

Confrontation de l'électronique de puissance définie par logiciel à la diversité des micro-réseaux d'énergie

Antoine Boche, Luiz Fernando Lavado Villa, Clément Foucher
LAAS-CNRS, Université de Toulouse, CNRS, UPS, Toulouse, France

RESUME - Dans ce travail, nous explorons la durabilité des micro-réseaux en adoptant une approche tirée de la théorie de la modélisation et la simulation. Pour ce faire, nous avons créé un modèle systémique qui intègre les aspects énergétiques, d'information, financiers et sociaux pour une représentation complète des micro-réseaux. La méthodologie de co-simulation a été utilisée pour examiner les interconnexions entre les différents domaines et obtenir une vue d'ensemble du système modélisé. L'utilisation de PDEVS en tant que wrapper pour la co-simulation a permis de connecter des domaines avec des modèles temporels difficiles à connecter en temps normal.

Mots-clés— Micro-réseau, durabilité, modélisation, théorie de la modélisation et de la simulation

1. INTRODUCTION

Les micro-réseaux électriques constituent une solution très prometteuse pour l'électrification de zones rurales difficiles d'accès, où l'extension du réseau électrique est complexe et coûteuse, et où les besoins en énergie dépassent ceux que peut fournir un système solaire domestique. Cependant, un défi majeur dans l'implémentation et le développement de ces micro-réseaux réside dans leur extrême diversité de configurations possibles dans les zones souhaitées.

Pour faire face à cette complexité, nous proposons ici d'étudier un type particulier de convertisseur de puissance pour s'adapter à la variété de conversions de puissance rencontrées dans les micro-réseaux et à leur stratégie générale d'implémentation. Nous suggérons en outre l'analyse d'un convertisseur de puissance modulaire et reprogrammable.

2. DE LA DIVERSITÉ DES MICRO-RÉSEAUX

En ce qui concerne la conversion de puissance, une étude approfondie des différentes méthodes utilisées dans les micro-réseaux a permis de déterminer trois aspects de grande variété de configurations possibles : une variété de types de conversion d'énergie, une variété de types de commande employée pour la stabilité de cette énergie, et une variété d'architectures de contrôle, c'est-à-dire la communication entre les convertisseurs [1].

L'existence de nombreuses possibilités pour l'implémentation de micro-réseaux dans une zone donnée complique considérablement les choix à faire et nécessite une expertise élevée pour sélectionner la topologie optimale d'un micro-réseau pour une zone spécifique [2]. La capacité d'adaptation de l'électronique de puissance définie par logiciel sera démontrée en comparant ce système à trois cas d'étude fréquemment rencontrés dans l'implémentation de micro-réseaux, ce qui permettra de mettre en évidence les possibilités étendues de ce type de système. Ce convertisseur sera

implémenté dans un cas de contrôle en mode "droop" CC, de commande maître/esclave ainsi que d'échanges de bus à courant continu.

2.1. Contrôle droop CC

Un contrôle Droop en électronique de puissance est un mécanisme de régulation qui permet d'équilibrer la consommation d'énergie et la production d'énergie dans un système électrique en utilisant des régulateurs de tension. Le contrôle Droop s'assure que la production d'énergie est équitablement répartie entre les différentes sources de production et les consommateurs, en surveillant la tension et en ajustant la production en conséquence. Le but de ce cas d'étude et de montrer la flexibilité de connexions sur un même bus grâce à l'électronique de puissance définie par logiciel.

A partir de ce cas d'étude décrit figure 1, nous démontrons :

- La possibilité de gestion d'un bus CC ;
- La flexibilité de connexion de plusieurs convertisseurs sur un même bus.

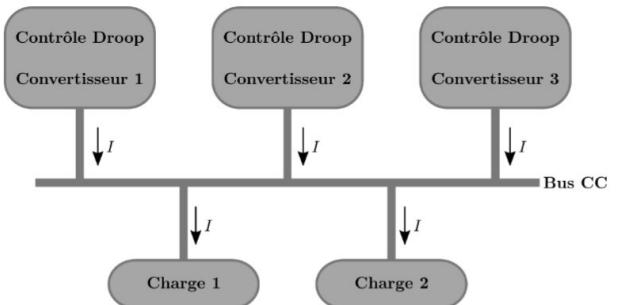


Figure 1-Contrôle droop sur un bus à courant continu

2.2. Commande maître/esclave

Le contrôle Maître/Esclave en électronique de puissance est un mécanisme de régulation qui permet de coordonner la production d'énergie des différentes sources dans un système électrique en utilisant une source de référence comme source principale. Le contrôle Maître/Esclave s'assure que la production d'énergie est en phase et en harmonie avec la source principale, en synchronisant la production des sources secondaires et en ajustant leur production en conséquence. Le but de ce cas d'étude est de montrer la flexibilité de communication grâce à l'électronique de puissance définie par logiciel.

A partir de ce cas d'étude décrit figure 2, nous démontrons:

- La possibilité de gestion de plusieurs convertisseurs;
- La flexibilité de communication entre plusieurs convertisseurs.

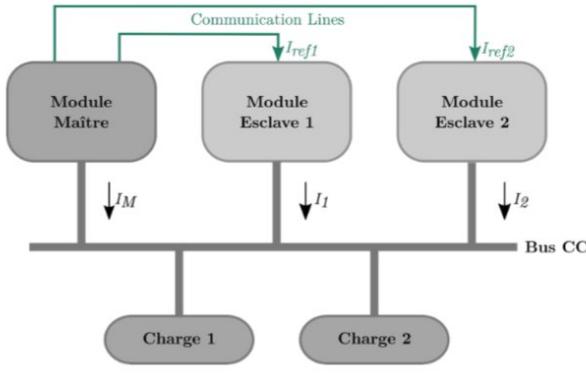


Figure 2 - Commande maître / esclave

2.3. Échanges de bus à courant continu

Le cas d'étude sur les échanges de bus à courant continu est un sujet classique dans l'étude des micro-réseaux, où les modules de puissance communiquent entre eux afin de déterminer leurs besoins énergétiques respectifs. Selon les besoins du moment, ces modules de puissance peuvent devenir producteurs s'ils ont un surplus d'énergie, être en veille s'ils n'ont pas besoin d'énergie à un moment donné, ou fonctionner en mode consommateur s'ils ont un déficit énergétique. Un bus de communication général est utilisé pour échanger des données entre les différents convertisseurs, de manière à trouver un consensus pour déterminer qui donnera de l'énergie au bus central et qui en récupérera.

A partir de ce cas d'étude décrit figure 3, nous démontrons:

- La possibilité de gestion de plusieurs bus;
- La flexibilité d'architecture de communication

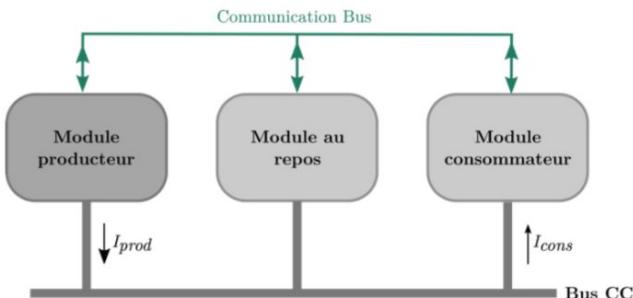


Figure 3 - Echange de bus à courant continu

3. PRÉSENTATION DU CONVERTISSEUR ÉTUDIÉ

Les Convertisseurs de Puissance Définis par Logiciel (Software-Defined Power Electronics) se concentrent sur la conception de matériel de puissance reprogrammable. Cette approche met l'accent sur la généralité d'utilisation plutôt que sur l'optimisation et vise à établir une abstraction entre le matériel de puissance et son logiciel intégré. Cette approche

offre une plus grande flexibilité dans la structure conceptuelle de la conversion de puissance, comme illustré à la figure 4.

Le convertisseur utilisé est la carte TWIST issue du projet OwnTech. Cette carte est capable de gérer des flux bi-directionnels de courant. Cela lui permet de travailler en buck, boost, en bras indépendants et AC. Les deux types de conversion qui seront utilisés dans l'étude proposée sont résumés dans les figures 4 et 5.

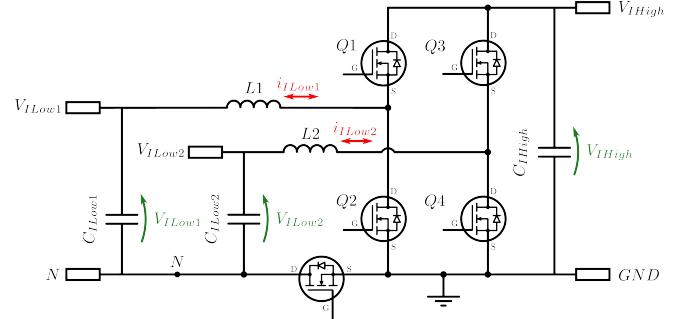


Figure 4 - Schématique du convertisseur étudié

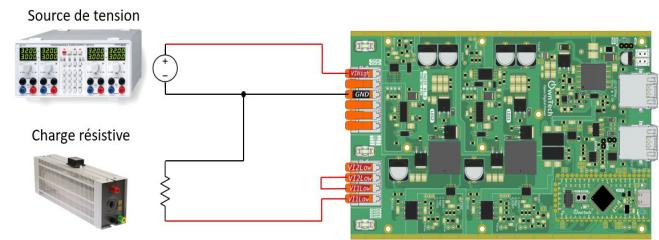


Figure 5 - Schématique d'une carte TWIST en connexion Buck

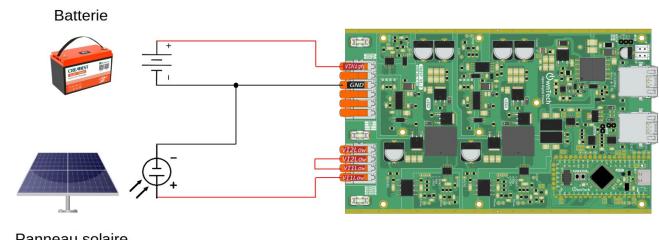


Figure 6 - Schématique d'une carte TWIST en connexion Boost

4. EXPERIMENTAL SETUP

Cet article présente trois expériences distinctes réalisées dans le domaine de l'électronique de puissance, en utilisant une approche novatrice basée sur une carte modulaire reprogrammable. L'objectif de ces expériences est de démontrer la versatilité et la modularité de cette carte en termes de contrôle des convertisseurs de puissance, ainsi que son application au sein de micro-réseaux électriques. Chaque expérience met en œuvre une conversion de puissance en mode buck, avec deux cartes de puissance connectées en parallèle. Les mesures de courant et de tension sont obtenues à l'aide des capteurs internes de la carte. Les expériences sont réalisées sur un bus à courant continu de 12 V alimentant une charge variable. La première expérience explore l'utilisation d'un contrôle droop avec des facteurs de droop différents pour chaque carte. La deuxième expérience utilise une communication analogique entre les cartes pour la

transmission d'une référence de courant. La troisième expérience utilise une communication RS485 pour la coordination de la production de courant entre les cartes.

4.1. Contrôle droop CC

La première expérience vise à alimenter le bus à courant continu en utilisant trois cartes de puissance connectées en parallèle. Chaque carte effectue une conversion de puissance en mode buck et est programmée avec un facteur de droop différent (respectivement 1.2, 1.1 et 1.6).

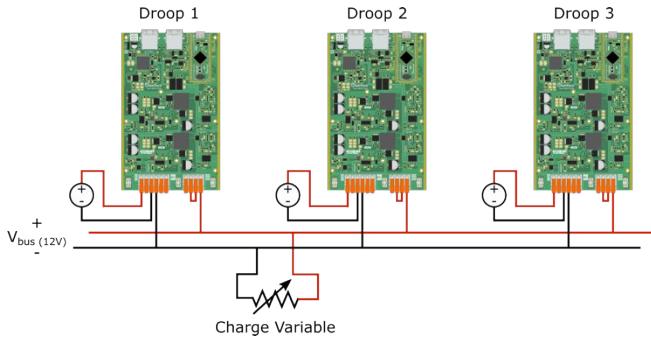


Figure 7 – Topologie d'expérience droop

La figure 7 illustre la configuration expérimentale, où les trois cartes sont connectées au bus à courant continu. Les courbes caractéristiques de droop pour chaque carte sont tracées dans la figure 8 pour valider les facteurs de droop choisis. La figure 9 présente l'évolution du courant et de la tension du bus à courant continu, ainsi que les courants mesurés sur chaque carte. Cette expérience met en évidence la robustesse du contrôle droop et démontre le bon fonctionnement des facteurs de droop sélectionnés pour chaque carte.

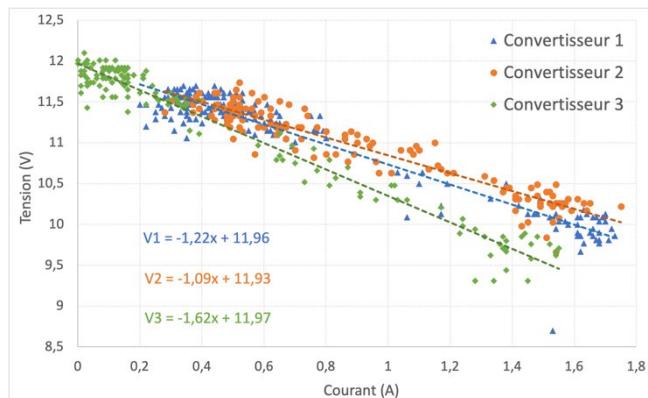


Figure 8 – Tracé des différents facteurs de droop

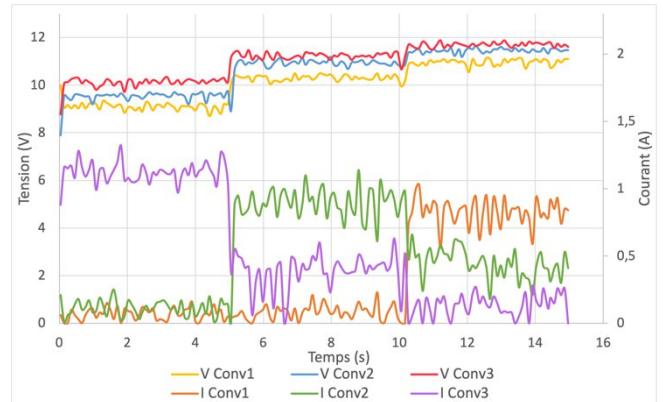


Figure 9 – Évolution des tension/courants

4.2. Commande maître/esclave

Dans la deuxième expérience, deux cartes de puissance sont connectées au bus à courant continu, accompagnées d'une charge variable.

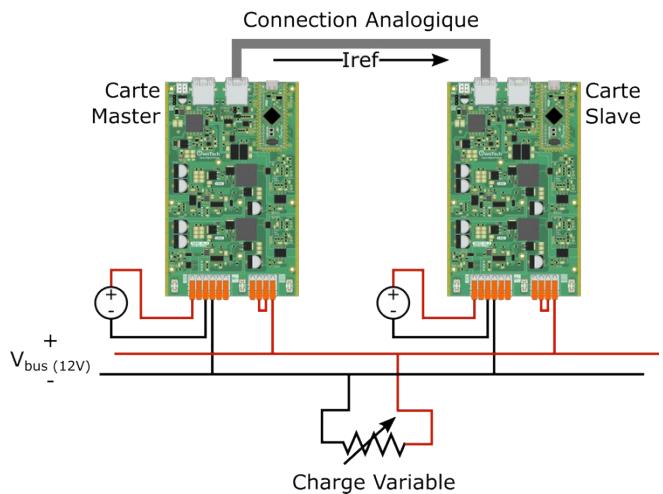


Figure 10 - Topologie d'expérience maître/esclave

La configuration expérimentale est représentée dans la figure 10. Les deux cartes sont interconnectées via une communication analogique permettant l'échange de valeurs entre 0 et 4000. La première carte est programmée en mode maître et la seconde en mode esclave. La carte maître envoie une référence de courant convertie dans la plage de données 0-4000, tandis que la carte esclave surveille en continu la communication analogique pour déterminer une nouvelle référence de courant à suivre et à injecter dans le réseau électrique. L'évolution du courant et des tensions au cours de cette expérience est présentée dans la figure 11, où l'on observe que la carte esclave suit avec précision la consigne de courant transmise par la carte maître via la communication analogique.

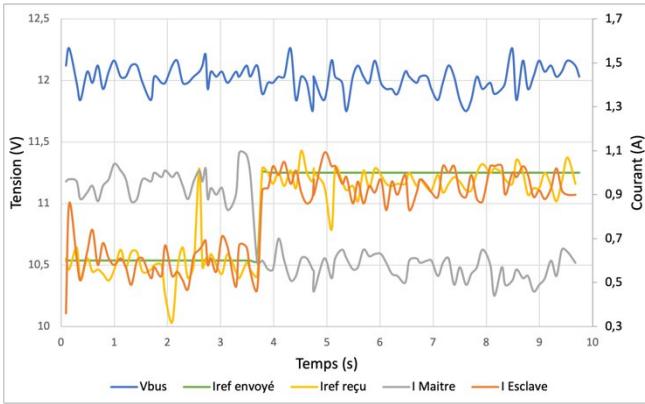


Figure 11 - Évolution des tension/courants

4.3. Échanges de bus à courant continu

La troisième expérience implique la connexion de deux cartes de puissance au bus à courant continu, accompagnées d'une charge variable. Les cartes sont interconnectées à l'aide d'une communication RS485 permettant l'échange de messages sur 8 bits.

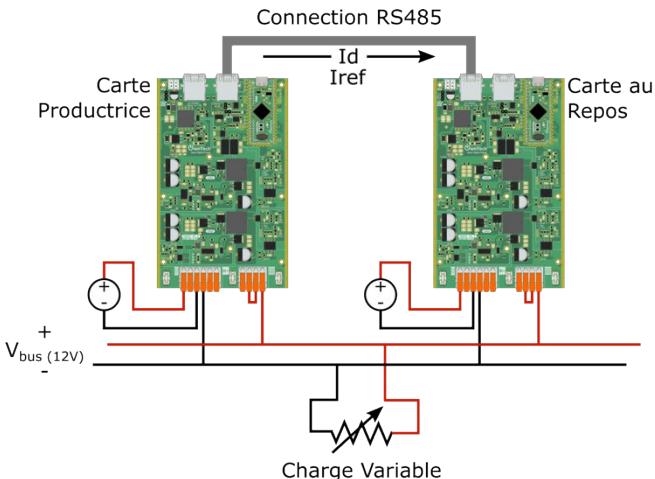


Figure 12 - Topologie d'expérience d'échange de bus à courant continu

Dans cette expérience, seuls trois des 8 bits sont utilisés. Le premier bit identifie la carte, le deuxième bit correspond à un ordre de mise à l'arrêt ou de mise en marche de la carte ciblée, et le troisième bit représente une valeur de courant de référence. La première carte est programmée pour ne pas dépasser 1 A de courant de sortie. Lorsque la charge diminue et que le courant du bus augmente au-delà de 1 A, la carte productrice envoie un message à la carte au repos pour l'activer et lui permettre de récupérer une partie du courant du bus. Ainsi, la première carte reste en dessous de la limite de 1 A. La topologie de cette expérience est illustrée dans la figure 12. Les courbes de courant de chaque carte sont représentées dans la figure 13, montrant le déclenchement de la carte au repos lorsque la première carte atteint 1 A. Lorsque le courant diminue considérablement, la carte au repos se désactive, permettant à la première carte de répondre seule à la demande de courant du réseau.

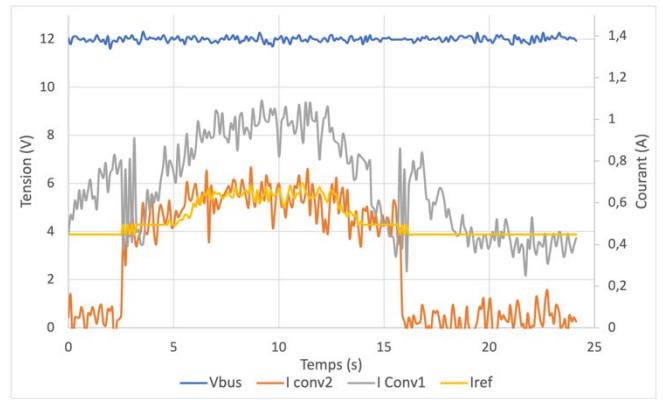


Figure 13 - Évolution des tension/courants

5. CONCLUSION

Les micro-réseaux électriques constituent une solution très prometteuse cependant, un des défis majeurs associés à leur implémentation est l'extrême diversité de configurations possibles. Cet article propose de confronter un convertisseur de puissance générique et reconfigurable à 3 cas classiques des micro-réseaux : droop CC, maître/esclave et échanges à bus DC (peer-to-peer).

La structure du convertisseur a été présentée et les deux types de connexions qui seront utilisées ont été illustrées. Ces expériences démontrent les différentes approches de commande de convertisseurs de puissance dans un micro-réseau électrique en utilisant une carte modulaire reprogrammable. Les résultats obtenus mettent en évidence la faisabilité et l'efficacité des méthodes de contrôle utilisées, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles recherches dans ce domaine prometteur de l'électronique de puissance.

6. REFERENCES

- [1] Santoro, D., Delmonte, N., Simonazzi, M., Toscani, A., Rocchi, N., Sozzi, G., ... & Menozzi, R. (2023). Local Power Distribution—A Review of Nanogrid Architectures, Control Strategies, and Converters. *Sustainability*, 15(3), 2759.
- [2] A. Boche, C. Foucher, and L. F. L. Villa, "Understanding Microgrid Sustainability: A Systemic and Comprehensive Review," *Energies*, vol. 15, p. 2906, Jan. 2022