

**Nom et Prénom : BELHAJ FATIMA ZAHRA**

**Date de soutenance : 14/05/2022**

**Directeur de Thèse : EL FADIL HASSAN**

**Sujet de Thèse :**

**Modélisation et commande avancée des systèmes de conversion d'énergie dans les véhicules électriques à hydrogène**

**Résumé :**

Avec l'augmentation des préoccupations concernant la pollution environnementale, le changement climatique et la crise des combustibles fossiles, les véhicules électriques (VE) ont attiré beaucoup d'attention, en particulier les véhicules électriques à pile à combustible.

Dans cette thèse, les systèmes de piles à combustible à hydrogène direct à membrane échangeuse de protons (PEM) dans les véhicules sont étudiés par le biais de la modélisation, des simulations et des validations expérimentales. Un nouveau modèle électrique équivalent d'un système de pile à combustible PEM de 1,2 kW a été développé, comparé au modèle existant et s'est avéré être le modèle le plus identique au modèle commercialisé de NEXA 1,2 kW.

Cette thèse traite également le problème de contrôle des systèmes de stockage hybrides dans les véhicules électriques à pile à combustible. Le système de stockage comprend un convertisseur de puissance dc-dc de type boost associé à une pile à combustible (FC), un convertisseur buck-boost connecté relié un super condensateur (SC) et un onduleur alimentant un moteur à induction de traction. Les deux convertisseurs et l'onduleur fonctionnent selon le principe PWM et le modèle moyen de l'ensemble du système est non linéaire et soumis à des incertitudes sur les paramètres. Les objectifs de contrôle sont : (i) assurer une bonne régulation de la tension du bus continu malgré les incertitudes sur la caractéristique tension courant de la pile à combustible et la variation du courant de la charge ; (ii) garantir un suivi parfait du courant du super condensateur par rapport à un signal de référence; (iii) assurer la stabilité asymptotique du système en boucle fermée en utilisant l'approche de Lyapunov. Le problème de contrôle est traité en utilisant différentes techniques de contrôle non-linéaire, par exemple : Contrôle par mode glissant (SMC), Backstepping adaptatif et intégral, contrôleur PID avec une action anti-windup, etc. Grâce aux simulations et aux validations expérimentales, il est formellement confirmé que les contrôleurs proposés répondent à tous leurs objectifs de contrôle.

Comme certains des contrôleurs développés dans cette étude nécessitent des mesures en ligne de plusieurs variables d'état qui ne sont pas accessibles à la mesure, des observateurs adaptatifs sont développés pour fournir des estimations précises des variables non mesurées et rendre la solution moins coûteuse et la fiabilité du contrôleur bien meilleure lorsque le nombre de capteurs physiques est réduit. Le contrôleur obtenu (composé de l'observateur et de la loi de commande) est connu sous le nom de commande par retour d'état car il ne repose que sur la mesure de la sortie (contrairement aux contrôleurs à retour d'état qui nécessitent que toutes les variables d'état soient accessibles pour la mesure). Les principales caractéristiques de ce contrôleur est son coût réduit et son insensibilité au bruit de mesure.

Mots clés : Véhicule à pile à combustible ; super condensateurs ; convertisseurs de puissance dc-dc ; Commande non linéaire ; Commande par mode glissant ; Backstepping adaptatif ; Backstepping avec action intégrale ; observateur non linéaire, observateur non linéaire adaptatif ; contrôleur PID ; Théorème de Lyapunov, L2-stabilité.

**Abstract :**

As the concerns regarding environmental pollution, climate change and the fossil fuel crisis have grown, electric vehicles (EVs) have attracted a great deal of attention, particularly Fuel Cell Electric vehicle.

In this thesis, direct hydrogen Proton Exchange Membrane (PEM) fuel cell systems in vehicles are investigated through modeling, analysis and experimental validations. A new equivalent electrical model of a 1.2 kW PEM fuel cell system

was developed, compared with existing model and proved to be the most identical model of the commercialized NEXA 1.2 kW.

This thesis deals also with the problem of controlling hybrid storage systems in electric vehicles. The storage system includes a DC to DC switched power converter of boost type associated with a fuel cell generator (FC), a buck-boost converter connected to a supercapacitor (SC) and an inverter is feeding a traction induction motor. Both converters and the inverter operate according to the PWM principle and the whole system averaged model is nonlinear and subject to parameter uncertainties. The control objectives are: (i) ensuring a tight dc bus voltage regulation despite the uncertainties on the fuel cell voltage-current characteristic and the DC load current variation; (ii) guaranteeing a perfect tracking of the supercapacitor current to a signal reference; (iii) ensure asymptotic stability of the closed loop system using Lyapunov approach. The control problem is dealt with using different nonlinear controller's techniques, for instance: Sliding mode control (SMC), adaptive and integral backstepping, PID controller with anti-windup action, etc. Through simulations and experimental validations, It is formally confirmed that the proposed controllers meets all its control objectives.

As some of the controllers developed in this study necessitate online measurements of several state variables that are not accessible for measurement, adaptive observers are developed providing accurate estimates of the non-measurement variables and making the solution cheaper and the controller reliability much better as the number of physical sensors is reduced. The obtained controller is known as an output feedback controller because it only relies on the output measurement.

**Keywords:** Fuel-cell Vehicles; Supercapacitors; DC-DC power converters; Integral Backstepping; adaptive Backstepping; Sliding Mode Control, Nonlinear observer, Adaptive non linear observer, Output feedback, L2-stability, Lyapunov theory, PID controller, anti-windup action.