

# UN MODELLO PER L'ISTERESI IN BATTERIE AGLI IONI DI LITIO

Luigi Egiziano<sup>1</sup>, Nicola Femia<sup>1</sup>, Ciro Visone<sup>2</sup>, Walter Zamboni<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dip. di Ing. dell'Informazione, Ing. Elettrica e Matematica Applicata (DIEM), Università degli Studi di Salerno  
Via Giovanni Paolo II, 132, 84084 Fisciano (SA), e-mail [wzamboni@unisa.it](mailto:wzamboni@unisa.it)

<sup>2</sup> Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi del Sannio

**Parole chiave:** Batterie, Stato di Carica, Isteresi

Le batterie ricaricabili basate sulla tecnologia a ioni di litio sono utilizzate in molte applicazioni: stazionarie (accumulo di energia per *smart-grid*), portatili (*smart-phone*, PC portatili), nell'elettronica di consumo, medicali, nei veicoli elettrici, ibridi e *plug-in*, e così via. Esse offrono energia e potenza specifiche e tempo di vita che, in molti casi, superano di gran lunga quello di batterie di diversa tecnologia, quali, ad esempio, il piombo-acido o il nickel-metal-idrato. Il costo delle batterie agli ioni di litio scende nel tempo e alla riduzione del costo è spesso associato un miglioramento delle prestazioni e della sicurezza. Le batterie al litio necessitano di un'interfaccia sicura e affidabile che assolva a funzioni di gestione del processo di carica, di protezione da carica eccessiva e scarica profonda, di monitoraggio della tensione, corrente e temperatura a livello di singola cella (o di gruppi di celle), e, eventualmente, di stima dello stato di carica e di bilanciamento della carica. Tali funzioni sono svolte da un'interfaccia elettronica chiamata *Battery Management System (BMS)*. Fra le funzioni del BMS, quella della stima dello stato di carica (*State-of-Charge, SoC*) è certamente una delle più importanti in BMS per veicoli elettrici [1]. Se è fatta a livello di cella, ad esempio, essa consente il bilanciamento attivo fra le celle [2]. Essa può essere anche associata a funzioni di identificazione dei parametri, se è necessario stimare in tempo reale anche lo stato di salute (*State-of-Health, SoH*) della batteria [3].

Nella famiglia delle batterie agli ioni di litio, le batterie al litio-ferro-fosfato ( $\text{LiFePO}_4$ , brevemente dette batterie LFP) sono spesso preferite per motivi di sicurezza. La loro caratteristica nel piano SoC/OCV (OCV è la tensione a vuoto) si presenta molto piatta (per  $20\% < \text{SoC} < 80\%$ ) e affetta da una pronunciata isteresi. Per isteresi si intende il complesso di fenomeni che portano la batteria ad esibire valori di OCV ottenuti a seguito di un processo di carica maggiori di quelli ottenuti a seguito di una scarica. Un esempio di ciclo di isteresi massimo, misurato in [4], è riportato in Fig. 1a. La cella su cui sono effettuate le misure ha una capacità di 20 A h e una tensione nominale di 3.3 V.

Per poter includere l'isteresi in modelli dinamici semplici, adatti alla stima in tempo reale dello stato della batteria, si può adottare un modello ad un sol parametro [4]. In alternativa, l'isteresi nel piano SoC/OCV può essere modellata con il modello di Preisach scalare [5], scrivendo che:

$$OCV(t) = \int_{\alpha > \beta} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta} \{SoC\} d\alpha d\beta \quad (1)$$

dove  $\gamma_{\alpha\beta}$  è il relè elementare (antiorario) caratterizzato dalle soglie di salita  $\alpha$  e di discesa  $\beta$ ;  $\mu$  è la funzione densità. Un'opportuna scelta della  $\mu$  consente di rappresentare anche l'isteresi oraria del tipo di quello in Fig. 1a. Piuttosto che identificare l'operatore per mezzo della sua funzione densità  $\mu$ , si preferisce discretizzare il problema introducendo la funzione di Everett, calcolata per mezzo dei rami di inversione del prim'ordine rappresentati in Fig. 1b. La funzione di Everett, definita come il semi-incremento della OCV nel punto  $\text{SoC}=\beta$  su di un ramo di inversione che parte da  $\text{SoC}=\alpha$ , è calcolata in modo diretto su una griglia di punti del dominio di Preisach. Nei restanti punti la funzione è ricostruita per mezzo di un'interpolazione dei dati sulla griglia.

Una volta identificato l'operatore, il modello può essere utilizzato per ricostruire la risposta con isteresi ad un'arbitraria storia del SoC data in ingresso. La Fig. 2 mostra i risultati della simulazione del modello di Preisach identificato con i rami di inversione della Fig. 1b in due storie del SoC. La prima (2a) si riferisce ad un ciclo di isteresi massimo, la seconda ad una storia del SoC che disegna, nel piano SoC/OCV, due cicli di isteresi minori innestati, contenuti nel ciclo massimo. L'accordo

fra simulazioni e dati sperimentali è soddisfacente. Inoltre, la natura della discretizzazione implica che il calcolo della risposta sia fatto esclusivamente sulla base di operazioni di combinazione lineare dei valori della funzione di Everett, la quale può essere data in forma di tabella a valle della procedura di identificazione. Ciò risulta particolarmente vantaggioso per includere il modello in dispositivi e sistemi *embedded* per la stima online dei parametri in un BMS.

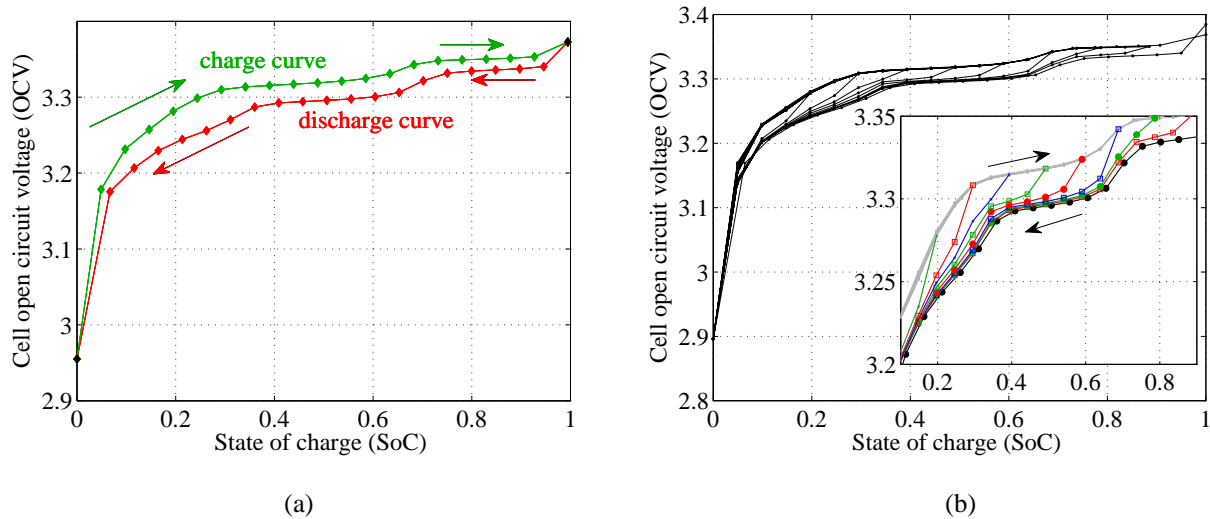


Fig. 1: Isteresi in una cella LFP. (a) Ciclo di isteresi massimo. (b) Rami di inversione del prim'ordine.

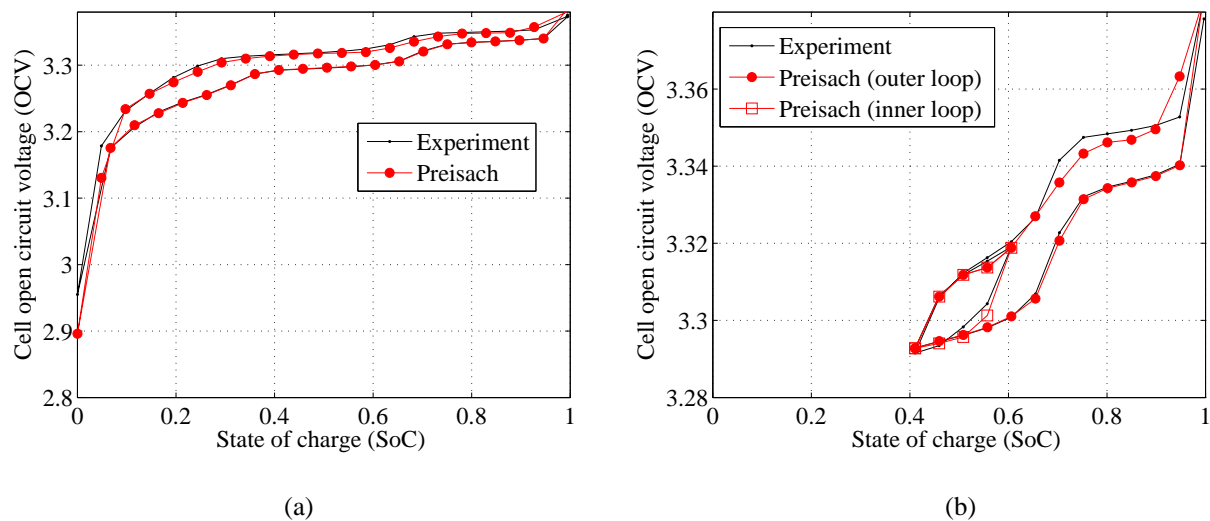


Fig. 2: Ricostruzione dei dati sperimentali per mezzo di simulazioni con il modello di Preisach. (a) Ciclo di isteresi massimo. (b) Storia con cicli minori.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] R. Restaino, W. Zamboni (2013) "Rao-Blackwellised Particle Filter for Battery State-Of-Charge and Parameters Estimation", *Proc. IEEE IECON 2013, Vienna, Austria*, pp. 6783–6788.
- [2] F. Baronti, R. Roncella, R. Saletti, W. Zamboni (2014), "Experimental Validation of an Efficient Charge Equalization System for Lithium-Ion Batteries", *Proc. IEEE ISIE 2014, Istanbul, Turchia*, pp. 1807–1812.
- [3] F. Baronti, W. Zamboni, N. Femia, H. Rahimi-Eichi, R. Roncella, S. Rosi, R. Saletti, and M.-Y. Chow (2013), "Parameter Identification of Li-PO Batteries in Electric Vehicles: a Comparative Study", *Proc. IEEE ISIE 2013, Taipei, Taiwan*, doi 10.1109/ISIE.2013.6563887.
- [4] F. Baronti, W. Zamboni, N. Femia, R. Roncella, R. Saletti (2013), "Experimental Analysis of Open-Circuit Voltage Hysteresis in Lithium-Iron-Phosphate Batteries", *Proc. IEEE IECON 2013 Vienna, Austria*, pp. 6728–6733.
- [5] F. Baronti, N. Femia, R. Saletti, C. Visone, W. Zamboni (2013), "Hysteresis Modelling in Li-ion Batteries", *in stampa su IEEE Trans. Magn.*, doi 10.1109/TMAG.2014.2323426.