

Borse di dottorato di ricerca finanziate da Regione Lombardia nell'ambito dell'Accordo di collaborazione con ENEA/Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie, l'Energia e lo Sviluppo sostenibile (DGR n. 7792 del 17/01/2018 e 5321 del 4/10/2021).

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PAVIA

Dottorato in: Ingegneria e scienze applicate.

Diego Locatelli: Integrazione di veicoli elettrici in smart grids.

Abstract

I sistemi di gestione delle batterie (Battery Management Systems o BMS) rivestono un ruolo cruciale nel monitoraggio delle funzionalità delle batterie. Per garantire un funzionamento efficiente di tali sistemi, si rende indispensabile l'impiego di modelli matematici. Tuttavia, la precisione dei parametri del modello, ottenuti mediante procedure di identificazione, si rivela limitata. Ciò deriva dalla circostanza che, tipicamente, sono misurabili solo la corrente e la tensione delle celle, rendendo necessaria l'elaborazione di stime degli stati del modello. Questa tesi propone un approccio basato su insiemi per la stima degli stati delle celle al litio attraverso l'utilizzo di un modello di circuito equivalente, considerando sia incertezze parametriche limitate che rumore di misura. I risultati delle simulazioni evidenziano l'efficacia degli stimatori proposti nel fornire un insieme di stati più accurato, fondamentale per la rilevazione di guasti e il controllo basato su modelli delle celle al litio.

Le batterie al litio devono affrontare sfide di affidabilità dovute all'instabilità termica, rendendo imperativa la progettazione di BMS finalizzati a migliorare la sicurezza e a garantire elevate prestazioni delle batterie. Questo studio si concentra sulla rilevazione di guasti termici nelle celle al litio attraverso uno schema di rilevamento dei guasti basato su insiemi che tiene conto di incertezze sconosciute, ma di cui si conoscono i valori di range. Viene impiegato un modello di circuito equivalente (ECM) per la stima degli stati, considerando incertezze parametriche limitate e rumore di misura. Il metodo proposto utilizza zonotopi vincolati (CZ), una rappresentazione insiemistica che consente operazioni standard con minore sforzo computazionale rispetto ai politopi. Le simulazioni numeriche dimostrano l'efficacia dell'approccio proposto nel rilevare guasti termici in una fase precoce e ne sottolineano i vantaggi rispetto a un metodo basato su intervalli che si affida a funzioni di inclusione e propagazione dei vincoli. L'osservabilità degli stati si configura come un aspetto critico nel controllo e nell'ottimizzazione di sistemi. Nel contesto della modellazione delle batterie, spesso si assume l'osservabilità del modello di circuito equivalente (ECM) senza considerare l'impatto degli ingressi, dei parametri incerti e della scelta della funzione di adattamento del potenziale a circuito aperto (OCP). Questo lavoro adotta un approccio basato su intervalli per stabilire condizioni di osservabilità garantite per l'ECM. L'analisi rivela che diverse funzioni OCP, nonostante abbiano adattamenti comparabili, portano a risultati vari in termini di osservabilità del modello. Inoltre, esistono combinazioni di stato-ingresso che possono risultare non osservabili quando si considera la derivata temporale dell'ingresso e i parametri incerti.

Le batterie al litio offrono un equilibrio ottimale tra prestazioni, prezzo e longevità per un efficiente stoccaggio dell'energia. Il BMS svolge un ruolo cruciale nel raggiungere un compromesso tra la ricarica veloce e la minimizzazione degli effetti dell'invecchiamento, nel rispetto dei requisiti di sicurezza. Questa tesi presenta una strategia di controllo ottimale online per la ricarica che tiene conto dell'invecchiamento. La strategia formula un problema di controllo utilizzando un modello surrogato che descrive il comportamento della batteria minimizzando reazioni che portano alla perdita di capacità e soddisfacendo vincoli legati all'invecchiamento e alla sicurezza. Il modello surrogato combina un modello non lineare statico dipendente dallo stato di carica con un modello lineare black-box a tempo invariante finito. I risultati delle simulazioni ottenuti con un modello di batteria DFN come "sistema" reale dimostrano l'efficacia dell'approccio proposto. Gli stati sono stimati utilizzando un filtro di Kalman con un fattore di dimenticanza. Infine, i Pareto front ottenuti utilizzando la metodologia proposta basata su controllo ottimale vengono confrontati con quelli ottenuti utilizzando una strategia ad anello aperto.

Nel complesso, questa tesi abbraccia vari aspetti dei sistemi di gestione delle batterie, compresa la stima degli stati basata su insiemi, la rilevazione di guasti termici, l'analisi dell'osservabilità e una strategia di controllo ottimale consapevole dell'invecchiamento. I metodi e le strategie proposti dimostrano risultati promettenti e contribuiscono al progresso dei sistemi di gestione delle batterie per una sicurezza, prestazioni e longevità migliorate delle celle al litio.

Pubblicazioni

- Locatelli, D., Rego, B. S., Raffo, G. V., & Raimondo, D. M. (2021). Interval state estimation based on constraint propagation for a lithium-ion cell using an equivalent circuit model. *IFAC-PapersOnLine*, 54(3), 602-608.
- D. Locatelli, D.M. Raimondo, Z. Khalik, H.J. Bergveld, M.C.F. Donkers. Closed-loop Optimal Ageing-Aware Charging of Li-ion Batteries Using a Surrogate Model. Accepted to IFAC2023 World Congress July 2023 (To be published).
- Rego, B. S., Locatelli, D., Raimondo, D. M., & Raffo, G. V. (2022). Joint state and parameter estimation based on constrained zonotopes. *Automatica*, 142, 110425.
- Saccani, G., Locatelli, D., Tottoli, A., & Raimondo, D. M. (2022). Model-based thermal fault detection in Li-ion batteries using a set-based approach. *IFAC-PapersOnLine*, 55(6), 329-334.

Convegni

- Locatelli, D., Tottoli, A., Saccani, G., & Raimondo, D. M. (2022, August). Thermal fault-detection in series connected Li-ion cells: a set-based approach using constrained zonotopes. In *2022 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA)* (pp. 411-417). IEEE.
- Locatelli, D., Saccani, G., Rego, B. S., Raffo, G. V., & Raimondo, D. M. (2022, November). Set-based joint state and parameter estimation of a Li-ion cell using constrained zonotopes. In *2022 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)* (pp. 1-6). IEEE.