Modélisation comportementale et optimisation de circuits de conversion RF-DC et des formes d'onde en émission pour le transfert d'énergie sans fil

Encadrants : Delaram HAGHIGHI-TALAB (delaram.haghighi-talab@esiee.Fr)

Hakim TAKHEDMIT (hakim.takhedmit@univ-eiffel.fr)

Laboratoire : ESYCOM UMR 9007

Présentation générale

Le transfert d'énergie sans fil par radiofréquence (RF) constitue une solution particulièrement intéressante pour l'alimentation de dispositifs électroniques à très faible consommation, notamment les capteurs autonomes et les objets connectés. Le principe consiste à transmettre ou à récupérer une énergie portée par une onde électromagnétique, puis à la convertir au niveau du récepteur en une tension continue exploitable. La chaîne de réception repose généralement sur une antenne, un réseau d'adaptation d'impédance et un circuit de conversion RF-DC, ou redresseur. L'un des principaux défis réside dans la très faible puissance RF disponible à l'entrée du récepteur, en raison notamment des pertes de propagation. Les performances du système dépendent alors fortement de la sensibilité du redresseur, de son rendement de conversion et de sa capacité à fonctionner sur une plage suffisamment large de puissances d'entrée [1]. Les travaux sur les rectennas montrent également l'intérêt des structures de multiplication de tension pour obtenir une tension continue suffisante à partir de faibles niveaux de puissance RF [2].

L'amélioration du transfert d'énergie ne repose cependant pas uniquement sur le récepteur. Le signal émis et la manière dont l'énergie RF est transmise constituent également des leviers d'optimisation. L'efficacité globale doit ainsi être considérée conjointement du côté émission et du côté réception : puissance et organisation temporelle de l'émission, conditions de propagation, adaptation d'impédance et comportement non linéaire du convertisseur RF-DC influencent directement l'énergie finalement disponible pour la charge. Certaines stratégies adaptent notamment l'émission à l'état énergétique du récepteur et utilisent les périodes disponibles pour transmettre des paquets d'énergie [3]. Cette approche conduit à étudier conjointement la conception des circuits de conversion RF-DC et les formes d'onde en émission afin de maximiser l'énergie continue récupérée et de permettre l'alimentation fiable de dispositifs autonomes à très faible consommation.

Objectifs du projet

Ce projet porte sur le développement d'un outil de modélisation comportementale sous MATLAB/Simulink pour la simulation rapide de circuits de conversion RF-DC destinés aux applications de transfert d'énergie sans fil. L'objectif est de disposer d'une alternative aux simulateurs circuits tels que ADS ou SPICE, afin de réduire significativement les temps de simulation tout en conservant une bonne représentation du comportement des convertisseurs étudiés.

Le travail s'appuiera d'abord sur la conception et l'optimisation de circuits de conversion RF-DC sous ADS, en considérant plusieurs topologies telles que les structures série, parallèle et doubleur de tension. Ces simulations numériques de référence permettront d'analyser le comportement des convertisseurs pour différentes conditions d'excitation et de constituer une base de résultats fiable pour la suite de l'étude. À partir de ces résultats, un modèle comportemental sous MATLAB/Simulink sera ensuite développé, dans un premier temps pour une topologie série, puis étendu aux autres architectures étudiées, afin de reproduire de manière rapide et précise la réponse du circuit à différentes formes d'ondes RF.

Le projet comprendra également un travail de comparaison et de validation entre les résultats issus du modèle comportemental, les résultats numériques de référence obtenus sous ADS et les résultats de mesures expérimentales réalisés sur un circuit existant. Une autre partie importante du stage portera sur l'optimisation de formes d'onde appliquée aux circuits étudiés. Il s'agira notamment d'évaluer la sortie continue obtenue pour des excitations autres qu'une onde continue (CW), par exemple des signaux multi-porteuses, impulsionnels ou de type OFDM, afin d'identifier, pour chaque topologie, la forme d'onde et les paramètres les plus favorables à la conversion RF-DC. Une comparaison systématique des temps de simulation entre ADS et MATLAB/Simulink sera menée tout au long du travail, de manière à quantifier l'apport de l'approche comportementale en termes de rapidité de calcul. Selon l'avancement, le projet pourra enfin inclure une phase de fabrication et de mesures expérimentales.

Ce projet mobilise des compétences avancées en électronique RF, circuits non linéaires, simulation sous ADS, modélisation sous MATLAB/Simulink et analyse de formes d'onde complexes. Il s'inscrit dans une démarche à la fois scientifique et appliquée, combinant conception de circuits, simulation numérique de référence, modélisation comportementale, fabrication et validation expérimentale, avec pour finalité la mise au point d'un outil de simulation rapide, rigoureux et exploitable pour l'étude et la conception de circuits de conversion RF-DC pour le transfert d'énergie sans fil. L'ensemble de ces travaux a vocation à conduire à une valorisation scientifique sous la forme d'un article de journal, intégrant les résultats obtenus ainsi qu'une étude approfondie de comparaison et de validation du modèle comportemental proposé vis-à-vis des simulations ADS et des mesures expérimentales.

Démarches

- Compléter modèle comportemental de circuit de conversion RF-DC série sous MATLAB/Simulink, capable de simuler la réponse du circuit à différentes formes d'ondes RF.
- Etendre le modèle à différentes topologies de circuits de conversion RF-DC (parallèle, doubleur de tension…)
- Confrontation des résultats de mesures, simulations et modèle sur un circuit existant.
- Conception d'un nouveau circuit de conversion RF-DC sous le logiciel ADS.
- Optimisation de forme d'onde en s'appuyant sur le modèle comportemental, sur un circuit existant
- Fabrication et mesures expérimentales (en fonction de l'avancement)

Références

[1] S. M. Noghabaei, R. L. Radin, Y. Savaria, and M. Sawan, “A high-sensitivity wide input-power-range ultra-low-power RF energy harvester for IoT applications,” IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, vol. 69, no. 1, pp. 440–451, Jan. 2022.

[2] H. Mahfoudi, H. Takhedmit, M. Tellache, and S. Boisseau, “Wireless sensor node remote supply using a compact stacked rectenna array with voltage multipliers at 2.45 GHz,” International Journal of Microwave and Wireless Technologies, 2019.

[3] Y. Wang, K. Yang, W. Wan, Y. Zhang, and Q. Liu, “Energy-efficient data and energy integrated management strategy for IoT devices based on RF energy harvesting,” IEEE Internet of Things Journal, vol. 8, no. 17, pp. 13640–13651, Sep. 2021.