



جامعة محمد الخامس بالرباط
Université Mohammed V de Rabat

École Nationale Supérieure d'Informatique et d'Analyse des Systèmes
Centre d'Études Doctorales en Sciences des Technologies de l'Information et de l'Ingénieur

AVIS DE SOUTENANCE DE THÈSE DE DOCTORAT

Monsieur Mohamed MAKHAD

Soutiendra publiquement sa thèse de Doctorat en Sciences de l'Ingénieur

Spécialité : Génie Electrique

Le Samedi 17 Février 2024 à 10h00 au Grand Amphi à l'ENSAM de Rabat

Intitulé de la thèse

**COMMANDE ROBUSTE DE L'ÉOLIENNE À BASE DE LA GÉNÉRATRICE SYNCHRONNE À
RELUCTANCE VARIABLE CONNECTÉE AU RÉSEAU ÉLECTRIQUE ET CONTRIBUTION À
L'AMÉLIORATION DU MICRO RÉSEAU À COURANT CONTINU AUTONOME PAR
L'INTÉGRATION DES SYSTÈMES DE STOCKAGE**

Devant le jury composé de :

Président :

Pr. Ahmed ESSADKI, PES, ENSAM, Université Mohammed V de Rabat

Directeur de thèse :

Pr. Malika ZAZI, PES, ENSAM, Université Mohammed V de Rabat

Co-Directeur de thèse :

Pr. Khalida ZAZI, PES, ENSAM, Université Mohammed V de Rabat

Rapporteurs :

Pr. Abdelmajid ABOULOIFA, PES, ENSEM, Université Hassan II, Casablanca

Pr. Abdelhadi RAIHANI, PES, ENSET-Mohammadia, Université Hassan II, Casablanca

Pr. Ahmed ABBOU, PES, EMI, Université Mohammed V de Rabat

Examineur :

Pr. Tamou NASSER, PES, ENSIAS, Université Mohammed V de Rabat



Résumé: La raréfaction des combustibles fossiles, l'augmentation de la demande énergétique mondiale et les problèmes environnementaux sont les défis majeurs de la vingt-et-unième siècle. Pour relever ces défis, la transition énergétique était la stratégie retenue pour projeter en toute sécurité le concept du développement durable. Dans le cadre de cette transition, la production de l'électricité par les énergies renouvelables est la politique privilégiée dans la majorité des pays. Cependant, la forte pénétration des énergies intermittentes dans les macro-réseaux crée de nouvelles exigences en termes de flexibilité et de résilience de ces installations. Alors, pour atténuer l'effet néfaste des ressources renouvelables sur le fonctionnement des infrastructures électriques, la mutation des réseaux électriques est basée sur le paradigme du micro réseau qui est une version modulaire du réseau intelligent. En outre, l'intégration des systèmes de stockage dans les réseaux modernes devient une exigence incontournable pour gérer la production locale et maintenir l'équilibre entre l'offre et la demande, permettant ainsi la stabilité et la fiabilité de ces installations. Dans ce contexte, la demande sur les matériaux critiques tels que le lithium et les terres rares augmente de façon exponentielle, créant un nouveau problème qui menace la finalité du modèle de développement durable. Le premier objectif du travail entrepris est de modéliser puis de valider par simulation la commande d'une éolienne basée sur la génératrice synchrone à réluctance variable (GSRV) double saillance 6/4 connectée au réseau électrique basse tension. Le modèle de la génératrice est élaboré en utilisant la méthode des éléments finis. En plus, afin de garantir des performances satisfaisantes, un contrôleur adaptatif super twisting terminal mode glissant est conçu pour asservir la vitesse de rotation de la génératrice. Le deuxième objectif de ce travail est la modélisation puis la simulation d'un micro réseau à courant continu autonome intégrant des options de stockage prometteuses. Plus précisément, nous avons intéressé au stockage hydroélectrique par une station de transfert de l'énergie par pompage et à la production de l'hydrogène par le processus d'électrolyse de l'eau. La structure du micro réseau proposée contient une éolienne à base de la génératrice synchrone à aimant permanent, une batterie, un supercondensateur, l'électrolyseur de l'hydrogène, la station de stockage hydroélectrique et une charge à courant continu. Pour la gestion du modèle élaboré, une stratégie de gestion de puissance avec prise en compte des états de charge des éléments de stockage est proposée. Les résultats de la simulation de l'éolienne basée sur la GSRV démontrent que le contrôleur proposé est extrêmement robuste. Néanmoins, le taux élevé d'ondulation du couple entrave l'utilisation de cette machine dans les systèmes de production connectés au réseau. D'autre part, les résultats de la simulation du modèle de micro-réseau ont montré les potentialités de stockage par pompage et de la production d'hydrogène vert dans le renforcement de la flexibilité et la stabilité des micro réseaux de faible inertie. La simulation a également confirmé le bon fonctionnement de la stratégie intelligente proposée. Enfin, nous soulignons que l'intégration d'une micro



station de transfert de l'énergie par pompage reste un défi ouvert et généralement, l'étude des micro réseaux est encore dans la phase de développement.

Abstract: The growing scarcity of fossil fuels, rising global energy demand, and environmental issues are the major challenges of this decade. To meet these challenges, most countries have adopted renewable energy as their energy policy. However, the high penetration of intermittent energies in the grid is creating new requirements in terms of its flexibility and resilience. So, to mitigate the adverse effect of renewable resources, the transformation of power grids is based on the microgrid concept as a modular version of the smart grid solution. In addition, the integration of grid-scale storage systems is necessary to manage local production and maintain the balance between supply and demand. In this context, the growing need for critical materials such as lithium and rare earths poses a further challenge to the realization of the sustainable development model.

The first objective of the work undertaken is to model and then validate by simulation the control of a wind turbine based on the 6/4 double saliency synchronous variable reluctance generator (GSRV) connected to the low-voltage grid. In addition, in order to guarantee satisfactory performance, an adaptive super-twist terminal sliding-mode controller has been proposed to regulate the speed of GSRV. The second objective of this work is to model and then simulate a DC-isolated microgrid incorporating promising storage options. More specifically, we are interested in hydroelectric storage utilizing a STEP station and hydrogen production employing water electrolysis. Furthermore, the proposed microgrid structure contains a GSAP-based wind turbine, a battery, a supercapacitor, and a DC load. For the management of the elaborated model, a power management strategy considering the states of charge of the storage elements is proposed. The GSRV-based wind turbine simulation results demonstrate that the proposed controller is extremely robust. However, the high torque ripple rate hinders the use of this machine in grid-connected generation systems. Moreover, the simulation of the developed microgrid model showed the potential of pumped storage and green hydrogen production in enhancing the flexibility and stability of low-inertia grids. The simulation also confirms that the proposed intelligent strategy is working effectively.

