



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



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

Dottorato di Ricerca in Ingegneria Meccanica

XII Ciclo N.S. (2011-2013)

***“Development of a Model-Based Diagnosis Algorithm oriented towards Solid Oxide
Fuel Cell Systems: Approach and Application”***

Ing. Pierpaolo Polverino

SOMMARIO

Il Tutor

Ch.mo Prof. Cesare Pianese

Il Co-tutor

Dott. Ing. Angelo Esposito

Il Coordinatore

Ch.mo Prof. Vincenzo Sergi

Sommario

La presente tesi di dottorato ha come scopo quello di illustrare una procedura completa di sviluppo di un algoritmo di diagnosi di tipo model-based, e ne mostra una sua applicazione ad un sistema pre-commerciale basato su celle a combustibile ad ossidi solidi (Solid Oxide Fuel Cell - SOFC). Le principali motivazioni che hanno spinto alla svolgimento di tale attività di ricerca risiedono nella crescente domanda di strumenti di diagnosi capaci di garantire le prestazioni ottimali e la massima vita utile del sistema a cui sono rivolti. Lo scopo di un algoritmo di diagnosi è appunto quello di rilevare ed isolare stati indesiderati (guasti) all'interno del sistema, in riferimento ad ogni suo componente (stack ed ausiliari). La conoscenza dei meccanismi peculiari che inducono tali malfunzionamenti o, nel peggiore dei casi, l'interruzione repentina del sistema permette lo sviluppo di mirate strategie di controllo atte ad evitare tali eventi ed assicurare le prestazioni richieste.

Nella presente attività di ricerca, tra le varie tecniche di diagnosi disponibili in letteratura, è stata considerata una metodologia nota come diagnosi model-based. Tale tecnica sfrutta un modello matematico per ricavare indicatori dello stato del sistema in esame da dati misurati sullo stesso durante la sua attività. I dati misurati sono confrontati con le variabili simulate dal modello per ottenere dei residui rappresentativi dell'andamento delle variabili monitorate. I residui, così ottenuti durante la fase di monitoraggio, sono confrontati con delle soglie al fine di rilevare stati indesiderati o inattesi. Tali soglie sono scelte tenendo conto, ad esempio, del livello di incertezza del modello e del rumore delle misure, nonché della necessità di rilevare guasti incipienti. Il confronto tra i residui e le soglie permette la generazione di sintomi analitici, i quali indicano se un evento indesiderato sta avendo luogo. La generazione di un sintomo evidenzia che il comportamento della corrispondente variabile monitorata non è nominale, completando la fase di rilevamento. A questo punto, sebbene il malfunzionamento è rilevato, non è ancora possibile caratterizzarne la natura. A tal fine, per identificare il tipo di malfunzionamento e localizzare il componente in stato di guasto, è possibile sfruttare un insieme di informazioni caratteristiche durante la fase di localizzazione. Tali informazioni comprendono quali sono i principali stati di guasto in cui il sistema considerato può trovarsi e quali sono le variabili da essi affette.

La prima parte della presente tesi di dottorato espone la procedura di sviluppo di un generico algoritmo di diagnosi di tipo model-based, descrivendo in dettaglio la progettazione del modello matematico e la definizione delle informazioni di riferimento per la fase di localizzazione del malfunzionamento. Il modello matematico deriva da un precedente modello disponibile in letteratura, sviluppato da Sorrentino et al. [1][2]. Tale modello si basa su un approccio a volumi concentrati e simula un sistema ad SOFC sia in condizioni stazionarie che dinamiche. Lo stack è assunto planare e co-flow e la tensione in uscita è rappresentata da una regressione non lineare, funzione dell'impiego di combustibile, della densità di corrente, dell'eccesso d'aria e delle temperature di ingresso ed uscita dello stack. La regolazione delle temperature dei flussi in ingresso allo stack avviene per mezzo di due valvole bypass, una al lato anodo ed una al catodo. Inoltre, la temperatura interna dello stack è controllata per mezzo di un controllore proporzionale-integrale PI, che agisce sulla portata di aria elaborata dalla soffiante al lato catodo. L'innovazione principale apportata al modello, rispetto a quanto presente in letteratura, consiste nell'implementazione di sotto-modelli di guasto, sviluppati appositamente per simulare il sistema in condizioni di malfunzionamento. Tali sotto-modelli permettono di impiegare l'intero modello per indagare sulle relazioni dirette ed indirette tra le variabili monitorate durante tali stati di malfunzionamento, raccogliendo ulteriori informazioni da impiegare durante la diagnosi.

Come descritto in precedenza, le informazioni di riferimento utilizzate nella fase di localizzazione dei guasti comprendono le correlazioni tra i sintomi, generati durante la fase di rilevamento dei guasti, ed i malfunzionamenti che possono avvenire nel sistema in esame. Nel presente lavoro, una Fault Signature Matrix (FSM) sviluppata inizialmente da Arsie et al. [3] seguendo un approccio di tipo Fault Tree Analysis (FTA), è considerata come punto di partenza per la definizione del suddetto set di informazioni. Tale FSM è modificata attraverso la simulazione di

differenti stati di guasto al fine di evidenziare le correlazioni dirette ed indirette tra malfunzionamenti e variabili monitorate. Inoltre, l'influenza dei guasti investigati sulle variabili di sistema è valutata in termini quantitativi in quanto viene identificato lo scostamento di tali variabili dalle condizioni di funzionamento nominale. A tale scopo, il modello precedentemente introdotto è appunto impiegato per simulare gli effetti di tali guasti a differenti livelli di magnitudine.

Nel presente lavoro di dottorato, cinque differenti stati di guasto relativi ad un generico sistema ad SOFC sono stati considerati, ossia: i) un incremento nelle perdite meccaniche della soffiante, ii) una perdita d'aria, iii) un malfunzionamento del controllore della temperatura dello stack, iv) la corrosione della superficie di scambio termico del pre-reformer e v) un incremento della resistenza ohmica delle celle. Attraverso la simulazione di tali stati di guasto, un insieme di residui è calcolato e confrontato successivamente con delle soglie. Per mezzo di tale confronto è possibile caratterizzare la correlazione quantitativa tra i guasti e le variabili influenzate ed evidenziare le differenze emergenti rispetto ad una FSM sviluppata seguendo unicamente un approccio euristico, ossia la FTA. Difatti, tale approccio tiene conto unicamente delle correlazioni qualitative tra guasti e sintomi, mentre la presente metodologia considera la reale sensibilità delle variabili monitorate all'entità del guasto.

La seconda parte della presente tesi di dottorato mostra la caratterizzazione e la validazione dell'algoritmo di diagnosi presentato su un sistema di micro-cogenerazione pre-commerciale ad SOFC, il sistema Galileo 1000N, prodotto dall'azienda svizzera HEXIS AG. Una dedicata attività sperimentale è stata condotta al fine di indurre stati di guasti controllati sul sistema in oggetto. È da evidenziare che l'ulteriore aspetto innovativo della presente attività di ricerca consiste appunto nell'aver sviluppato delle specifiche procedure per l'induzione di stati di malfunzionamento controllati. In alcuni casi, le procedure hanno consistito unicamente in opportune manovre per mezzo del sistema di controllo, mentre in altri casi sono state necessarie delle modifiche hardware.

Per poter applicare l'algoritmo di diagnosi al sistema Galileo 1000N, è stato necessario seguire un processo di adattamento per caratterizzarne gli aspetti principali. La necessità di avere un modello che fosse applicabile online e facilmente modificabile ha portato alla scelta di un modello basato su mappe al fine di simulare il sistema in condizioni nominali, e calcolare così i residui. Tale modello è basato su mappe contenenti i valori medi delle variabili monitorate, funzione delle condizioni operative. Inoltre, la FSM migliorata attraverso la simulazione di stati di guasto è ulteriormente modificata in base al numero di variabili realmente monitorabili ed il comportamento del controllore di sistema. L'algoritmo è completato con lo sviluppo di un test d'ipotesi statistico per tener conto delle probabilità di falso allarme e di mancato rilevamento. Tale analisi è fondamentale per la corretta interpretazione dei sintomi generati durante la fase di rilevamento.

Per quanto concerne l'impatto della presente attività di ricerca, l'algoritmo sviluppato ha come scopo quello di migliorare sia le prestazioni che la vita utile di sistemi ad SOFC per mezzo di una sua implementazione in un apposito sistema di controllo. In tal modo è possibile associare alla diagnosi delle specifiche manovre di contenimento attuate dal controllore. Ciò permette di conseguire vantaggi significativi sia per il produttore che per l'utente finale in termini di riduzione dei costi di manutenzione e di incremento dell'efficienza.

I principali contributi forniti e gli aspetti innovativi dell'attività di ricerca presentata possono essere riassunti come segue:

- sviluppo di un algoritmo di diagnosi di tipo model-based;
- miglioramento di una FSM, inizialmente sviluppata seguendo un approccio FTA, per mezzo della simulazione di stati di malfunzionamento e la valutazione della sensibilità delle variabili monitorate rispetto alla magnitudine dei guasti;
- implementazione di un test d'ipotesi statistico per la valutazione delle probabilità di falso allarme e mancato rilevamento di guasto;
- progettazione di procedure specifiche e modifiche hardware per l'induzione di stati di guasto controllati su di un reale sistema ad SOFC (il sistema Galileo 1000N) per la validazione

dell'algoritmo di diagnosi;

- validazione sia offline che online dell'algoritmo di diagnosi attraverso la sua implementazione per mezzo di un eseguibile controllato con interfaccia grafica.

È inoltre importante sottolineare che i contributi forniti con la presente attività di ricerca sono da considerarsi pionieristici rispetto a quanto presente in letteratura. Parte dei risultati presentati sono stati ottenuti all'interno del progetto europeo GENIUS (Generic diagnosis instrument for SOFC systems) ed hanno ricevuto fondi dall'"European Community's Seventh Framework Programme (FP7/2007-2013) for the Fuel Cell and Hydrogen Joint Technology Initiative" – grant agreement N° 245128.

Bibliografia

[1] Sorrentino M., Pianese C., "Model-based development of low level control strategies for transient operation of solid oxide fuel cell systems", *Journal of Power Sources* 196 (2011) 9036-9045.

[2] Sorrentino M., Pianese C., "Control oriented modeling of solid oxide fuel cell auxiliary power unit for transportation applications", *Journal of Fuel Cell Science and Technology* Vol. 6 (2009) 041011-1.

[3] Arsie I., Di Filippi A., Marra D., Pianese C., Sorrentino M., "Fault tree analysis aimed to design and implement on-field fault detection and isolation scheme for SOFC systems", *Proceedings of the ASME 2010 Eighth International Fuel Cell Science, Engineering and Technology Conference, FuelCell2010*, June 14-16, 2010, Brooklyn, New York, USA, FuelCell2010-33344.