tels que les bobines en présence de tissus humains est nécessaire. Dans cette thèse, un blindage est conçu afin de limiter les interférences électromagnétiques entre les bobines du système, le capteur médical (dans le patch ou l'implant) et les tissus biologiques. Pour chaque dispositif (patch ou implant), une bobine adaptée est conçue en prenant en compte la forme, l'emplacement (dans le corps ou sur la peau) et la taille du dispositif. La validation expérimentale du transfert de puissance est réalisée en fonction de la distance de couplage et pour différentes charges résistives représentant le capteur médical. Pour assurer la communication NFC, Les bobines réalisées ont des caractéristiques électriques adéquates à 13,56 MHz. Afin de valider le lien NFC, le critère mis en mesure est la détection du patch/implant par un lecteur NFC.

Mots-Clés : Couplage magnétique, NFC, Bobine, Télé-Alimentation

Design and evaluation of NFC flexible coils for communication and wireless power supply of medical monitoring patches and implants

Medical implants and patches are systems performing a medical task such as measuring a physiological constant. Their use is becoming more and more massive because of their contribution to improve the medical monitoring of patients. This thesis concerns the establishment of a wireless power supply and communication link, via NFC technology, between patches or medical implants (pacemakers, etc.) and an external reader. This allows remote medical monitoring which increases patient autonomy. Wireless powering of implants and patch is done by magnetic coupling at 13.56 MHz (NFC). The optimization of the shape of elements such as the coils present of human tissue is required. In this thesis, a shield is designed to limit electromagnetic interferences between coils, the medical sensor (in the patch or implant) and biological tissues. For each device (patch or implant), a suitable coil is designed, considering the shape, location (inside the body or on the skin) and size of the device. The experimental validation of the power transfer is carried out as a function of the coupling distance and for different resistive loads representing the medical sensor. To ensure NFC communication, the coils produced have adequate electrical characteristics at 13.56 MHz. In order to validate the NFC link, the criterion measured is the detection of the patch/implant by an NFC reader.

Keywords : Magnetic coupling, NFC, Coil, Wireless supply

Marcin Biczyski

Systemes d'actionnement à moteur à réluctance variable pour véhicules aériens multirotors

Dans la course aux émissions nettes nulles, de nouveaux concepts de véhicules sont en plein essor. Les véhicules aériens multirotors sont populaires pour les applications grand public comme le sport ou la photographie, mais ils sont également considérés comme une solution aux défis de la mobilité aérienne urbaine. En analysant les véhicules multirotors et leurs défauts typiques, on constate que la plus grande gravité des défauts est attribuée au système d'actionnement, dont le composant central est le moteur électrique. En comparant les technologies disponibles, les moteurs à réluctance commutée (SR) sont considérés comme une solution prometteuse en raison de leur haut degré de tolérance aux pannes, leur robustesse, leur durabilité et l'absence d'aimants permanents. Par conséquent, cette étude présente un processus de conception d'un système d'actionnement de moteur SR pour une utilisation dans des applications de véhicule multirotor. Les efforts se concentrent sur la réalisation de la fonctionnalité souhaitée et la documentation des défis techniques, plutôt que sur la réalisation d'une conception optimale. Une pré-étude sur la méthodologie de dimensionnement des véhicules multirotors basée sur des bases de données de composants disponibles sur le marché est présentée. Elle est ensuite étendue pour couvrir les systèmes avec des moteurs électriques en général. Sur la base des spécifications de dimensionnement, un ensemble de moteurs SR est optimisé pour une gamme de poids de véhicule. Une conception (correspondant à un véhicule quadrotor de 8 kg) est choisie pour une analyse plus approfondie et la fabrication. Une solution de contrôle basée sur un contrôleur PI est développée et mise en oeuvre, ainsi que le modèle de l'ensemble du système d'actionnement dans un simulateur. Les performances simulées sont comparées à celles d'un système d'actionnement de référence à moteur BLDC. En outre, le comportement du système est analysé en présence d'incertitudes et de défauts injectés. Les résultats sont exprimés en termes de mesure de la perte d'efficacité (LOE) utilisée pour le développement d'un contrôle tolérant aux fautes. Le système d'actionnement de moteur SR est ensuite vérifié comme ayant une performance adéquate et une bonne tolérance aux fautes, en particulier contre les fautes de circuit ouvert dans une ou deux phases. Cependant, le système s'est avéré sensible à la défaillance du système de détection de position. Dans une comparaison préliminaire avec les systèmes d'actionnement à moteur BLDC, le système conçu est comparable en termes de performance, avantageux en termes de tolérance aux pannes et d'un poids considérablement plus élevé, ce qui est attribué à l'immaturation de la technologie. Les sources des avantages du système de moteur SR sont identifiées comme le couple de réluctance et la séparation des phases, et sont recommandées pour une étude plus approfondie.

Mots-Clés : Multirotor, UAV, Système d'actionnement, Réluctance variable, Moteur électrique, Tolérance aux pannes

Switched reluctance motor actuating systems for multirotor air vehicles

Among the race to net zero emissions, new vehicle concepts are thriving. Multirotor air vehicles are popular for consumer-grade applications like sport or photography, but they are also considered to solve the challenges of Urban Air Mobility. By analysing the multirotor vehicles and their typical faults, the highest severity of faults is attributed to the actuating system, of which the central component is the electric motor. Comparing available technologies, switched reluctance (SR) motors are deemed a promising solution due to their high degree of fault-tolerance, ruggedness, sustainability and the lack of permanent magnets. Therefore, this study presents a process of designing an SR motor actuating system for use in multirotor vehicle applications. The efforts are focused on achieving desired functionality and documenting technical challenges, rather than achieving an optimal design. A pre-study on multirotor vehicle sizing methodology based on databases of off-the-shelf components is presented. This is then expanded to cover systems with electric motors in general. Based on sizing specifications, a set of SR motors is optimised for a range of vehicle weights. One design (corresponding to 8 kg quadrotor vehicle) is chosen for further analysis and manufacture. A PI controller-based control solution is developed and implemented, along the model of the whole actuating system in a simulator. Simulated performance is compared with that of a reference BLDC motor actuating system. In addition, system behaviour is analysed in the presence of uncertainties and injected faults. Results are expressed in terms of Loss of Effectiveness (LOE) metric used for the development of fault-tolerant control. The SR motor actuating system is then verified to be of adequate performance and good fault-tolerance, especially against open circuit faults in one or two phases. However, the system was found to be susceptible to position sensing system failure. In a preliminary comparison with BLDC motor actuating systems, the designed system is comparable in terms of performance, advantageous in terms of fault-tolerance and of considerably higher weight, which is attributed to immaturity of the technology. Sources of the SR motor system advantages are identified as reluctance torque and separation of phases, and recommended for further study.

Keywords : Multirotor, UAV, Actuating system, Switched reluctance, Electric motor, Fault-Tolerance

Rafael Coelho Medeiros

Cryo-MMC - un convertisseur modulaire multiniveau avec des bobines de bras supraconductrices couplées

Dans cette thèse, nous étudions un convertisseur modulaire multiniveau (MMC) avec des bobines de bras supraconductrices couplées, que nous proposons d'appeler cryo-MMC. Nous dimensionnons les bobines supraconductrices de bras en couplage direct en utilisant des rubans supraconducteurs à haute température (HTS) afin de les intégrer dans un cryo-MMC pour une application haute-tension courant continu à ± 320 kV et 1 GW. Nous évaluons numériquement les performances en régime permanent et transitoire du cryo-MMC, qui permettent de confirmer sa stabilité thermique et électrique. En particulier, lors d'un défaut DC pôle-à-pôle, les bobines supraconductrices réduisent les courants DC et AC par un facteur de cinq. D'un point de vue techno-économique, le cryo-MMC est une topologie réalisable et sa capacité de limiter les courants de défaut peut simplifier la protection des futurs réseaux HVDC. En fait, le concept proposé réduit la masse des bobines de bras d'un facteur de quatre et divise leur empreinte au sol par un facteur de 1,6 par rapport au cas de référence, ce qui est particulièrement attirant pour les applications embarquées en mer. Nous présentons une toute première preuve expérimentale de ce concept avec un cryo-MMC à 5 niveaux et détaillons le dimensionnement, la réalisation, la construction et la caractérisation en régime permanent de ce prototype. Cette démonstration pratique permet de classer le cryo-MMC dans un niveau de maturité technologique de 3-4.

Mots-Clés : Haute tension courant continu, Convertisseur Modulaire Multiniveau, Bobines Supraconductrices à haute température

Cryo-MMC - a Modular Multilevel Converter with Superconducting Coupled Arm Coils

In this thesis, we study a Modular Multilevel Converter (MMC) with high temperature superconducting (HTS) directly-coupled arm coils that we proposed to call cryo-MMC. We design directly-coupled HTS arm coils and their cooling system for a cryo-MMC in a point-to-point high-voltage direct-current (HVDC) link rated at ± 320 kV and 1 GW. We numerically assess the steady-state and transient performance of the cryo-MMC, which confirms its thermal and electrical stability. The HTS arm coils reduce the DC and AC prospective fault currents by a factor of five during a pole-to-pole DC fault. From a technical and economic point of view, the cryo-MMC was demonstrated to be a feasible topology, and its fault-current limitation capability could simplify the protection of future HVDC grids. In addition, this topology lowers the arm coils mass by a factor of four while reducing their footprint by a factor of 1.6 compared to a reference case, which is particularly advantageous for offshore applications. We propose a first experimental proof of this concept with a 5-level cryo-MMC, detail its design construction, and report the steady-state response of the prototype. This prototype brings the cryo-MMC to a technology readiness level of 3-4.

Keywords : High-Voltage direct current, Modular Multilevel Converter, High-Temperature superconducting coils

Soroush Abedi

Fantômes anthropomorphiques pour le développement de dispositifs médicaux micro-ondes

L'imagerie micro-onde offre une variété de dispositifs médicaux pour le diagnostic, le monitoring et le traitement des patients. Pour développer et évaluer ces dispositifs, il est nécessaire de concevoir des fantômes de référence ayant des caractéristiques physiques et diélectriques similaires à celles du corps humain. Dans cette thèse, des fantômes anthropomorphiques adaptés aux dispositifs développés par les partenaires du projet EMERALD sont proposés. Les fantômes liquides sont choisis car ils sont faciles à produire, stables dans le temps et large bande. Une approche systématique basée sur des représentations 3D, des simulations électromagnétiques et des validations croisées est réalisée afin d'établir une méthodologie standard pour le développement de fantômes anthropomorphiques imprimés. Les versions numériques de plusieurs fantômes, à savoir la tête, le sein, l'aisselle et le foie traité, sont modélisés à partir de scans IRM et CT de patients. Ceci ouvre de nouvelles voies dans la standardisation des fantômes pour évaluer les systèmes d'imagerie par micro-ondes. En important ces fichiers numériques dans des solveurs électromagnétiques, l'effet des propriétés des fantômes et des conditions d'expérimentations sont étudiés, ce qui permet d'évaluer les performances du dispositif avant toute expérimentation. De plus, il est possible d'extraire le contour du modèle et de l'utiliser comme information a priori dans un algorithme de diffraction inverse pour améliorer la résolution spatiale des images microonde. La reconstruction d'une tumeur dans un modèle de sein anthropomorphe avec la méthode de décomposition en valeurs singulières tronquée, en donne une illustration.

Mots-Clés : Imagerie médicale par micro-ondes, Fantôme biologique anthropomorphe large bande, Mélange binaire liquide, Algorithme de diffraction inverse (ou d'inversion), Problème inverse

Standard Phantoms for EM Device testing

Microwave imaging offers a variety of devices for patient diagnosis, monitoring, and treatment. To develop and evaluate these devices, it is necessary to design anthropomorphic reference phantoms with physical and dielectric characteristics similar to those of the human body. The first objective of this thesis is to propose anthropomorphic phantoms adapted to the devices developed by the partners of the EMERALD project. After a brief review of the different types of existing phantoms, liquid phantoms are chosen because they are easy to produce, stable over time and wide band. A systematic approach based on 3D representations, electromagnetic simulations and cross-validations, has been performed to achieve a standard methodology for the development of several printed anthropomorphic phantoms suitable for different microwave imaging systems. In this thesis, numerical versions of several phantoms i.e. the head, breast, axillary, and liver are modeled from MRI and CT scans of patients for assessing the microwave imaging systems developed in the frame of the EMERALD project. This opens new avenues in the standardizing of phantoms for assessing the microwave imaging system. By importing these numerical files into electromagnetic solvers, the effect of properties of the phantoms and experimental conditions are studied, which gives the opportunity to study the performance of the microwave imaging system before any experiment. Moreover, by using the numerical version of the phantom it is possible to extract the outer shape of the organ and use it as a priori information in an inverse scattering algorithm to improve the spatial resolution of the microwave images.

Keywords : Medical imaging, Inverse diffraction (or inversion) algorithm, Anthropomorphic biological phantom

Tanbir Kaur Sodhi

Nouvelles solutions pour accroître les propriétés de piézogénération des nanofils de GaN

Au cours des dernières années, les nanofils (NFs) de GaN sont apparus comme de très bons candidats pour la récupération d'énergie aux petites échelles. Leurs grandes propriétés mécaniques et piézoélectriques leur confèrent la capacité de convertir efficacement les énergies vibratoires et mécaniques ambiantes en une énergie électrique, et ainsi de développer une nouvelle génération de générateurs piézoélectriques ultra-compacts, efficaces et autonomes pour assister ou alimenter des micro-dispositifs. Malgré la démonstration de premiers piézo-générateurs prometteurs à base de ces NFs, il est encore aujourd'hui indispensable d'augmenter la capacité de piézo-conversion de ces nouveaux systèmes. L'exploration de nouvelles solutions pour l'amélioration de leurs performances est l'axe de recherche de cette thèse. Dans ce travail, l'épitaxie par jets moléculaires assistée par plasma est utilisée pour développer des NFs de GaN intrinsèquement dopés de type p et présentant une grande qualité cristalline. Grâce à un outil de nano-caractérisation basé sur le microscope à force atomique équipé du module électrique Resiscope spécifiquement adapté pour réaliser des mesures de piézo-conversion, la réponse piézoélectrique des NFs est étudiée en fonction des solutions considérées. L'efficacité de la génération piézoélectrique des NFs est fortement affectée par le circuit externe. Pour la première fois aux échelles nanométriques, nous démontrons expérimentalement son influence. Les limites du protocole établi dans la communauté pour juger de la capacité de génération de ces nanostructures 1D sont abordées et des solutions sont proposées. L'efficacité de génération piézoélectrique des NFs est également profondément affectée par les charges de surface, qui sont fortement prononcées dans les NFs de GaN caractérisés par des diamètres inférieurs à 100 nm. Nous démontrons que ces charges de surface peuvent être avantageuses pour les applications piézoélectriques car elles offrent la possibilité d'ajuster la concentration de porteurs de charge libres en fonction du diamètre des NFs. Ainsi, nous établissons expérimentalement qu'en présence de charges de surface, l'efficacité de couplage électromécanique des nanofils de GaN augmente jusqu'à 43,4 % pour des diamètres compris entre 45 et 60 nm. Les mesures piézoélectriques sur des NFs de GaN et des NFs cœur/coquille de GaN/Al₂O₃ sont également effectuées. La réduction de la densité de charge de surface en présence de la coquille d'Al₂O₃ se traduit par une dégrade la réponse piézoélectrique des NFs, confirmant ainsi l'importance des charges de surface pour améliorer la réponse piézoélectrique de ces derniers. Enfin, en tirant parti de ces solutions, des tensions de sortie pouvant atteindre jusqu'à 520 mV par NF ont été mesurées, établissant un nouvel état de l'art, selon le protocole de mesure couramment utilisé, pour les nanostructures piézoélectriques 1D.

Mots-Clés : Nanofils III-nitrides, AFM-résiscope, Piézo-générateurs, Récupération d'énergie

Novel solutions for piezogeneration enhancement in GaN nanowires

In the last decade, GaN nanowires (NWs) have emerged as promising candidates in the field of small-scale energy harvesting. Their superior mechanical and piezoelectric properties confers to them the ability to effectively convert the ambient vibrational and mechanical energies into electrical energy, and thus develop a new generation of ultra-compact, high-efficient and self-sustainable piezoelectric generators to assist or power microelectronic devices. Despite the demonstration of first promising NW-based piezo-generators, it is today indispensable to further increase the piezo-conversion capacity of these new harvesters. The exploration of novel solutions to enhance their performances is the research axis of this thesis. Here, plasma-assisted molecular beam epitaxy (PA-MBE) is employed to grow intrinsically p-doped GaN NWs with high crystalline quality. Thanks to a nano-characterization tool based on atomic force microscope equipped with the Resiscope electric module specifically adapted for piezoelectric conversion measurements, the piezoelectric response of NWs is investigated as a function of the explored solutions. The piezo-generation efficiency of the NWs is strongly affected by the external circuit. For the first time in the nanoscale regime we experimentally demonstrate its influence on the piezo-generation efficiency of the NWs. The limitations of the formerly established protocol to judge the piezo-generation capacity of 1D-nanostructures are addressed and solutions are proposed. The piezo-generation efficiency of the NWs is also deeply affected by the surface charges, which are strongly pronounced in sub-100 nm wide GaN NWs. We demonstrate that these surface charges can be advantageous for piezoelectric applications as they offer the possibility to tune the free charge carrier concentration as a function of NW diameter. Thus, we establish experimentally that in the presence of surface charges, the electromechanical coupling efficiency of GaN NWs increases up to 43.4 % for diameters in the range of 45-60 nm. The piezoelectric measurements on GaN and GaN/Al₂O₃ core-shell NWs are also performed. The reduction of surface charge density by the Al₂O₃ shell results in a degradation of the piezoelectric response of the NWs. These results confirm the importance of the surface charges for improving the piezo-response of GaN NWs. Finally, by taking advantage of these solutions, output voltages reaching up to 520 mV per NW have been measured, stating a new-state-of-the-art, in the commonly used protocol, for 1D piezoelectric nanostructures.

Keywords : III-Nitride nanowires, AFM-resiscope, Piezogenerators, Energy harvesting

Thomas Brouhard

Analyse et modélisation technico-économique d'une évolution des zones de prix des marchés de gros du système électrique européen

En Europe, les marchés de gros de l'électricité sont organisés selon un système zonal, avec des zones correspondant essentiellement aux frontières des états. Au sein de ces zones, les acteurs de marché sont libres de s'échanger de l'électricité sans contraintes de volume et à un prix unique. En revanche, les capacités d'échanges commerciaux entre ces zones sont limitées, à l'export comme à l'import, suivant des seuils représentatifs des contraintes physiques du réseau. Dans la lignée du Clean Energy Package et des codes de réseau introduits par la Commission Européenne, les gestionnaires de réseau de transport sont aujourd'hui incités à maximiser les capacités d'échange ouvertes aux échanges transfrontaliers, quitte à définir des plans d'action à court-terme pour réduire les contraintes réseau. En cas de persistance de congestions structurelles, de nouveaux découpages des zones de marché seront envisagés, ce qui a déjà donné lieu à plusieurs analyses de la part des régulateurs et des gestionnaires de réseau. De telles reconfigurations auraient un impact déterminant sur l'activité des énergéticiens européens, dont les politiques d'exploitation et d'investissement dans les actifs de production dépendent du design de marché. L'objectif de cette thèse est donc de proposer une modélisation et une analyse technico-économique de différentes reconfigurations des zones de prix des marchés de gros du système électrique européen, afin d'en décrire l'impact sur l'exploitation des parcs de production d'électricité, la gestion et le coût du système pour la collectivité, la formation des prix et la coordination des investissements dans le réseau et la production.

Mots-Clés : Marchés de gros de l'électricité, Transport d'électricité, Clustering, Énergies renouvelables

Techno-Economic Modelling and Analysis of an Evolution of Bidding Zones for Wholesale Electricity Markets in the European Power System

In Europe, wholesale electricity markets follow a zonal market design, where bidding zones are generally defined according to national borders. Within these areas, market players are free to trade electricity with no constraint in volume, in relation to a uniform wholesale electricity price. On the other hand, exchange capacities between zones are limited, both for export and import, according to thresholds that are representative of the physical constraints that apply on the transmission system. In line with the Clean Energy Package and the network codes introduced by the European Commission, transmission system operators are now encouraged to provide as much trading capacity as possible between European national markets, even if this means defining short-term action plans to reduce grid constraints. In the event of persistent structural congestion, further splittings of market areas will be considered, which has already been addressed several times by transmission system operators and regulation authorities. As a matter of fact, bidding zone delineation significantly impacts the activity of European energy companies, whose operation and investment decisions regarding production assets are highly dependent on market design. The objective of this thesis is therefore to propose a techno-economic modelling and analysis of bidding zone evolution scenarios for the European power system, in order to address their impacts on generation asset portfolios, system operation and costs, price formation and the coordination between grid and generation investments.

Keywords : Wholesale Electricity Markets, Power Transmission, Clustering, Renewable Energy Sources

Valentin Rigot

Transformateur à air pour un convertisseur dc-dc bidirectionnel haute densité de puissance haute fréquence pour l'application automobile

Face aux urgences climatiques et politiques, le véhicule électrique est en pleine expansion. Les besoins en termes de densité de puissance embarquée sont en constante augmentation, ce qui nécessite des évolutions conceptuelles en électronique de puissance pour dépasser les limites actuelles tout en assurant un rendement similaire. Cette thèse est focalisée sur la modélisation, l'optimisation et la réalisation d'un transformateur pour un fonctionnement à haute fréquence sans circuit magnétique. Ce transformateur a été intégré dans un convertisseur bidirectionnel pour valider le fonctionnement d'un chargeur de batterie de véhicule électrique à forte densité de puissance fonctionnant à la fréquence de 1,5MHz. Les travaux présentés contribuent à l'amélioration de la densité de puissance dans les chargeurs embarqués, en profitant notamment de l'essor des composants semi-conducteurs à grand gap qui élargissent les plages de fréquence et de puissance et autorisent ainsi la réalisation de convertisseurs plus compacts. Après nous être intéressés aux transformateurs à haute densité de puissance, nous mettons en évidence l'intérêt des transformateurs à air pour la forte densité de puissance. Une nouvelle géométrie de transformateur à air exploitant l'emplacement des spires pour minimiser le rayonnement magnétique tout en garantissant une certaine valeur d'inductance propre constitue ainsi la première rupture technologique de cette thèse. Une étude sur les conducteurs de haute fréquence a aussi été menée afin de déterminer le conducteur le plus adapté à notre application en prenant en compte les effets de peau et de proximité. Différentes solutions sont proposées même si le fil de Litz a finalement été sélectionné. Ensuite et grâce à l'optimisation de la géométrie via un programme de modélisation écrit avec python, plusieurs supports successifs de bobinage ont été réalisés en polycarbonate par une imprimante 3D. Tout cela a abouti à un prototype pour un fonctionnement à 7 kW. Après bobinage et caractérisation électrique, magnétique et thermique, les propriétés du transformateur ont été utilisées comme point de départ de l'élaboration d'une topologie de convertisseur DC-DC. L'objectif automobile imposait les tensions et les puissances ainsi que le caractère bidirectionnel. L'étude a convergé sur l'utilisation d'un convertisseur Dual Active Bridge. La valeur de la fréquence de commutation a été déterminée pour atteindre les différentes puissances nécessaires pour le convertisseur tout en conservant la commutation douce. Cet ordre de grandeur de fréquence de commutation pour ce niveau de transfert de puissance constitue la seconde rupture technologique de cette thèse. Après avoir déterminé les commandes et choisi les différents composants nécessaires à la réalisation du convertisseur, des bras d'onduleur déjà fonctionnels ont été adoptés afin de simplifier l'élaboration du convertisseur. Un circuit imprimé dédié a été réalisé dans le but de relier les bras d'onduleurs, les bus de tension d'entrée et de sortie, le transformateur et la carte de commande du convertisseur. Finalement, les résultats expérimentaux des tests sur le convertisseur sont en accord avec le cahier des charges avec un rendement de 96% pour une puissance de 9kW et une fréquence de commutation de 1,5MHz. La densité de puissance obtenue est de 8,5kW/L ce qui est supérieur à l'existant et constitue une troisième rupture technologique. Des travaux supplémentaires restent à effectuer afin de valider complètement le prototype dans une application finale. Cependant, il est tout à fait envisageable que les véhicules électriques de demain utilisent ce type de transformateur qui permet d'améliorer le rendement, l'évacuation de la chaleur, donc également la compacité.

Mots-Clés : Electronique de puissance, Haute fréquence, Topologie, Transformateur à air

Air core transformer for bidirectionnal high power density high frequency DC-DC converter for automotive application

The electric vehicle is currently strongly expanding to face climate change. The power density requirements for onboard power are constantly growing and need evolution to go over the present electronic limitation without decreasing the efficiency. This thesis focuses on modeling, optimization and realization of a high-frequency coreless transformer integrated into a dedicated converter to validate a bidirectional on-board battery charger operating at 1.5MHz. The work contributes to the increase of the on-board charger power density by taking benefit of wideband gap semiconductors emergence which opens a new range of admitted switching frequency. It consequently offers an opportunity to increase the compacity of the converters. After a study on high power density transformers and coreless transformers, a highlight of the opportunity that an air-core transformer designed for power density is presented. The high-frequency electrical conductors have also been considered to determine the best one for our application by considering the skin and the proximity effects. The new transformer geometry is the result of an optimization program able to propose the best turns' positions for minimizing the magnetic emission while ensuring a certain value of self-inductance. This geometry establishes the first technical breakthrough of this thesis. Several transformers' trials were realized on 3D printed polycarbonate supports resulting in a 7kW prototype. An electrical, magnetic, and thermal characterization was done on the transformer after its winding process and validate the prediction.

Those values were taken for the start point of a dedicated DC-DC topology. The automotive and bidirectional context led us to merge on the Dual Active Bridge converter. The switching frequency was determined to ensure the required power transfer with a soft-switching operation. This frequency value in automotive chargers establishes the second technical breakthrough of this thesis. After determining the command signals and choosing the required components for the realization of the converter, a ready-to-use inverter branch was chosen to simplify the complexity of construction. A dedicated printed circuit board was realized to link the inverter branch with the DC bus, the transformer, and the command board of the converter. Finally, experimental results on the converter respect the requirement specifications with an efficiency conversion of 96% for a power transfer of 9kW and a switching frequency of 1.5MHz. The final estimated power density is 8.5 kW/L which is higher than the existing power density in the industry. Some complementary works must be done to validate the prototype in a final application. It is however possible to observe this kind of transformer in an electrical vehicle in the future. The results were indeed in rupture and presents better volume, better thermal management, and better efficiency.

Keywords : Power electronic, High frequency, Topology, Air core transformer

Vincent Andraud

Etude expérimentale du phénomène de balayage de l'arc électrique lors du foudroiement d'un aéronef

Lors du foudroiement d'un aéronef, il y a un mouvement relatif entre l'arc électrique de foudre et l'aéronef, qui peut voler jusqu'à 100 m/s en phase de décollage ou d'atterrissage, alors qu'il ne peut éviter l'impact. Ainsi le point d'attachement de la foudre n'est pas statique mais peut se mouvoir sur toute la surface de l'avion - on parle de balayage de l'arc électrique de foudre. Face à ce danger, les aviateurs doivent prévoir de protéger toutes les parties de l'aéronef d'autant plus que les nouveaux modèles d'avions en fibre de carbone supportent moins les dommages thermiques, mécaniques et électriques causés que leurs prédécesseurs recouverts d'aluminium. Actuellement, le manque de retour d'expérience ne permet pas de justifier le caractère prédictif des outils de simulation existants de balayage d'arc électrique. L'objectif de cette thèse est dans un premier temps de reproduire une expérience en laboratoire répétable et représentative d'un foudroiement d'aéronef afin de réaliser dans un second temps une base de données expérimentale sur les grandeurs physiques mesurables du phénomène de balayage dans des situations standardisées. Cette base expérimentale pourra servir de référence pour des protections aéronautiques ou pour valider des outils de simulation. Pour reproduire une expérience représentative de foudroiement d'un aéronef, un générateur électrique haute puissance de type Buck capable de reproduire un arc électrique respectant la norme de foudre aéronautique est conçu, réalisé et testé. Des arcs de quelques kV représentatifs de l'onde continue de foudre - une consigne de 400 A pendant 50 ms - sont formés et étirés jusqu'à 1.50 m afin de recréer une colonne d'arc libre. La propulsion de plaques de matériau aéronautiques à des vitesses de plusieurs dizaines de m/s est rendue possible par la conception, le développement et la réalisation d'un lanceur électromagnétique de type Railgun : avec un banc de supercondensateurs, l'injection d'un courant de 25 kA pendant environ 50 ms dans un système de rails de Laplace permet de projeter des plaques de quelques centaines de grammes aux vitesses voulues en 2 m d'accélération. Le couplage du générateur électrique et du lanceur électromagnétique permet alors la reproduction et l'étude du phénomène de balayage : des mesures électriques et des diagnostics optiques par caméras rapides et spectroscopie d'émission permettent de remonter aux grandeurs électriques, hydrodynamiques et thermiques de la colonne d'arc en mouvement ainsi que de caractériser le déplacement du point d'impact sur le matériau aéronautique. Ces mesures et analyses sont aussi effectuées avec soufflerie qui provoque le mouvement de l'arc sur la plaque test fixe en remplacement du Railgun. Ceci permet d'établir une comparaison entre les deux modes de reproduction d'un mouvement relatif arc électrique/plaque aéronautique.

Mots-Clés : Arcs électriques, Générateur haute puissance, Railgun, Diagnostics électriques et optiques, Foudre

Experimental implementation and study of the lightning swept-stroke along an aircraft

In the domain of aeronautical industry, the risk of lightning strike is taken into account from the conception of the aircrafts as the phenomenon statistically occurs every 1000 to 10000 flight hours. As this phenomenon involves a lightning channel that is static in the terrestrial reference frame and an aircraft that can reach a speed of 100 m/s in the takeoff or in the landing phase, there is a displacement of the impact area - the arc root - on the aircraft outerskin. This phenomenon is referred to as swept-stroke phenomenon. Thus, all the parts of the aircraft are exposed to the risk of direct electric and thermomechanical damages induced by the lightning strikes. Therefore, it is necessary to understand the physical mechanisms that drive the displacement of the arc root to optimize lightning strike protections. There is a significant bibliography about the modelling of this displacement combining electromagnetism and fluid mechanics equations. Though, the existing simulation codes still have not been validated by the implementation of an experimental aircraft simulation that would be struck down by lightning to create a reference database for the physical parameters of the phenomenon. This PhD thesis aims to reproduce such an experiment and to establish such a reference database. To reproduce a representative experiment of swept stroke, a high power electric generator with a Buck configuration and capable to reproduce an electric arc respecting the aeronautical standard lightning waveform is designed, implemented and tested. Electric arcs of a few kV representative of the continuous lightning waveform standard are created and elongated until 1.50 m. The propulsion of test samples to speeds of several tens m/s is realized with the design, development and implementation of an Railgun electromagnetic launcher: a supercapacitor bank enables the injection of a current of 25 kA during 50 ms into a Laplace's rails system and so to propel samples of a few hundred grams to the desired speeds within 2 m of acceleration. The coupling of the electric generator and the Railgun enables the reproduction and the study of the swept-stroke: electrical measures and optic diagnostics through high speed camera and spectroscopy are implemented to characterize the electric, hydrodynamic and thermal behavior of the moving electric arc. The impact point displacement is also characterized and analyzed. These measures and analyses are also conducted with a Wind tunnel that provokes the displacement of the electric arc on the test sample, replacing the Railgun. From this study, the comparison between the two modes of relative motion between the electric arc and the test sample is established.

Keywords : Electric arcs, Lightning, High-Power generator, Electrical and optical diagnostics, Railgun

Vorachack Kongphet

Contribution à la détection de défauts dans les modules PV en utilisant les courbes I-V

La surveillance continue de l'état de santé des modules PV est obligatoire pour maintenir un rendement élevé et minimiser les pertes de puissance dues aux défauts ou aux pannes. Dans ce travail, un traceur embarqué à faible coût est développé et optimisé pour mesurer la courbe I-V en moins de 0,2 s afin de minimiser la durée de l'interruption de la production électrique. Le traceur proposé est validé avec un analyseur du commerce. Les données expérimentales sont utilisées pour valider le modèle analytique du module PV. Ce modèle s'appuie sur les cinq paramètres (I_{ph} , R_s , R_{sh} , I_0 and n) du circuit électrique à une diode. Il est combiné au modèle numérique de Matlab-Simulink pour mettre en place le modèle hybride qui sera utilisé comme référence pour le diagnostic. Ce modèle est validé avec une erreur relative inférieure à 3% pour plusieurs données environnementales (éclairage et température). Les données mesurées sont utilisées pour extraire les cinq paramètres du modèle électrique équivalent ainsi que les principales caractéristiques de la courbe I-V (courant, tension, V_{oc} , I_{sc} et P_{mpp}). Les courbes I-V mesurées sont aussi utilisées pour évaluer les deux méthodes de diagnostic des défauts (notées M1 et M2). M1 s'appuie sur le modèle analytique des cinq paramètres (I_{ph} , R_s , R_{sh} , I_0 and n) alors que M2 utilise les cinq caractéristiques (I_{pv} , V_{pv} , P_{mpp} , V_{oc} and I_{sc}) et le modèle hybride pour générer les courbes I-V de référence. Les résidus sont calculés entre les indicateurs des défauts extraits des mesures expérimentales et ceux issues des courbes de référence. Trois cas de défaut ont été étudiés : dégradation de la résistance série (R_s), dégradation de la résistance shunt (R_{sh}) et l'ombrage partiel. Les résultats basés sur des données expérimentales obtenues sous différentes températures et éclairagements ont montré que la dégradation des résistances série et shunt et l'ombrage partiel étaient mieux détectés par les caractéristiques qu'avec les paramètres.

Mots-Clés : Photovoltaïque, Traceur I-V, Modèle photovoltaïque, Courbe I-V, Détection et Diagnostic de défaut

Contribution to fault detection of PV modules using I-V curves

Continuous monitoring of the health status of PV modules is mandatory to maintain high efficiency and minimize power losses due to faults or failures. In this work, a low-cost embedded tracer is developed and optimized to measure the I-V curve in less than 0.2 s to minimize the duration of power generation interruption. The proposed tracer is validated with a commercial analyzer. The experimental data is used to validate the analytical model of the PV module. This model is based on the single diode electrical circuit's five parameters (I_{ph} , R_s , R_{sh} , I_0 and n). It is combined with the Matlab-Simulink numerical model to set up the hybrid model that will be used as a reference for the diagnosis. This model is validated with a relative error of less than 3% for several environmental data (irradiance and temperature). The measured data are used to extract the five parameters of the equivalent electrical model and the main characteristics of the I-V curve (current, voltage, V_{oc} , I_{sc} , and P_{mpp}). The measured I-V curves are also used to evaluate two fault diagnosis methods (denoted M1 and M2). The method M1 uses the analytical models of the five parameters (I_{ph} , R_s , R_{sh} , I_0 and n) while M2 uses the five characteristics (I_{pv} , V_{pv} , P_{mpp} , V_{oc} and I_{sc}) of the I-V curves as fault features, and the hybrid model to generate the I-V reference curves. The residuals are calculated between the fault indicators extracted from the experimental measurements and those from the reference curves. Three fault cases were studied: degradation of the series resistance, degradation of the shunt resistance, and partial shading. The results based on experimental data, obtained under different temperatures and illuminations, showed that the I-V curves' characteristics are more sensitive to series and shunt resistance degradation and partial shading than the parameters.

Keywords : Solar photovoltaic, I-V tracer, PV model, I-V characteristic, Fault detection and diagnosis

Yao Pei

Conception et optimisation de systèmes de transfert de puissance inductifs par des techniques de métamodélisation

Le travail de cette thèse est de proposer une méthode de métamodélisation afin d'évaluer l'efficacité d'un système de transfert de puissance inductif résonant (TPIR) et de gérer les contraintes de compatibilité électromagnétique dans les VE. La méthode inclut différents aspects du problème électromagnétique: la forme des bobines, les caractéristiques géométriques du système (ferrites, châssis du véhicule, plaques de blindage), le désalignement entre l'émetteur et le récepteur. Cette méthodologie repose sur la combinaison de la méthode des éléments finis (MEF) avec des techniques de métamodélisation. L'efficacité de transmission maximale et la densité de flux magnétique de fuite ont été analysés pour quatre formes de coupleurs (circulaire, carré, bipolaire (BP) et double-D (DD)). Nous avons modélisé ces structures de coupleurs par des calculs MEF COMSOL 3D puis vérifié par des mesures expérimentales sur des prototypes à l'échelle 1:10 développés au labo GeePs. Il apparaît que le rapport entre la longueur du fil conducteur et l'inductance mutuelle influence directement l'efficacité maximale de la transmission quand l'émetteur et le récepteur sont identiques. Concernant l'efficacité de transmission maximale, les coupleurs circulaires peuvent fournir les valeurs maximales parmi ces coupleurs, mais les coupleurs carrés ont une plus grande tolérance au désalignement que les autres; en revanche, les coupleurs carrés ont plus de fuites de champ magnétique. Cependant, grâce à la tolérance au désalignement, les coupleurs carrés sont choisis. Deuxièmement, afin de prendre en compte les sources d'incertitude (le désalignement le long des axes, ou rotation du récepteur), différents métamodèles (régression par machine à vecteur de support, algorithme de programmation génétique multigénique, expansions de chaos polynomial (PCE)) ont été comparés dans le cas de coupleur carré à échelle réduite. En raison du compromis entre le temps de calcul et la précision, le PCE a été retenu. Selon l'analyse de sensibilité établie à partir des coefficients des métamodèles, le désalignement le long de l'axe X s'est avéré le facteur le plus influent pour les coupleurs DD/BP, alors que le désalignement le long de l'axe X/Y a le même effet sur les coupleurs circulaires et carrés, en raison des symétries. Ensuite, une optimisation multi-objectifs combinée avec un métamodèle PCE a été proposée pour un système TPIR sans blindage (développé au labo GeePs et l'institut Vedecom) et un autre système avec blindage (développé au labo GeePs). Le but était de déterminer les dimensions du système, afin d'une part d'améliorer l'efficacité de la transmission et d'autre part de réduire le poids/le coût du système en prenant en compte les recommandations de l'ICNIRP. Par rapport à une approche traditionnelle d'optimisation, cette méthode peut économiser plusieurs fois le temps de calcul (y compris le temps d'apprentissage) et les ressources de calcul. Deux algorithmes d'optimisation: Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) et Multiobjective Particle Swarm Algorithm (MOPSO) sont comparés. Il en ressort qu'un métamodèle PCE avec MOPSO s'avère une approche performante pour effectuer l'optimisation lorsqu'on considère le système impliquant un grand nombre de variables de conception sous contraintes. Par ailleurs, une optimisation topologique permet d'affiner le placement de la ferrite dans la zone obtenue afin de réduire le volume de ferrite sans trop affecter l'inductance mutuelle.

Mots-Clés : Transfert de puissance inductif, Développement en chaos polynomial, Analyse de sensibilité, Optimisation

Design and optimization of inductive power transfer systems by metamodeling techniques

The aim is to propose a metamodeling method in order to assess the efficiency of the resonant inductive power transfer system and to manage electromagnetic compatibility constraints in EVs. The method simultaneously includes various aspects of the electromagnetic problem: the shape of the coils, geometrical characteristics of the system (ferrites, chassis of vehicle, shielding plates), and possible misalignment between transmitter and receiver while charging. This methodology relies on the combination of the finite element method (FEM) with metamodeling techniques. First, the maximum transmission efficiency and magnetic flux density leakage are analyzed for four shapes of couplers (circular, square, bipolar (BP), and double-D (DD)). They are compared using 3D FEM simulations and the experiments on 1:10 scale prototypes developed in the GeePs laboratory. It was shown that the ratio between the wire length and the mutual inductance mainly influences the maximum transmission efficiency when the transmitter and the receiver are identical. The analysis was performed on the electrical circuit in the series-series compensation topology. Regarding the maximum transmission efficiency in RIPT systems, the circular coupler can provide the maximum values among different shapes of coils, but the square coupler has a higher tolerance to misalignment than others; meanwhile, the square coupler also has a higher magnetic flux density leakage. However, focusing on the tolerance to misalignment, the square coupler is chosen for developing the RIPT system. Secondly, to take into account the sources of uncertainty (the misalignment or the rotation of the receiver), various metamodels (support vector machine regression, multigene genetic programming algorithm, sparse polynomial chaos expansions (sparse PCE)) were built and compared for analyzing the mutual inductance on the small scale square coupler. Due to the tradeoff between the computational time and the accuracy

of the metamodel, the sparse PCE metamodel was chosen to analyze the variation of the mutual inductance for different shapes of couplers considering the sources of uncertainty. This metamodeling technique proved to be a very useful tool in the analysis of RIPT system in order to save significant computational time. According to the sensitivity analysis established on the PCE metamodels, the misalignment along the X axis appeared to be the most influential factor in the mutual inductance for DD/BP couplers, whereas the misalignment along X/Y axis had the same effect as the circular and the square couplers, due to their symmetries. Then, a method was proposed to perform a multiobjective optimization with the sparse PCE metamodeling technique to the RIPT system without shielding (developed by GeePs laboratory and Vedecom institute) and the one with shielding (developed by GeePs laboratory). The target was to find the best dimensions of the system to improve the transmission efficiency and decrease the volume of the ferrite/ the cost of the shielding (the ferrite plates and an aluminum plate above the receiver) under the ICNIRP guidelines. Compared to 3D FEM computations with multiobjective optimization methods, this method may save several times the computational time (including the time to calculate the training samples) and computational resources. Two optimization algorithms: Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) et Multiobjective Particle Swarm Algorithm (MOPSO) were compared, and it comes out that associating PCE metamodel with MOPSO uses a shorter computational time, and it can find a larger set of feasible solutions than the PCE metamodel with NSGA-II. Furthermore, topology optimization with the solid isotropic material with penalization (SIMP) method is used to find a ferrite distribution that maximizes the mutual inductance while constraining the volume of ferrite.

Keywords : Inductive power transfer, Polynomial chaos expansion, Sensitivity analysis, Optimization

Yarui Zhang

Imagerie électromagnétique non linéaire : d'algorithmes basés sur les ondelettes préservant la parcimonie à l'apprentissage en profondeur

Ce travail traite de l'imagerie électromagnétique mal-posée non-linéaire à partir de données en régime harmonique dans une expérience de diffraction bidimensionnelle, en mettant l'accent sur deux approches dans le cadre de l'inversion de source de contraste (CSI). La première approche est un CSI pénalisé par la parcimonie de groupe dans le domaine des ondelettes, la seconde est un schéma d'apprentissage profond dit déroulé. Dans la première approche, une dépendance existe entre les coefficients d'ondelettes à différentes échelles, appelée relation parent-enfant, ce qui donne une structure quadtree d'ondelettes, de sorte que les coefficients d'ondelettes sont parcimonieux tant au niveau des pixels qu'au niveau des groupes. L'accent est mis sur l'utilisation de la transformée en ondelettes complexe (CWT) à double arborescence en vue d'obtenir correctement la représentation parcimonieuse par groupe recherchée. Une norme $l_{2,1}$ ajoutée à la fonction coût standard applique la parcimonie de groupe aux coefficients d'ondelettes du contraste. La stratégie de réplication est combinée avec la méthode proximale afin de résoudre le problème pénalisé de groupes qui se chevauchent. La seconde approche est inspirée de la méthode déroulée. En intégrant les itérations CSI dans le modèle d'apprentissage profond, la connaissance du domaine est intégrée au processus d'apprentissage. Dans les deux cas, des tests numériques approfondis sont effectués afin d'évaluer les performances, la stabilité, la robustesse et la fiabilité, en menant des comparaisons avec des solutions considérées plus standard (comme CSI, la transformée en ondelettes discrète ou DWT, et U-net), et celles-ci illustrent l'avantage des deux approches proposées en de nombreux aspects.

Mots-Clés : Inversion de source de contraste, Transformée d'ondelettes complexes à double arborescence, Parcimonie de groupe, Apprentissage profond, Méthode déroulée

Non-linear electromagnetic imaging : from sparsity-preserving wavelet-based algorithms to deep learning

This work deals with nonlinear ill-posed electromagnetic imaging from time-harmonic data within a two-dimensional scattering experiment, the focus being on two approaches in the framework of the contrast-source inversion (CSI). The first approach is a group sparsity penalized CSI in the wavelet domain, the second is an unrolled deep learning scheme. In the first approach, dependency exists between wavelet coefficients at different scales, referred to as parent-child relationship, which yields a wavelet quadtree structure so that wavelet coefficients are both pixel-wise and group-wise sparse. Emphasis is on the dual-tree complex wavelet transform (CWT) to achieve this result. A $l_{2,1}$ norm added to the standard cost function is to enforce group sparsity onto the wavelet coefficients of the spatially-varying contrast. The replication strategy is combined with the proximal method to solve the overlapping group penalized problem. The second approach is inspired by the unrolled method. By embedding the CSI iterations into the deep learning model, the domain knowledge is incorporated into the learning process. In both cases, thorough numerical tests are carried out to evaluate performance, stability, robustness, and reliability with comparisons with more standard solutions (like CSI, discrete wavelet transform (DWT) and U-net), which exhibit the advantage of the proposed approaches under many aspects.

Keywords : Contrast source inversion, Dual-tree complex wavelet transform, Group sparsity, Deep learning, Unrolled method