

Titre de la thèse : Pilotage distribué des micro-réseaux cellulaires : Vers une formation résiliente, stable et flexible

Thesis title : Distributed Control of Cellular Microgrids: Towards Resilient, Stable, and Flexible Operation

Laboratoire d'accueil / Host Laboratory : FEMTO-ST Research Institute - UMR CNRS

Spécialité du doctorat préparé/Speciality : Automatique / Automatic

Mots-clefs : réseau de micro-réseaux, système de système, gestion des flux de puissance en temps réel, stabilité, flexibilité, résilience.

Keywords: microgrid network, system of systems, real-time power flow management, stability, flexibility, resilience.

Descriptif détaillé de la thèse

Dans le but d'améliorer la fiabilité et la résilience des micro-réseaux de grande taille (macro-réseaux), en parallèle avec le développement des systèmes cyberphysiques, de nombreuses études récentes recommandent de diviser le macro-réseau en plusieurs cellules autonomes. Une cellule est caractérisée comme étant la plus petite partie du réseau capable de fonctionner de manière indépendante en exploitant ses propres ressources, telles que les Ressources Énergétiques Distribuées (RED) et les charges. Par conséquent, chaque cellule doit être capable de fonctionner lorsque le macro-réseau principal subit des défaillances en raison de perturbations. En outre, cela permet une meilleure adaptation aux conditions variables du système au fil du temps grâce à une gestion décentralisée et flexible des cellules pouvant être reconfigurées de manière dynamique.

La question scientifique centrale de cette recherche vise à élaborer des stratégies de coordination des flux de puissance en temps réel, capables d'aborder la structure hiérarchique de contrôle d'un macro-réseau dans son ensemble. Cette approche de contrôle unifiée et intégrée doit atteindre les objectifs suivants :

- Maximiser les indices d'autoconsommation au niveau des bâtiments et des charges.
- Coordonner les flux de puissance sur des échelles de temps correspondant à la dynamique du macro-réseau, en assurant des consignes optimales pour les RED en fonction de l'état actuel du système et des prévisions des conditions ambiantes.
- Réguler de manière harmonieuse les tensions et les fréquences malgré des fluctuations importantes des sources, des charges et des changements de topologie (connexion et déconnexion des RED et des charges).
- Proposer une approche constructive qui démontre la stabilité [1] du micro-réseau et permet d'évaluer la zone de stabilité.

Ces objectifs doivent être atteints tout en respectant diverses contraintes, telles que les plages de paramètres de fonctionnement, les limites des actifs, les problèmes de réseau, le cadre réglementaire, législatif et juridique, les contraintes du marché et les temps de communication.

Sur le plan technique, un système de gestion de l'énergie fiable et efficace implique de résoudre un problème d'optimisation non linéaire, multi objectif et soumis à des contraintes. La conception d'une méthodologie d'optimisation en temps réel adaptée pour répondre à ces exigences représente un défi important.

Ce sujet de thèse porte sur l'élaboration d'une approche de pilotage pour les micro-réseaux interconnectés (macro-réseau) dans un contexte de « système de systèmes », garantissant un fonctionnement résilient, stable et évolutif pour les ressources d'énergie renouvelable qui le composent. Le macro-réseau peut être considéré comme un système constitué de nombreuses cellules, et son fonctionnement dépend de ces différentes "cellules". Associées à une infrastructure de communication distribuée, elles forment un système cyber physique. Le contrôle de ce système peut être abordé selon le paradigme des systèmes de systèmes : chaque cellule du macro-réseau est modélisée, et une loi de pilotage des flux de puissance et de la couche opérationnelle est synthétisée pour l'optimisation des DER sans communication intercellulaire, afin de réguler les tensions de distribution et de gérer les pics de demande. Un système de supervision intelligent coordonne les cellules pour la reconfiguration du réseau et la restauration du service, garantissant une résilience et une stabilité optimales en temps réel.

Verrous scientifiques et techniques : Les méthodes conventionnelles de gestion de l'énergie OPF [2] (Optimal Power Flow) pour les micro-réseaux sont structurées de manière hiérarchique, créant une disjonction entre les niveaux de contrôle en fonction de l'échelle temporelle et de la dynamique concernée. Elles reposent généralement sur une séparation temporelle combinant l'optimisation anticipative hors ligne et des contrôleurs de bas niveau (*droop* [3], *AGC*). La forte intermittence des sources d'énergie renouvelable et des charges, les incertitudes paramétriques dans la modélisation des composants du micro-réseau et les éventuels problèmes de communication peuvent rendre la synthèse hiérarchique sous-optimale sans garantir la régulation souhaitée.

Deux approches seront explorées pour aborder ces objectifs :

- En exploitant la notion d'homogénéité [4, 5], qui se base sur la convergence et la stabilisation en temps fini [6, 7, 8], il est envisageable de séparer et de hiérarchiser dans le temps les processus de contrôle et d'optimisation distribués dans l'espace, tout en respectant des contraintes temporelles strictes. Cette approche simplifie considérablement l'analyse et la conception de solutions à grande échelle pour les systèmes interconnectés (cyber-physiques). En somme, cette méthode permet de faciliter la gestion de ces systèmes complexes.
- Commande prédictive basée sur un apprentissage partiel, où ces contrôleurs utilisent un modèle physique de base du système, partiellement connu, et y ajoutent une couche d'apprentissage pour compenser la partie inconnue du modèle, combinant les caractéristiques de stabilité de la conception basée sur un modèle et les avantages du modèle d'apprentissage libre en termes de convergence rapide et de robustesse aux incertitudes

Description of the thesis:

In order to improve the reliability and resilience of large microgrids (macro-grids), in parallel with the development of cyber-physical systems, many recent studies recommend dividing the macro-grid into several autonomous cells. A cell is characterized as the smallest part of the network capable of operating independently by exploiting its own resources, such as Distributed Energy Resources (DER) and loads. Therefore, each cell must be able to operate when the main macro-grid fails due to disturbances. In addition, this allows for better adaptation to changing system conditions over time through decentralized and flexible management of cells that can be dynamically reconfigured. The central scientific question of this research is to develop real-time power flow coordination strategies that can address the hierarchical control structure of a macro network as a whole. This unified and integrated control approach should achieve the following objectives:

- Maximize self-consumption indices in buildings and load level.
- Coordinate power flows on time scales corresponding to the dynamics of the macro-grid, ensuring optimal set points for DERs based on current system status and forecasted ambient conditions.

- Smoothly regulate voltages and frequencies despite large fluctuations in sources, loads and topology changes (connection and disconnection of DERs and loads).
- Propose a constructive approach that demonstrates the stability [1] of the microgrid and allows the stability zone to be assessed.

These objectives must be achieved while respecting various constraints, such as operating parameter ranges, asset limitations, network issues, regulatory, legislative, and legal frameworks, market constraints and communication times.

Technically, a reliable and efficient energy management system involves solving a non-linear, multi-objective and constrained optimization problems. The design of a real-time optimization methodology adapted to meet these requirements is a major challenge.

This thesis topic focuses on the development of a control approach for interconnected microgrids (macrogrid) in a "system of systems" context, guaranteeing resilient, stable, and scalable operation for the renewable energy resources that make it up.

The macro-grid can be seen as a system made up of many cells, and its functioning depends on these different "cells". Together with a distributed communication infrastructure, they form a cyber-physical system. The control of this system can be approached according to the system of systems paradigm: each cell of the macro-grid is modelled, and a power flow and operational layer control law is synthesized for the optimization of DERs without inter cell communication, to regulate distribution voltages and to manage peak demand. An intelligent supervisory system coordinates the cells for the network reconfiguration and service restoration, ensuring optimal resilience and stability in real time.

Scientific and technical challenges: Conventional OPF [2] (Optimal Power Flow) energy management methods for microgrids are hierarchically structured, creating a disjunction between control levels depending on the time scale and dynamics involved. They are usually based on a temporal separation combining offline feedforward optimization and low-level controllers (*droop* [3], AGC). The high intermittency of renewable energy sources and loads, parametric uncertainties in the modelling of microgrid components and possible communication problems can make hierarchical synthesis suboptimal without guaranteeing the desired control.

Two approaches will be explored to address these objectives:

- By exploiting the notion of homogeneity [4, 5], which is based on convergence and stabilization in finite time [6, 7, 8], it is possible to separate and prioritize spatially distributed control and optimization processes in time, while respecting strict temporal constraints. This approach greatly simplifies the analysis and design of large-scale solutions for interconnected (cyber-physical) systems. In sum, this method facilitates the management of these complex systems.
- Partial learning based predictive control, where these controllers use a basic, partially known physical model of the system and add a learning layer to compensate for the unknown part of the model, combining the stability characteristics of the model-based design with the advantages of the free learning model in terms of fast convergence and robustness to uncertainties.

Références bibliographiques / Bibliography

- [1] M. Farrokhhabadi et al, *Microgrid Stability Definitions, Analysis, and Examples*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 35, no. 1, pp. 13-29, Jan. 2020.
- [2] V.A. Evangelopoulos, P.S. Georgilakis, N.D. Hatziargyriou, *Optimal operation of smart distribution networks: A review of models, methods and future research*, Electr. Power Syst. Res., 140 (2016), pp. 95-106
- [3] Bolognani, R. Carli, G. Cavraro, S. Zampieri, *On the need for communication for voltage regulation of power distribution grids*, IEEE Transactions on Control of Network Systemsn 6(3) (2019) 1111–1123.

- [4] L.Fridman, D. Efimov, S. Laghrouche, *Homogeneous Sliding-Mode Control and Observation*, Int. J. Robust & Non. Cont. SI. 31(9), 2021.
- [5] M. Harmouche, S. Laghrouche et al. *Stabilisation of perturbed chains of integrators using Lyapunov-based homogeneous controllers*, Int. J. of Cont., 90(12) 2017.
- [6] Y. Chitour, M. Harmouche, S. Laghrouche, *Lp-stabilization of integrator chains subject to input saturation using Lyapunov-based homogeneous design*, SIAM Journal on Control and Optimization, 53(4) 2015.
- [7] S. Laghrouche et al. *Higher Order Super-Twisting for Perturbed Chains of Integrators*, IEEE Trans. on Automatic Control, 62(7) 2017.
- [8] S. Laghrouche et al. *Barrier Function-Based Adaptive Higher Order Sliding Mode Controllers*, Automatica, Volume 123, 2021.

Profil demandé

Il est requis d'avoir une forte motivation pour la recherche scientifique et de posséder des compétences avancées en langue anglaise. Le candidat doit également faire preuve de rigueur, de méthode, d'autonomie et de compétences pratiques en simulation, analyse et présentation des données. Un Master 2 ou équivalent avec d'excellentes notes est nécessaire, ainsi que des connaissances solides en automatique, optimisation et génie électrique.

Candidate profile:

A strong motivation for scientific research and advanced English language skills are required. The candidate must also demonstrate rigor, method, autonomy and practical skills in simulation, data analysis and presentation. A master's degree or equivalent with excellent grades is required, as well as a strong background in control theory, optimization, and electrical engineering.

Financement : MESRI Etablissement

Dossier à envoyer pour le 05 juin 2023 / Closing date for the application is June 5th, 2023

Début du contrat : 1^{er} Octobre 2023 / Start of the Contract : October, 1st, 2023

Salaire mensuel brut : 1975€ / Gross monthly Salary : 1975€

Direction de la thèse:/ Thesis Supervisor : LAGHROUCHE SALAH, salah.laghrouche@utbm.fr

Encadrement de la thèse : co-directeur(s) et co-encadrant(s) : AIT-AMIRAT YUCEF / Qualité durant la thèse (co-directeur), youcef.ait-amirat@univ-fcomte.fr

Documents à fournir par le candidat :

- CV
- Lettre de motivation
- Relevés de notes avec classements en M1 et M2
- Lettre(s) de recommandation

List of documents to be provided:

- CV
- Cover Letter
- Academic transcript and ranking of Master 1 and 2
- Letter(s) of recommendation.