

MODELLAZIONE COMPORTAMENTALE DELLE BATTERIE LI-ION TRAMITE GENETIC PROGRAMMING

G. Di Capua¹, A. Maffucci¹, N. Femia², M. Molinara¹, N. Oliva³, F. Porpora¹

¹ DIEI, Università degli Studi di Cassino e del Lazio Mer., Via G. Di Biasio, Cassino (FR)

² DIEM, Università degli Studi di Salerno, Via G. Paolo II, Fisciano (SA)

³ EXELING SRL, Avellino (AV)

Le batterie agli ioni di litio (Li-ion) sono fondamentali per le moderne soluzioni di accumulo energetico, in particolare nel settore della mobilità elettrica. Una modellazione accurata della tensione ai terminali della batteria, in funzione dello stato di carica (SoC), del tasso di carica/scarica (C_{rate}) e della temperatura (T), è essenziale per lo sviluppo di sistemi di gestione della batteria (*Battery Management Systems*, BMS) efficienti.

Negli ultimi anni, i gruppi di ricerca delle Università di Cassino e Salerno si sono concentrati sull'elaborazione di modelli comportamentali (BM) utilizzando algoritmi di Genetic Programming (GP). Questi modelli esprimono la tensione ai terminali della batteria come una funzione analitica diretta di SoC, C_{rate} e T . Studi precedenti hanno dimostrato l'efficacia del GP nel modellare diverse chimiche di batterie (LTO e LFP), ottenendo una buona concordanza tra dati simulati e sperimentali [1]. In particolare, la tensione ai terminali della batteria è stata modellata come

$$V_{B,bhv} = f[SoC, C_{rate}, \mathbf{u}(T)] \quad (1)$$

dove SoC e C_{rate} sono le variabili principali rispetto alle quali è definita la forma analitica della funzione, mentre la temperatura costituisce un fattore di *bias* che ne influenza i coefficienti. L'approccio GP offre grande flessibilità, generando modelli adatti sia per la previsione diretta che per l'analisi inversa, con vantaggi significativi in termini di trattabilità analitica e implementazione nei BMS.

Ulteriori ricerche si sono concentrate sull'espansione del contesto dei metodi di modellazione. Sono stati confrontati due approcci principali: modelli basati su GP e una suite di metodi di Machine Learning (ML), tra cui Multi-Layer Perceptron (MLP), Epsilon-Support Vector (ESV), Stochastic Gradient Descent, Gradient Boosting (GBO), CatBoost (CBO), XGBoost (XGB), Elastic Net (ENE) e Lasso (LAS). Gli algoritmi sono stati selezionati per le loro peculiarità nel gestire efficacemente la complessità di modellazione delle batterie. Utilizzando un dataset generato da test di scarica controllata di una batteria LFP da 90 Ah, si è riscontrato che le prestazioni dei modelli GP risultano generalmente migliori di quelle dei corrispondenti ML in termini di accuratezza, richiedendo al contempo meno dati sperimentali e minor onere computazionale. I risultati ottenuti avvalorano il metodo GP per la modellazione delle batterie in condizioni operative reali [2]. Le metriche utilizzate per quantificare e confrontare le prestazioni degli approcci di modellazione comportamentale basati su GP e su ML sono riassunte nella Tabella 1, ed includono il valore medio (μ_E), la deviazione standard (σ_E), il valore minimo (E_{min}) e il valore massimo (E_{max}) dell'errore assoluto sul dataset di test, nonché il valore di RMSE rilevante tra i valori predetti e quelli osservati effettivi. I risultati indicano una prestazione superiore dei modelli basati su GP rispetto a quelli basati su ML, come mostrato dall'andamento dell'errore assoluto sul dataset di test presentato nella Figura 1.

Tabella 1. Valori delle metriche per diversi approcci di modellazione comportamentale.

Approcci di Modellazione Comportamentale		Dataset di test				
		μ_E (mV)	σ_E (mV)	E_{min} (mV)	E_{max} (mV)	RMSE (mV)
GP	GP1	6.3	5.3	0.0	21.1	8.2
	GP2	4.2	4.9	0.2	25.6	6.4
ML	MLP	21.0	20.3	0.8	84.0	29.1
	ESV	30.5	57.9	3.6	371.4	64.8
	SGD	37.5	48.9	0.3	310.3	61.1
	GBO	16.8	23.6	0.0	128.2	28.7
	CBO	15.3	26.3	0.2	133.1	29.9
	XGB	20.0	28.7	0.3	138.1	34.7
	ENE	34.7	55.0	0.7	357.2	64.5
	LAS	34.7	55.7	0.6	362.1	65.1

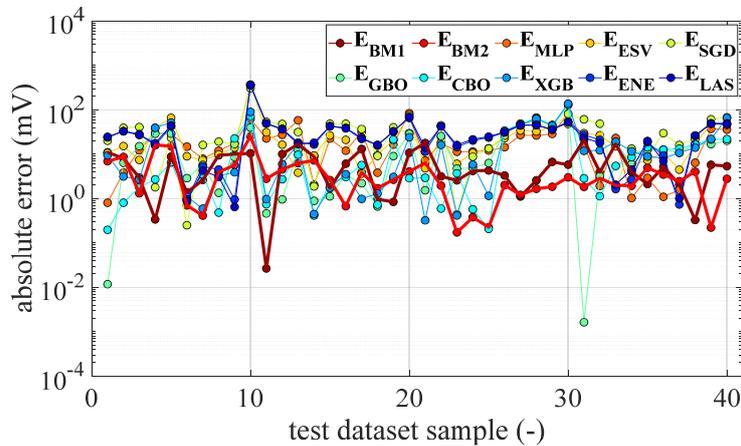


Figura 1. Errore assoluto sul set di dati di prova per i modelli GP e ML.

RINGRAZIAMENTI

La ricerca sul tema di questa memoria è stata parzialmente supportata dall'Università degli Studi di Salerno nell'ambito del progetto "Elettronica di potenza per la sostenibilità energetica" (300638FRB21FEMIA), e dall'Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale nell'ambito del progetto PRIN 2022 "Smart Electric traNsport systems for Sustainable Urban Mobility – SENSUM" (CUP H53C24001010006, CP 20227PF9CC), che mira a sviluppare soluzioni innovative per la mobilità urbana sostenibile attraverso l'elettrificazione intelligente dei trasporti, in collaborazione con altri partner industriali e accademici, tra cui i gruppi di ricerca dell'Università di Bologna e di Palermo.

RIFERIMENTI

- [1] G. Di Capua, F. Porpora, F. Milano, N. Oliva, A. Maffucci, "Behavioral Models for Lithium Batteries based on a Genetic Programming Algorithm", *IEEE Access*, vol 12, August 2024.
- [2] G. Di Capua, M. Molinara, A. Maffucci, F. Porpora, N. Femia, N. Oliva, "Machine Learning and Genetic Programming-based behavioral modeling approaches of Li-ion Batteries", *ISCAS 2025 conference*, May 2025.