Sommario

L'urgente necessità di ridurre le emissioni di gas serra e mitigare la dipendenza dai combustibili fossili ha accelerato la ricerca nel campo della mobilità sostenibile. I veicoli elettrici a batteria (BEV) stanno guadagnando quote di mercato, ma la loro adozione è ancora limitata dalla disponibilità di infrastrutture, vincoli di peso e limitata autonomia. Per tale motivo, la transizione verso una totale elettrificazione dei trasporti è ancora lontana, e l'uso di veicoli ibridi è attualmente considerato un'alternativa percorribile per il perseguimento dell'obiettivo di decarbonizzazione del settore. In alternativa ai soluzioni convenzionali, l'idrogeno è emerso come vettore energetico versatile, grazie alla possibilità di produrre direttamente energia elettrica sfruttando celle a combustibile a membrana a scambio protonico (PEMFC), impiegate sia come sistema primario di propulsione che come range extender. Nel contesto illustrato, questa tesi di dottorato propone un approccio di modellizzazione integrato per sviluppare architetture ibride alimentate a idrogeno, combinando la modellizzazione ad alta fedeltà dei componenti con la simulazione del veicolo a livello di sistema per ottenere un'elevata efficienza e un'autonomia estesa.

L'attività di ricerca presentata segue una metodologia multiscala, partendo dallo sviluppo di un modello dinamico a parametri concentrati di uno stack PEMFC per applicazioni in tempo reale. Il modello considera il trasporto di gas, le reazioni elettrochimiche e la gestione dell'acqua all'interno della cella, bilanciando la semplicità computazionale con l'accuratezza fisica. È stato sviluppato e integrato un sottomodello analitico dedicato al comportamento della membrana, derivato dall'equazione di bilancio dell'acqua all'interno della membrana: questa formulazione consente di modellare i fenomeni fisici essenziali che avvengono all'interno della membrana sia in condizioni stazionarie che transitorie, permettendo di determinare rapidamente la resistenza ohmica della membrana. La gestione dell'acqua e del calore è rappresentata con modelli specifici, bilanciando precisione ed accuratezza. Il modello è stato validato con dati sperimentali provenienti da uno stack commerciale a catodo aperto, dimostrando una buona accuratezza sia in condizioni stazionarie che transitorie, con errori medi inferiori al 5% e un tempo di calcolo ridotto, più di 50 volte più veloce del tempo reale. Il modello è adatto per l'integrazione in sistemi di

monitoraggio e controllo a bordo del veicolo, consentendo il rilevamento dei guasti e l'estensione della durata di vita degli stack PEMFC.

Proseguendo lungo la scala fisica fenomenologica, il quadro modellistico è esteso a livello di sistema per studiare l'integrazione dello stack PEMFC in un'architettura ibrida. Il caso studio si focalizza su un quadriciclo leggero ibridizzato con una PEMFC che lavora come range extender. Questa configurazione è progettata, modellata dal punto di vista dei flussi energetici e infine simulata durante un ciclo di omologazione standard per la determinata classe di veicolo, in conformità con le normative vigenti. Trattandosi di powertrain ibrido, sono state implementate diverse strategie di gestione dell'energia che vanno dal controllo euristico, basato su regole empiriche, ad algoritmi di controllo ottimo, come il principio minimo di Pontryagin (Pontryagin's Minimum Principle – PMP) e la strategia di minimizzazione del consumo equivalente (Equivalent Consumption Minimisation Strategy – ECMS). I risultati della simulazione evidenziano che range extender basati su PEMFC sono in grado di estendere in modo significativo l'autonomia del veicolo, in particolare quando vengono applicate strategie di controllo ottimali che migliorano il consumo di combustibile fino ad un massimo del 7%.

L'integrazione di approcci multi-scala, passando da attività di model-based design al model-based control, rappresenta il contributo innovativo di questo lavoro allo stato dell'arte, fornendo un set completo di strumenti per lo sviluppo di soluzioni efficienti e affidabili basate sull'idrogeno nel settore dei trasporti. Il modello PEMFC proposto può essere implementato come digital twin del sistema reale per la diagnosi a bordo, mentre la sua integrazione nel modello di veicolo ibrido fornisce una base di simulazione affidabile per l'ottimizzazione delle strategie controllo di alto livello. Nel loro insieme, queste attività supportano lo sviluppo di soluzioni basate sull'idrogeno efficienti e tecnologicamente vantaggiose, aprendo la strada a future ricerche sulla dinamica dei sottosistemi e sulle strategie correttive per migliorare l'affidabilità nelle applicazioni reali.

Abstract

The urgent need to reduce greenhouse gas emissions and mitigate dependence on fossil fuels has accelerated research into sustainable mobility. Battery electric vehicles (BEVs) are gaining market share, but their adoption is still limited by infrastructure availability and mileage constraints. Hence, the transition towards full electrification is still far, and deployment of hybrid powertrains is currently a worldwide recognise alternative towards the decarbonisation of mobility sector. Alternative to conventional solutions, hydrogen has emerged as a versatile energy carrier, particularly used in electrochemical conversion systems such as Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFCs), used either as first mover or range extender within hybrid architectures. In such framework, this doctoral thesis proposes an integrated modelling approach to develop hydrogen-fuelled hybrid architectures, combining high-fidelity component modelling with system-level vehicle simulation to achieve high efficiency and extended range.

The research follows a multi-scale methodology, starting from the development of a dynamic lumped model of a PEMFC stack designed for real-time applications. The model accounts for gas transport, electrochemical reactions, and water management within the cell, balancing computational simplicity with physical accuracy. A dedicated analytical sub-model for membrane behaviour, derived from the membrane physical water balance, is developed and integrated: this formulation allows to capture the essential physics happening inside the membrane both in steady-state and transient conditions, allowing to determine the membrane ohmic resistance. The water and thermal managements are accounted with specific accurate models with balanced precision. The model is validated against experimental data from a commercial open-cathode stack, demonstrating good agreement in both steady-state and transient conditions, with average errors below 5%, and low computing time, more than 50 times faster than real time. The model is suitable for integration into on-board monitoring and control systems applications, enabling fault detection and lifetime extension of PEMFC stacks.

Leveraging component-level accuracy, the modelling framework is scaled up to system level to investigate the integration of PEMFC stack into a hydrogen-

fuelled hybrid powertrain. The case study addresses a lightweight hybrid electric vehicle equipped with a hydrogen-fuelled PEMFC stack operating as range extender. This configuration is modelled and tested under standard homologation cycle, following current regulations. Several energy management strategies are implemented, ranging from heuristic rule-based control to optimal algorithms, such as Pontryagin's Minimum Principle (PMP) and Equivalent Consumption Minimisation Strategy (ECMS). Simulation results highlight that PEMFC-based range extenders are feasible to significantly improve vehicle range, particularly when optimal control strategies are applied, also improving fuel consumption up to 7%.

The integration of these models designed at different scales advances the state of knowledge by providing a comprehensive toolset for the development of efficient and reliable hydrogen-based solutions. The PEMFC model acts as a digital twin for on-board diagnosis, while its integration into the hybrid vehicle model provides a reliable simulation ground for high-level optimal control design. Collectively, these activities support the development of efficient and technologically advantageous hydrogen-based solutions, paving the way for future research on system dynamics and corrective strategies to improve reliability in real-world applications.