

(English version Bellow)

Sujet de thèse projet ciblé Tec 1.1 – Lot 3.1

Lot 3.1 : Stratégies de pilotage, de protection pour une gestion fiabilité des réseaux mixtes AC et DC

Titre Thèse : Outil méthodologique pour l'analyse de la stabilité de réseaux MVDC à structure variable

Contexte :

Le MVDC (Medium Voltage Direct Current ou courant continu à moyenne tension) s'adresse aux exploitants de réseaux électriques désireux de l'agrandir pour accueillir plus de sources (renouvelables) ou de charges (véhicules électriques par ex.) afin de proposer une solution de production décentralisée et renouvelable (jusqu'à 200 km de distance et 20-100kV).

Les sources d'énergie renouvelables et de stockage sont reliées à un micro-réseau MVDC par des convertisseurs de puissance régulés qui sont connectés entre eux par des filtres et des lignes passives. Dans le cas d'une unité de production unique, le convertisseur associé est à haut rendement et régulé avec des dynamiques élevées pour garantir la qualité de la tension du bus DC tout en assurant des marges de stabilité satisfaisantes. Du fait de l'intermittence des sources d'énergies renouvelables et de l'imprévision des charges se connectant au réseau, la stabilité du fonctionnement de l'ensemble devient une tâche importante à garantir ou à définir les conditions pour lesquelles le réseau sera stable. Ainsi, pour ce réseau, plusieurs unités de production peuvent s'interconnectées pour former un système décentralisé de DG (Decentralized Generators) qui alimente plusieurs charges. Dans ces systèmes complexes, en raison de la faible inertie et des interactions possibles entre les différentes bandes passantes (contrôleurs, filtres passifs, communication), une instabilité peut se produire, en particulier dans des conditions de charge contraignantes. Ceci est particulièrement critique lors de l'alimentation de charges à puissance constante (CPL : Constant Power Load), la reconfiguration de l'architecture du réseau suite à la connexion ou déconnexion des unités DG ou charges, et d'une éventuelle expansion du système pour agréger de nouvelles sources et/ou charges. De telles contraintes entraînent des problèmes de stabilité sur des échelles de temps étendues allant de quelques millisecondes à plusieurs minutes.

Actions :

Une première phase consiste à obtenir un modèle du réseau MVDC avec les DG et les convertisseurs associés (modèle analytique et/ou de simulation). Une mise à l'échelle d'un réseau réelle ainsi que la prise en compte d'un standard normalisée sera indispensable. Une phase d'analyse de la stabilité de l'ensemble en découle avec comme degré de liberté le contrôle des convertisseurs ou une action sur la topologie par la connexion et déconnexion des DG.

Une stratégie de contrôle hiérarchique est à prospecter afin d'apporter une preuve de stabilité globale de l'ensemble de réseau en présence de larges perturbations tout en intégrant l'expansion potentielle du système.

Etapes envisagées :

- Etat de l'art des outils pour l'étude et l'analyse de stabilité statique et dynamique des systèmes énergétiques et des réseaux DC ou AC (spectroscopie d'impédance, méthodes de Lyapunov,...).
- Etude des méthodes de synthèse de type larges signaux afin de dégager une formulation générique et généralisable en cas de reconfiguration de l'architecture du réseau MVDC ou de son expansion. Le concept de passivité, basé sur le formalisme Hamiltonien, semble adapté pour appréhender la problématique.
- Elaboration de stratégies de contrôle hiérarchique (droop, consensus...) du réseau MVDC permettant de garantir la résilience du système et de maintenir la stabilité sous de grandes perturbations (impacts de charges, connexion et déconnexion d'une ou plusieurs unités DG, et problèmes liés aux moyens de communication (retards, pertes)).
- Recherche d'une preuve de stabilité globale des stratégies développées en présence de larges perturbations.
- Développement de techniques de stabilisation actives respectant le formalisme retenu face à des phénomènes de résonances (stabilité haute-fréquences), induits notamment par de possibles interactions filtres-commandes.
- Validation des stratégies hiérarchiques développées sur un réseau de référence MVDC avec un environnement HIL.

Références bibliographiques :

[RICL_1] Khefifi N., Houari A., Machmoum M., Ghanes M., " *Generalized IDA-PBC control using enhanced decoupled power sharing of parallel distributed generators in standalone microgrids* ", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. DOI: 10.1109/JESTPE.2020.3034464,

[RICL_2] A. Saim, A. Houari, J.M. Guerrero, A. Djerioui, M. Ait Ahmed and M. Machmoum, "Stability Analysis and Robust Damping of Multi-Resonances in Distributed Generation based Islanded Microgrids", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 66, pp. 8958- 8970, 2019. DOI: 10.1109/TIE.2019.2898611

[RICL_3] X. Li, M. Zhu, Y. Li and X. Cai, "Cascaded MVDC Integration Interface for Multiple DERs With Enhanced Wide-Range Operation Capability: Concepts and Small-Signal Analysis," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 2, pp. 1182-1188, Feb. 2020, doi: 10.1109/TPEL.2019.2932402.

[KON] Kong, Suyao | Bressel, Mathieu | Hilaiet, Mickaël | Roche, Robin, Advanced passivity-based, aging-tolerant control for a fuel cell/super-capacitor hybrid system, Control Engineering Practice, Volume 105, dec 2020, Pages :104636 (11)

[HIL] Hilaiet, Mickaël | Béthoux, Olivier | Ghanes, Malek | Tanasa, Valentin | Barbot, Jean-Pierre |

Normand-Cyrot, Marie-Dorothee, Experimental validation of a sampled-data passivity-based controller for coordination of converters in a fuel cell system, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume 62, Issue (8), aug 2015, Pages :5187 – 5194.

[LIU] Liutanakul, S. Pierfederici et F. Meibody-Tabar, Application of SMC with I/O Feedback Linearization to the Control of the Cascade controlled - Rectifier/Inverter - Motor Drive System with Small DC-Link Capacitor, IEEE Transaction on Power Electronics, vol. 23, n° 5, sept. 2008, pp.2489-2500.

[MAG] P. Magne, B. Nahid-Mobarakeh, S. Pierfederici, « Large-signal Stabilization of a DC-link Supplying à Constant Power Load: Impact on the Domain of Attraction », in IEEE Trans. on Industry Applications, 2012

[PAN] S Pang, B Nahid-Mobarakeh, SA Hashjin, S Pierfederici, JP Martin, Y Liu, ‘Stability Improvement of Cascaded Power Conversion Systems Based on Hamiltonian Energy Control Theory’, IEEE Transactions on Industry Applications, vol.57, no.1, pp.1081-1093, 2020/11/16, 10.1109/TIA.2020.3038355.

[Sou]S Soued, HS Ramadan, M Becherif, “Effect of Doubly Fed Induction Generator on Transient Stability Analysis under Fault Conditions”, Energy Procedia 162, 315-324, DOI: 10.1016/j.egypro.2019.04.033. 2019

[Ben] A Benmouna, M Becherif, “Combined passivity-based control and optimal control for energy management of fuel cell/battery hybrid system”, Asian Journal of Control, <https://doi.org/10.1002/asjc.2133>. 2019.

Laboratoire d'accueil : Femto-ST UMR CNRS 6174, bâtiment F, UTBM, rue Thierry Mieg 90010 Belfort Cedex

Encadrants:

Mohamed Becherif: UTBM, Femto-ST, Mohamed.becherif@utbm.fr

Amel Benmouna: ESTA, Femto-ST, abenmouna@esta-groupe.fr

Youcef Ait Amirat, UFC, Femto-ST, Youcef.ait-amirat@univ-fcomte.fr

Serge Pierfederici, LEMTA-ENSEM, serge.pierfederici@univ-lorraine.fr

Démarrage : 01-09-2025, durée : 36 mois

Rémunération : selon salaire minimum en vigueur sur projet PEPR TASE Architect (CNRS)

Niveau de recrutement : Ingénieur, Master 2

Procédure pour candidater : Envoi de CV + lettre de motivation aux mails des encadrants

Compétences attendues : Bases solides en Automatique, Génie Electrique, Matlab, Convertisseurs de puissance, des compétences en expérimentation et montage de bancs de tests seraient appréciées

PhD Topic – Targeted Project Tec 1.1 – Work Package 3.1

Work Package 3.1: Control and Protection Strategies for Reliability Management of Hybrid AC and DC Networks

PhD Title: Methodological Tool for the Stability Analysis of Variable Structure MVDC Networks

Context:

MVDC (Medium Voltage Direct Current) targets power network operators aiming to expand their grid to integrate more sources (renewable) or loads (such as electric vehicles), offering a decentralized and renewable production solution (up to 200 km distance and 20–100kV).

Renewable energy and storage sources are connected to an MVDC microgrid through regulated power converters that are interconnected via filters and passive lines. In the case of a single production unit, the associated converter is high-efficiency and regulated with fast dynamics to ensure bus voltage quality while maintaining sufficient stability margins. Due to the intermittent nature of renewable energy sources and unpredictable load connections, ensuring stable operation becomes crucial—or at least determining the conditions under which the network remains stable.

In this kind of network, multiple generation units can interconnect to form a decentralized generator (DG) system that powers multiple loads. In such complex systems, due to low inertia and possible interactions between different bandwidths (controllers, passive filters, communication), instability may occur, particularly under demanding load conditions. This is especially critical when supplying Constant Power Loads (CPL), during reconfiguration of the network following DG/load connection or disconnection, or during potential system expansion to integrate new sources and/or loads. These constraints lead to stability issues across extended timescales, ranging from a few milliseconds to several minutes.

Actions:

An initial phase consists of developing an MVDC network model with DGs and associated converters (analytical and/or simulation model). Scaling of a real network and compliance with standardization will be essential. A subsequent stability analysis will be conducted, leveraging converter control or topology adjustment via DG connection/disconnection.

A hierarchical control strategy will be explored to provide proof of global network stability in the presence of large disturbances while considering the potential for system expansion.

Planned Steps:

- Literature review on tools for static and dynamic stability analysis of energy systems and DC/AC networks (impedance spectroscopy, Lyapunov methods, etc.).
 - Study of large-signal synthesis methods to develop a generic and scalable formulation applicable in case of network reconfiguration or expansion. The concept of passivity, based on Hamiltonian formalism, appears suitable to tackle this issue.
 - Design of hierarchical control strategies (droop, consensus...) for the MVDC network to ensure system resilience and maintain stability under large disturbances (load impacts, connection/disconnection of one or several DG units, and issues linked to communication systems such as delays and losses).
 - Establish proof of global stability for the developed strategies under significant disturbances.
 - Development of active stabilization techniques in line with the chosen formalism, to address resonance phenomena (high-frequency stability), notably caused by filter-controller interactions.
 - Validation of the developed hierarchical strategies on a reference MVDC network within a HIL (Hardware-In-the-Loop) environment.
-

Bibliography:

- [RICL_1] Khefifi N., Houari A., Machmoum M., Ghanes M., “ *Generalized IDA-PBC control using enhanced decoupled power sharing of parallel distributed generators in standalone microgrids* “, IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. DOI: 10.1109/JESTPE.2020.3034464,
- [RICL_2] A. Saim, A. Houari, J.M. Guerrero, A. Djerioui, M. Ait Ahmed and M. Machmoum, "Stability Analysis and Robust Damping of Multi-Resonances in Distributed Generation based Islanded Microgrids", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 66, pp. 8958- 8970, 2019. DOI: 10.1109/TIE.2019.2898611
- [RICL_3] X. Li, M. Zhu, Y. Li and X. Cai, "Cascaded MVDC Integration Interface for Multiple DERs With Enhanced Wide-Range Operation Capability: Concepts and Small-Signal Analysis," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 2, pp. 1182-1188, Feb. 2020, doi: 10.1109/TPEL.2019.2932402.
- [KON] Kong, Suyao | Bressel, Mathieu | Hilaiet, Mickaël | Roche, Robin, Advanced passivity-based, aging-tolerant control for a fuel cell/super-capacitor hybrid system, Control Engineering Practice, Volume 105, dec 2020, Pages :104636 (11)
- [HIL] Hilaiet, Mickaël | Béthoux, Olivier | Ghanes, Malek | Tanasa, Valentin | Barbot, Jean-Pierre | Normand-Cyrot, Marie-Dorothée, Experimental validation of a sampled-data passivity-based controller for coordination of converters in a fuel cell system, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume 62, Issue (8), aug 2015, Pages :5187 – 5194.
- [LIU] Liutanakul, S. Pierfederici et F. Meibody-Tabar, Application of SMC with I/O Feedback Linearization to the Control of the Cascade controlled - Rectifier/Inverter - Motor Drive System with Small DC-Link Capacitor, IEEE Transaction on Power Electronics, vol. 23, n° 5, sept. 2008, pp.2489-2500.
- [MAG] P. Magne, B. Nahid-Mobarakeh, S. Pierfederici, « Large-signal Stabilization of a DC-link Supplying à Constant Power Load: Impact on the Domain of Attraction », in IEEE Trans. on Industry Applications, 2012
- [PAN] S Pang, B Nahid-Mobarakeh, SA Hashjin, S Pierfederici, JP Martin, Y Liu, ‘Stability Improvement of Cascaded Power Conversion Systems Based on Hamiltonian Energy Control

Theory', IEEE Transactions on Industry Applications, vol.57, no.1, pp.1081-1093, 2020/11/16, 10.1109/TIA.2020.3038355.

[Sou]S Soued, HS Ramadan, M Becherif, "Effect of Doubly Fed Induction Generator on Transient Stability Analysis under Fault Conditions", Energy Procedia 162, 315-324, DOI: 10.1016/j.egypro.2019.04.033. 2019

[Ben] A Benmouna, M Becherif, "Combined passivity-based control and optimal control for energy management of fuel cell/battery hybrid system", Asian Journal of Control, <https://doi.org/10.1002/asjc.2133>. 2019.

Hosting Laboratory:

Femto-ST UMR CNRS 6174, Building F, UTBM, rue Thierry Mieg 90010 Belfort Cedex, France

Supervisors:

- Mohamed Becherif: UTBM, Femto-ST – mohamed.becherif@utbm.fr
- Amel Benmouna: ESTA, Femto-ST – abenmouna@esta-groupe.fr
- Youcef Ait Amirat: UFC, Femto-ST – youcef.ait-amirat@univ-fcomte.fr
- Serge Pierfederici: LEMTA-ENSEM – serge.pierfederici@univ-lorraine.fr

Start Date: September 1, 2025

Duration: 36 months

Salary: According to current minimum salary regulations on National PEPR TASE Architect project (CNRS)

Required Degree: Engineering Degree, Master's Degree (M2)

Application Procedure: Send CV + cover letter to the supervisors' email addresses

Expected Skills: Strong background in Control Systems, Electrical Engineering, Matlab, Power Converters. Skills in experimentation and test bench assembly are appreciated.