

Author: Brian OSPINA AGUDELO

Thesis title: Modelling and Experiment-Based Methods for Lithium-Ion Batteries SoH estimation

Abstract (English):

This thesis addresses multiple issues regarding the on-board implementation of Lithium-Ion (Li-ion) batteries State-of-Health (SoH) estimation. Even if in the literature multiple model- and experiment-based SoH estimation methods are very well explored under laboratory conditions, their suitability for implementation in the framework of Battery Management Systems (BMSs) or battery chargers is still an open research topic.

Initially, the thesis explores the topic of on-board implementation and identification of battery impedance models. First the issue of impedance models fitting from Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) data is addressed, by proposing an identification method with a suitable procedure for setting the initial values of the impedance model parameters. When tested using experimental EIS data, the method guarantees the convergence of the identification process, which is not always the case when considering fixed initial conditions, as it is typical in the literature.

Then, discrete time representations for three approaches for time domain response approximation of fractional-order battery models are proposed and evaluated in terms of performance and suitability for on-board implementation. Comparisons between the methods are made in terms of accuracy, computational burden and suitability for the identification of impedance parameters from time domain measurements. The study was performed in a simulation framework and focused on a set of ZARC elements, representing the middle frequency range of Li-ion batteries' impedance. It was found that the multiple RC approach offers the best accuracy-complexity compromise, making it the most interesting approach for real-time battery simulation applications. As for applications requiring the identification of impedance parameters, the Oustaloup approach offers the best compromise between the goodness of the obtained frequency response and the accuracy-complexity requirements.

Then, the Incremental Capacity (IC) analysis is proposed for characterising the capacity and the SoH of batteries aged by using cycling patterns built from current pulses with randomly selected levels and durations. The batteries are periodically characterised using a 1C charge, which is a high value with respect to the typical IC tests in pseudo-equilibrium condition. The high-current IC curves generation from raw voltage/current data includes two filtering stages, one for the input voltage and one for the IC curve smoothing, which are optimised for the application on the basis of the data characteristics. The correlations between the IC main peak features and the battery full capacity, for 28 Lithium-Cobalt oxide batteries with 18650 packaging, were evaluated, finding that the main peak area is a general feature for the evaluation of the SoH under high current tests and random usage patterns, and, therefore, it can be used as a battery health indicator in practical applications. The effects of the computational parameters on the relationship between the peak area and the battery capacity are also investigated. The results are confirmed by a further analysis performed over two additional sets of cells with different technologies, aged with a fixed driving profile and using fast charging regimes. Additionally, the performance of the peak area as a health indicator was compared with an ohmic resistance-based estimation approach.

Finally, several linear multifeature models for battery SoH estimation are proposed and their performance is evaluated. The models combine high current IC and dynamic resistance features, obtainable during partial constant current charges and discharges respectively. The models are constructed by including fixed sets of features or by applying features selection procedures based on statistical criteria. The proposed models are fitted and evaluated with data from two publicly available battery datasets, including batteries cycled using driving and randomised profiles. During the test process, the estimation improvement introduced by each multifeature model is evaluated by computing the reduction on the mean squared error for the SoH estimation with respect to two reference single-feature models already used in recent literature. The collinearity for each model is quantified through the variance inflation factor to indicate the prediction

reliability of each model. As main result of this analysis, a simple two-features model is proposed as the best compromise between estimation improvement, with respect to single feature models, and collinearity reduction.

Abstract (Italian):

Questa tesi affronta molteplici questioni riguardanti l'implementazione a bordo della stima dello stato di salute (SoH) delle batterie agli ioni di litio (Li-ion). Anche se in letteratura molteplici metodi di stima dello SoH basati su modelli ed esperimenti sono molto ben esplorati in condizioni di laboratorio, la loro idoneità all'implementazione nell'ambito dei sistemi di gestione delle batterie (BMS) o dei caricabatteria è ancora un soggetto di ricerca aperto.

Inizialmente, la tesi esplora i temi dell'implementazione e identificazione a bordo dei modelli di impedenza della batteria. In primo luogo viene affrontata la questione del fitting dei modelli di impedenza ai dati della spettroscopia di impedenza elettrochimica (EIS), proponendo un metodo di identificazione con una procedura adeguata per impostare i valori iniziali dei parametri del modello di impedenza. Quando testato utilizzando dati di EIS sperimentali, il metodo garantisce la convergenza del processo di identificazione, cosa che non sempre avviene quando si considerano condizioni iniziali fisse, come è tipico in letteratura.

Quindi, le rappresentazioni del tempo discreto per tre approcci per l'approssimazione della risposta nel dominio del tempo di modelli di batterie di ordine frazionario vengono proposte e valutate in termini di prestazioni e idoneità per l'implementazione a bordo. I confronti tra i metodi sono effettuati in termini di accuratezza, onere computazionale e idoneità per l'identificazione di parametri di impedenza da misurazioni nel dominio del tempo. Lo studio è stato condotto in un quadro di simulazione e si è concentrato su un insieme di elementi ZARC, che rappresentano la gamma di frequenze medie dell'impedenza delle batterie agli ioni di litio. È stato riscontrato che l'approccio RC multiplo offre il miglior compromesso tra precisione e complessità, rendendolo l'approccio più interessante per le applicazioni di simulazione della batteria in tempo reale. Per quanto riguarda le applicazioni che richiedono l'identificazione di parametri di impedenza, l'approccio di Oustaloup offre il miglior compromesso tra la bontà della risposta in frequenza ottenuta e i requisiti di accuratezza-complessità.

Quindi, viene proposta l'analisi della capacità incrementale (IC) per caratterizzare la capacità e il SoH delle batterie invecchiate utilizzando schemi di ciclo costruiti da impulsi di corrente con livelli e durate selezionati casualmente. Le batterie vengono periodicamente caratterizzate utilizzando una carica a 1C, che è un valore elevato rispetto ai tipici test IC in condizioni di pseudo-equilibrio. La generazione di curve IC ad alta corrente dai dati di tensione/corrente include due stadi di filtraggio, uno per la tensione e uno per il livellamento della curva IC, che sono ottimizzati per l'applicazione sulla base delle caratteristiche dei dati. Per 28 batterie all'ossido di litio-cobalto con confezione 18650, sono state valutate le correlazioni tra le caratteristiche del picco principale della curva IC e la capacità della batteria. È stato riscontrato che l'area di picco principale è una caratteristica generale per la valutazione del SoH in test di corrente elevata e modelli di utilizzo casuali e, pertanto, può essere utilizzata come indicatore della salute della batteria in applicazioni pratiche. Vengono inoltre studiati gli effetti dei parametri computazionali sulla relazione tra l'area di picco e la capacità della batteria. I risultati sono confermati da un'ulteriore analisi eseguita su altre due set di celle con tecnologie diverse, invecchiate con un profilo di guida fisso e utilizzando regimi di ricarica rapida. Inoltre, le prestazioni dell'area di picco come indicatore di salute sono state confrontate con un approccio di stima basato sulla resistenza ohmica.

Infine, vengono proposti diversi modelli lineari multifeature per la stima dello SoH della batteria e ne vengono valutate le prestazioni. I modelli combinano caratteristiche di IC ad alta corrente e di resistenza dinamica, ottenibili rispettivamente durante cariche e scariche parziali a corrente costante. I modelli sono costruiti includendo insiemi fissi di caratteristiche o applicando procedure di selezione delle caratteristiche basate su criteri statistici. I modelli proposti sono parametrizzati e valutati con i dati di due datasets di batterie pubblicamente disponibili, che includono batterie ciclizzate utilizzando profili di guida e randomizzati. Durante

il processo di test, il miglioramento di stima introdotto da ciascun modello multifeature viene valutato calcolando la riduzione dell'errore quadratico medio per la stima dello SoH rispetto a due modelli di riferimento single-feature già utilizzati nella letteratura recente. La collinearità per ciascun modello viene quantificata attraverso il fattore di inflazione della varianza per indicare l'affidabilità di previsione di ciascun modello. Come risultato principale di questa analisi, un semplice modello a due caratteristiche viene proposto come miglior compromesso tra il miglioramento della stima, rispetto ai modelli di riferimento, e la riduzione della collinearità.