



Ricerca di Sistema elettrico

Modelli preliminari di funzionamento e invecchiamento di celle al litio

Stefano Cordiner, Vincenzo Mulone

MODELLI PRELIMINARI DI FUNZIONAMENTO E INVECCHIAMENTO DI CELLE AL LITIO

S. Cordiner, V. Mulone (Università di Roma Tor Vergata, Dipartimento di Ingegneria Industriale)

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2014

Area: Governo, Gestione e Sviluppo del Sistema elettrico Nazionale

Progetto: Sistemi avanzati di accumulo dell'energia

Obiettivo: Analisi sperimentali e validazioni di sistemi di accumulo per una tranvia leggera e per la "second life" e l'invecchiamento di celle litio-ione

Responsabile del Progetto: Mario Conte, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *"Modelli di simulazione e di previsione dell'invecchiamento di batterie litio-ione"*

Responsabile scientifico ENEA: Manlio Pasquali

Responsabile scientifico Tor Vergata: Stefano Cordiner

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI	6
2.1 DESCRIZIONE MODELLO CIRCUITALE DI BATTERIE LI-ION.....	6
2.2 ANALISI DEI RISULTATI: CONFRONTO NUMERICO-SPERIMENTALE DEL COMPORTAMENTO DINAMICO DI UNA BATTERIA LI-ION NUOVA 8	
3 CONCLUSIONI.....	10
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	10
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	11

Sommario

Il presente RT illustra i dettagli dell'implementazione di un modello circuitale per la simulazione del comportamento di batterie Li-ion, in grado valutare l'evoluzione dinamica della tensione una volta imposto il profilo di corrente nel tempo.

Utilizzando una definizione relativamente semplice, il modello consente di rappresentare non solo le non linearità del comportamento della batteria – in corrispondenza di estremali dello State of Charge – ma anche i fenomeni dinamici di rilassamento della tensione durante il transitorio di erogazione della corrente.

Le prestazioni del modello sono valutate nell'ambito della presente attività mediante confronto diretto con dati sperimentali acquisiti per una batteria nuova. Il ciclo di prova è definito come una serie di processi, in cascata, di scarica profonda a 4.3A, di successiva stabilizzazione della tensione e di carica profonda a 4.3A.

I parametri di input del modello sono definiti sulla base dei valori di tensione nominale e massima, delle frazioni dello stato di carica alle quali corrisponde il comportamento non lineare della batteria e della costante di tempo che descrive la durata dei fenomeni dinamici di rilassamento.

I risultati ottenuti sono soddisfacenti, valutando il confronto tra la tensione calcolata rispetto a quella misurata sperimentalmente durante l'intero ciclo di test. Inoltre, la semplicità del modello e i ridotti tempi di calcolo, fanno potenzialmente del modello un ottimo strumento per applicazioni di carattere controllistico, oltre che per applicazioni diagnostiche atte a valutare lo stato di salute della batteria.

1 Introduzione

La possibilità di rappresentare il comportamento di batterie o sistemi di batterie tramite modelli dalle assunzioni semplificate, ma in grado di replicare pur con un certo inevitabile errore l'evoluzione nel tempo dei parametri di prestazione fondamentali, e cioè tipicamente tensione (voltage [V]), corrente (current [A]) e stato di carica (SOC [%]) o capacità (capacity [Ah]), è di grande utilità nel contesto sia della progettazione di componenti e sistemi (ad esempio sistemi di controllo e gestione del pacco batterie, o BMS, Battery Management Systems), e sia nel contesto del controllo di componenti e sistemi. In quest'ultimo caso, l'utilizzo di modelli, ad esempio, consente di valutare lo stato di carica (SOC) mediante la misura della tensione, o, con maggior accuratezza, mediante la misura combinata della tensione e della corrente, con tecniche quali l'utilizzo del filtro di Kalman [1,2].

La modellazione del comportamento della batteria è tradizionalmente affrontata sulla base di 3 approcci:

- Approccio sperimentale
- Approccio elettrochimico
- Approccio circuitale

L'utilizzo dell'approccio sperimentale, basato sull'utilizzo di look-up tables definite a partire dalle curve di scarica espresse in funzione del discharge rate (C-rate), vedi Figura 1, non consente alcuna rappresentazione dei fenomeni dinamici dato che tali curve sono misurate in condizioni stazionarie [3-5].

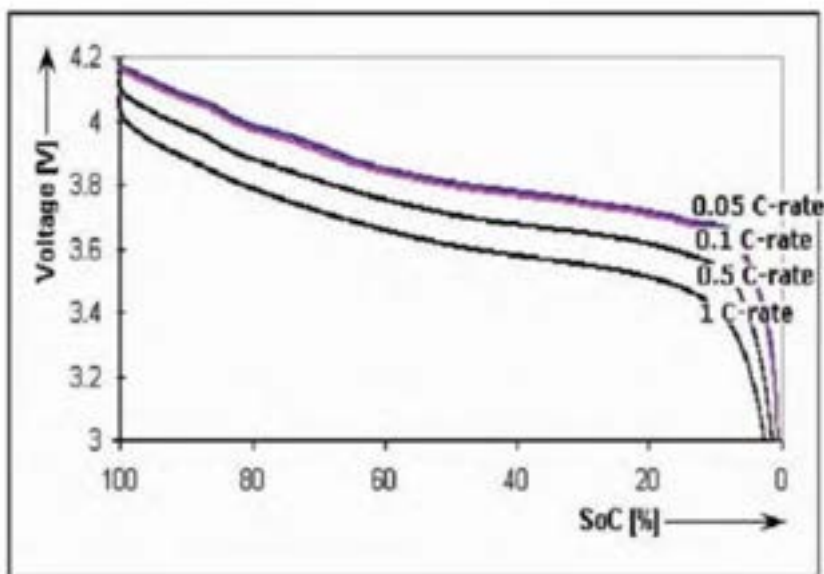


Figura 1. Curve di scarica per una batteria Li-ion in funzione del C-rate [1]

L'approccio elettrochimico, accoppiato alla risoluzione delle equazioni dello scambio termico [6], è di solito utilizzato per la progettazione degli elementi, dato che modella direttamente le equazioni di trasporto diffusivo delle specie chimiche coinvolte, e può consentire la validazione di modelli più semplificati per applicazioni, ad esempio, controllistiche [7].

I modelli basati sull'approccio circuitale [8] sono tra i più diffusi: infatti tali modelli, per definizione, tengono conto delle caratteristiche elettriche della batteria, che ne rappresenta la fondamentale attrattiva per applicazioni orientate all'utilizzo di batterie (application oriented). Tra i modelli circuitali, i più diffusi rappresentano la batteria tramite una capacità in serie a uno o più circuiti RC (resistenza e capacità in parallelo): alcuni esempi sono riportati in Figura 2, a partire dal più semplice modello Rint, fino a modelli più complessi caratterizzati da numerose maglie RC in parallelo. Questi ultimi modelli consentono potenzialmente un'accurata rappresentazione dei fenomeni dinamici di rilassamento, mediante l'evoluzione transitoria dei circuiti RC, ma presentano alcune difficoltà nell'identificazione dei parametri,

specialmente all'aumentare del numero di circuiti RC, e del numero, quindi, delle costanti di tempo. I valori di R e C sono tipicamente ricavati attraverso tecniche sperimentali quali la impedance spectroscopy [9,10].

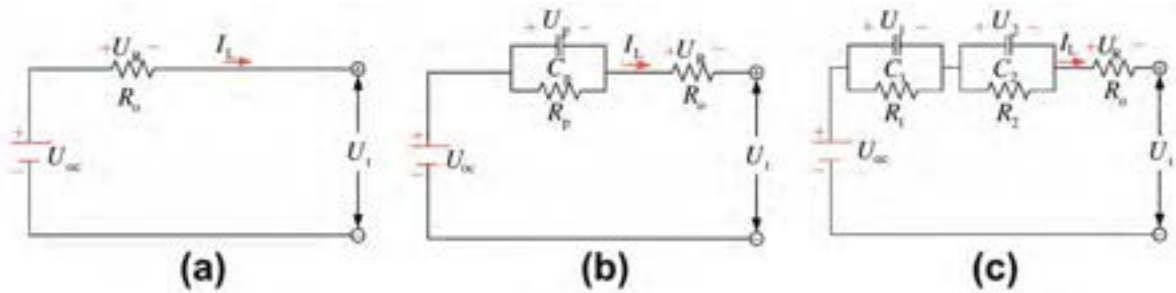


Figura 2. Modelli circuitali basati sulla Warburg impedance [11] (a) modello Rint, (b) modello di Thevenin, (c) modello DP.

Il problema fondamentale dei modelli basati sulla Warburg impedance consiste nella deviazione dal comportamento lineare, anche in condizioni di carico stazionarie, problema particolarmente evidente a ridotti e elevati SOC, dove la tensione evolve tipicamente secondo un andamento esponenziale. Questi aspetti possono essere corretti mediante la definizione di un comportamento non lineare della capacità principale [1], o attraverso la definizione di un potenziale di polarizzazione [12,13]. Questo approccio è utilizzato nel caso in esame.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Descrizione modello circuitale di batterie Li-ion

Il modello circuitale qui presentato, si riferisce a batterie Li-ion, ed è schematizzato in Figura 3.

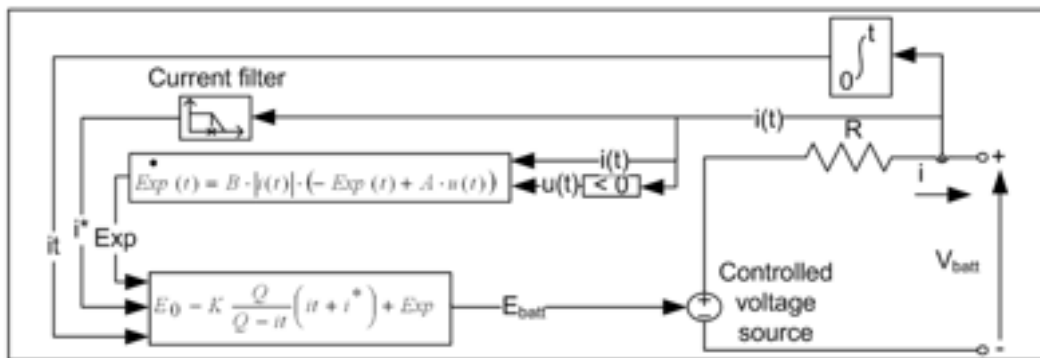


Figura 3. Schema circuitale del modello della batteria [12]

Facendo riferimento alla Figura 3, il potenziale ai capi della batteria è espresso attraverso la seguente formula

$$V_{batt} = E_0 - K \frac{Q}{Q - it} it - Ri + A \exp(-B it) - K \frac{Q}{Q - it} i^* \quad (1)$$

dove:

- E_0 = componente costante della tensione (misurato in V)
- K =costante di polarizzazione (misurata in V/Ah), termine che rappresenta il contributo di una resistenza di polarizzazione
- Q =capacità della batteria (misurata in Ah)
- $it = \int_0^t idt$ = carica (attuale) contenuta nella batteria al tempo t, misurata in Ah

- A=potenziale di riferimento (misurato in V) per il regime di scarica esponenziale
- B=termine che rappresenta l'inverso della costante di tempo relativa alla scarica in regime esponenziale (misurato in Ah⁻¹)
- i= corrente (misurata in A)
- i*=corrente filtrata e integrata (misurata in Ah)

Durante il ciclo di carica il modello si comporta in maniera differente, consentendo così un'adeguata rappresentazione dei fenomeni di isteresi tra i cicli di carica e di scarica, mantenendo al contempo la medesima caratteristica OCV e le medesime proprietà elettriche. In particolare, le batterie Li-ion sono contraddistinte da un repentino aumento della tensione alla fine del processo di carica, modellabile attraverso un termine che esprime l'aumento della resistenza di polarizzazione del tipo $K \frac{Q}{it} i^*$. Per evitare la presenza di una resistenza infinita a SOC=100%, la resistenza di polarizzazione è espressa tramite un termine del tipo $K \frac{Q}{it-0.1Q} i^*$. Il SOC è legato alla carica attualmente presente nella batteria tramite la (2).

$$SOC = \frac{Q - \int_0^t idt}{Q} = \frac{Q - it}{Q} \quad (2)$$

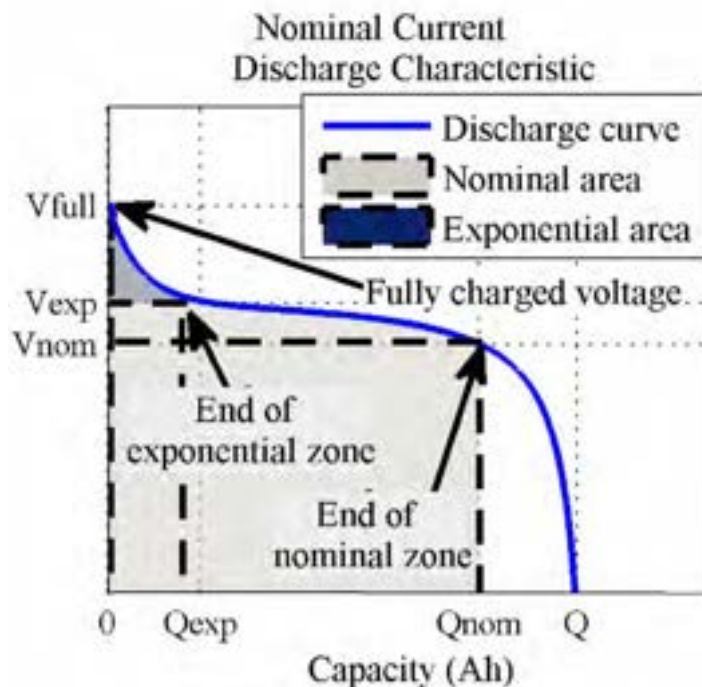


Figura 4. Modellazione della curva di scarica stazionaria, mediante tratti esponenziali [12]

In funzione dei parametri appena descritti, possono essere definiti ulteriori parametri espressi in relazione alla curva di scarica, per i quali ci si riferisce alla Figura 4:

- V_{full} è il valore della tensione corrispondente a una SOC del 100%, ed è tipicamente pari a circa 3.5 V per batterie Li-ion nuove. V_{full} è legato ai parametri esposti precedentemente dalla seguente formula:

$$V_{full} = E_0 - Ri + A \quad (3)$$

- V_{exp} =valore della tensione al di sopra della quale la curva di scarica presenta un comportamento esponenziale. Tipicamente questo valore è dell'ordine di 3.2V, assunto in corrispondenza di una SOC dell'ordine del 90%, nel caso di batterie Li-ion nuove. Si può esprimere V_{exp} in funzione dei

parametri circuitali, tenendo conto che B può essere approssimato a $3/Q_{exp}$, assumendo che il termine esponenziale si riduca al 5% dopo 3 costanti di tempo e che $i=i^*$, e assumendo la stazionarietà dei fenomeni:

$$V_{exp} = E_0 - K \frac{Q}{Q - Q_{exp}} (Q_{exp} + i) - Ri + A \exp\left(-\frac{3Q_{exp}}{Q_{exp}}\right) \quad (4)$$

- V_{nom} =valore della tensione nominale, al di sotto del quale la curva di scarica devia fortemente dal comportamento lineare. Tale valore è espresso in funzione della Q_{nom} , e per il caso di batterie Li-ion nuove tale valore è pari a 3.15V assunto in corrispondenza di SOC dell'ordine del 30%. Si può esprimere V_{nom} in funzione dei parametri circuitali, attraverso la seguente formula

$$V_{nom} = E_0 - K \frac{Q}{Q - Q_{nom}} (Q_{nom} + i) - Ri + A \exp\left(-\frac{3Q_{nom}}{Q_{exp}}\right) \quad (5)$$

- Il battery response time τ del filtro applicato alla i^* , esprime il tempo di rilassamento che per batterie nuove è dell'ordine di qualche minuto.

Risolvendo il sistema di equazioni definito dalle (3,4,5), si possono ricavare i parametri E_0 , K ed A in funzione di V_{full} , V_{exp} e V_{nom} , una volta assunti Q_{exp} , Q_{nom} , R e τ . I sette parametri indipendenti V_{full} , V_{exp} , V_{nom} , R , τ , $SOC_{exp}=Q_{exp}/Q$, $SOC_{nom}=Q_{nom}/Q$, consentono dunque di definire completamente il comportamento stazionario e dinamico della batteria, una volta nota la capacità (massima) Q .

2.2 Analisi dei Risultati: confronto numerico-sperimentale del comportamento dinamico di una batteria Li-ion nuova

Il modello di batteria è stato confrontato con dati sperimentali acquisiti su batterie Li-ion, e disponibili sotto forma di curve di scarica e carica di celle appena prodotte, e cioè in condizioni vergini.

Il modello è stato utilizzato per replicare gli esperimenti condotti, che prevedevano la scarica completa della cella a 4.3A, la stabilizzazione del valore della tensione, e l'effettuazione di un processo di carica completa al medesimo valore della corrente (4.3A). Durante il ciclo di carica, date le condizioni di sovratensione, il test è effettuato in modo da imporre, in feedback, una limitazione di corrente tale da mantenere le condizioni di tensione costante nel tempo.

I principali parametri utilizzati per la simulazione, ed i relativi valori, sono riportati in Tabella 1, e sono stati mantenuti invariati per l'intero ciclo di test (processi di carica, rilassamento, carica)

Tabella 1. : Parametri principali del modello di batteria, per la rappresentazione di un ciclo di carica e scarica profonda effettuato a 4.3A. Batteria nuova

V_{full} [V]	3.45
V_{exp} [V]	3.25
V_{nom} [V]	3.15
SOC_{exp} [%]	91.9
SOC_{nom} [%]	30
τ [s]	600
Q_{aged}/Q_0	1
R_{aged}/R_0	1

Dall'analisi di Figura 5, dove è riportato il confronto numerico (model) sperimentale (experimental) tra l'evoluzione della tensione durante ciclo di scarica completa, rilassamento e ciclo di carica completa, risulta evidente come il modello sia sostanzialmente in grado di replicare con buona accuratezza l'evoluzione della tensione nel tempo, una volta calibrati i parametri di tensione (V_{full} , V_{exp} e V_{nom}), di definizione dei domini

non lineari (SOC_{exp} e SOC_{nom}), insieme alla definizione della dinamica di rilassamento attraverso il parametro τ .

Risulta inoltre evidente come:

- Durante il processo di scarica il modello sia in grado di seguire correttamente le non linearità, sia in corrispondenza del limite superiore ($SOC > SOC_{exp}$) che in quello inferiore ($SOC < SOC_{nom}$);
- Il modello sia in grado di rappresentare linearmente il fenomeno di rilassamento, deviando dal comportamento sperimentale laddove emergano deviazioni dovute a non linearità;
- L'evoluzione della tensione durante il processo di carica sia soddisfacente soprattutto a ridotto SOC, mettendo in evidenza correttamente l'effetto di sovratensione;
- L'evoluzione della tensione durante la fase finale del processo di scarica sia sottostimata dal modello, in corrispondenza della fase a tensione costante. In tali condizioni, il modello è stato utilizzato in open-loop mantenendo in ingresso il medesimo dato di input imposto sperimentalmente mediante un controllo in controreazione (feedback).
- Una volta finito il processo di carica completa, ed effettuato il processo di rilassamento, la tensione predetta dal modello sia in linea con il valore rilevato sperimentalmente ($SOC=100\%$ a circuito aperto).

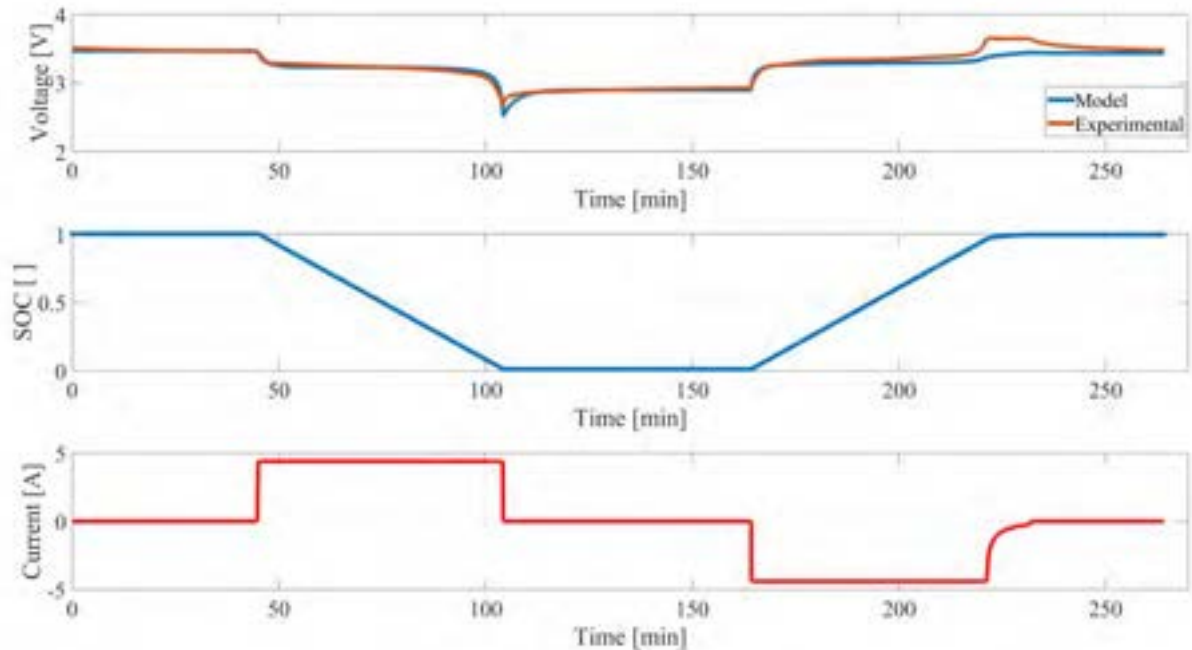


Figura 5. Ciclo di test di una batteria nuova. (top) confronto numerico-sperimentale dell' evoluzione della tensione (voltage) in funzione del tempo; (center) stato di carica (SOC) calcolato dal modello in funzione del tempo; (bottom) corrente (current) in funzione del tempo, imposta sia durante l' esperimento che come dato di input del modello

3 Conclusioni

Nel presente RT è stata illustrata la definizione di un modello per la rappresentazione del comportamento di una batteria Li-ion durante i processi di scarica e carica, tenendo conto dei fenomeni di rilassamento della tensione (comportamento dinamico).

La formulazione del modello, sebbene semplificata, consente di tenere conto delle non linearità del comportamento della batteria in corrispondenza degli stati sia a ridotto che a elevato stato di carica (SOC).

I principali risultati ottenuti da un confronto con dati sperimentali, consentono di trarre le seguenti conclusioni sintetiche:

- Il modello rappresenta in maniera sufficientemente accurata l'evoluzione dei processi di scarica, rilassamento e carica, mantenendo invariati i parametri di input.
- La deviazione tra dati numerici e sperimentali risulta minima soprattutto nella descrizione del processo di scarica, anche in corrispondenza dei tratti non lineari dell'evoluzione della tensione in funzione della corrente.
- La deviazione tra dati numerici e sperimentali risulta maggiore durante il processo di scarica, e particolarmente nella fase finale (fortemente non lineare) caratterizzata, sperimentalmente, da un comportamento a tensione costante.

4 Riferimenti bibliografici

1. Mecocci F., Mission Oriented and Dynamic Optimization of Parallel Hybrid Vehciles Powertrain and Energy Storage, PhD dissertation, University of Rome Tor Vergata, 2013.
2. Plett G.L., Extended Kalman Filtering for Battery Management Systems of LiPB-based HEV Battery Packs Part 3. State and Parameter Estimation, *J. Power Sources*, 134:277-292, 2004.
3. He H., Xiong R., Xu Y., Guo H., Online Model-Based Estimation of State-of-Charge and Open-Circuit Voltage of Lithium-ion Batteries in Electric Vehicles, *Energy*, 39, 310-318, 2012.
4. Pop V., Bergveld H.J., Danilov D., Regtien P.P.L., Notten P.H.L., Battery Management Systems: Accurate State-of-charge Indication for Battery-powered Applications, Springer, London, 2008.
5. Xing Y., He W., Pecht M., Tsui K.L., State of Charge Estimation of Lithium-ion Batteries Using the Open-Circuit Voltage at Various Ambient Temperatures, *Applied Energy*, 113, 106:115, 2014.
6. Song L., Evans J.W., Electrochemical-Thermal Model of Lithium Polymer Batteries, *J. Electrochemical Society*, 147, 2086:2095, 2000.
7. Kandler S.A., Rahn C.D., Wang C.Y., Control Oriented 1D Electrochemical Model of Lithium ion Battery, *En. Conv. Manag.*, 48, 2565:2578, 2007.
8. He H., Xiong R., Fan J., Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach, *Energies*, 4, 582:598, 2011.
9. Kuhn E., Forgez C., Lagonotte P., Friedrich G., Modeling Ni-MH Battery Using Cauer and Foster Structures, *J. Power Sources*, 158:1490-1497, 2006.
10. Galeotti M., Gianmarco C., Cinà L., Cordiner S., Di Carlo A., Synthetic Methods for the Evaluation of the State of Health (SOH) of Nickel-Metal hydride (NiMH) Batteries, *Energy Conversion and Management*, 92:1-9, 2015.
11. He H., Xiong R., Guo H., Li S. Comparison Study on the Battery Models Used for the Energy Managment of Batteries in Electric Vehicles. *Energy Conversion and Management*, 64:113-121, 2012.
12. Tremblay O., Dessaint L-A., Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications.
13. Tremblay O., Dessaint L-A, A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles, *Vehicle Power and Propulsion Conference*, pp 284-289, 2007.

5 Abbreviazioni ed acronimi

- BMS=Battery Management System
- SOC=State Of Charge
- Exp=Exponential
- Q=carica
- V,E,U=tensione
- τ =costante di tempo di rilassamento
- R=resistenza
- i=corrente

CURRICULA DEL GRUPPO DI STUDIO

Stefano CORDINER

Stefano Cordiner, dopo aver conseguito nel maggio 1989 la laurea in Ingegneria Meccanica presso l'Università di Roma Tor Vergata, ha iniziato la propria attività di ricerca nel campo dello studio dei motori a combustione interna e delle problematiche connesse al loro impatto sull'ambiente presso il Dipartimento di Ingegneria Meccanica della medesima Università. Nel luglio del 1993 ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca in Ingegneria delle Macchine e nello stesso anno ha vinto una borsa di studio nell'ambito del Progetto Finalizzato "Trasporti 2" del CNR. Le attività studio svolte in questo periodo, di natura teorico sperimentale, hanno anche compreso lo sviluppo di un laboratorio per la ricerca sui motori a combustione interna. Nel Novembre 1994 prende servizio presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Roma Tor Vergata come ricercatore del raggruppamento I04B e, dopo la riorganizzazione dei settori scientifici disciplinari, nell'SSD ING-IND 08 (Macchine a Fluido). Nel 1997 si conferma in ruolo e riceve dalla Facoltà di Ingegneria l'incarico di insegnamento in "Interazione fra le Macchine e l'Ambiente" in aggiunta all'intensa attività didattica svolta in supporto delle discipline afferenti all' SSD Nel luglio 2003 risulta vincitore di un concorso per Professore Universitario di II Fascia nello stesso settore disciplinare e nel novembre del 2004 prende servizio presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Roma Tor Vergata. In tale ruolo tiene diversi moduli di insegnamento nell'ambito dei Corsi di Laurea e Laurea Specialistica in Ingegneria per l'Ambiente ed il Territorio, nonché cicli di insegnamento nell'ambito di master e dottorato. Nel giugno 2010 risulta vincitore di un concorso per Professore Universitario di I Fascia nello stesso settore disciplinare e nello stesso mese viene chiamato presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Roma Tor Vergata. Nel dicembre 2012 ha preso servizio come Professore Straordinario dopo un'attesa di due anni e mezzo a causa di un blocco alle assunzioni di personale per l'Ateneo Tor Vergata Autore di circa 115 pubblicazioni, prevalentemente pubblicate su rivista internazionale o in atti di congressi internazionali, ha partecipato a numerosi progetti di ricerca in ambito nazionale ed internazionale ed in collaborazione con enti pubblici e privati. Ha attivato collaborazioni internazionali con l'University of British Columbia in Canada e con l'University of Nevada at Reno. E' stato inoltre responsabile di progetti di collaborazione con il CNR e l'ISPESL. Più recentemente ha affiancato alle attività di ricerca sui motori a combustione interna lo studio delle celle a combustibile e delle problematiche di utilizzo dell'idrogeno. In tale ambito e' stato responsabile del progetto di ricerca ACCEPT svolto nel V programma quadro dell'UE ed è stato membro del network tematico ENIGMATIC. Dal 2006 è membro di uno dei gruppi di lavoro (WG – Cross Cutting Issues) dell'Implementation Panel della Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform. E' responsabile di numerose iniziative di trasferimento tecnologico e di supporto all'innovazione nei confronti dell'industria nazionale ed internazionale nel campo dell'energia e dell'inquinamento derivante da processi di sua generazione. È stato ed è coordinatore locale di progetti di ricerca in collaborazione con importanti industrie nazionali (tra queste Enel, Faam, Riso Scotti, ASM di Brescia, Arcotronics) ed internazionali (Emitec, ALLPS, Suedchemie, etc.). Nell'ambito di alcune iniziative del Dipartimento di Ingegneria Meccanica finalizzate al supporto dell'innovazione in ambito industriale ha contribuito alla realizzazione di una efficiente metodologia finalizzata all'incremento della sostenibilità nei processi industriali. Ha inoltre svolto una intensa attività organizzativa: E' stato membro del Consiglio di Amministrazione dell'Università Tor Vergata dal novembre 2008 all'aprile 2013. Nell'ambito della Facoltà di appartenenza è stato più volte rappresentante dei ricercatori in Consiglio di Facoltà, è componente del Consiglio Scientifico della Biblioteca di area e del Centro Servizi della Facoltà; In ambito dipartimentale fa parte della Giunta del Dipartimento di Ingegneria Meccanica. E' il Responsabile per l'uso razionale dell'Energia per l'Ateneo e per il Policlinico di Roma Tor Vergata. In questa veste ha attivato una serie di interventi per la diffusione delle migliori tecnologie in relazione all'efficienza energetica ed alla diffusione delle fonti rinnovabili di energia.

Vincenzo MULONE

Vincenzo Mulone è professore associato dal 2015 presso l'Università di Roma "Tor Vergata", dove è titolare o co-titolare dei corsi di "Fluidodinamica delle Macchine" e del corso di "Sistemi e Componenti per la Conversione di Energia da Fonti Rinnovabili".

E' risultato vincitore di una research-scholar-grant Fulbright, espletata nell'A.A. 2009-10, presso la West Virginia University di Morgantown (WV) ed ha ricevuto il SAE Forest R. McFarland award nel 2012.

Le attività di ricerca riguardano l'analisi dei processi di conversione dell'energia ed il loro impatto ambientale. In particolare, gli studi sono stati applicati al progetto di sistemi di post-trattamento dei gas di scarico, di motori a combustione interna e di celle a combustibile (fuel cells).

Le attività sul post-trattamento dei gas di scarico sono state condotte, con approccio misto numerico 3D e sperimentale al banco prova motori, con l'obiettivo di progettare differenti tipologie dispositivi. Le attività sono state inoltre condotte in collaborazione con aziende leader mondiali nei rispettivi campi (EMITEC, Lombardini, CRF-FIAT), e con partner di riferimento (CNR-IM, WVU, ANL).

Le attività riguardanti il progetto di motori sono state portate avanti principalmente con il prof. Evans (UBC), per lo sviluppo di motori a gas naturale. Ulteriori collaborazioni sono state strette con il CNR-IM di Napoli, ENEA e l'ANL, per lo sviluppo di motori dual-fuel e ad idrogeno. E' anche in atto una collaborazione con l'ITV di Aachen per lo sviluppo di un modello di combustione turbolenta per motori alimentati a gas naturale: nel contesto di questo progetto è stato ricercatore ospite presso l'ITV-Aachen nel 2007.

Le attività sui motori e sul post-trattamento sono state oggetto di finanziamento nel contesto di programmi biennali PRIN-MIUR nel 2002, nel 2004, nel 2007 e nel 2009.

Le attività riguardanti le celle a combustibile sono state condotte sia nel campo dell'alta che della bassa temperatura, in collaborazione con diverse aziende leader del settore (Exergy-Fuel-Cells, ALPPS, FAAM) e con il Queen's RMC FCRC. Particolare attenzione è stata dedicata alle celle SOFC alimentate a biomassa mediante fonti rinnovabili, all'analisi del fenomeno del flooding in celle ad elettrolita polimerico, ed al design di stack modulari di celle SOFC microtubolari. Sono inoltre stati realizzati test-bench sperimentali per celle a combustibile ad elettrolita polimerico per la diretta validazione di modelli 3D termofluidodinamici, e per lo sviluppo di sistemi stazionari e per veicoli. Sono inoltre in fase di design e realizzazione reformer di idrogeno alimentati a gas naturale ed a gasolio, studiati e progettati mediante approccio misto numerico-sperimentale.

Le attività sulle celle a combustibile sono state oggetto di finanziamento nel V e VII programmi quadro (ACCEPT, FC-POWERED-RBS) e in un programma PRIN biennale nel 2003. Il progetto FC-Powered-RBS, tuttora in corso, è dedicato allo studio di sistemi ibridi (produzione programmata e non programmata integrata con tecnologie di stoccaggio elettrochimiche e con idrogeno) applicati a stazioni off-grid per telecomunicazioni.

Particolare attenzione è stata dedicata negli ultimi anni allo studio dei processi di conversione dell'energia da fonti rinnovabili riguardanti lo sviluppo di un gassificatore a letto fluido alimentato mediante residui di lavorazione e lo sviluppo di un prototipo di microturbina a gas a combustione esterna alimentata a biomassa.

I risultati ottenuti sono descritti in oltre 80 pubblicazioni, presentate prevalentemente in congressi e riviste internazionali.