

Considérations sur la conception d'un redresseur destiné à la récupération d'énergie RF dans la bande ISM à 868 MHz

Jesus Argote-Aguilar^{1,2}, Florin-Doru Hutu², Guillaume Villemaud², Matthieu Gautier¹, Olivier Berder¹

¹Univ Rennes, CNRS, IRISA, prenom.nom@irisa.fr

²Univ Lyon, INSA Lyon, Inria, CITI, EA3720, 69621 Villeurbanne, France, prenom.nom@insa-lyon.fr

Mots clés (en français et en anglais) : redresseur, transfert de puissance sans fil, ligne microruban, diode Schottky (rectifier, wireless power transfer, microstrip line, Schottky diode).

Résumé/Abstract

L'étude théorique des redresseurs RF à travers la simulation avec des composants idéaux est une première approche pour comprendre les atouts et les inconvénients d'un tel circuit destiné à la récupération d'énergie RF. Cependant, les composants électroniques réels ont des pertes et des effets parasites qui peuvent changer drastiquement le comportement de ces redresseurs, notamment leur rendement de conversion. Le travail présenté ici met en évidence l'importance de prendre en compte la technologie de fabrication. Les considérations de conception pour le redresseur proposé ici tiennent compte du contexte applicatif qui est l'alimentation avec une tension continue régulée d'une interface de type « wake-up radio » à travers un circuit de gestion d'énergie (PMIC - Power Management Integrated Circuit).

The theoretical study of RF rectifiers through simulation with ideal components is a first approach to understand the advantages and drawbacks of such a circuit intended for RF energy harvesting. However, real electronic components have losses and parasitic effects that can drastically change the behavior of these rectifiers, especially their conversion efficiency. The work presented here highlights the importance of considering the manufacturing technology. The design considerations for the rectifier proposed here consider the application context which is the supply of a regulated DC voltage to a "wake-up radio" interface through a Power Management Integrated Circuit (PMIC).

1 Introduction

Récupérer de l'énergie Radio-Fréquence (RF) pour rendre des objets connectés moins dépendants des sources conventionnelles d'énergie (batteries, accumulateurs, etc.) apparaît comme une solution prometteuse. De plus, pour réduire la consommation globale des objets communicants, des interfaces radio à très faible consommation d'énergie peuvent permettre des réveils par ondes radio (Wake-up Radio - WuRx) [1]. Alimenter ces WuRx par récupération d'énergie RF est alors envisageable, à condition de garantir des niveaux suffisants de puissance récupérée ainsi qu'une tension d'alimentation régulée. Dans les circuits de récupération d'énergie RF, des redresseurs sont utilisés pour transformer le signal RF en une tension continue. Dans certaines applications, il est souhaitable de récupérer de l'énergie RF sur une large plage de niveaux de puissance. Pourtant, la conception de ces redresseurs s'avère très complexe particulièrement à cause de la non-linéarité des diodes qui le composent et par conséquent dépend du niveau de puissance du signal RF.

Dans la littérature scientifique, différentes approches sont proposées pour récupérer de l'énergie RF sur une large plage de puissance de façon efficace. Dans [2], l'auteur associe deux redresseurs identiques avec un coupleur en quadrature pour rendre l'impédance d'entrée du système constante à 50Ω et indépendant de la puissance d'entrée. L'association est optimisée pour récupérer des puissances à 20 dBm et une fréquence de 2.45 GHz. Des puissances autour de 10 dBm sont réfléchies par un des ports du coupleur à une nouvelle association de redresseurs optimisés pour récupérer ce dernier niveau de puissance et ainsi agrandir la plage de puissance de récupération du système. Dans [3], les auteurs associent 3 redresseurs, chacun optimisé pour une bande de fréquence spécifique et avec sa propre antenne. Selon la façon avec laquelle ils sont branchés en sortie à l'aide d'un interrupteur à base de transistors MOSFET, l'association est optimisée pour des niveaux des puissances d'entrée de 1 dBm et -4 dBm, ce qui élargit la capacité du système à récupérer de l'énergie RF sur une plage plus large. Dans [4] et [5], des redresseurs optimisés à un niveau spécifique de puissance et chaque redresseur avec sa propre charge sont connectés à un circulateur qui achemine les niveaux de puissance aux redresseurs appropriés depuis une seule antenne. Ces deux travaux récupèrent de la puissance à 2.45 GHz, sur une plage de puissance allant de -20 dBm à 20 dBm. Dans [6], les auteurs proposent une architecture qui fournit une tension régulée à travers un circuit intégré de gestion d'énergie qui est alimenté par une association de redresseurs capable de récupérer de manière efficace de l'énergie RF sur la bande à 868 MHz et une plage de puissance allant de -20 dBm à 0 dBm. Les redresseurs sont associés à travers un circulateur à l'entrée et en série à la sortie pour alimenter un circuit de gestion d'énergie

qui à son tour est capable de fournir une tension régulée à une Wake-Up Radio faible consommation (Figure 1). Si les puissances autour de -20 dBm peuvent être récupérées de l'environnement ou depuis une source dédiée, les niveaux de puissance allant au-delà de 0 dBm sont assez élevés et loin d'être présents dans l'environnement. Cependant, d'autres scénarios sont envisageables, par exemple des niveaux autour de 0 dBm peuvent être recyclés par couplage entre l'antenne du circuit de récupération d'énergie RF et l'antenne principale de l'objet communicant (du fait qu'elles sont très proches), lors des transmissions de ce dernier. Dans [6], la conception de l'architecture proposée est simulée en utilisant des composants idéaux uniquement.

Dans cette communication, nous proposons des considérations de conception d'un redresseur à 868 MHz et 0 dBm et l'étude de l'utilisation de composants réels sur le fonctionnement du redresseur. L'étude est réalisée en simulation à l'aide du logiciel ADS de Keysight. Cet article est organisé de la façon suivante : une étude est réalisée avec des composants idéaux dans la section 2, des modèles plus proches de la réalité sont utilisés dans la section 3 et finalement la section 4 conclue ce papier.

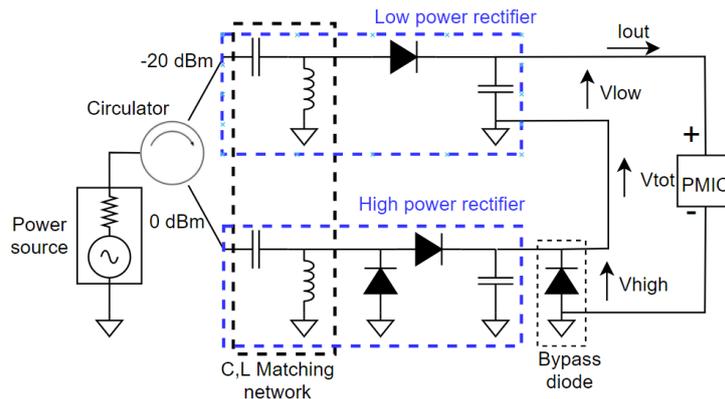


Figure 1 : Architecture pour la récupération d'énergie RF de -20 dBm à 0 dBm.

2 Etude avec des composants idéaux

Une approche rapide pour choisir une topologie de redresseur et la diode utilisée est l'étude des performances avec des composants idéaux ensuite d'ajouter du réalisme. Sur la Figure 1, il est possible de distinguer les parties d'un redresseur. La partie circuit d'adaptation permet d'adapter l'impédance d'entrée du redresseur avec l'impédance de la source qui généralement est une antenne, ensuite une partie constituée par des diodes fait la rectification du courant alternatif fourni par l'antenne dans un courant continu et finalement une partie (sur la Figure 1 un condensateur) qui permet de lisser la tension de sortie du redresseur. La figure 2 montre trois types de topologies d'un redresseur données par la disposition de ces diodes. Cet article se focalise sur le bloc circuit d'adaptation et les topologies série, parallèle et doubleur de tension, quand les diodes SMS7630, HSMS2850 et HSMS2860 sont considérées.

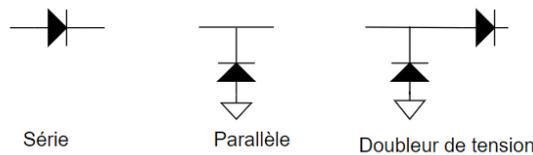


Figure 2 : Topologies d'un redresseur à base de diodes Schottky

La Figure 3 montre les rendements ou efficacités E_{ff} de ces topologies à base des diodes susmentionnées en fonction de la charge du redresseur quand un circuit d'adaptation en L à base d'éléments réactifs idéaux est utilisé. Pour chaque valeur de la charge, le circuit d'adaptation est optimisé avec pour objectif d'avoir un coefficient de réflexion S_{11} en dessous de -25 dB à 868 MHz et un rendement maximal pour une puissance d'entrée de 0 dBm.

Le Tableau 1 présente les valeurs de charges optimales pour chaque topologie et chaque diode ainsi que les rendements maximaux obtenus pour ces charges. Les résultats montrent qu'à 0 dBm et à 868 MHz, la diode HSMS2860 est la plus performante et les trois topologies qui utilisent cette diode ont des rendements maximaux similaires (supérieurs à 85 %).

Différentes combinaisons des éléments réactifs idéaux du circuit d'adaptation en L ont été étudiées et les rendements des rectifieurs ne changent pas de manière significative. Cette étude permet d'affirmer que les rendements et les

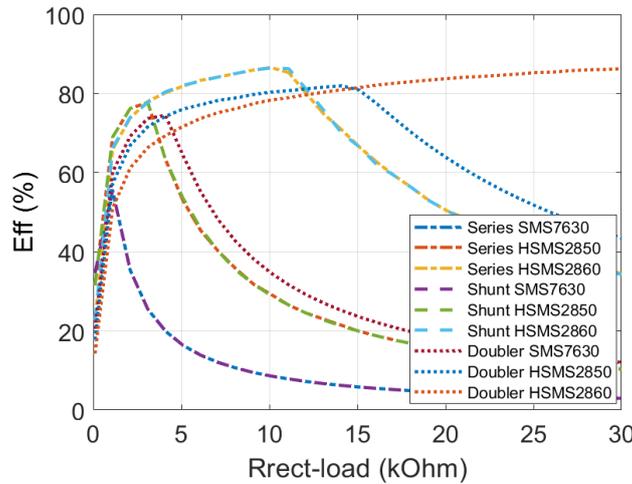


Figure 3 : Rendements des différents redresseurs en fonction de la charge à 868 MHz et 0 dBm.

charges optimales, à une fréquence et une puissance donnée, sont dépendantes des diodes et des topologies et sont indépendantes de la structure du circuit d'adaptation à condition que ce dernier offre un bon coefficient de réflexion. Il faut mentionner que, pour une diode donnée, les courbes des topologies à une seule diode se superposent, comme observé dans la Figure 2. De plus, les résultats montrent que la charge optimale pour les topologies à une seule diode est inférieure, autour de 10 k Ω , face à 40 k Ω dans le doubleur de tension pour les redresseurs à base de la diode HSMS2860. Le choix de la topologie et de la diode en fonction de la charge est fait selon l'application, des charges plus élevées sont capables de fournir des tensions plus élevées. Cependant pour certaines applications, tant qu'elles fournissent un niveau suffisant de tension, des topologies plus simples à une seule diode sont préférées. Un autre facteur de dimensionnement est l'impédance d'entrée du circuit auquel le rectifieur est branché. La charge optimale d'une topologie est indépendante du circuit d'adaptation quand ce dernier garantit des bons coefficients de réflexion pour chaque charge. Pourtant il est possible d'optimiser un circuit d'adaptation pour que le redresseur ait un transfert de puissance maximal pour une charge spécifique. Dans [7], les auteurs indiquent le fait que l'impédance de sortie du rectifieur est égale à sa charge optimale. En effet, il est possible de faire la conception d'un circuit d'adaptation pour que le redresseur ait une impédance de sortie souhaitée, parfois au détriment du rendement du redresseur.

Topologie	Diode	Charge optimale (k Ω)	Rendement (%)
Série	SMS7630	1	55.5
Série	HSMS2850	3	77.8
Série	HSMS2860	10	86.6
Parallèle	SMS7630	1	55.5
Parallèle	HSMS2850	3	77.8
Parallèle	HSMS2860	10	86.5
Doubleur de tension	SMS7630	4	74.5
Doubleur de tension	HSMS2850	14	82.0
Doubleur de tension	HSMS2860	40	88.0

Tableau 1 : Rendements et charges optimales des différents redresseurs.

3 Etude avec des modèles plus réalistes des composants

A cause de la simplicité et des bons rendements obtenus avec des composants idéaux, la topologie série et la diode HSMS2860 sont choisies pour une étude plus approfondie. Pour affiner la conception du redresseur, les composants passifs idéaux sont remplacés par des composants réalistes qui incluent dans leur modèle des pertes et des effets parasites.

Tout d'abord, les effets parasites du boîtier de la diode sur le rendement et la charge optimale du redresseur sont étudiés sur la Figure 4. Bien que les valeurs des éléments réactifs du circuit d'adaptation changent pour chaque charge du rectifier, le rendement n'est pas affecté. Ce résultat est expliqué par le fait que le modèle du boîtier n'est constitué que par des composants réactifs.

Ensuite, les composants idéaux du circuit d'adaptation sont remplacés par des modèles plus réalistes. De plus, une partie des composants discrets est remplacée par leurs homologues réalisés en technologie microruban. La Figure 5(a) montre l'impact des paramètres du substrat sur le rendement du redresseur. Un substrat ISOLA est utilisé

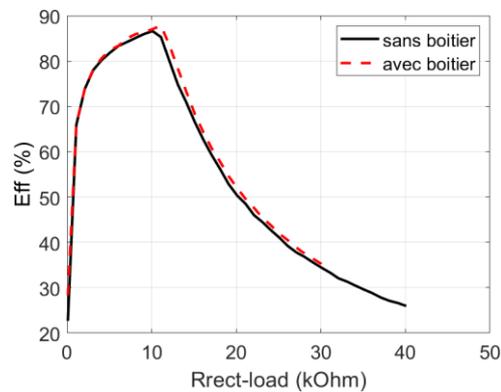


Figure 4 : Etude de l'impact des effets parasites du boîtier de la diode (SOT-23) sur le rendement de la topologie série et la diode HSMS2860.

comme référence, celui-ci a les caractéristiques suivantes : $t_{sub} = 0.73 \text{ mm}$, $E_r = 3.62$, $TanD = 0.0042$, $t_{cu} = 17 \mu\text{m}$, où t_{sub} est l'épaisseur du substrat, E_r est la permittivité relative du diélectrique, $TanD$ est la tangente de pertes et t_{cu} l'épaisseur des lignes de transmission. La Figure 5(b) montre les rendements des redresseurs conçus avec ces composants discrets réels.

Sur la Figure 5(a), les courbes de composants idéaux ont des allures très proches. Néanmoins, comme attendu, en rajoutant du réalisme dans la modélisation du circuit électronique, ses rendements et la charge optimale diminuent. A 868 MHz, la longueur des lignes microruban du circuit d'adaptation est autour de 50 mm au total et les pertes dans le diélectrique (liées à $TanD$) et le conducteur sont non-négligeables, ce qui explique la diminution des rendements. La Figure 5(b) montre que les rendements obtenus avec des composants discrets réels sont supérieurs au rendement des redresseurs conçus avec des lignes microrubans et que le rendement augmente avec le facteur de qualité des composants. En effet, la diminution des rendements est principalement liée aux pertes dans la technologie. Par conséquent, pour toutes les topologies, des meilleurs rendements seront obtenus avec la technologie et la disposition qui introduisent moins de pertes.

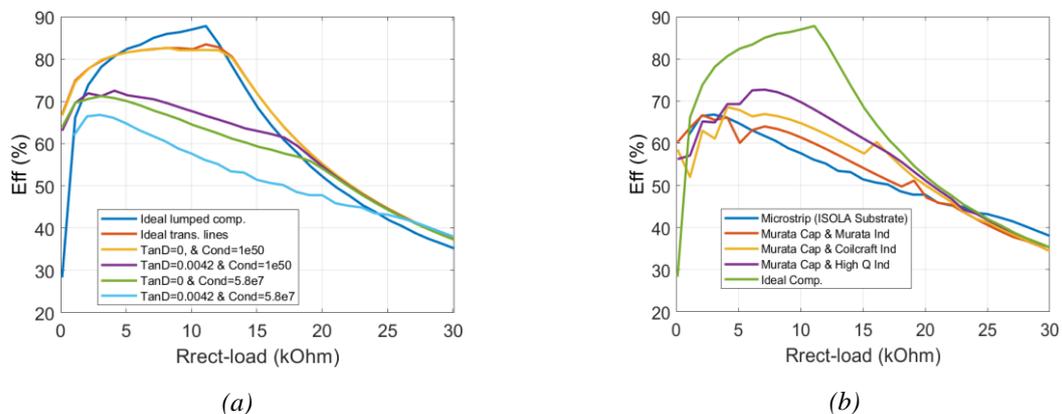


Figure 5 : Comparaison de l'impact des a) lignes microrubans et b) composants discrets sur la topologie série et la diode HSMS2860.

Pour simplifier au maximum l'étape de fabrication, l'architecture à base de lignes microrubans a été choisie. A cause des différences signalées sur la Figure 5(a), les trois topologies et les trois diodes mentionnées ont été simulées à nouveau avec un circuit d'adaptation qui utilise des lignes microrubans. La Figure 6 montre la disposition des lignes du circuit d'adaptation utilisée pour tous les redresseurs. Une ligne en série avec le redresseur L_s et une ligne court-circuitée en parallèle avec la source L_p sont utilisées. La Figure 7 compare les rendements obtenus avec ces lignes microrubans quand le substrat ISOLA est utilisé face aux rendements obtenus avec des composants idéaux pour les différents redresseurs.

Les rendements des rectifieurs qui utilisent des lignes microrubans dans le circuit d'adaptation sont en dessous ou quasiment confondus avec les rendements des rectifieurs conçus avec des composants idéaux. Les rendements des lignes microruban légèrement supérieurs à ses homologues idéaux s'expliquent par le coefficient de réflexion S_{11} .

Bien que tous les S_{11} sont en dessous de -25 dB, pour ces circuits d'adaptation en ligne microruban, les S_{11} sont autour de -40 dB, ce qui explique un léger et négligeable rendement supérieur. Sur la Figure 7, il est possible d'observer que certaines topologies ont des diminutions sur les rendements plus drastiques que d'autres. La longueur de la ligne de transmission en parallèle L_p n'a pas un effet important sur la diminution des rendements, pourtant les pertes dans la résistance équivalente de la ligne de transmission en série modifie considérablement le facteur de qualité du circuit d'adaptation.

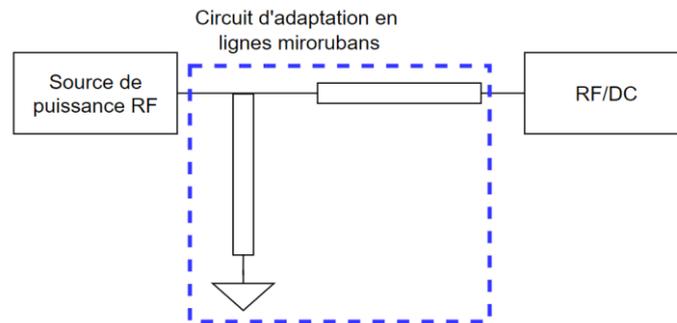


Figure 6 : a) Structure du circuit d'adaptation en lignes microrubans

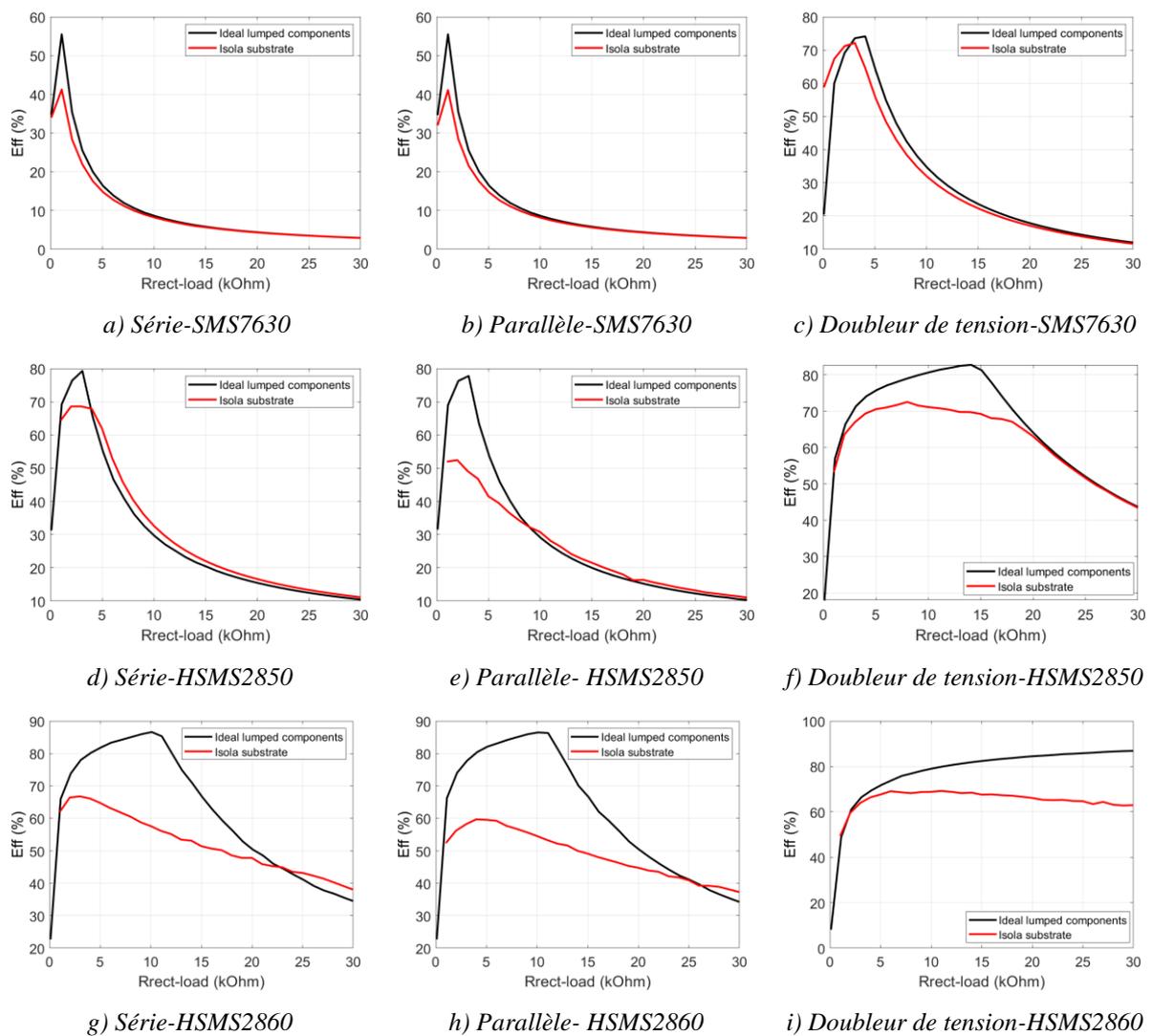


Figure 7 : Comparaison des rendements des différents redresseurs quand ils sont conçus avec des lignes microrubans face aux rendements obtenus avec des composant idéaux.

La Figure 8 montre les longueurs des lignes L_s des redresseurs Doubleur de tension-HSMS2850 et Série-HSMS2860 qui ont des rendements et charges optimales comparables quand ils utilisent des composants idéaux. Pourtant quand des lignes microrubans sont utilisées, la diminution des rendements du dernier est plus importante. En effet, les longueurs des lignes L_s du redresseur Série-HSMS2860 sont plus importantes que celles du redresseur Doubleur de tension-HSMS2850.

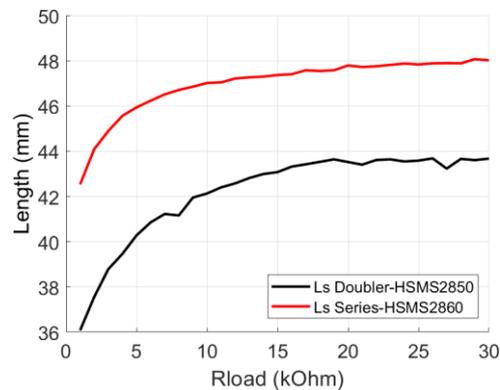


Figure 8 : Longueur des lignes microruban en série avec les redresseurs Doubleur de voltage-HSMS2850 et Série-HSMS2860

Les longueurs des lignes microrubans dans cette configuration du circuit d'adaptation dépendent de l'impédance d'entrée intrinsèque à la topologie et les diodes utilisées à une fréquence et une puissance donnée. Le meilleur rendement obtenu en utilisant cette technologie est de 71 % pour une charge de 8 k Ω et correspond à la topologie doubleur de tension et la diode HSMS2850.

4 Conclusion

Ce travail montre les considérations à prendre en compte pour la conception d'un redresseur RF dans la bande à 868 MHz et pour une puissance d'entrée de 0 dBm. Une étude avec des composants idéaux est une approche rapide qui permet notamment le choix de la topologie du circuit redresseur. Néanmoins, l'impact du réalisme dans la modélisation des composants électroniques peut changer drastiquement les performances du redresseur. Ce travail montre l'importance de prendre en compte la technologie utilisée pour choisir et concevoir un redresseur. Par la suite, ces considérations de conception seront prises en compte pour la conception et la fabrication de l'architecture complète de circuit récupérateur d'énergie capable de récolter l'énergie dans une large gamme de puissances et délivrer une tension régulée à sa charge.

5 Bibliographie

- [1] F. Ait-Aoudia, M. Gautier, M. Magno, O. Berder, et L. Benini, "Leveraging energy harvesting and wake-up receivers for long-term wireless sensor networks," *Sensors*, p. 1578, 2018.
- [2] M. -D. Wei and R. Negra, "Dynamic-Range Extension Technique based on Balanced Rectifiers," *IEEE/MTT-S International Microwave Symposium - IMS*, Philadelphia, PA, USA, 2018, pp. 1141-1143, 2018.
- [3] C. Benkalfate, A. Ouslimani, A.-E. Kasbari, and M. Feham, "A new rf energy harvesting system based on two architectures to enhance the dc output voltage for wsn feeding," *Sensors*, vol. 22, no. 9, p. 3576, 2022.
- [4] A. Benhamou, M. Tellache, S. Hebib, and H. Mahfoudi, "A wide input power range rectenna for energy harvesting and wireless power transfer applications," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 30, no. 12, p. e22461, 2020.
- [5] H. Zhang, Y. -x. Guo, Z. Zhong and W. Wu, "Cooperative Integration of RF Energy Harvesting and Dedicated WPT for Wireless Sensor Networks," in *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 29, no. 4, pp. 291-293, 2019.
- [6] J. Argote-Aguilar, F. -D. Hutu, G. Villemaud, M. Gautier et O. Berder, "Efficient Association of Low and High RF Power Rectifiers for Powering Ultra-Low Power Devices," *29th IEEE ICECS conference*, pp. 1-4, 2022.
- [7] S.-E. Adami, V. Marian, N. Degrenne, C. Vollaïre, B. Allard, and F. Costa, "Self-powered ultra-low power DC-DC converter for RF energy harvesting," in *IEEE Faible Tension Faible Consommation*, pp. 1-4, 2012.