



UNIVERSITY OF SALERNO

Department of Industrial Engineering

Ph.D. Course in Industrial Engineering

Curriculum in Mechanical Engineering

XXXII Cycle

DESIGN, DEVELOPMENT AND ON-FIELD
TESTING OF ADVANCED SOLUTIONS FOR
MONITORING, DIAGNOSIS AND FAULT
MITIGATION OF SOFCs

Supervisors:

Ch.mo Prof. Cesare Pianese

Ch.mo Prof. Marco Sorrentino

Dott. Ing. Pierpaolo Polverino

Ph.D. Student:

Marco Gallo

8800500037

Ph.D Course Coordinator:

Ch.mo Prof. Francesco Donsì

ABSTRACT ITALIANO

A.S. 2019-2020

Abstract

Il lavoro presentato in questa tesi è finalizzato allo sviluppo di un algoritmo avanzato volto a monitorare lo stato di salute (State of Health - SoH) di celle a combustibile ad ossidi solidi (SOFC). Una struttura computazionale è stata implementata per la diagnosi di possibili guasti di questa tecnologia, insieme ad una serie di strategie di mitigazione. L'idea principale è l'applicazione di metodi avanzati basati sulla spettroscopia di impedenza elettrochimica (EIS) per la diagnosi. Approcci EIS e convenzionali vengono infatti utilizzati per dedurre lo stato della cella e per stimarne la rimanente vita utile (RUL). Un ulteriore scopo di questi approcci è anche quello di fornire utili linee guida sulle possibili contromisure di mitigazione da attuare in caso di guasti.

Le SOFCs si configurano nel panorama energetico attuale come una delle alternative più adatte ai sistemi di produzione di energia convenzionale per la generazione di energia stazionaria, la cogenerazione e l'unità di potenza ausiliaria (APU), in un'ottica di "green energy generation". Difatti, nell'ultimo decennio, la diffusione e l'utilizzo di prodotti basati su SOFC ha aperto prospettive e opportunità rendono tali tecnologie valide soluzioni nell'attuale contesto di decarbonizzazione. In Europa, la loro diffusione è ancora limitata da costi di produzione elevati e durata limitata, a causa di ricorrenti guasti e fenomeni di degrado (ad esempio perdite, deposizione di carbonio all'anodo, riossidazione dell'anodo, contaminazioni, ecc.), che ne riducono notevolmente le prestazioni e possono causare danni irreparabili nei componenti costitutivi. È altresì chiaro che una maggiore affidabilità e durata di tali tecnologie, contribuirà alla riduzione dei costi di funzionamento delle SOFC con una conseguente competitività sul mercato.

Le variabili più comuni che permettono la cosiddetta "detection" e l'isolamento dei guasti nel sistema sono principalmente relative a corrente, tensione e temperatura. Per estrarre ulteriori informazioni sullo stato di salute del sistema, le curve V-I e la metodologia della spettroscopia di impedenza elettrochimica (EIS) possono essere estremamente utili, concentrandosi sul comportamento elettrochimico delle celle a combustibile. In particolare, l'EIS è uno strumento diagnostico avanzato che supporta nella valutazione del SoH dello stack. L'analisi dei risultati è spesso supportata da un approccio modellistico basato su circuiti equivalenti, che permettono di modellare lo stato del sistema.

Confrontando i dati misurati in condizioni nominali (cioè durante un funzionamento scevro da alcun tipo di malfunzionamento) con quelli registrati durante l'operazione real-time dello stack, è possibile individuare eventuali variazioni nello spettro d'impedenza, che possono essere associati ad uno o più malfunzionamenti che possono quindi indurre uno o più fenomeni di degrado. D'altra parte, monitorando il comportamento della SOFC nel tempo, è anche possibile identificare l'impatto dei fenomeni di degrado correlati all'invecchiamento della cella. In questo lavoro l'approccio modellistico ai circuiti equivalenti (ECM) viene utilizzato per descrivere i principali processi che si verificano all'interno della cella e per estrarre informazioni quantitative relative a guasti e fenomeni di degrado.

Uno dei risultati ottenuti in questo lavoro è lo sviluppo di un algoritmo completamente generico, denominato Matching Geometric Fitting Guess (MGFG), basato su EIS per il rilevamento e l'isolamento dei guasti in celle o stack. L'algoritmo MGFG segue un approccio ECM, quindi l'estrazione dei parametri viene eseguita mediante una tecnica brevettata di cui UNISA è proprietaria. Ciò consente un'elevata generalizzabilità ed un "fitting" rapido dello spettro misurato.

I risultati ottenuti applicando tale metodologia agli spettri misurati su Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFC), nell'ambito del progetto Europeo HEALTH-CODE, hanno aperto la strada all'applicazione di tale metodologia anche alle SOFC, di cui questo lavoro mira a definire un algoritmo generale per estrarre metriche utili per scopi diagnostici.

Le caratteristiche correlate (ovvero le metriche stesse, la loro combinazione o parametri derivati da esse) sono opportunamente selezionate quali indicatori principali dello stato di salute della cella/stack (SoH) e sono quindi utilizzate per dedurre il loro stato di funzionamento. L'intera metodologia sviluppata è stata testata e validata sulla base di dati sperimentali provenienti dai progetti Europei INSIGHT e SOSLEM.

Combinando le informazioni derivate da esperimenti condotti ad-hoc sulla base delle conoscenze euristiche dei fenomeni di interesse, una Fault Signature Matrix (FSM) è stata costruita per correlare i guasti ai sintomi osservati durante il monitoraggio on-line dello stack.

E' importante sottolineare che, ai fini di questo lavoro, il fenomeno definito "fuel starvation", ovvero la carenza di carburante all'ingresso della cella, viene considerato come guasto vero è proprio (non un semplice malfunzionamento che può portare a guasti ad esso correlati) e la relativa riga della FSM è stata popolata di conseguenza. Le soglie sono state fissate su evidenze sperimentali analizzate su celle segmentate, short stack e full stack; in seguito, l'approccio diagnostico è stato validato su tutte queste configurazioni sopraelencate.

Lo studio sull'invecchiamento della cella finalizzato alla stima della durata della vita utile residua è stato eseguito attraverso un approccio modellistico ai parametri concentrati, poi validato con dati sperimentali. Questo approccio consente di simulare le condizioni nominali attese della cella, come condizioni di riferimento scevre da guasti, fondamentali per l'attività di monitoring. Inoltre, un sottomodulo volto a simulare l'invecchiamento dei componenti dello stack è stato implementato, integrando alcune metriche estratte dall'approccio ECM, consentendo quindi la simulazione anche di condizioni nominali, seppur influenzate dal degrado naturale dei componenti. I risultati hanno portato a un modello di stima di vita utile residua, che è stato anch'esso convalidato con successo sulla base di dati sperimentali.

La mitigazione è stata studiata per definire le possibili contromisure da attuare quando si verifica un guasto. In particolare, l'inferenza sui dati sperimentali rilevati in presenza di malfunzionamenti all'interno del progetto INSIGHT, ed il conseguente arricchimento di informazioni attraverso la conoscenza euristica dei fenomeni in questione, ha portato allo sviluppo di una metodologia generale per le contromisure di mitigazione dei guasti.

E' stato inoltre condotto uno studio per definire una sequenza di azioni, schematizzate in un diagramma di flusso del processo di mitigazione, con lo scopo di supportare l'utente nel processo di stabilizzazione del fenomeno di degrado od in quello di totale recupero dello stato nominale.

Dallo stesso studio possono anche essere ricavate le specifiche per lo sviluppo di un algoritmo di mitigazione, in cui l'algoritmo diagnostico e le relative metriche di controllo estratte vengono utilizzati in una sorta di "modalità inversa" per fornire informazioni circa la fattibilità e l'efficacia della contromisura applicata in caso di malfunzionamento. In questo lavoro, il caso di "Fuel Starvation" è stato analizzato ed il relativo diagramma di flusso è stato redatto di conseguenza.

Infine, è stata proposta una metodologia che combina le tecniche diagnostiche e un approccio di controllo orientato alla mitigazione. È stato descritto un caso di studio di fuel starvation indotta da una perdita di idrogeno all'ingresso dello stack e sono stati discussi i risultati raggiunti attraverso

l'applicazione delle suddette metodologie volte a identificare la fattibilità della mitigazione di questo guasto.

In sintesi, è stato sviluppato ed applicato a dati sperimentali un algoritmo basato su approccio EIS per rilevare la fuel starvation in celle a combustibile a ossidi solidi. Un modello dinamico ai parametri concentrati è stato sviluppato per simulare con successo l'invecchiamento di tali sistemi, con il fine di stimare la vita utile residua degli stessi. Utili linee guida di mitigazione sono inoltre state descritte e proposte. Tutti questi risultati sono stati concepiti con lo scopo di migliorare la diffusione sul mercato di questi dispositivi.

Questi risultati hanno aperto la strada ad ulteriori lavori volti ad aumentare il livello di preparazione tecnologica (TRL) di tale strumento di monitoraggio, diagnostica e durata (MDLT) per scopi commerciali.

L'attività complessiva è stata finanziata da UNISA nell'ambito del progetto Europeo INSIGHT.