



# TESI

Presentata per ottenere il titolo di

**DOTTORE DELL'UNIVERSITÀ DI SALERNO**

Scuola Dottorale : XII Ciclo N.S. (2011-2013)

Settore : Ingegneria Meccanica

**DOTTORE DELL'UNIVERSITÀ DI FRANCHE-COMTE**

Scuola Dottorale : Sciences Pour l'Ingénieur et Microtechniques

Settore : Sciences pour l'Ingénieur / Ingegneria Elettrica

**Raffaele PETRONE**

***“Electrochemical Impedance Spectroscopy for the on-board diagnosis of PEMFC via on-line identification of Equivalent Circuit Model parameters”***

**Sostenuta il 18 marzo 2014 davanti alla commissione :**

Prof. Gianfranco Rizzo	<i>Direttore Area Didattica di Ing. Meccanica - Università di Salerno</i>	Presidente
Dr. Ing. Delphine Riu	<i>G2ELAB - Università di Grenoble</i>	Revisore
Prof. Mohamed Machmoum	<i>IREENA - Università di Nantes</i>	Revisore
Prof. Cesare Pianese	<i>DIIN - Università di Salerno</i>	Tutor
Dr. Ing. Marco Sorrentino	<i>DIIN - Università di Salerno</i>	Tutor
Prof. Daniel Hissel	<i>FEMTO-ST / FCLAB - Università di Franche-Comté</i>	Tutor
Prof. Marie-Cécile Péra	<i>FEMTO-ST / FCLAB - Università di Franche-Comté</i>	Tutor
Prof. Massimo Guarnieri	<i>DII - Università di Padova</i>	Esaminatore

**TESI SVILUPPATA NELL'AMBITO DI UNA CONVENZIONE DI COTUTELA STIPULATA TRA L'UNIVERSITÀ DI SALERNO E L'UNIVERSITÀ DI FRANCHE-COMTÉ.**

# SINTESI

## OBIETTIVI DELLA RICERCA

L'attività di ricerca svolta dal candidato nel triennio del Corso di dottorato è finalizzata allo sviluppo di un innovativo strumento di diagnosi e controllo per il monitoraggio on-board di sistemi a celle a combustibile con membrana a scambio protonico (Proton Exchange Membrane, PEMFC) e rientra all'interno del progetto "D-CODE" finanziato dall'Unione Europea. A tale scopo è stato sviluppato un modello circuitale equivalente (ECM) di una PEMFC da affiancare alla tecnica di indagine sperimentale detta "Spettroscopia di Impedenza Elettrochimica" (EIS).

Le celle a combustibile sono dei sistemi elettrochimici in grado di convertire direttamente l'energia chimica in elettrica, la cui vita utile è fortemente legata alle condizioni operative del sistema stesso. In caso di funzionamento a lungo termine in condizioni anomale, diversi meccanismi di degrado chimico, meccanico e termico possono compromettere in maniera irreversibile la durata di detti dispositivi. Pertanto monitorare lo stato del sistema durante il suo funzionamento e diagnosticare possibili malfunzionamenti e/o guasti (fault) in real-time risulta l'obiettivo principale.

Il presente lavoro è finalizzato allo sviluppo di un algoritmo di identificazione per il rilevamento in-situ di possibili fault basato sull'EIS. L'EIS è una tecnica di misura sperimentale non-distruttiva, comunemente applicata nell'analisi di sistemi elettrochimici. Detta tecnica consiste nel perturbare il sistema in esame con un segnale di tipo sinusoidale a determinate frequenze e analizzarne la risposta. Analizzando lo spettro di impedenza misurato è dunque possibile separare le diverse perdite dovute ai processi elettrochimici in atto durante il funzionamento della cella. Al fine di estrapolare dette informazioni un modello a circuito equivalente è stato sviluppato. Per ogni elemento del ECM è possibile associare un determinato fenomeno fisico. Quindi, identificando i parametri del modello circuitale è possibile monitorare il sistema e rilevare eventuali malfunzionamenti.

L'attività di ricerca vuole analizzare principalmente due problematiche: l'implementazione on-board dell'EIS e l'identificazione on-line dei parametri del ECM. Il primo punto di carattere sperimentale riguarda la validità delle misure che possono essere influenzate da fattori interni ed esterni al sistema. Il secondo di carattere modellistico, fa riferimento al problema di minimizzazione di una funzione complessa non-lineare in presenza di diversi minimi locali. L'obiettivo finale risulta

dunque lo sviluppo di una procedura di identificazione automatica dei parametri dell'ECM per lo sviluppo di uno strumento di diagnosi in-situ.

Il presente lavoro rientra nell'ambito del progetto D-CODE (<https://dcode.eifer.uni-karlsruhe.de>) finanziato dalla Comunità Europea (Settimo Programma Quadro - FP7/2007-2013 per le celle a combustibile e idrogeno, iniziativa tecnologica congiunta nel quadro di accordi di sovvenzione n ° 256673). L'obiettivo del progetto è lo sviluppo di uno strumento di diagnosi on-board per celle a combustibile PEM basato sulla tecnica EIS. Nell'ambito del progetto il presente lavoro di ricerca ha principalmente analizzato le problematiche relative alla realizzabilità delle misure, all'analisi e alla modellazione degli spettri di impedenza.

## **ATTIVITA DI RICERCA**

Nel presente lavoro è stata sviluppata una procedura automatizzata per identificare i parametri di un modello circuitale equivalente (ECM) finalizzata alla diagnosi di bordo delle celle a combustibile di tipo PEM. La procedura si basa sulle misure ottenute mediante la spettroscopia di impedenza elettrochimica (EIS) e rileva i vari processi elettrochimici che avvengono all'interno di una cella PEM analizzando la forma dello spettro misurato. Sulla base della geometria dello spettro, un algoritmo di preselezione esamina la configurazione del modello circuitale e ne imposta i valori iniziali appropriati per l'identificazione dei parametri. Analizzando i parametri identificati è dunque possibile monitorare lo stato del sistema e verificare eventuali malfunzionamenti.

Nel corso dell'attività sperimentale, si sono analizzate le problematiche legate alla realizzabilità delle misure in caso di applicazioni a bordo del EIS per sistemi integrati. I test effettuati nel laboratorio celle a combustibile (Fuel Cells Laboratory - FCLAB) dell'Università di Franche-Comté, in collaborazione con l'Università di Salerno (UNISA) hanno fornito preziose informazioni per adattare l'EIS sui sistemi PEM in commercio. A tal fine, il modulo BALLARD® Nexa™ è stato adattato per applicazioni EIS. Gli spettri misurati sono stati inoltre impiegati per validare l'algoritmo di identificazione, oggetto del presente lavoro. Ai fini della validazione si sono inoltre

utilizzati sia i dati disponibili in letteratura [Fouquet et al. (2006)]<sup>1</sup> che gli spettri misurati sul sistema Dantherm<sup>®</sup> DBX2000 (oggetto del progetto D-CODE) forniti dall'istituto europeo per la ricerca energetica (EIFER) in Germania.

Nell'ambito della modellazione si è introdotto il circuito equivalente utilizzato per modellare l'impedenza equivalente di un sistema PEM. Il modello permette di caratterizzare i diversi fenomeni elettrochimici che avvengono in seno alla cella. L'impedenza equivalente è una funzione non lineare e complessa che dipende dalle condizioni operative. Pertanto, per identificare i parametri, è stato adottato il metodo dei minimi quadrati per funzioni complesse e non lineari (CNLS). A tal fine, l'algoritmo Nelder-Mead (NM) è stato utilizzato per risolvere il problema di non linearità. La bontà della minimizzazione è valutata mediante la norma 2, comparando i dati sperimentali con i risultati del modello. Inoltre, la norma 2 consente di valutare la deformazione relativa dello spettro di impedenza. Nel caso in cui le condizioni iniziali siano scelte correttamente, l'algoritmo NM mostra ottime prestazioni, con un residuo di circa 1,5 % e tempi di calcolo di circa 0,2 secondi. Tuttavia, un cambiamento nelle condizioni iniziali può influenzare i risultati della minimizzazione. In questo caso, l'identificazione può convergere ad un minimo locale piuttosto che alla soluzione ottimale. È importante notare che la forma dello spettro varia a seconda della condizione di funzionamento del sistema e quindi il circuito elettrico equivalente impiegato per modellare l'impedenza varia di conseguenza. Ciò si traduce in una variazione del dominio di identificazione dei parametri. Ai fini dell'identificazione questo comportamento rappresenta la problematica principale per la scelta dei parametri del modello e dei loro valori iniziali.

Per risolvere questo problema e automatizzare la procedura è stato sviluppato un algoritmo di preselezione, chiamato geometrical first guess (GFG). Il GFG consente la corretta selezione della configurazione dell'ECM e delle condizioni iniziali per l'identificazione di parametri impiegando un tempo di calcolo di circa 0,4 secondi. L'analisi effettuata dal GFG si basa sulla geometria dello spettro di impedenza. I risultati ottenuti per l'identificazione hanno mostrato una buona precisione, non influenzata dalla presenza del rumore di misura. Il GFG è stato testato su tre diversi sistemi PEM funzionanti in diverse condizioni operative.

La procedura di identificazione online precedentemente descritta è stata sviluppata per applicazioni di diagnosi. In particolare, per la diagnosi è possibile individuare due fasi: la simulazione e l'identificazione online. Nel primo caso, un semplice modello circuitale di Randles è utilizzato per monitorare lo stato del sistema. Per simulare lo spettro d'impedenza equivalente l'ECM di Randles

---

<sup>1</sup> Fouquet N, Doulet C, Nouillant C, Dauphin-Tanguy G, Ould-Bouamama B (2006). Model based PEM fuel cell state-of-health monitoring via ac impedance measurements. *Journal of Power Sources*, 159(2):905-13.

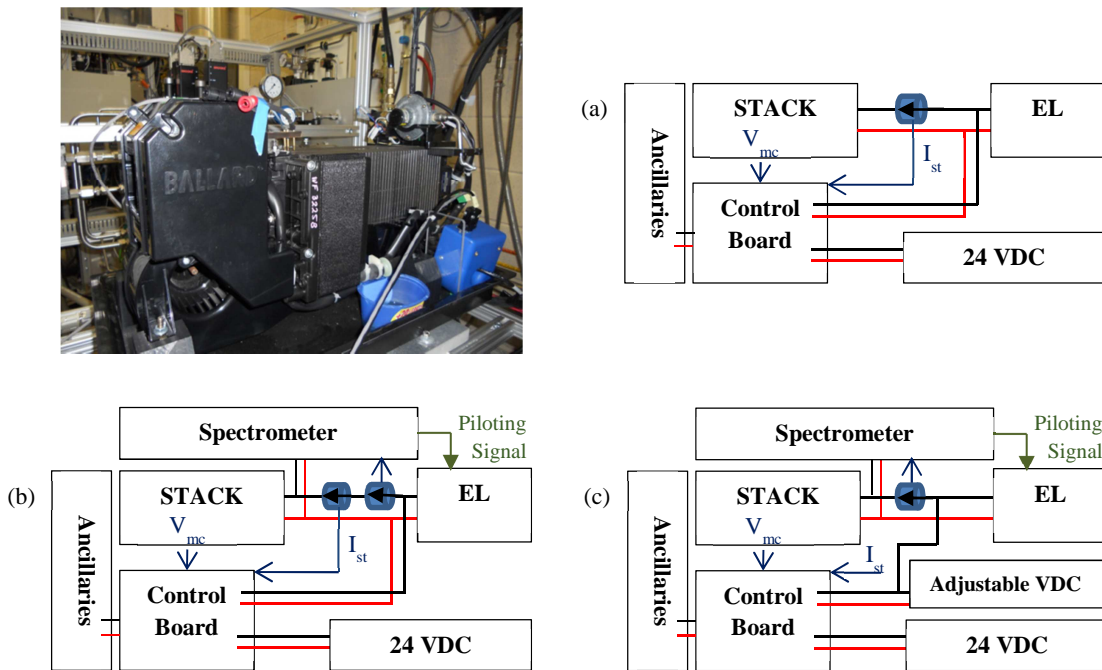
necessità dei valori dei parametri riferiti alle condizioni operative del sistema. A tal fine, delle regressioni matematiche sono state ricavate off-line sulla base dei parametri identificati in condizioni di funzionamento normali. In questa prima fase la norma 2 è impiegata per valutare lo scostamento tra lo spettro misurato e quello simulato col modello semplificato alla Randles. Se il valore della norma 2 è inferiore ad una data percentuale (circa il 10%), il sistema opera in condizioni normali, altrimenti la procedura di identificazione assistita dal GFG ha inizio. In questa seconda fase, una volta identificati i parametri, i residui sono calcolati confrontando i parametri identificati in linea con i valori attesi. Tali valori sono ottenuti mediante le regressioni precedentemente introdotte. Quando uno o più residui superano i rispettivi limiti è possibile individuare un sintomo. Il legame tra i sintomi e i malfunzionamenti sono invece contenuti in una matrice, detta fault to symptom matrix (FSM). Confrontando il vettore dei sintomi con le righe di detta matrice è dunque possibile individuare il malfunzionamento correlato. Nel presente lavoro si sono riportati i casi di funzionamento in condizioni di disidratazione e di incipiente allagamento.

## **ATTIVITÀ SPERIMENTALE**

Nel corso dei tre anni, il candidato ha svolto un'intensa attività sperimentale nell'ambito delle celle a combustibile di tipo PEM. In particolare durante il periodo trascorso all'estero il dottorando ha acquisito il know-how necessario per l'impiego di diversi strumenti e software dedicati all'implementazione della spettroscopia di impedenza elettrochimica (EIS).

Nel primo anno di dottorato il candidato ha effettuato la sperimentazione del sistema Nuvera<sup>®</sup> PowerFlow, presso il laboratorio EproLab (I5) del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Salerno. Detto sistema è composto da uno stack avente una potenza nominale di 5 kW<sub>e</sub> e da diversi ausiliari, tra cui il circuito di alimentazione dell'idrogeno, il sistema di alimentazione e umidificazione dell'aria e il sistema di raffreddamento ad acqua. Durante l'attività sperimentale il dottorando ha caratterizzato il sistema, identificando le curve di funzionamento, potenza ed efficienza e valutandone i consumi. Le condizioni di avvio ed i transitori sono stati anch'essi indagati. Le informazioni ottenute sono servite alla stesura di una tesi triennale e all'implementazione di un simulatore per veicoli ibridi oggetto di un altro lavoro.

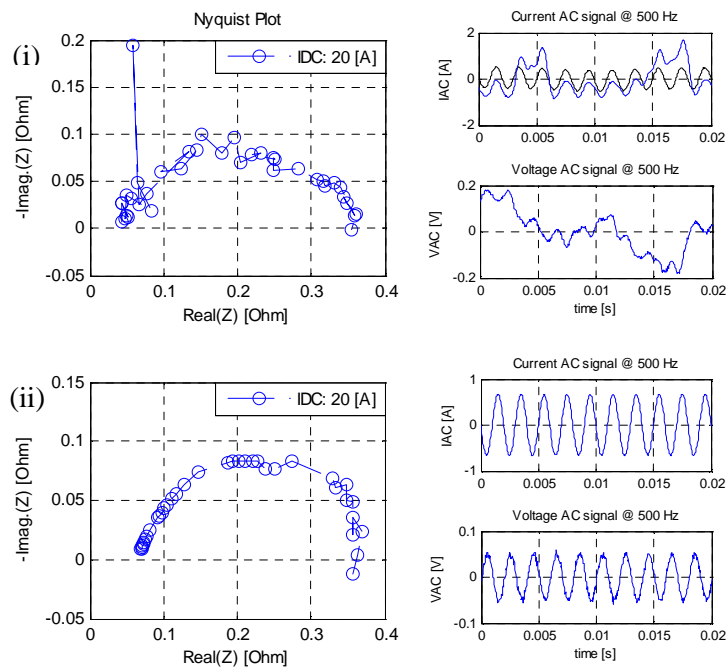
Nel secondo anno di dottorato, durante il periodo trascorso presso il laboratorio francese FCLAB, il candidato ha svolto diverse attività sperimentali sul sistema BALLARD® Nexa power module. Il sistema in esame è costituito da uno stack avente potenza nominale di 1.2 kW<sub>e</sub> raffreddato ad aria. Nella prima fase il dottorando ha caratterizzato il sistema sulla base delle esperienze svolte presso EproLab. In seguito il candidato ha modificato la configurazione del sistema Nexa, come riportato in figura 1 per consentire l'applicazione on-board della spettroscopia di impedenza elettrochimica.



**Figura 1: BALLARD Nexa power module: a) configurazione standard; b) configurazione standard con aggiunta dello spettrometro; c) configurazione ottimale per la spettroscopia d'impedenza.**

In caso di configurazione standard del sistema Nexa (fig. 1.b), il segnale di corrente sinusoidale iniettato per perturbare lo stack influenza ed è a sua volta influenzato dagli ausiliari e dal sistema di controllo, la cui alimentazione avviene alle estremità dello stesso stack. Si noti che l'alimentazione a 24 VDC è prevista solo in fase di avvio e spegnimento o in caso di fault. Detta problematica ha suggerito di applicare la configurazione di figura 1.c al fine di disaccoppiare sia gli ausiliari che la scheda di controllo. In figura 2 si riportano gli esempi di una misura affetta dal rumore indotto dagli ausiliari (i) e di una misura effettuata disaccoppiando gli ausiliari (ii). Oltre a stabilizzare i segnali in ingresso e uscita (corrente e tensione) per la misura e il funzionamento degli ausiliari durante

l'EIS, le modifiche apportate hanno consentito di effettuare delle misure in condizioni di funzionamento anomale e/o critiche. Condizioni difficilmente ottenibili con la configurazione iniziale. Pertanto nella fase finale il candidato ha effettuato la spettroscopia d'impedenza sia in condizioni di funzionamento normali che anomale, creando un database utilizzato da UNISA, FCLAB ed EIFER per lo sviluppo dei rispettivi modelli di diagnosi.



**Figura 2: Influenza degli ausiliari nella misura: i) spettro di impedenza e segnali perturbati nel caso di configurazione b); ii) spettro di impedenza e segnali “puliti” nel caso di configurazione c).**

Durante il terzo anno di dottorato il candidato ha partecipato alla campagna sperimentale, della durata di una settimana, sulle celle a combustibile di tipo PEM ad alta temperatura presso l'European Institute For Energy Research (EIFER) in Germania. Durante questa esperienza il dottorando ha inoltre risolto alcuni problemi legati alla configurazione e al collegamento dello spettrometro sul sistema in esame.

## ATTIVITA' MODELLISTICA

Nel corso dei tre anni, il dottorando ha condotto un'ampia analisi bibliografica sullo stato dell'arte dei modelli a circuiti equivalente (ECM) finalizzati alla caratterizzazione di celle a combustibile di tipo PEM. Parallelamente l'attività di ricerca si è concentrata su:

- 1) Modellazione di celle a combustibile di tipo PEM attraverso ECM.
- 2) Sviluppo di una procedura automatica per l'identificazione dei parametri on-line.
- 3) Applicazione della procedura di identificazione per attività di diagnosi on-board.

Durante il periodo iniziale il dottorando ha analizzato i legami esistenti tra la forma dello spettro e i diversi fenomeni elettrochimici che avvengono all'interno di una cella a combustibile. Sulla base dei processi elettrochimici studiati è stato dunque possibile individuare i componenti circuitali in grado di rappresentare il comportamento del sistema. Il circuito equivalente ottenuto è raffigurato in figura 3, mentre in figura 4 si riportano qualitativamente il circuito equivalente semplificato e lo spettro d'impedenza ad esso annesso. Le perdite ohmiche caratterizzate dalla resistenza al passaggio di cariche protoniche nell'elettrolita sono modellate attraverso una resistenza  $R_{\Omega}$ , mentre le perdite legate alla cinetica delle reazioni, lato anodo e catodo, sono caratterizzate dalle resistenze  $R_{ct,a}$  e  $R_{ct,c}$ . Al fine di modellare il comportamento capacitivo dell'interfaccia elettrolita/elettrodo considerando la porosità dell'elettrodo è stato introdotto un componente fittizio, detto *constant phase element* (CPE). Infine le perdite legate ai fenomeni di diffusione e quindi al trasporto di massa sono modellate attraverso un elemento fittizio, detto *impedenza di Warburg* ( $Z_W$ ). Pertanto l'impedenza equivalente di una cella a combustibile di tipo PEM risulta essere una funzione complessa e non-lineare. Poiché le perdite all'anodo risultano trascurabili, il modello di riferimento può essere semplificato, come riportato in figura 4.



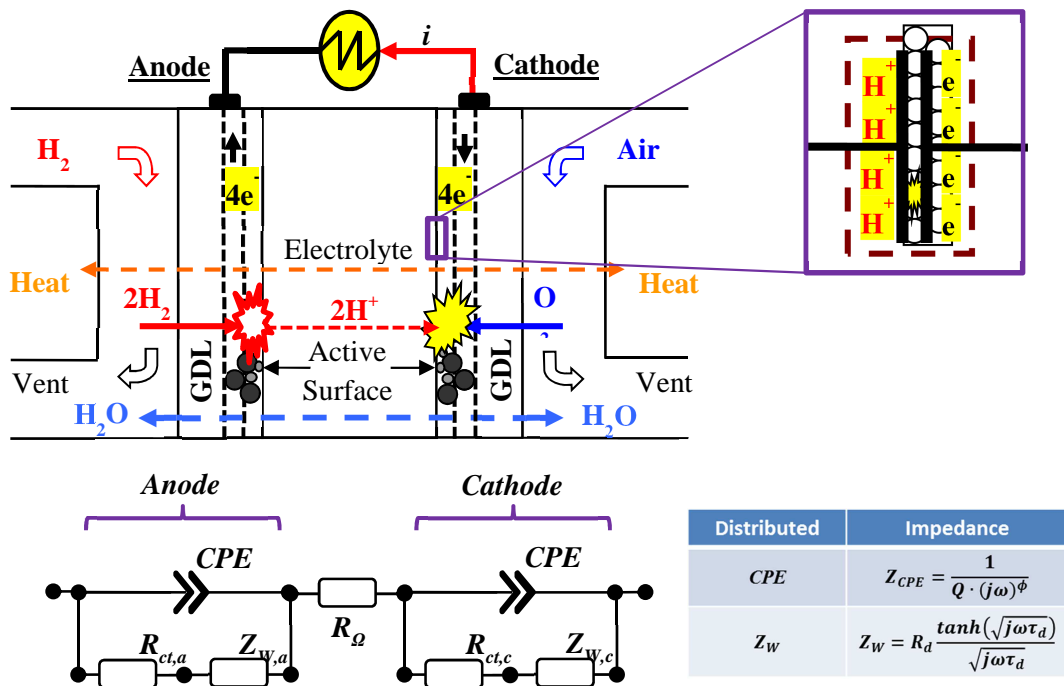


Figura 3: ECM di una cella a combustibile di tipo PEM.

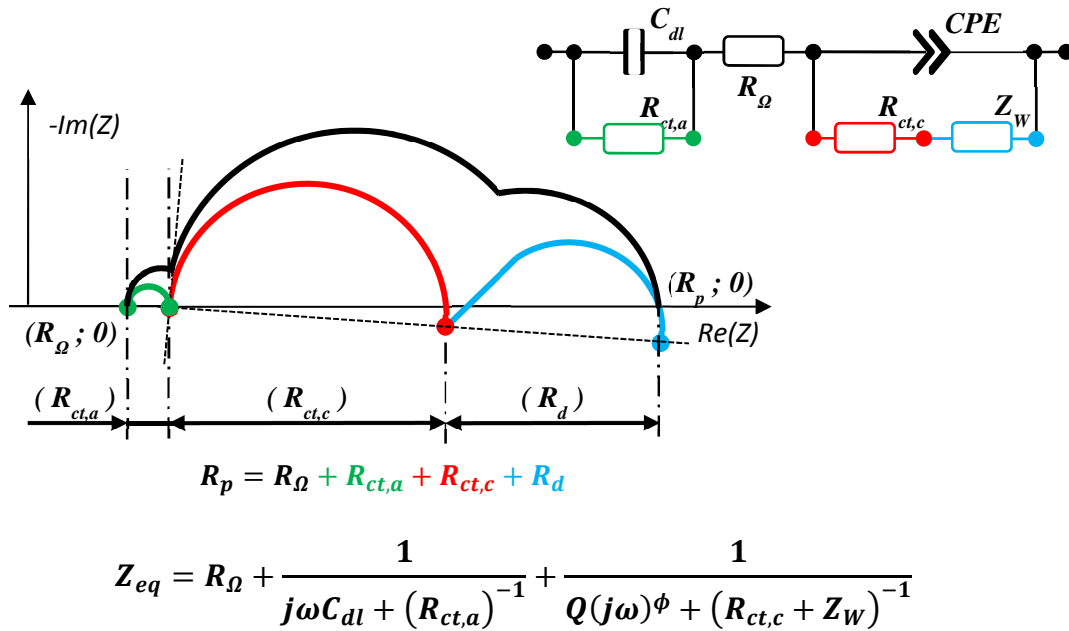
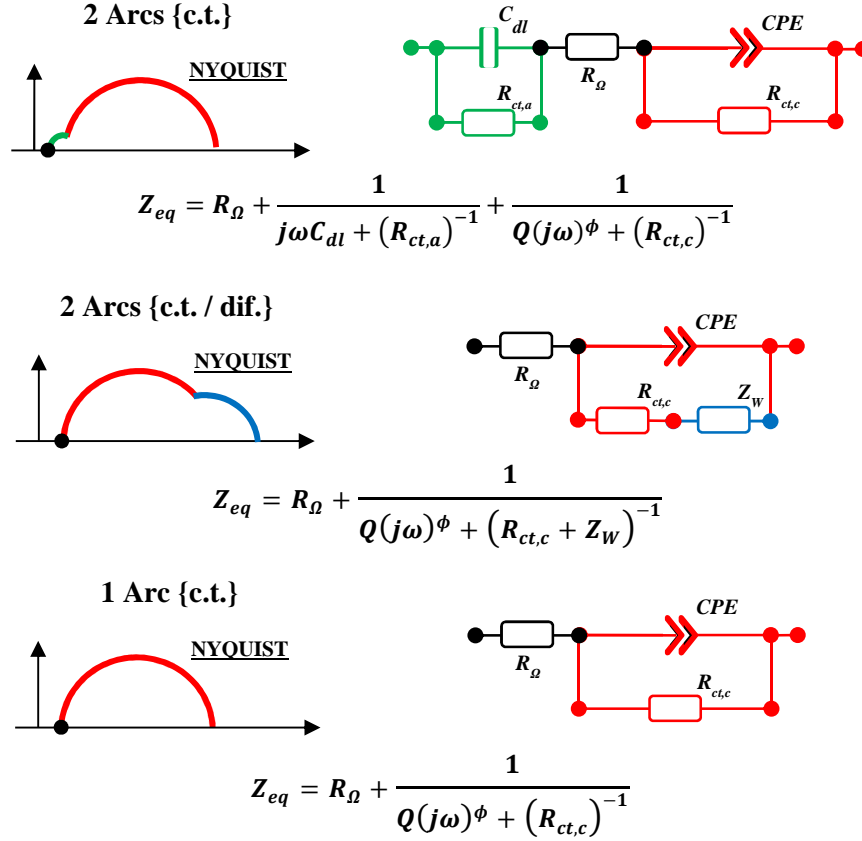


Figura 4: Rappresentazione qualitativa di uno spettro d'impedenza di una cella a combustibile di tipo PEM e relativo ECM semplificato.

È importante sottolineare che la configurazione del modello è legata alla forma dello spettro d'impedenza, che a sua volta è funzione delle condizioni operative. Al variare del funzionamento della cella, la forma dello spettro può degenerare in due archi fino a divenire un unico arco, riducendo di conseguenza anche il circuito di riferimento, come riportato in figura 5.



**Figura 5: Riduzione del circuito equivalente in funzione della forma dello spettro d'impedenza.**

Dopo avere analizzato l'influenza delle condizioni operative sulla geometria dello spettro d'impedenza e avere individuato i relativi circuiti equivalenti il dottorando ha sviluppato la procedura di identificazione dei parametri. A tale fine è stato impiegato il metodo dei minimi quadrati per funzioni non lineari complesse (complex non-linear least squares - CNLS), definendo la funzione obiettivo come la somma del quadrato dei residui della parte reale ed immaginaria dell'impedenza misurata rispetto a quella identificata.

$$Obj\_F = \sum_{i=1}^n (w_{Re,i} e_{Re,i}^2 + w_{Im,i} e_{Im,i}^2) \quad (\text{Eq. 1})$$

$$e_{Re,i} = \text{Re}\{Z_{meas}(j\omega_i)\} - \text{Re}\{Z_{mod}(j\omega_i, \beta_m)\} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$e_{Im,i} = \text{Im}\{Z_{meas}(j\omega_i)\} - \text{Im}\{Z_{mod}(j\omega_i, \beta_m)\} \quad (\text{Eq. 3})$$

Mentre per la ricerca del minimo si è adottato l'algoritmo di Nelder-Mead (NM), che a differenza dei metodi basati sul calcolo del gradiente consente una migliore soluzione dei problemi non-lineari in uno spazio multidimensionale. L'esistenza di diversi minimi locali ha evidenziato il problema della scelta delle condizioni iniziali, che si sono a loro volta rivelate funzione delle condizioni operative del sistema. Di solito per applicazioni off-line, la scelta del circuito equivalente e delle condizioni iniziali sono affidate all'esperienza del ricercatore. Al fine di rendere automatica la procedura e di consentirne un'applicazione on-line, il dottorando ha sviluppato un algoritmo di pre-setting dei parametri (*geometrical first guess* - GFG) basato sulla geometria dello spettro. Detto algoritmo è in grado di effettuare l'analisi geometrica dello spettro d'impedenza individuando sia il circuito equivalente che il set di valori iniziali dei parametri del modello. L'algoritmo su cui si basa il GFG è illustrato in figura 6. La procedura effettua una prima analisi dello spettro d'impedenza nel piano di Bode per individuare il numero di archi presenti nello spettro e i fenomeni elettrochimici correlati. Sulla base di queste informazioni il GFG seleziona la corretta configurazione dell'ECM. In seguito i valori iniziali dei parametri del modello sono individuati ricostruendo gli archi sul piano di Nyquist. Lo spettro proposto in figura 6 è riferito ai dati pubblicati nell'articolo di Fouquet et al (2006). L'impiego del GFG nella procedura di minimizzazione ha irrobustito la convergenza del metodo, garantendo l'univocità della soluzione. La procedura è stata validata per tre sistemi differenti operanti in diverse condizioni operative, riportate in tabella 1. I risultati dell'identificazione sono riportati in figura 7.

**Tabella 1: Data set utilizzati per validare la procedura di identificazione.**

<b>Data set</b>	<b>Authors</b>	<b>PEMFC</b>	<b>Data set specifics</b>
<b>A</b>	Dati di letteratura: <b>Fouquet et al. (2006)</b> Journal of Power Sources	Stack compost da 6 celle	Test effettuati a 70 A in caso di: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Allagamento delle celle</li> <li>• Condizioni nominali</li> <li>• Celle secche</li> </ul>
<b>B</b>	Dati <b>FCLAB</b> : attività sperimentale del candidato.	<b>BALLARD® Nexa™</b> Stack di 47 celle	Test effettuati variando: <ul style="list-style-type: none"> <li>• La corrente di esercizio [5:45] A</li> <li>• Il rapporto stechiometrico [2:3.7] a 20 A</li> </ul>
<b>C</b>	Dati <b>EIFER</b> : partner del progetto D-CODE	<b>Dantherm® DBX2000</b> Stack di 56 celle con una configurazione a catodo aperto	Test effettuati variando: <ul style="list-style-type: none"> <li>• La corrente di esercizio [5:45] A.</li> </ul>

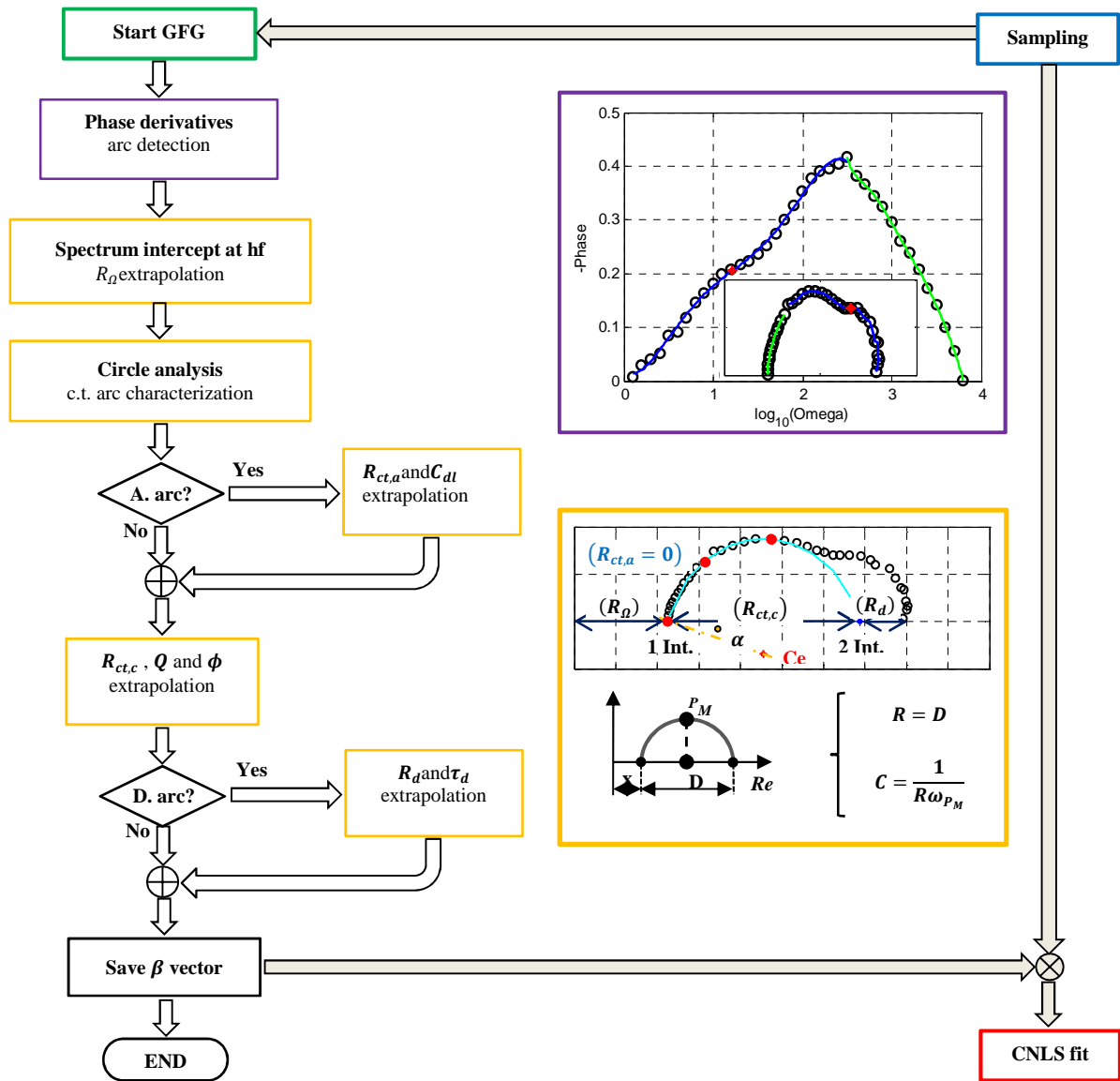
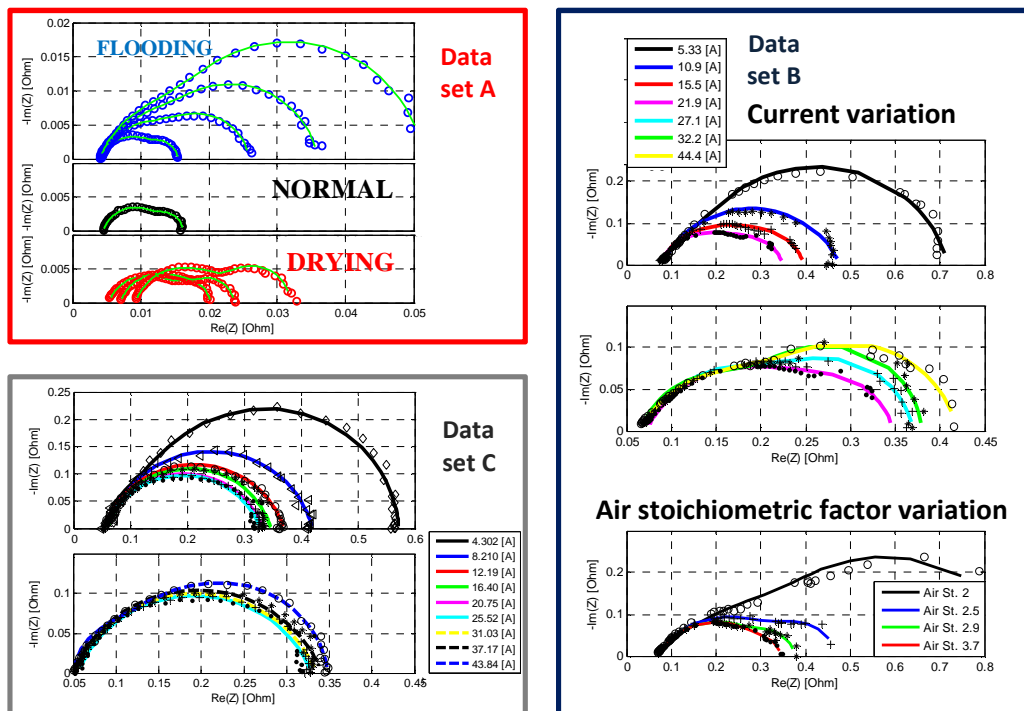


Figure 6: Diagramma di flusso del GFG.



**Figura 7: Validazione della procedura di identificazione per tre differenti PEMFC in diverse condizioni di esercizio.**

Infine l'attività di ricerca propone l'applicazione della procedura di identificazione per lo sviluppo di una metodologia di diagnosi on-board. Come accennato, gli obiettivi sono il monitoraggio dello stato del sistema e la diagnosi. È possibile monitorare il sistema impiegando il modello circuitale per simulare l'impedenza equivalente del sistema in condizioni normali (vedere figura 8). Confrontando l'impedenza simulata con quella misurata, la procedura di identificazione è impiegata in caso di anomalie. In questa fase sia la misura che l'identificazione avvengono on-board. Le possibili fault sono rilevate e isolate attraverso l'inferenza dei residui valutati confrontando a parità di condizioni operative i parametri identificati on-line e quelli di riferimento ottenuti in condizioni di funzionamento normale (vedere figura 9). A tale scopo il dottorando ha utilizzato delle regressioni per modellare l'andamento dei parametri in condizioni operative normali. Nel caso in cui i residui superino delle prefissate soglie è possibile individuare un sintomo. A sua volta il sintomo è confrontato con le righe di una matrice che lega i sintomi alle fault, detta fault to symptom matrix (FSM), individuando il tipo di malfunzionamento. Qualora il sintomo non fosse contenuto nella FSM la procedura effettuerebbe un'analisi sugli andamenti dei parametri, indicando la fault più probabile verso cui il sistema è diretto.

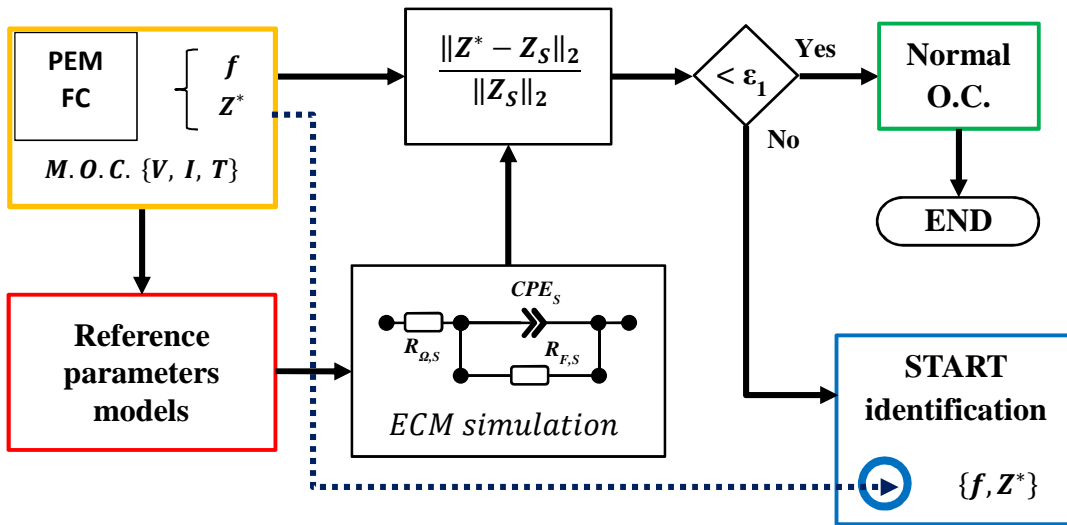


Figura 8: Diagnosi on-board: procedura di monitoring.

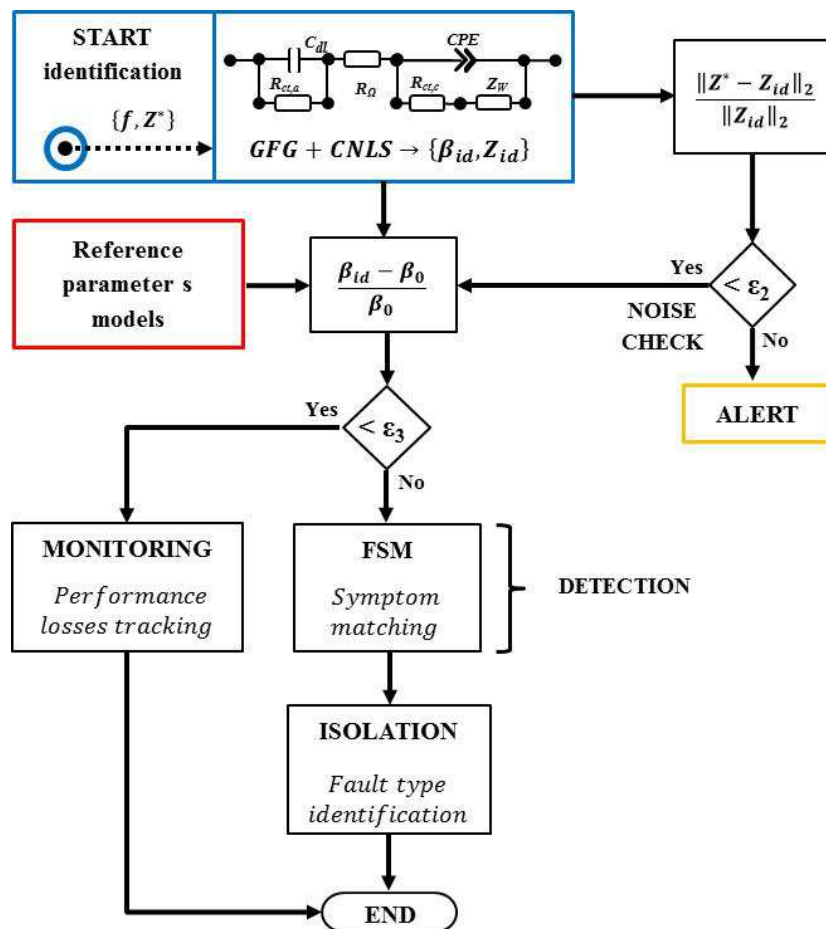


Figura 9: Diagnosi on-board: identificazione.

In figura 10 e 11 si riportano i casi d'identificazione delle condizioni di cella secca e di inizio cella allagata.

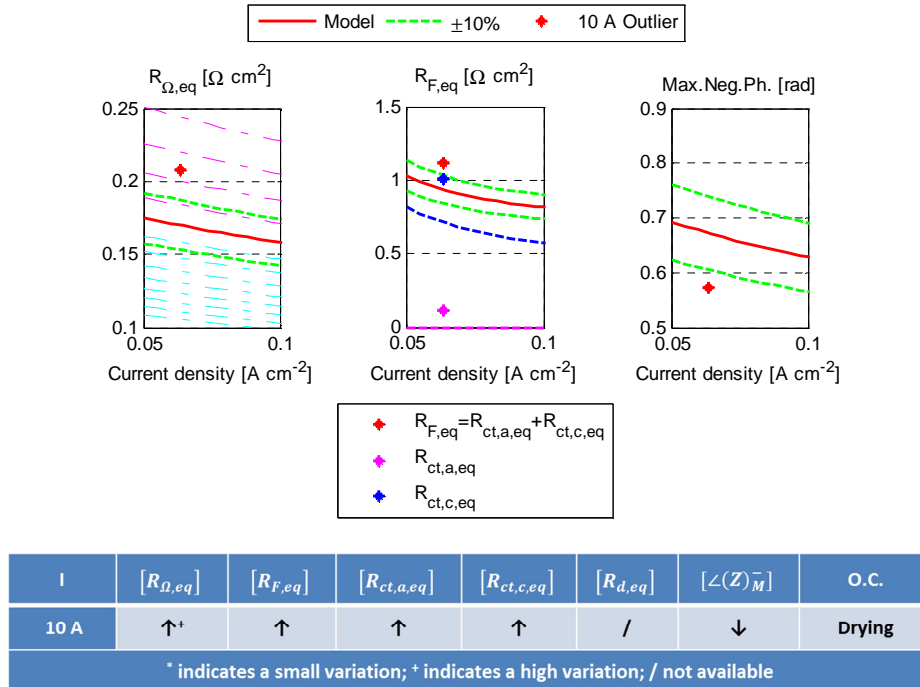


Figura 10: Risultati della diagnosi in caso di cella secca.

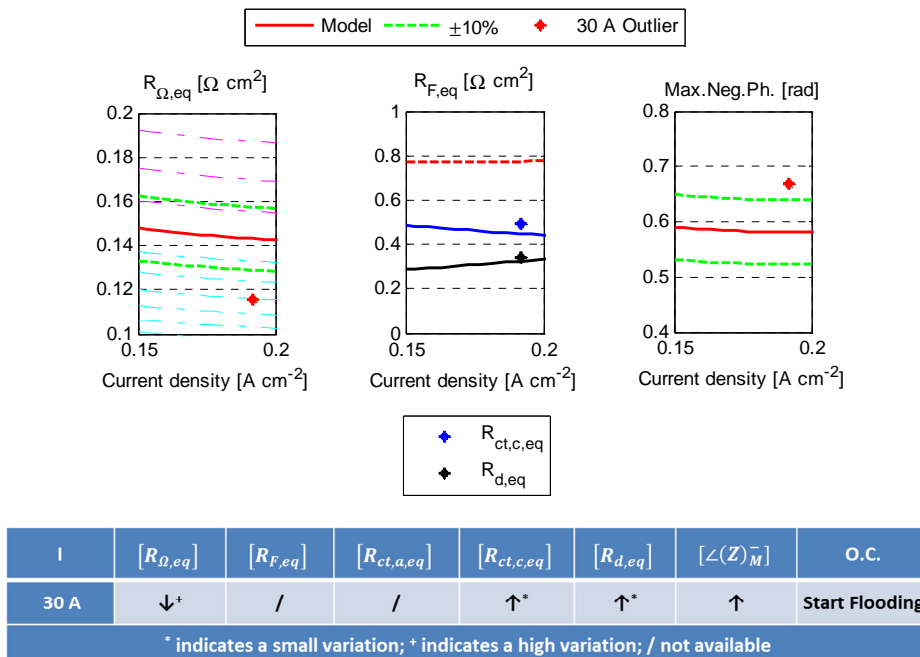


Figura 11: Risultati della diagnosi in caso di inizio cella allagata.

## SVILUPPI FUTURI

L'attività di ricerca presentata può essere considerata come un punto di partenza per diverse applicazioni. La disponibilità di un convertitore DC/DC, sviluppato dai partner del progetto D-CODE offre l'opportunità di ampliare le applicazioni dell'EIS. Infatti, grazie ad una riconfigurazione del converter l'EIS può essere adattata ai sistemi integrati per realizzare la diagnosi a bordo. L'approccio proposto permette l'implementazione delle applicazioni EIS su diverse scale di potenza, non sempre analizzabili con gli spettrometri comunemente in commercio. È interessante notare che l'EIS è generalmente utilizzata su diversi sistemi elettrochimici quali batterie e super-capacitori, e rappresenta un valido supporto nell'analisi di corrosione. A questo proposito, attraverso il metodo proposto qualunque sistema elettrochimico dotato di un convertitore DC/DC controllato in linea può trarne dei vantaggi.

La caratterizzazione dello spettro basata sulle analogie con gli ECM è stato oggetto di questo lavoro. L'algoritmo sviluppato (GFG) consente la rapida identificazione di parametri del modello circuitale. La procedura è automatizzata e nessuna esperienza umana è richiesta per definire sia la configurazione dell'ECM che i valori iniziali per l'identificazione. L'algoritmo GFG può essere adottato in applicazioni offline per prove di laboratorio che coinvolgono lo studio dei fenomeni elettrochimici, oppure online, per lo sviluppo della diagnostica di bordo. Il GFG è stato testato con successo in diverse condizioni di funzionamento su tre sistemi diversi. Tuttavia, è interessante notare che il GFG è stato sviluppato per sistemi di tipo PEM. Pertanto, per estendere la sua applicazione ad altre celle a combustibile, batterie e altri sistemi, sia la configurazione di riferimento dell'ECM che le funzioni coinvolte nel GFG devono essere adattate.

Una procedura di diagnosi basata sull'identificazione dei parametri dell'ECM è stata dunque presentata. Un primo miglioramento da considerare è lo sviluppo di nuovi modelli per determinare i valori di riferimento dei parametri in condizioni nominali, attualmente ottenuti mediante semplici regressioni. Inoltre, la matrice di correlazione sintomi-guasti (FSM) deve essere incrementata per aumentare il numero di malfunzionamenti rilevabili. Infine, l'analisi dei residui basata su un rilevamento binario può portare alla perdita di informazioni. Pertanto, il processo di isolamento dei guasti potrebbe essere migliorato mediante l'introduzione di un'analisi di sensitività dei residui volta ad aumentare il numero di informazioni ottenibili.



Infine, l'algoritmo di diagnosi permette di analizzare la variazione dei parametri durante il funzionamento della cella. Un'ulteriore applicazione potrebbe essere quindi introdotta analizzando dette variazioni con l'obiettivo finale di sviluppare un nuovo algoritmo finalizzato alla prognosi.