

Avis de Soutenance

Sadaqat ALI

Soutiendra publiquement ses travaux de thèse intitulés

« Energy management of multi-source DC microgrid systems for residential applications »

Le vendredi 29 septembre 2023 à 10h00

Amphithéâtre - CentraleSupélec

2 rue Edouard Belin, 57070 Metz

Laboratoire Matériaux Optiques, Photonique et systèmes (LMOPS)
Université de Lorraine & CentraleSupélec

Directeurs de thèse : M. Michel Aillerie & Mme. Zhixue Zheng

Composition du jury

Rapporteurs : M. Gilles Notton, Pr, Université de Corsica, Ajaccio, France
Mme. Anne Migan Dubois, Pr, GeePs, Université Paris Saclay, Paris, France

Examineurs : M. Claude Delpha, Pr, L2S, Université Paris Saclay, Paris, France
Mme. Melika Hinaje, Pr, GREEN, Université de Lorraine, Nancy, France

M. Damien Guilbert, Pr, GREAH, Université Le Havre Normandie, Le Havre, France

Invité : M. Javier Solano, Dr, European Institute for Energy Research, Karlsruhe, Germany

Abstract

Over the last decade, remarkable progress has been made in the penetration of renewable energy sources (RES) for residential applications. Compared with AC microgrid, DC microgrid has demonstrated numerous advantages such as its natural interface with RES, energy storage systems and DC loads, higher efficiency with less conversion stages, and simpler control without skin effect and reactive power flow considerations. Despite its numerous advantages and wide applications, DC microgrid is still a relatively new technology, and its grid architectures, control strategies, stabilization techniques, etc. deserve enormous research efforts. In this context, this thesis is targeted at the energy management issues of a multi-source DC microgrid dedicated to residential applications. The DC microgrid consists of distributed generators (PV panels), a hybrid energy storage system (HESS) with batteries and a supercapacitor (SC), and DC loads, interconnected via DC /DC power converters. The main objective of this research is the development of an advanced energy management strategy (EMS) to improve the system operational efficiency while reinforcing its reliability and durability.

In one aspect, a hierarchical DC microgrid simulation platform was developed under MATLAB/Simulink environment. The simulation platform consists of two layers with different

timescales, i.e., a local level control layer (with a timescale from seconds to minutes due to converter switching behaviors) for local component controls, and a system-level control layer (with a timescale from days to months with accelerated test) for long-term EMS validation and its performance evaluation. In the local-level control layer, PV panel, batteries and SC were separately modeled and controlled. Different control modes such as current control, voltage control and maximum power point tracking (MPPT) control were implemented.

To split the total HESS power into low and high frequency components for batteries and SC, respectively, a low pass filter (LPF) was applied and the influence of different cut-off frequencies of the LPF for power sharing was studied as well. In the system-level control layer, a combined automatic sizing and bi-level hybrid EMS was proposed and validated. It mainly covers five operating scenarios including PV curtailment, load shedding and three scenarios via HESS control associated with SC state of charge (SOC) retaining hysteresis control. Meanwhile, an objective function considering both capital cost (CAPEX) and operating cost (OPEX) functions was designed for EMS performance evaluation. The mutual effect between the HESS sizing and EMS design was jointly studied based on an open dataset of residential power profiles covering both summer and winter.

In the other aspect, a multi-source DC microgrid experimental platform was developed as part of this work in the laboratory for real-time EMS validation. It consists of four lithium-ion batteries, a supercapacitor, a programmable DC power supply, a programmable DC load, corresponding DC/DC converters, and a real-time controller (dSPACE/Microlabbox). Accelerated tests were carried out to verify the proposed EMS in different operating scenarios by integrating real PV generation and load consumption power profiles into programmable DC supply and load. Both the developed hierarchical DC microgrid simulation platform and the experimental platform can serve as general uses for verifying and evaluating various EMS.

Keywords: DC microgrid; renewable energy sources; energy management strategy; EMS testbench evaluator; hybrid energy storage system; rule-based EMS; filtration-based EMS.

Résumé

Au cours de la dernière décennie, d'importants progrès ont été réalisés dans la pénétration des sources d'énergie renouvelable (RES) pour les applications résidentielles. Comparé au réseau électrique alternatif (AC), le réseau électrique en courant continu (DC) a démontré de nombreux avantages tels que son interface naturelle avec les RES, les systèmes de stockage d'énergie et les charges en courant continu, une efficacité supérieure avec moins d'étapes de conversion, et un contrôle plus simple sans effet de peau et sans considérations sur le flux de puissance réactive. Malgré ses nombreux avantages et ses applications étendues, le micro-réseaux DC reste une technologie relativement nouvelle, et ses architectures de réseau, stratégies de contrôle, techniques de stabilisation, etc. méritent d'énormes efforts de recherche. Dans ce contexte, cette thèse porte sur les problèmes de gestion de l'énergie d'un réseau électrique en courant continu multi-source dédié aux applications résidentielles. Le réseau électrique en courant continu est composé de générateurs distribués (panneaux solaires), d'un système de stockage d'énergie hybride (HESS) avec des batteries et un supercondensateur (SC), et de charges en courant continu, interconnectées via des convertisseurs de puissance DC/DC. L'objectif principal de cette recherche est de développer une stratégie avancée de gestion de l'énergie (EMS) afin d'améliorer l'efficacité opérationnelle du système tout en renforçant sa fiabilité et sa durabilité.

Dans un aspect, une plateforme de simulation hiérarchique de réseau électrique en courant continu a été développée sous l'environnement MATLAB/Simulink. La plateforme de simulation est composée de deux couches avec des échelles de temps différentes, à savoir une couche de contrôle de niveau

local (avec une échelle de temps de quelques secondes à quelques minutes en raison des comportements de commutation des convertisseurs) pour les contrôles des composants locaux, et une couche de contrôle de niveau système (avec une échelle de temps de quelques jours à quelques mois avec un test accéléré) pour la validation à long terme de l'EMS et son évaluation de performance. Dans la couche de contrôle de niveau local, les panneaux solaires, les batteries et le SC ont été modélisés et contrôlés séparément. Différents modes de contrôle tels que le contrôle de courant, le contrôle de tension et le contrôle du point de puissance maximale (MPPT) ont été mis en œuvre.

De plus, un filtre passe-bas (LPF) a été appliqué pour diviser la puissance totale du HESS en composantes basse et haute fréquence pour les batteries et le SC respectivement. L'influence des différentes fréquences de coupure du LPF pour le partage de puissance a également été étudiée. Dans la couche de contrôle de niveau système, un EMS hybride bi-niveau combiné et un dimensionnement automatique ont été proposés et validés. Il couvre principalement cinq scénarios d'exploitation, notamment la réduction de la production des panneaux solaires, la réduction de la charge et trois scénarios via le contrôle du HESS associé à la rétention du contrôle de l'état de charge (SOC) du supercondensateur. Parallèlement, une fonction objective prenant en compte à la fois le coût en capital (CAPEX) et les coûts d'exploitation (OPEX) a été conçue pour l'évaluation des performances de l'EMS. L'effet mutuel entre le dimensionnement du HESS et la conception de l'EMS a été étudié conjointement sur la base d'un ensemble de données ouvertes de profils de consommation électrique résidentielle couvrant à la fois l'été et l'hiver.

Dans un autre aspect, une plateforme expérimentale de réseau électrique en courant continu multi-source a été développée dans le cadre de ce travail en laboratoire pour la validation en temps réel de l'EMS. Elle est composée de quatre batteries lithium-ion, d'un supercondensateur, d'une alimentation électrique en courant continu programmable, d'une charge en courant continu programmable, des convertisseurs DC/DC correspondants et d'un contrôleur en temps réel (dSPACE/Microlabbox). Des tests accélérés ont été réalisés pour vérifier l'EMS proposé dans différents scénarios d'exploitation en intégrant la génération réelle de panneaux solaires et les profils de consommation de charge dans l'alimentation en courant continu programmable et la charge. Les deux plateformes développées, la plateforme de simulation hiérarchique de réseau électrique en courant continu et la plateforme expérimentale, peuvent être utilisées de manière générale pour vérifier et évaluer divers EMS.

Mots-clés : Réseau électrique en courant continu ; sources d'énergie renouvelable ; stratégie de gestion de l'énergie ; évaluateur de banc d'essai de l'EMS ; système de stockage d'énergie hybride ; EMS basé sur des règles ; EMS basé sur la filtration.