



*Ministero dell'Istruzione,
dell'Università e della Ricerca*



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

Dottorato di Ricerca in Ingegneria Meccanica

XI Ciclo N.S. (2009-2012)

ABSTRACT

***“Development of Solid Oxide Fuel Cell stack models for
monitoring, diagnosis and control applications”***

Ing. Dario Marra

Il Tutor

Ch.mo Prof. Cesare Pianese

Il Coordinatore

Ch.mo Prof. Vincenzo Sergi

Il Co-Tutor

Dr. Ing. Marco Sorrentino

Abstract

Nel presente lavoro di tesi sono presentati modelli matematici di diversi stack di celle a combustibile ad ossidi solidi (SOFC). I risultati presentati sono stati ottenuti nel ambito del progetto GENIUS (GENeric diagNosis Instrument for SOFC systems), finanziato dall Unione Europea (contratto n° 245128). L'obiettivo del progetto è sviluppare uno strumento di diagnosi "generico" e delle metodologie per sistemi SOFC. Il termine "generico" si riferisce alla possibilità di adattare lo strumento di diagnosi a diversi sistemi SOFC.

Al fine di perseguire l'obiettivo del progetto e sviluppare modelli matematici adatti per applicazioni di monitoraggio, di controllo e di diagnosi per sistemi SOFC, diversi approcci modellistici sono stati proposti. Particolare attenzione è stata data per la loro implementabilità in strumenti computazionali per uso on-board. Nel presente lavoro di tesi sono stati sviluppati modelli monodimensionali (1-D), modelli grey-box e black-box, sia stazionari che dinamici. I modelli sono stati validati con dati sperimentali forniti da partner europei nell'ambito del progetto GENIUS.

Nella tesi è stato presentato un modello 1-D stazionario di una cella planare in configurazione equicorrente e controcorrente. Il modello 1-D è stato sviluppato partendo da un modello monodimensionale sviluppato dall'Università di Salerno per una cella con configurazione equicorrente (Sorrentino, 2006). Il modello è stato validato attraverso un confronto con i risultati ottenuti con modelli simili sviluppati dall'Università di Genova e dall'istituto VTT della Finlandia. Il confronto dei risultati ha messo in evidenza l'accuratezza del modello 1-D sviluppato. Inoltre è stata presentata una possibile applicazione del modello 1-D per la stima del degrado di stack di celle. I risultati ottenuti hanno confermato la possibilità di implementare tale modello per applicazioni nell'ambito della fault detection.

Inoltre è stato sviluppato un modello grey-box a parametri concentrati per la simulazione della dinamica termica dello stack SOFC dell'azienda TOPSOE, i cui dati sperimentali sono stati forniti nell'ambito del progetto GENIUS. Particolare attenzione è stata riposta per il problema dei flussi di calore tra lo stack e l'ambiente circostante, per cui è stato proposto un modello dedicato. Tale modello è stato sviluppato attraverso un approccio

black-box, che ha mostrato una buona affidabilità ed accuratezza per lo scopo della sua applicazione. La procedura adottata per lo sviluppo del modello di scambio termico è risultata veloce e applicabile ad altri stack SOFC con differenti geometrie e materiali. I buoni risultati ottenuti e i ridotti tempi di calcolo rendono questo modello a parametri concentrati adatto per applicazioni in strumenti di diagnosi. Questo modello potrebbe essere impiegato come sensore virtuale per la stima ed il controllo della temperatura dello stack.

Sono stati sviluppati inoltre modelli black-box di stack SOFC. In particolare è stata sviluppata una rete neurale stazionaria per la simulazione della tensione dello stack dell'azienda HEXIS. Il sistema analizzato è uno stack di 5 celle che ha funzionato per più di 10 mila ore con carico costante. La rete neurale ha mostrato un'accuratezza di simulazione molto buona, anche con sistemi con tecnologia diversa da quella del sistema utilizzato per il training del modello. Oltre a mostrare buone capacità di predizione, la rete neurale ha assicurato una elevata accuratezza nel riprodurre il degrado degli stack SOFC, in particolare grazie all'inserimento del tempo di funzionamento con input del modello.

Inoltre è stata sviluppata una rete neurale ricorrente per la simulazione dinamica della tensione dello stack prodotto da TOPSOE ed una simile per uno short-stack costruito da HTc e testato da VTT. Gli stack analizzati sono stati: uno stack planare con configurazione equicorrente (TOPSOE) ed uno stack planare controcorrente (VTT-HTc).

Tutti i modelli sviluppati nel presente lavoro di tesi hanno mostrato un'elevata accuratezza e tempi di calcolo che permettono di implementarli in strumenti di diagnosi e controllo sia per applicazioni off-line (modello 1-D e grey-box) che on-line (reti neurali stazionarie e ricorrenti). È importante notare che i modelli matematici sono stati sviluppati con riferimento a stack prodotti da diverse aziende. Questo ha permesso di valutare differenti tecnologie SOFC, così da ottenere informazioni utili per lo sviluppo dei modelli. Le informazioni hanno inoltre evidenziato gli aspetti critici di questi sistemi per quanto riguarda la misura ed il controllo di alcune variabili del sistema, fornendo indicazioni per lo sviluppo di modelli degli stack SOFC.

Gli approcci modellistici proposti sono buoni candidati per affrontare le emergenti problematiche riguardanti lo sviluppo e la diffusione sul mercato delle celle a combustibile, come per esempio l'opportunità di sviluppare strumenti basati su modelli capaci di essere sufficientemente generici da

poter essere utilizzati per il controllo e la diagnosi real-time di sistemi a celle a combustibile di diversa tipologia, tecnologia e potenza.

Abstract

In the present thesis different SOFC stack models have been presented. The results shown were obtained in the general framework of the GENIUS project (GENeric diagNosis Instrument for SOFC systems), funded by the European Union (grant agreement n° 245128). The objective of the project is to develop “generic” diagnostic tools and methodologies for SOFC systems. The “generic” term refers to the flexibility of diagnosis tools to be adapted to different SOFC systems.

In order to achieve the target of the project and to develop stack models suitable for monitoring, control and diagnosis applications for SOFC systems, different modeling approaches have been proposed. Particular attention was given to their implementability into computational tools for on-board use. In this thesis one-dimensional (1-D), grey-box and black-box stack models, both stationary and dynamic were developed. The models were validated with experimental data provided by European partners in the frame of the GENIUS project.

A 1-D stationary model of a planar SOFC in co-flow and counter-flow configurations was presented. The model was developed starting from a 1-D model proposed by the University of Salerno for co-flow configuration (Sorrentino, 2006). The model was cross-validated with similar models developed by the University of Genoa and by the institute VTT. The cross-validation results underlined the suitability of the 1-D model developed. A possible application of the 1-D model for the estimation of stack degradation was presented. The results confirmed the possibility to implement such a model for fault detection.

A lumped gray-box model for the simulation of TOPSOE stack thermal dynamics was developed for the SOFC stack of TOPSOE, whose experimental data were made available in the frame of the GENIUS project. Particular attention was given to the problem of heat flows between stack and surrounding and a dedicated model was proposed. The black-box approach followed for the implementation of the heat flows and its reliability and accuracy was shown to be satisfactory for the purpose of its applications. The procedure adopted turned out to be fast and applicable to other SOFC stacks with different geometries and materials. The good results obtained and the limited calculation time make this model suitable for implementation in diagnostic tools. Another field of application is that

of virtual sensors for stack temperature control.

Black-box models for SOFC stack were also developed. In particular, a stationary Neural Network for the simulation of the HEXIS stack voltage was developed. The analyzed system was a 5-cells stack operated up to 10 thousand hours at constant load. The neural network exhibited very good prediction accuracy, even for systems with different technology from the one used for training the model. Beyond showing excellent prediction capabilities, the NN ensured high accuracy in well reproducing evolution of degradation in SOFC stacks, especially thanks to the inclusion of time among model inputs. Moreover, a Recurrent Neural Network for dynamic simulation of TOPSOE stack voltage and a similar one for a short stack built by HTc and tested by VTT were developed. The stacks analyzed were: a planar co-flow SOFC stack (TOPSOE) and a planar counter-flow SOFC stack (VTT-HTc).

All models developed in this thesis have shown high accuracy and computation times that allow them to be implemented into diagnostic and control tool both for off-line (1-D model and grey-box) and for on-line (NN and RNNs) applications. It is important noting that the models were developed with reference to stacks produced by different companies. This allowed the evaluation of different SOFC technologies, thus obtaining useful information in the models development. The information underlined the critical aspects of these systems with regard to the measurements and control of some system variables, giving indications for the stack models development.

The proposed modeling approaches are good candidates to address emerging needs in fuel cell development and on-field deployment, such as the opportunity of developing versatile model-based tools capable to be generic enough for real-time control and diagnosis of different fuel cell systems typologies, technologies and power scales.