



Ricerca di Sistema elettrico

Utilizzo gestionale di celle al litio per applicazioni second life

Massimo Ceraolo, Romano Giglioli, Giovanni Lutzemberger



Università di Pisa
DESTEC

UTILIZZO GESTIONALE DI CELLE AL LITIO PER APPLICAZIONI SECOND LIFE

Massimo Ceraolo, Romano Giglioli, Giovanni Lutzemberger (Università di Pisa, Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni)

Settembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2017

Area: Trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica

Progetto: Sistemi di accumulo di energia per il sistema elettrico

Obiettivo: Studio dei fenomeni di degrado, sicurezza e second-life - Studio dell'invecchiamento e riuso delle batterie

Responsabile del Progetto: Pier Paolo Prosini, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Sperimentazione di sistemi di accumulo per utilizzo gestionale in ottica second-life"

Responsabile scientifico ENEA: Natascia Andrenacci

Responsabile scientifico Università di Pisa - DESTEC: Romano Giglioli

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 ATTIVITÀ SPERIMENTALE.....	5
2.1 CELLA DI PROVA.....	5
2.2 SETUP DI PROVA.....	6
2.3 TEST EFFETTUATI.....	7
3 RISULTATI.....	8
3.1 TEST DI CAPACITÀ ESTRATTA.....	8
3.2 VALUTAZIONE DELL'INVECCHIAMENTO MEDIANTE ANALISI DEI PARAMETRI.....	9
3.3 TEST DI POTENZA.....	10
4 CONCLUSIONI.....	12
5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	12
6 CURRICULA DEL GRUPPO DI LAVORO.....	13

Sommario

Oggetto dell'attività è la definizione e l'esecuzione di test sperimentali su celle elettrochimiche al litio, nuove e degradate. In particolare, al termine di una fase di caratterizzazione preliminare, sono stati effettuati test aventi come obiettivo la verifica delle prestazioni delle celle medesime, ai fini di un loro utilizzo di tipo gestionale. A tal fine, nell'ottica di un loro impiego in second-life, sono stati messi a confronto il comportamento di celle nuove e invecchiate, al fine di definire idonei criteri di selezione delle celle, sulla base delle prestazioni effettivamente usufruibili.

1 Introduzione

Oggetto dell'attività ha riguardato la definizione e l'esecuzione di test sperimentali su celle elettrochimiche al litio, nuove e degradate. Queste ultime sono state in particolare sottoposte da ENEA a cicli di carica-scarica completi, fino al raggiungimento dell'80% della capacità iniziale, in modo da ritenersi a fine vita.

I test sperimentali hanno avuto due principali obiettivi: quello di caratterizzare le celle in prova, identificando idonei modelli circuitali equivalenti. In questo caso i test hanno avuto l'obiettivo di ricavare idonei set di parametri. Il secondo obiettivo ha invece riguardato una verifica delle prestazioni, nell'ottica di un utilizzo gestionale del sistema di accumulo. A questo riguardo, anziché cicli di carica-scarica completi, sono stati definiti cicli caratterizzati dalla ripetizione di fasi di carica-scarica a corrente costante, caratterizzate da valori fissati al massimo limite ammesso dal costruttore, e ridotte profondità di scarica. Attraverso misure di tensione, corrente e temperatura, è stato così possibile valutare se le prestazioni delle celle invecchiate, pur a fronte di una significativa riduzione di capacità utile, appaiono ancora idonee per un impiego "in potenza".

Sulla base dei risultati conseguiti sono stati ricavati trend dei parametri caratteristici, nonché informazioni sulle prestazioni effettivamente usufruibili. Sulla base dello scostamento tra prestazioni effettive, riferibili all'utilizzo della cella in second-life, e prestazioni nominali, relative alla cella nuova, si è effettivamente verificato se la cella considerata, pur a fronte di un significativo decremento dell'energia utile, possa ancora impiegarsi per utilizzi di tipo gestionale dell'accumulo, oppure sia destinata allo smantellamento e riciclaggio.

2 Attività sperimentale

2.1 Cella di prova

Le prove sono state eseguita su celle NMC (anodo: grafite, catodo: $\text{Li}[\text{NiCoMn}]\text{O}_2$), aventi capacità nominale 20 Ah e range di tensione ammissibile $3 \div 4.15$ V, le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 1.

Caratteristiche meccaniche	
Modello	C020
Dimensioni (mm)	217 x 129 x 7
Peso (kg)	0,43
Caratteristiche elettriche	
Tensione nominale (V)	3,65
Capacità nominale (Ah)	20
Energia specifica (Wh/kg)	174
Densità energetica (Wh/L)	370
Potenza specifica (@DOD=50%, 10 s) (W/kg)	2300
Densità di potenza (@DOD=50%, 10 s) (W/L)	4600
Condizioni operative	
Carica raccomandata	CC-CV
Massima tensione di carica (V)	4,15
Corrente di carica raccomandata (C-rate)	0,5C
Tensione di fine scarica raccomandata (V)	3
Limite inferiore di tensione (V)	2,5
Massima corrente di scarica continua (C-rate)	5C
Massimo picco di corrente di scarica (< 10 s) (C-rate)	10C
Temperatura operativa (°C)	-30 ÷ +55
Temperatura di carica raccomandata (°C)	0 ÷ +40
Temperatura di stoccaggio (°C)	-30 ÷ +55
Vita a cicli @25°C @1C/-1C DOD100%	1000



Tabella 1. Caratteristiche tecniche della cella utilizzata

2.2 Setup di prova

Le prove sono state realizzate per mezzo del setup sperimentale descritto in Figura 1. Il blocco “ciclatore” include sia l’alimentatore che il carico elettronico. Questi ultimi sono comandabili da PC mediante interfaccia LabVIEW. La batteria è posta all’interno di una camera climatica, per il mantenimento della temperatura ambiente al valore desiderato. Tramite scheda di acquisizione (DAQ) sono rilevabili le misure di tensione e corrente di batteria (U ed i rispettivamente) e, mediante termocoppie, le temperature di cella e ambiente (T_{batt} e T_{amb}).

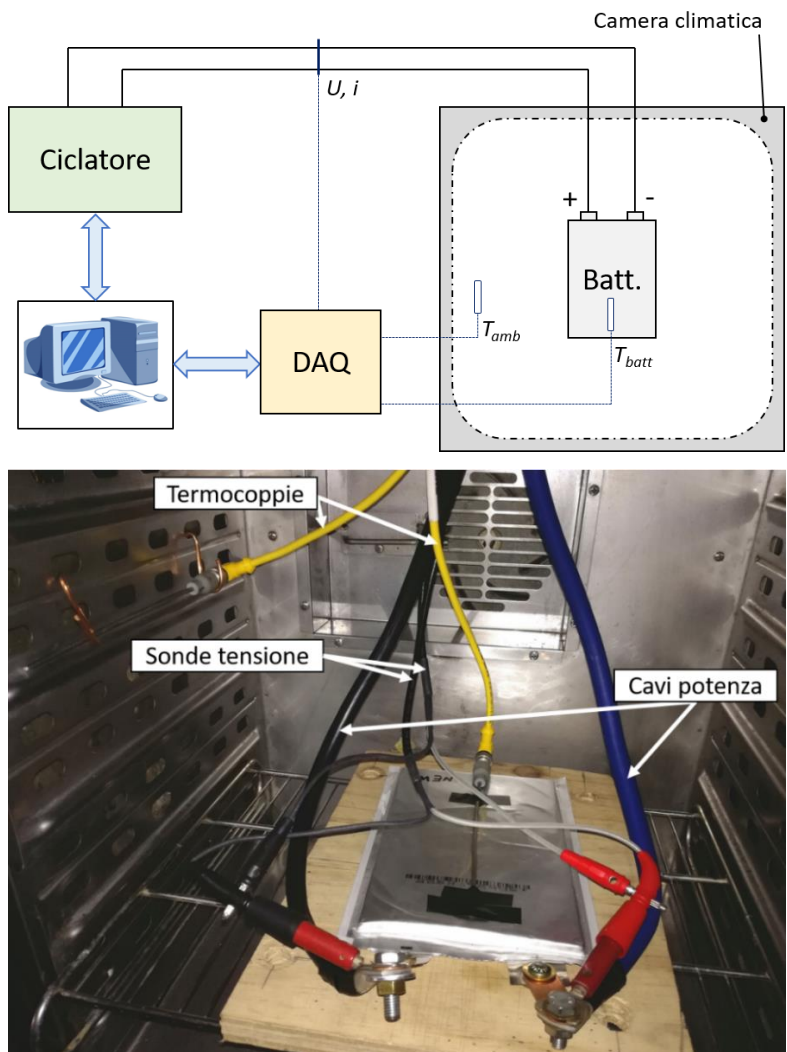


Figura 1. Setup di prova (in alto); cella durante i test (in basso)

2.3 Test effettuati

Il numero delle celle utilizzate è risultato pari a tre. Una cella in condizioni di inizio vita denominata "NEW", e due celle in condizioni di fine vita, rispettivamente chiamate "AGED #1" ed "AGED #5". Le combinazioni dei test effettuati sulle celle a disposizione sono riassunte nella Tabella 2 che segue.

TEST		Celle testate		
		NEW	AGED #1	AGED #5
Misura capacità effettiva		✓	✓	✓
Multiple Step Test		✓	✓	✓
NEDC Test		✓	-	✓
Test in potenza	3C	✓	✓	✓
	4C	✓	✓	✓
	5C	✓	✗	✗
	8C	✓	✗	✗
	10C	✓	✗	✗

Legenda:
 ✓ : test eseguito con successo
 ✗ : test fallito in corso di prova
 - : test non eseguito

Tabella 2. Matrice di test delle prove sperimentali effettuate

Preliminarmente, è stato effettuato un test di scarica completa sulle celle in esame, al fine di misurare la differenza di capacità estratta tra cella nuova e celle invecchiate.

Il test attraverso cui effettuare la calibrazione del modello di batteria si chiama invece Multiple-Step-Test (MST), visibile in Figura 2. Tutti i parametri sono funzione dello stato di carica (SOC) e della temperatura di cella. Il test è definito al fine di scaricare progressivamente la cella, con una serie di step successivi di scarica a corrente costante, ciascuno in grado di estrarre il 10% della capacità nominale. Tra una scarica e la successiva, viene interposta una pausa di 3600 s, in modo da leggere ai morsetti una tensione equivalente a quella a circuito aperto.

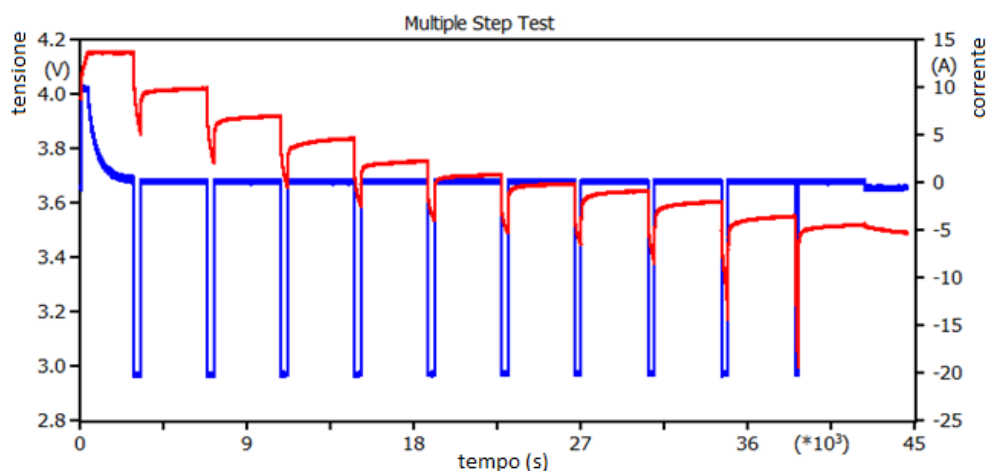


Figura 2. Sollecitazione in corrente per il test in potenza

Infine, nell'ottica di testare le prestazioni della cella, si è invece definito un profilo di carica-scarica secondo quanto riportato in Figura 3. Tali profili si compongono di un tratto di carica (o scarica simmetrica) della durata di 30 secondi, seguita da una pausa di 20 secondi. Mantenendo questa forma d'onda, vengono eseguite diverse prove variando l'intensità dei gradini di corrente (XC in Figura 3), rispettivamente pari, in termini di C-rate, a: 3, 4, 5, 8 e 10C.

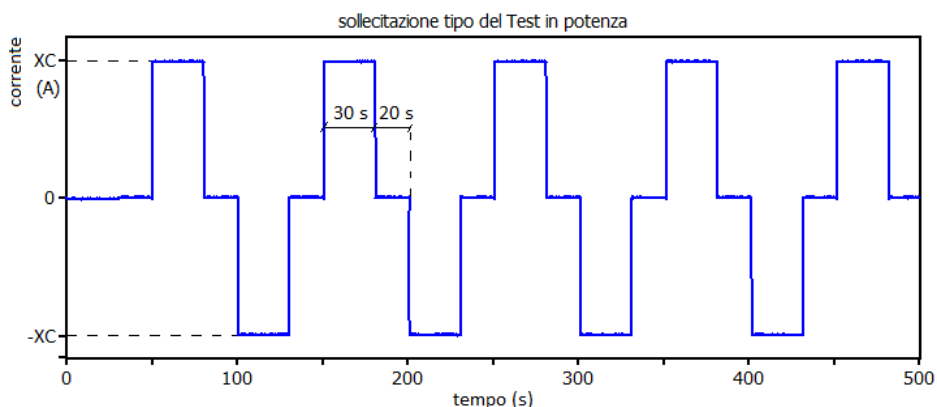


Figura 3. Sollecitazione in corrente per il test in potenza

Durante ciascun test la batteria viene sollecitata finché non si raggiunge l'equilibrio termico fra la temperatura di cella e la temperatura ambiente, opportunamente misurata e monitorata. Qualora la temperatura della cella superi la temperatura massima di 55°C definita dal costruttore, la prova viene interrotta.

3 Risultati

3.1 Test di capacità estratta

La Figura 4 mostra gli andamenti delle scariche complete effettuate sulle celle in esame. Si nota subito come la cella nuova (NEW) riesca ad erogare un quantitativo nettamente superiore alle altre due (17,2 Ah rispetto ai 15 e 14 delle celle AGED #1 ed AGED #5). Per queste ultime due celle, si conferma lo stato di fine vita utile, avendo estratto, appunto, una capacità complessiva inferiore all'80% di quella nominale ($20 \cdot 0,8 = 16$ Ah).

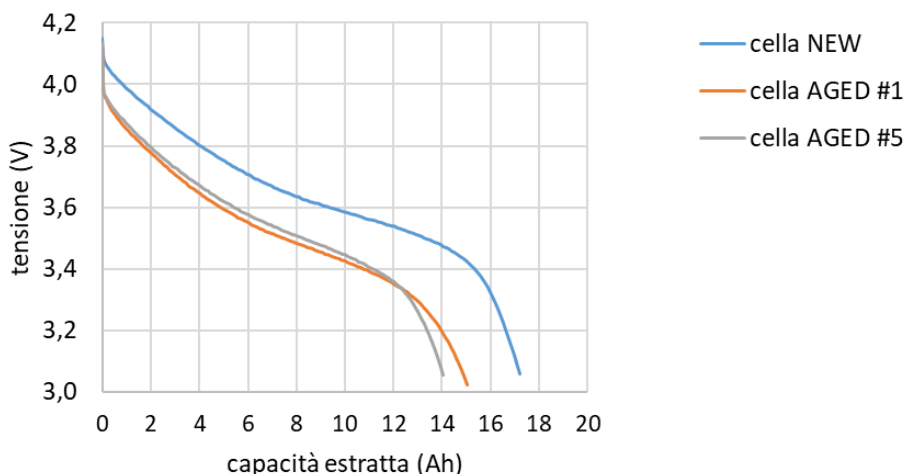


Figura 4. Misura di capacità effettiva delle celle testate

3.2 Valutazione dell'invecchiamento mediante analisi dei parametri

Attraverso il tool di valutazione dei parametri sviluppato in [1], relativo all'identificazione delle grandezze del circuito equivalente di Figura 5, è stata in particolare analizzata la variazione di resistenza interna per una delle celle invecchiate.

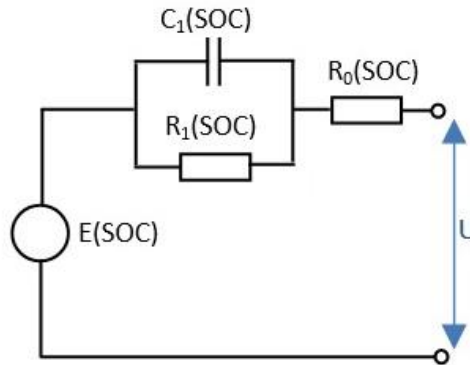


Figura 5. Modello equivalente di cella al litio

I valori di resistenza interna R_0 sono stati ottenuti dai dati forniti ENEA, responsabile dei test di invecchiamento, e riportati in Figura 6. In aggiunta ai valori sperimentali, sono riportate anche le curve di trend ottenute, ottenute dai valori di resistenza interna rilevate a diverso numero di cicli. Così la curva in celeste è la curva di tendenza che prende a riferimento i valori di resistenza interna fino a 1000 cicli, la curva in verde quelli fino a 1600 cicli, la rossa quelli fino a 2000 cicli.

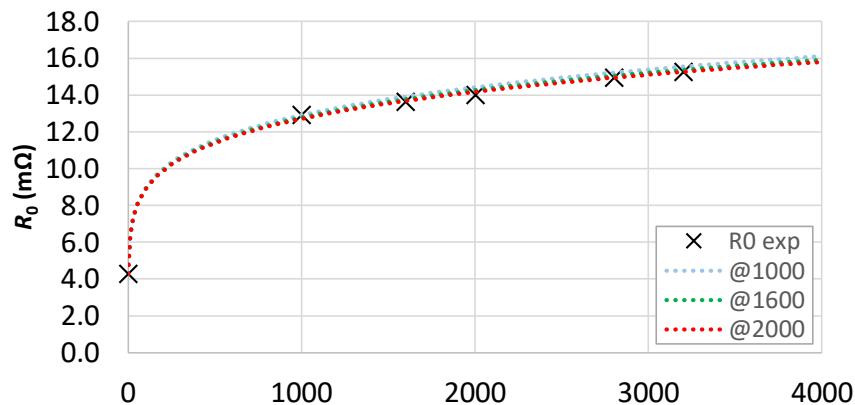


Figura 6. Andamento della resistenza interna R_0 funzione del numero di cicli [2]

Come osservabile, le curve di trend ottenute sono in tutti i casi allineate ai valori sperimentali. Ci si è posti quindi il problema di valutare la possibilità di definire procedure di calcolo della resistenza interna da effettuarsi on-line, senza cioè disconnettere la batteria dall'impianto nel quale è inserita, al fine di effettuare poi, sulla base della curva off-line di laboratorio, l'identificazione dell'effettivo livello di invecchiamento. Per far ciò sono stati condotti due test ulteriori:

- I parametri del circuito di Figura 5, calcolati off-line, sono stati utilizzati in un modello di simulazione nel quale è stato imposto un profilo di corrente derivato da un ciclo di impiego realistico della batteria, e confrontate la tensione misurata sperimentalmente con quella simulata. In questo caso, il modello di batteria ricopia fedelmente l'andamento sperimentale, il che comprova la qualità della stima off-line dei parametri. I risultati del test sono riportati in Figura 7.
- Il secondo test prevede che il calcolo dei parametri venga effettuato su un profilo di impiego realistico, rispetto al MST descritto in Figura 2, in modo da simulare una procedura di calcolo da effettuarsi senza disconnettere la batteria dall'impianto. Al termine del test, i parametri ottenuti dal profilo realistico

sono stati confrontati con quelli ottenuti dal metodo off-line, al fine di verificare l'esattezza dei valori ottenuti. Effettivamente, i parametri ottenuti sono risultati circa equivalenti ai precedenti, potendosi concludere che la procedura di calcolo può eseguirsi correttamente anche on-line [2].

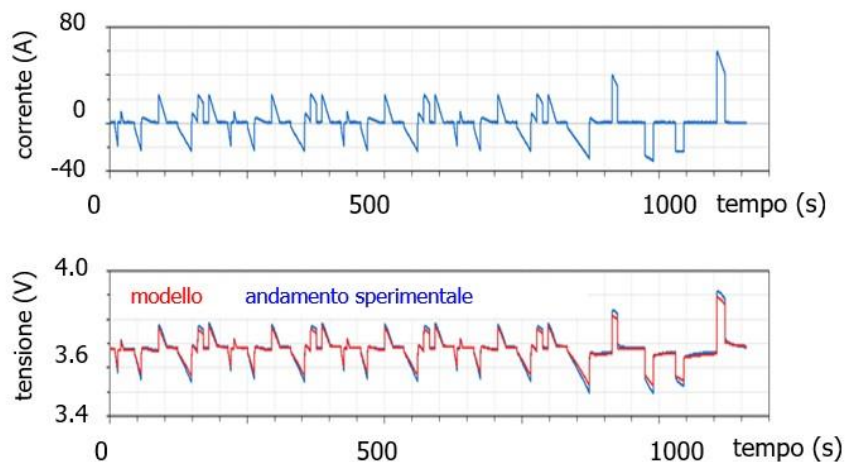


Figura 7. Utilizzo dei parametri della procedura off-line nel modello di simulazione della batteria [2]

3.3 Test di potenza

Un esempio di andamento delle grandezze principali misurate in questa prova è illustrato in Figura 8, nella quale si riporta il caso di prova effettuata su cella nuova, sottoposta al profilo di corrente di Figura 3, con valore di picco pari a 5C (100 A).

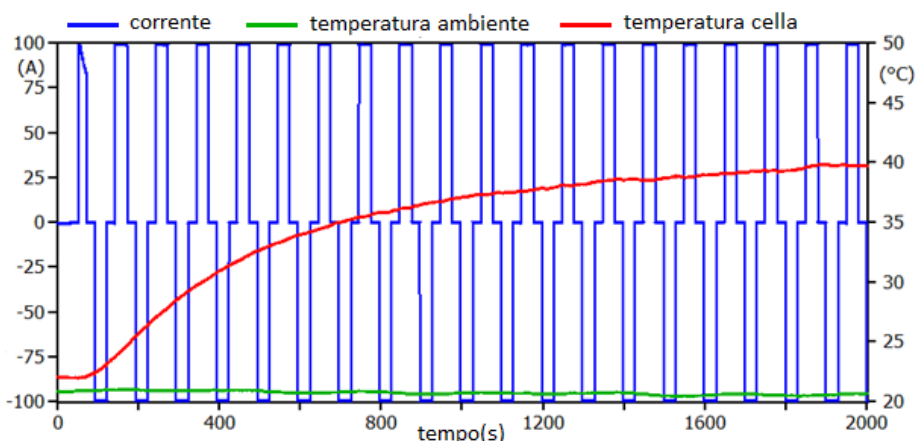


Figura 8. Andamento del test di potenza, misura della temperatura

L'insieme dei risultati ottenuti è invece riportato in Figura 9. I valori della corrente di prova variano da un minimo pari a 3C (60 A), a un massimo pari a 10C (200 A). La temperatura massima raggiunta è risultata pari a 55°C.

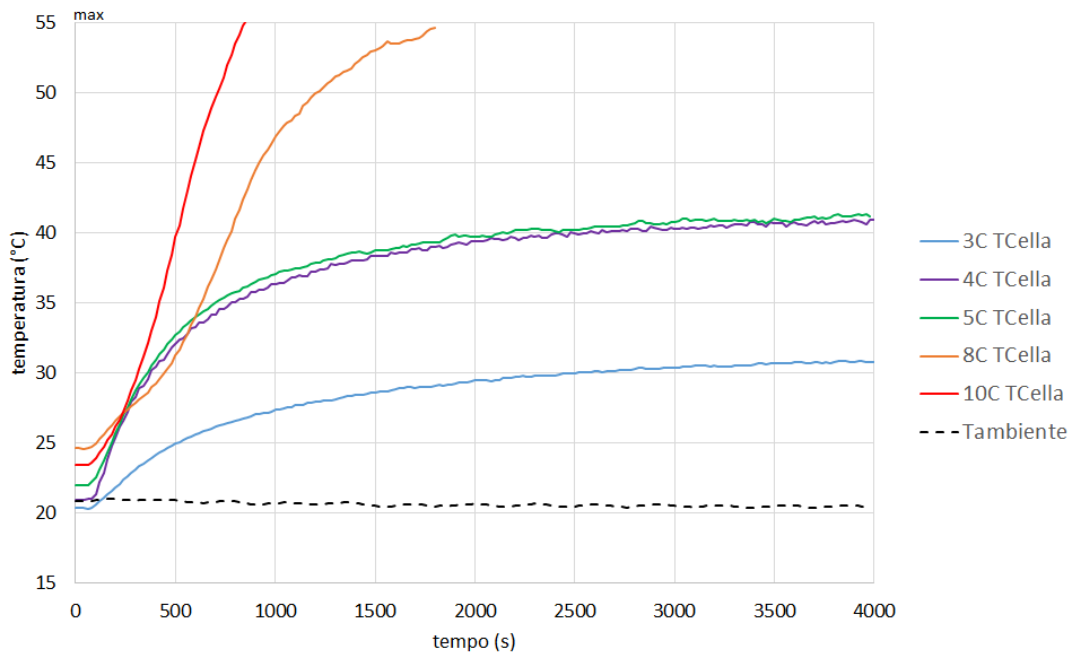


Figura 9. Risultati ottenuti per il test in potenza, cella nuova

Per avere un ulteriore riscontro sulla misura della temperatura è stata utilizzata anche una termo-camera, per il controllo dell'uniformità termica superficiale della cella in esame. La Figura 10 riporta la situazione interna alla camera climatica subito dopo il termine della prova a 10C.

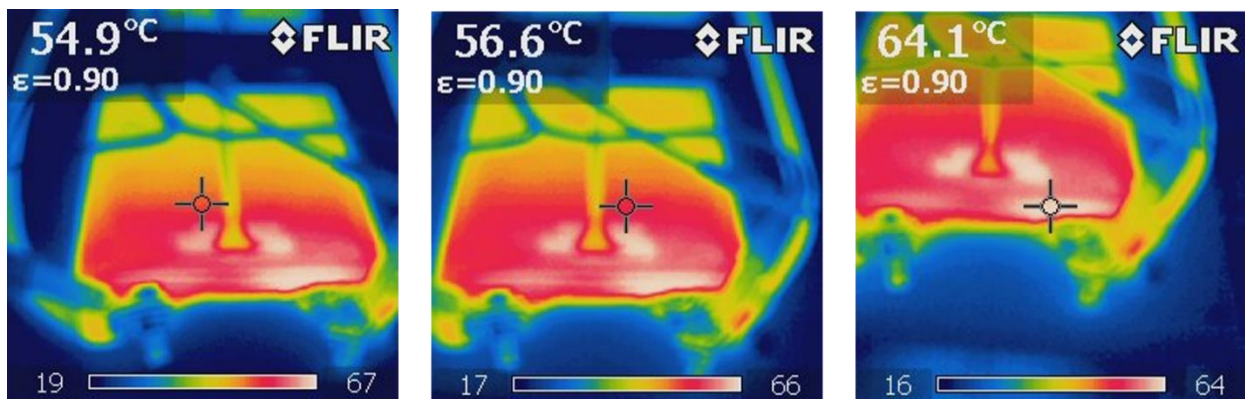


Figura 10. Fotografie con termo-camera, cella nuova

Lo stesso tipo di test è stato effettuato anche su cella invecchiata. In questo caso è stato osservato un incremento di temperatura mediamente inferiore ai 10°C, dunque pienamente tollerabile, nel caso di cella a fine vita. Il problema principale ha però riguardato l'impossibilità di condurre prove oltre 4C, a causa dell'impossibilità della cella invecchiata di mantenersi all'interno del range di tensione ammesso, per via dell'incremento di resistenza interna. I risultati sono riassunti nella successiva Figura 11. Infatti, a parità di gradino di corrente con cui si sollecita la batteria, si riscontra un incremento di tensione molto più ampio di quello riscontrato nella cella nuova, motivo per il quale prestazioni impulsive oltre 4C (80 A di picco) da parte della cella invecchiata sono da ritenersi impraticabili nel rispetto del range di tensione suggerito dal costruttore.

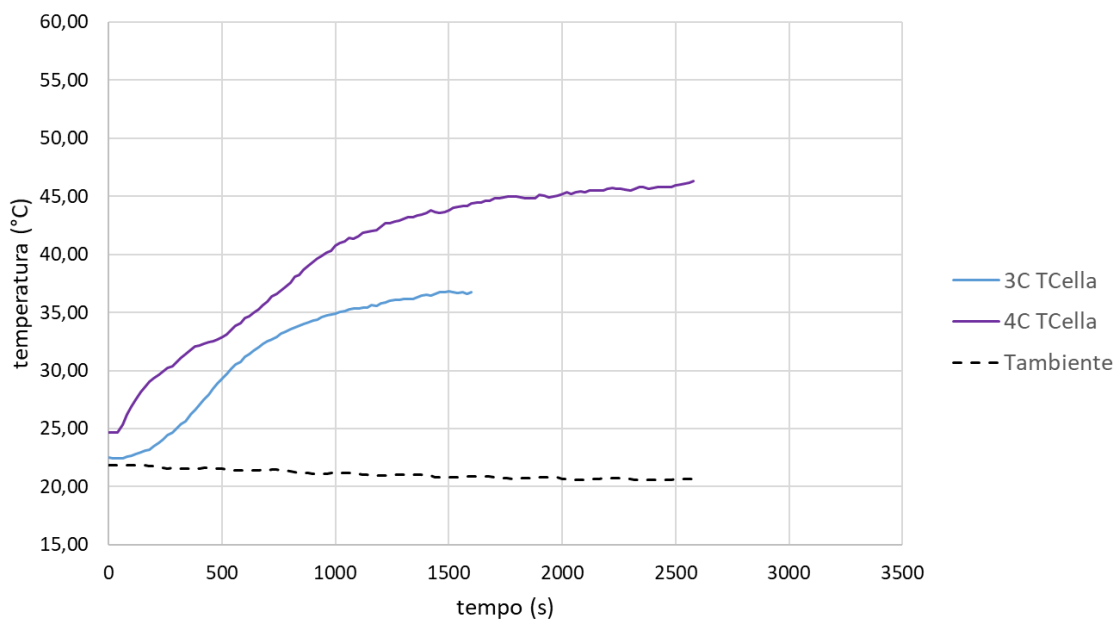


Figura 11. Risultati ottenuti per il test in potenza, cella invecchiata

4 Conclusioni

La presente attività ha avuto inizialmente l’obiettivo di identificare trend di evoluzione dei parametri caratteristici con l’invecchiamento della cella. Ciò è stato realizzato attraverso le consuete procedure di analisi dei parametri circuitali equivalenti, in particolare la resistenza interna, sulla base di prove effettuate da ENEA. I risultati hanno dimostrato che le procedure di calcolo di suddetti parametri possono effettuarsi anche on-line, senza disconnettere l’accumulo dall’impianto in esercizio.

Sono poi stati effettuati test sperimentali aventi l’obiettivo di analizzare in dettaglio il livello di prestazioni fornito dalle celle invecchiate rispetto alle nuove. Le verifiche effettuate a livello termico hanno mostrato incrementi accettabili per gli stress cui le celle sono state sottoposte. Tuttavia, a differenza di quanto accaduto per la cella nuova, la cella invecchiata non è riuscita a mantenersi nel range di tensioni ammissibili oltre un certo livello di corrente, a causa dell’incremento di resistenza interna. Tale aspetto, variabile in funzione dell’invecchiamento, evidenzia dunque indirettamente il decadimento di prestazioni in potenza.

5 Riferimenti bibliografici

- [1] M. Ceraolo, R. Giglioli, G. Lutzemberger: “Modellazione di sistemi di accumulo e loro validazione sperimentale. Analisi dell’invecchiamento”, Report di Ricerca di Sistema Elettrico, Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA, PAR 2016, Ottobre 2017.
- [2] M. Ceraolo, G. Lutzemberger, et alii: “Experimental analysis of NMC lithium cells aging for second life applications”, 18th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEE), 2018 IEEE, 12-15 June 2018, Palermo.

6 Curricula del gruppo di lavoro

Stefano Barsali (1969)

Ha conseguito laurea e dottorato di ricerca in Ingegneria Elettrica presso l'Università di Pisa nel 1994 e 1998 rispettivamente. Dal 2000 è stato ricercatore dall'ottobre 2006 è professore associato presso l'Università di Pisa dove è attualmente titolare degli insegnamenti di "Sistemi di produzione dell'energia elettrica" e "Dinamica e controllo dei sistemi elettrici per l'energia" del corso di laurea magistrale in Ingegneria Elettrica. Dal dicembre 2012 è presidente del Consiglio di Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica. Nel dicembre 2013 ha conseguito l'abilitazione scientifica nazionale alle funzioni di professore universitario di prima fascia nel settore concorsuale 09/E2 – Ingegneria dell'Energia Elettrica. Svolge la propria attività di ricerca presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi del Territorio e delle Costruzioni (DESTEC) dell'Università di Pisa. Dal 2004 al 2008 ha svolto la funzione di segretario dello Study Committee C6 CIGRÉ su "Distribution Systems and Dispersed Generation" ed è stato membro di due task force CIGRÉ ed attualmente partecipa ai lavori del WG C6.30 "Impact of battery energy storage systems on distribution networks". I principali temi della ricerca svolta più di recente sono:

- Generazione distribuita dell'energia elettrica e fonti rinnovabili.
- Sistemi di accumulo elettrochimico ed applicazioni in veicoli a propulsione ibrida.
- Riaccensione del sistema elettrico a seguito di black-out.

Tale attività è stata condotta sia in collaborazione con altre Università (anche nell'ambito di progetti PRIN) che con enti esterni (ENEL, CESI, AEI, GRTN/TERNA, CIGRÉ, ecc.).

Fabio Bonsignori (1960)

Fabio Bonsignori ha conseguito il diploma di perito industriale, specializzazione Elettrotecnica, presso l'I.T.I.S "L. da Vinci" Pisa, nell'a.s. 1978/79. Dal 1/06/1980 al 31/12/1988 ha lavorato come dipendente della ditta Montesi snc, settore impianti elettrici, con la qualifica di operaio. Dal 2/01/1989 è in servizio presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni-DESTEC (ex Dipartimento dei Sistemi Elettrici e dell'Automazione DSEA) dell'Università di Pisa, con la qualifica di dipendente tecnico di Livello D1. Successivi corsi frequentati: "Sicurezza, prevenzione e formazione sul luogo di lavoro", presso Università di Pisa, Corso di Lingua inglese (Livello elementare e pre-intermedio).

Massimo Ceraolo (1960)

Ricercatore universitario dal 1992 professore Ordinario di Sistemi Elettrici per l'Energia dal 2002 presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Pisa. E' docente degli insegnamenti di Sistemi Elettrici di Bordo presso l'Università di Pisa e presso l'Accademia Navale di Livorno. La sua attività di ricerca nell'ultimo decennio si è prevalentemente sviluppata nel settore dell'accumulo elettrochimico dell'energia, e dei veicoli a propulsione elettrica e ibrida. Su questi ultimi temi stato autore negli ultimi 10-15 anni di oltre 40 pubblicazioni, prevalentemente a carattere internazionale, di cui si allegano i riferimenti. Attualmente coordina lo sviluppo di un veicolo a propulsione elettrica alimentato a fuel-cell ad idrogeno. E' presidente del Corso di Dottorato in Veicoli Terrestri e Sistemi di Trasporto e membro del Comitato di Presidenza della Commissione Veicoli Elettrici Stradali.

Romano Giglioli (1951)

Laureato con lode in Ingegneria Elettrotecnica nel 1976, nello stesso anno ha ricevuto il premio di Economia e Tecnica dell'Energia "G. Levi Cases".

Dal 1994 è Professore Ordinario e ricopre le cattedre di "Sistemi Elettrici per l'Energia e Tecnica ed Economia dell'Energia".

In collaborazione con strutture di ricerca pubbliche e private, sia nazionali che internazionali, ha contribuito, con studi teorici e sperimentali, all'innovazione e allo sviluppo di sistemi e dispositivi per la produzione, trasporto ed accumulo (in particolare elettrochimico) dell'energia elettrica e dei sistemi di conversione energetica, nonché dei sistemi di trasporto con propulsione elettrica ed ibrida. Sta inoltre promuovendo e sviluppando attività di ricerca nei settori della Smart grids, Smart Cities e Smart Communities. L'attività di ricerca è testimoniata da oltre un centinaio di pubblicazioni, dalla titolarità di alcuni brevetti utilizzati nell'ambito dei sistemi elettrici per l'energia ed in quelli di conversione energetica e dalla realizzazione di numerosi sistemi e dispositivi prototipali.

Ha assunto nel tempo incarichi direzionali nell'Ateneo di Pisa e in strutture pubbliche. Inoltre è esperto tecnico scientifico per la valutazione per il MIUR dei progetti PRIN e dei progetti PON e incaricato dal Ministro della Ricerca (MIUR) quale esperto italiano nel Comitato di programma Horizon 2020, nell'ambito della configurazione denominata "Secure, Clean and Efficient Energy" e membro del comitato CIACE (Dipartimento delle Politiche Europee della Presidenza del Consiglio).

Giovanni Lutzemberger (1981)

Nato a Pisa il 31/12/1981, ha conseguito il Diploma di Maturità classica nel Luglio dell'anno 2000. Ha conseguito la Laurea Specialistica in Ingegneria dei Veicoli Terrestri nel 2007 presso l'Università di Pisa, ed è risultato tra i vincitori con borsa del Concorso di ammissione al Dottorato di Ricerca in Veicoli Terrestri e Sistemi di Trasporto (Ciclo 2008-2010) presso la Scuola di Dottorato Leonardo da Vinci.

Nel 2011 ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca discutendo la tesi dal titolo "Battery, Hybrid and Fuel Cell vehicle propulsion systems". Nel 2011 è risultato vincitore della Selezione pubblica per il conferimento di un assegno di ricerca di durata biennale sul tema "Modellazione e sperimentazione di batterie al litio per applicazioni veicolari", presso il Dipartimento di Ingegneria dell'energia e dei sistemi (Università di Pisa), di cui ha ottenuto il rinnovo nel 2013. Nel 2014 è risultato vincitore della Selezione pubblica per l'assunzione di un Ricercatore a tempo determinato L.240/2010 di tipo junior (RTD-A) presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni (Università di Pisa), Settore concorsuale 09/E2 "Ingegneria dell'energia elettrica", Settore scientifico-disciplinare ING-IND/33 "Sistemi elettrici per l'energia". Nel 2016 è risultato vincitore della Selezione pubblica per l'assunzione di un Ricercatore a tempo determinato L.240/2010 di tipo senior (RTD-B) presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni (Università di Pisa), Settore concorsuale 09/E2 "Ingegneria dell'energia elettrica", Settore scientifico-disciplinare ING-IND/33 "Sistemi elettrici per l'energia". La sua attività di ricerca si è prevalentemente sviluppata nel settore dei veicoli a propulsione elettrica e ibrida e dell'accumulo elettrochimico dell'energia. Su questi ultimi temi è stato autore di 22 pubblicazioni, prevalentemente a carattere internazionale.

Davide Poli (1972)

Nel luglio 1991 ha ottenuto la maturità scientifica a pieni voti presso il Liceo Statale "Giosuè Carducci" di Volterra. Durante il periodo 1994-96 ha ricevuto una borsa di studio Siemens per studenti della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Pisa, su base di merito; tale borsa gli ha permesso vari soggiorni di studio e tirocinio in Germania. Nel luglio 1997 si è laureato con lode in Ingegneria Elettrica presso l'Università di Pisa, con una tesi dal titolo "Simulazione tecnico-economica di un parco di generazione idro-termoelettrico: una tecnica per la messa a punto di contratti tra Utility e Produttori Indipendenti", con relatori i professori Luigi Paris e Paolo Pelacchi. Dal 1998 al 2001 ha frequentato presso la stessa Università il corso di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Elettrotecnica (XIV ciclo). In tale ambito si è occupato dell'analisi di sistemi elettrici liberalizzati (California, Spagna, Inghilterra, PJM, Italia) e di problematiche di tariffazione per clienti idonei e vincolati. Ha concluso il corso di dottorato con una tesi dal titolo: "Mercati elettrici liberalizzati – Analisi del

funzionamento e tecniche di simulazione". Il 1° agosto 2001 è diventato ricercatore universitario nel settore scientifico disciplinare INGIND/33 "Sistemi Elettrici per l'Energia", con afferenza al Dipartimento di Sistemi Elettrici e Automazione dell'Università di Pisa, poi divenuto DESE e infine DESTEC (Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni). E' stato confermato in ruolo nel 2004. E' abilitato alla professione di ingegnere. Nel dicembre 2013 ha ottenuto l'Abilitazione Scientifica Nazionale (ASN 2012) al ruolo di professore di seconda fascia nel Settore Concorsuale 09/E2 "Ingegneria dell'energia elettrica". A fine ottobre 2014 è risultato vincitore di procedura selettiva ex art.18 legge 240/2010 per Professore di seconda fascia (professore associato) nel Settore Concorsuale 09/E2 "Ingegneria dell'energia elettrica" – Settore Scientifico Disciplinare ING-IND/33 "Sistemi Elettrici per l'Energia" ed è stato chiamato in ruolo dal DESTEC il 13 novembre 2014.