

Ricerca di Sistema elettrico



LA 3.6 – Accumulo: Sviluppo e applicazione funzionalità innovative per la gestione delle batterie

Federico Baronti, **Roberto Di Rienzo**, Michele Martino, Roberto Roncella,
Roberto Saletti, Cesare Sandri, Gianluca Simonte
Dipartimento Ingegneria dell'Informazione (DII) – Università di Pisa



UNIVERSITÀ DI PISA

dii DIPARTIMENTO DI
INGEGNERIA
DELL'INFORMAZIONE

LA 3.6 – Accumulo: Sviluppo e applicazione funzionalità innovative per la gestione delle batterie

F. Baronti, R. Di Rienzo, M. Martino, R. Roncella, R. Saletti, C. Sandri, G. Simonte

Dipartimento Ingegneria dell'Informazione (DII) – Università di Pisa

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: Decarbonizzazione

Progetto: Tema di ricerca 1.7 – Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali

Linea di attività: 3.6

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile del Work Package: Fernando Ortenzi, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Roberto Di Rienzo (DII-UNIFI)

Mese inizio previsto: 19

Mese inizio effettivo: 19

Mese fine previsto: 36

Mese fine effettivo: 36

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione: "Studi preliminari di funzionalità innovative per la gestione delle batterie".

Indice

1	Risultati attesi	4
2	Risultati ottenuti.....	5
3	Prodotti attesi	6
4	Prodotti sviluppati	7
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	8
6	Sintesi delle attività svolte	9
7	Dettaglio delle attività svolte.....	10
7.1	Identificazione preventiva dei guasti tramite la misura della deformazione della cella 10	
7.1.1	Principio di funzionamento del sistema induttivo per misurare l'espansione delle celle 10	
7.1.2	Test sperimentali e risultati ottenuti.....	11
7.1.2.1	Effetti dello Stato di Carica (SoC).....	11
7.1.2.2	Test termico	12
7.1.2.3	Effetti dell'invecchiamento	12
7.1.3	Ottimizzazione delle bobine induttive	12
7.1.4	Conclusioni della sotto attività	13
7.2	Bilanciamento dinamico per batterie in applicazioni di seconda vita.....	13
7.2.1	Conclusioni della sotto attività	13
7.3	Parallelizzazione intelligente di batteria in applicazioni di seconda vita.....	13
7.3.1	Sistema di parallelizzazione di batterie proposto	14
7.3.2	Conclusioni della sotto attività.....	14
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	15
9	Pubblicazioni scientifiche	16
10	Eventi di disseminazione	17

Indice delle figure

Figura 1 - Rappresentazione del sistema proposto per la misura dell'espansione delle celle di una batteria al litio.	10
Figura 2 - Sistema composto da due batterie utilizzato durante i test.	11
Figura 3 - Andamento della variazione di distanza misurata dal sensore in funzione del SOC a varie correnti di carica/scarica.	11
Figura 4 - Andamento della variazione di distanza misurata dal sensore in funzione della temperatura a vari livelli di SOC.	12
Figura 5 - Confronto tra il comportamento delle celle nuove e invecchiate in funzione della temperatura (a) e del SOC (b).	12
Figura 6 - Schema a blocchi generico di un sistema di parallelizzazione per batterie basato su convertitori DC/DC Partial-Power.	14

1 Risultati attesi

I risultati attesi da questa linea di attività consistono in un report tecnico che descrive: l'implementazione delle funzionalità innovative approfondite nella linea di attività, il setup sperimentale utilizzato per testare le funzionalità sviluppate e i risultati da esse ottenuti.

2 Risultati ottenuti

I risultati attesi dalla linea di attività sono stati completamente raggiunti fornendo molti spunti di riflessione per migliorare le funzionalità dei sistemi di accumulo. In particolare, le funzionalità relative alle batterie di seconda vita possono portare enormi benefici per il sistema elettrico nazionale ed i suoi utenti. Infatti, le funzionalità proposte mirano a rendere commercialmente appetibili le batterie dei veicoli elettrici che hanno raggiunto prestazioni non più soddisfacenti in ambito automotive che tuttavia possono essere sfruttate ancora in applicazioni stazionarie. In questo modo, si ottengono contemporaneamente tre aspetti positivi: l'incremento del valore della batteria sostituita dal veicolo elettrico, la riduzione dei costi necessari ad installare sistemi di accumulo dell'energia in applicazioni stazionarie per l'ottimizzazione della distribuzione della l'energia elettrica e l'impatto ambientale delle batterie dei veicoli elettrici.

3 Prodotti attesi

Questa linea di attività prevede la condivisione di eventuali file di progetto per facilitare l'implementazione delle funzionalità identificate in futuri sistemi batteria.

4 Prodotti sviluppati

Nella linea di attività è stata sviluppata una piattaforma simulativa in grado di emulare una batteria di seconda vita e la funzionalità di bilanciamento dinamico basata sulle 5 più comuni architetture usate per il bilanciamento attivo di celle agli ioni di litio. La piattaforma è stata dettagliatamente descritta nel report tecnico allegato a questo documento dal titolo: "Sviluppo e applicazione di funzionalità innovative per la gestione delle batterie". Inoltre, alcuni esempi di utilizzo sono stati mostrati nelle pubblicazioni scientifiche [8] e [9] prodotte all'interno di questa linea di attività. Infine, la piattaforma può essere liberamente scaricata dal link https://github.com/batterylabunipi/SLB_dynamic_equalization e utilizzata per future ricerche in questo ambito.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Non ci sono stati scostamenti significativi delle attività e dei risultati ottenuti rispetto a quanto preventivato.

6 Sintesi delle attività svolte

Le attività svolte in questa linea di attività hanno l'obiettivo di studiare le problematiche dei sistemi di gestione delle batterie commerciali, identificate nella linea di attività 3.5.

Le principali attività funzionalità esplorate sono tre:

- L'identificazione preventiva dei guasti utilizzando sensori per misurare la deformazione delle celle delle batterie.
- Lo studio della funzionalità di bilanciamento dinamico delle batterie di seconda vita per massimizzarne la capacità utilizzabile.
- Sviluppo di convertitori *Partial-Power* per la parallelizzazione intelligente delle batterie in applicazioni stazionarie.

I risultati ottenuti dimostrano la validità delle soluzioni proposte e la possibilità di implementare le funzionalità avanzate sviluppate all'interno di sistemi a basso costo per la gestione delle batterie.

7 Dettaglio delle attività svolte

Questa linea di attività ha lo scopo di sviluppare le funzionalità innovative evidenziate nella linea di attività 3.5, al fine di aggiungerle ai futuri sistemi di accumulo elettrochimico per migliorarne le prestazioni, ridurre l'impatto ambientale e favorirne la diffusione consentendo sempre a più utenti di sfruttarne i benefici. L'attività si è focalizzata su tre diverse funzionalità: l'identificazione preventiva di eventi potenzialmente pericolosi e il miglioramento delle stime dello stato interno delle celle che compongono la batteria; il bilanciamento dinamico in una batteria di seconda vita per massimizzarne le prestazioni e quindi aumentarne il valore; la parallelizzazione di batterie provenienti da veicoli elettrici, considerate ormai esauste per questa applicazione ma che possono ancora essere sfruttate per migliorare le prestazioni di applicazioni stazionarie, come ad esempio le *smart-grid*. Le successive sottosezioni presentano maggiori dettagli delle tre sotto attività riportando anche i principali risultati ottenuti ed evidenziando l'impatto di questi ultimi per il servizio elettrico nazionale e i suoi utenti.

7.1 Identificazione preventiva dei guasti tramite la misura della deformazione della cella

Questa sotto attività ha lo scopo di progettare un dimostratore di un sistema induttivo a basso costo per misurare l'espansione delle celle di batterie al litio che sia compatibile con la struttura delle attuali batterie commerciali e possa quindi essere facilmente inserito nei futuri pacchi batteria. Come evidenziato all'interno della linea di attività 3.5, la misura della deformazione della cella potrà fornire informazioni utilissime al sistema di controllo della batteria per individuare preventivamente condizioni potenzialmente pericolose, come ad esempio l'individuazione dei meccanismi che portano alla fuga termica di una cella prima che essa si verifichi. Inoltre, la deformazione delle celle fornisce informazioni utili sullo stato interno della cella essendo legata al suo stato di carica, allo stato di invecchiamento e alla sua temperatura interna.

7.1.1 Principio di funzionamento del sistema induttivo per misurare l'espansione delle celle

Il sistema proposto si basa sul sensore commerciale LDC1614 prodotto dalla Texas Instruments che è in grado di misurare la frequenza di risonanza di un gruppo LC. In particolare, il sensore è stato utilizzato per misurare l'induttanza di un induttore planare stampato su PCB e posto tra due celle come mostrato in Figura 1.

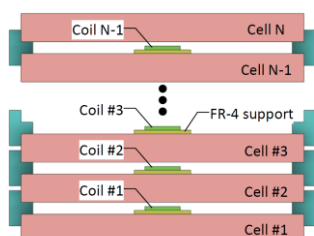


Figura 1 – Rappresentazione del sistema proposto per la misura dell'espansione delle celle di una batteria al litio.

Per effetto delle cosiddette "eddy currents" il valore dell'autoinduttanza dipende dalla distanza tra induttore e superficie laterale della cella e quindi cambia se le celle si deformano. Di conseguenza, correlando la misura di induttanza effettuata dal sensore con la distanza tra le facce delle celle è possibile stimare quanto le due celle si stiano deformando. Per ottenere la legge di conversione tra la misura del sensore e la distanza tra le celle è stato sviluppato un

setup di misura basato su una stampante 3D e una struttura che è in grado di emulare la struttura del pacco batteria mostrata in Figura 1. La struttura è stata progettata in modo che la stampante possa modificare la distanza tra le celle emulando una loro deformazione. Le celle utilizzate durante questa fase di caratterizzazione iniziale e nelle fasi di test descritte successivamente sono celle prismatiche basate su tecnologia Nichel-Manganese-Cobalto (NMC), con una capacità nominale di 5,2 Ah e dimensioni 120 mm x 80 mm x 12 mm.

7.1.2 Test sperimentali e risultati ottenuti

Il sistema di misura proposto è stato testato utilizzando due celle assemblate nella struttura mostrata in Figura 2. In particolare, esse sono posizionate in maniera adiacente, separate da distanziatori in acido polilattico (PLA) stampati in 3D. La distanza tra le celle è stata fissata a 5 mm come nei più comuni pacchi batteria commerciali. Infine, tra le celle è stato posizionato l'induttore per la misura della deformazione.

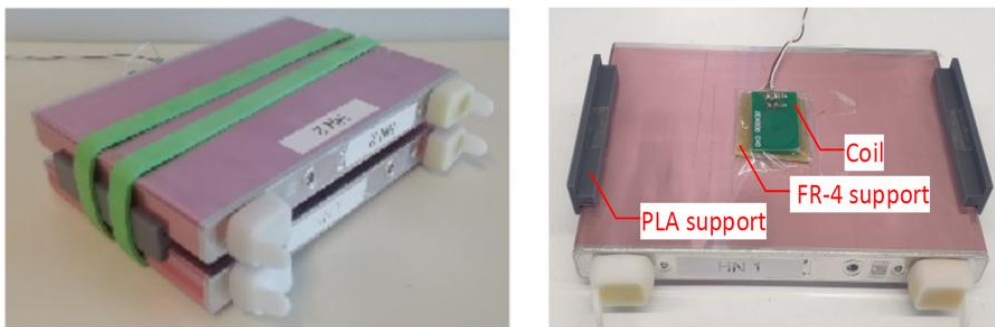


Figura 2 - Sistema composto da due batterie utilizzato durante i test.

Il setup appena descritto è stato utilizzato per valutare la deformazione delle celle dovute alla variazione dello stato di carica, dello stato di salute e della loro temperatura.

7.1.2.1 Effetti dello Stato di Carica (SoC)

Le celle sono state caricate/scaricate tra 0% e 100% con diverse correnti, mantenendo la temperatura costante a 25 °C. I risultati sono presentati in Figura 3 e mostrano che:

- La distanza tra le celle varia significativamente con il loro stato di carica e il volume della cella diminuisce al diminuire dello stato di carica.
- Le variazioni non dipendono significativamente dalla corrente di carica/scarica.

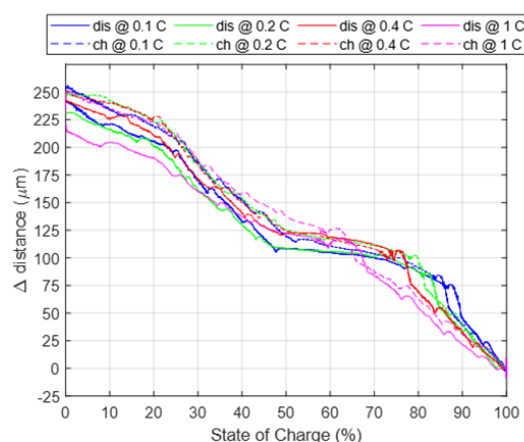


Figura 3 - Andamento della variazione di distanza misurata dal sensore in funzione del SOC a varie correnti di carica/scarica.

7.1.2.2 Test termico

Il sistema è stato posto in camera termica e sottoposto a una variazione termica tra 5 °C e 45 °C, con una velocità di variazione di ± 10 °C/h. Il test è stato ripetuto a diversi livelli di stato di carica. I risultati, riportati in Figura 4, mostrano che le celle con stati di carica inferiori si deformano di più rispetto a più cariche. La massima espansione è di circa 827 μm .

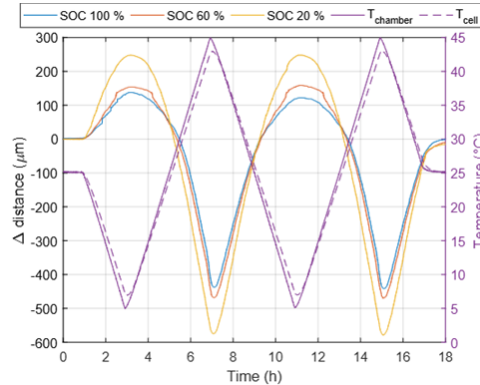


Figura 4 - Andamento della variazione di distanza misurata dal sensore in funzione della temperatura a vari livelli di SOC.

7.1.2.3 Effetti dell'invecchiamento

I test relativi allo stato di carica e termici sono stati ripetuti usando due celle invecchiate e si è osservato che:

- Celle invecchiate presentano maggiori dilatazioni termiche rispetto alle celle nuove.
- Celle invecchiate presentano minori espansioni dovute alla variazione di stato di carica rispetto alle celle nuove.

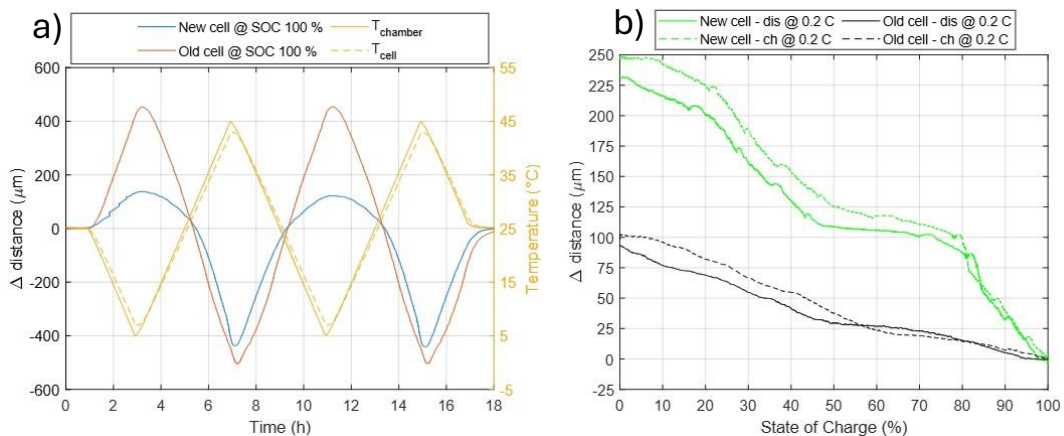


Figura 5 - Confronto tra il comportamento delle celle nuove e invecchiate in funzione della temperatura (a) e del SOC (b).

7.1.3 Ottimizzazione delle bobine induttive

Dati i buoni risultati ottenuti si è scelto di valutare l'impatto della geometria dell'induttore utilizzato per effettuare la misura sulla sua accuratezza. In particolare, sono state progettate e caratterizzate otto geometrie diverse, variando la larghezza della traccia dell'induttore, il rapporto tra diametro interno ed esterno delle spire e forma geometrica (circolare o quadrata).

I test hanno rivelato che:

- Un rapporto elevato tra diametro interno ed esterno migliora la sensibilità.

- Bobine con tracce più larghe danno risultati migliori.
- La forma geometrica ha un impatto minore sulla bontà delle misure. Tuttavia, le bobine circolari sono leggermente più performanti rispetto a quelle quadrate.

7.1.4 Conclusioni della sotto attività

Il sistema di misura della deformazione delle celle proposto si è dimostrato valido per misurare l'espansione delle celle al litio con una buona sensibilità. I risultati sperimentali confermano la coerenza delle misure effettuate nei test sperimentali con la deformazione attesa da analisi teoriche e studi di letteratura. In conclusione, questo studio offre una base solida per l'implementazione pratica di sistemi di monitoraggio della deformazione delle celle che compongono la batteria nei futuri sistemi di accumulo elettrochimico.

7.2 Bilanciamento dinamico per batterie in applicazioni di seconda vita

Nella linea di attività 3.5 è stato condotto uno studio teorico sulla letteratura relativa alle batterie di seconda vita, con particolare attenzione ai sistemi di bilanciamento dinamico per compensare le differenze di capacità tra celle causate dall'invecchiamento non uniforme delle stesse all'interno del pacco batteria. Tale sbilanciamento riduce la capacità utilizzabile del pacco batteria diminuendone quindi il valore. Di conseguenza, lo studio di tecniche in grado di massimizzare la capacità utilizzabile di pacchi batteria di seconda vita potrebbe facilitarne l'uso in applicazioni stazionarie dove la densità di energia e potenza richiesta alla batteria è meno critica. In questa linea di attività è stata sviluppata una piattaforma di simulazione avanzata per modellare realisticamente le celle che compongono batterie di seconda vita e le più promettenti architetture per implementare il concetto del bilanciamento dinamico. Usando la piattaforma sono state comparate 5 diverse architetture di bilanciamento dinamico: *Direct Cell-to-Cell* (DC2C), *Cell-to-Pack* (C2P), *Pack-to-Cell* (P2C), *Adjacent Cell-to-Cell* (AC2C) e *Cell-to-Auxiliary cell* (C2AUX).

7.2.1 Conclusioni della sotto attività

Le performance delle varie topologie sono state valutate rispetto a parametri chiave come la corrente di bilanciamento necessaria a mantenere le celle bilanciate, gli effetti dell'efficienza del convertitore DC-DC utilizzato nell'architettura e la complessità dell'algoritmo di bilanciamento richiesto. Il confronto tra le architetture è stato condotto su una batteria composta da 10 celle collegate in serie, con capacità nominale di 20 Ah e differenze di capacità distribuite uniformemente in un intervallo del $\pm 15\%$. I risultati hanno mostrato che l'architettura DC2C consente di ottenere le migliori prestazioni a parità di efficienza del convertitore DC/DC utilizzato ma allo stesso tempo necessita di un'architettura più complessa e, quindi, più costosa. Invece, la topologia C2AUX sembra offrire il migliore compromesso tra prestazioni e complessità, ma richiede l'aggiunta di una cella ausiliaria al pacco batteria che ne aumenta il costo.

7.3 Parallelizzazione intelligente di batteria in applicazioni di seconda vita

Questa ultima sotto attività svolta all'interno della linea di attività 3.6 ha come obiettivo lo sviluppo e la validazione di sistemi avanzati di parallelizzazione per batterie utilizzando convertitori DC/DC in modalità *Partial Power* (PP). Questo approccio mira a migliorare l'efficienza, la scalabilità e l'affidabilità degli accumuli energetici in applicazioni stazionarie, come ad esempio la *micro-grid*. In queste applicazioni, un sistema di parallelizzazione

intelligente di batteria a basso costo consentirebbe di utilizzare le batterie esauste dei veicoli elettrici combinandole tra di loro per ottenere capacità adeguate all'applicazione. Questo approccio presenta notevoli vantaggi sia dal punto di vista ambientale che economico, consentendo di ottenere accumuli elettrochimici di energia a basso costo per le applicazioni stazionarie e riutilizzando batterie che dovevano essere dismesse.

7.3.1 Sistema di parallelizzazione di batterie proposto

In questa sotto attività è stato proposto di sostituire i classici convertitori DC/DC attualmente utilizzati nella parallelizzazione di batterie con convertitori DC/DC *Partial Power* usati in configurazione IPOS (*Input Parallel Output Series*). Questi ultimi sono in grado di controllare la corrente che scorre in batterie connesse in parallelo gestendo direttamente solamente una piccola parte della potenza complessiva erogata dalla batteria. Questo è reso possibile dalla loro connessione nel sistema mostrata in Figura 6.

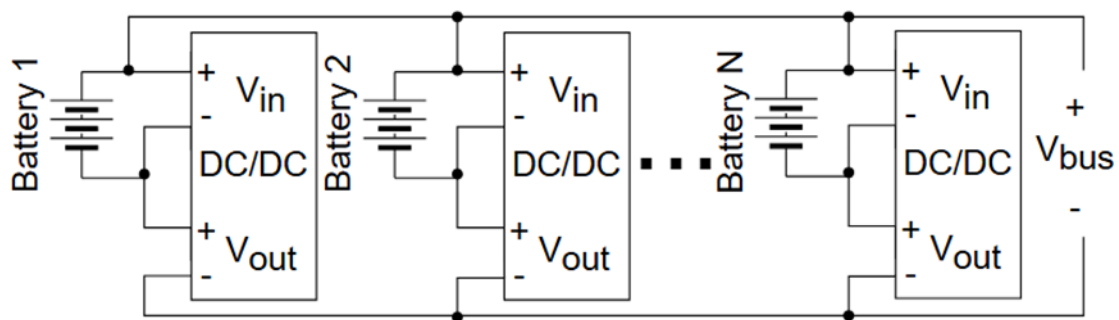


Figura 6 - Schema a blocchi generico di un sistema di parallelizzazione per batterie basato su convertitori DC/DC *Partial Power*.

Controllando solamente una piccola parte della potenza erogata dalla batteria si riescono ad ottenere elevate efficienze energetiche del sistema complessivo utilizzando convertitori DC/DC *Partial Power* con efficienze modeste e quindi dal basso costo. Per dimostrare questa affermazione è stato realizzato un prototipo sperimentale in scala basato su una topologia *buck-boost* e il controllore commerciale LTC1778-1. Il sistema ottenuto è stato testato nella parallelizzazione di due batterie con tensione nominale di 8,4 V e capacità di 2,5 Ah e 5 Ah, rispettivamente. Il sistema è stato in grado di mantenere le batterie in parallelo durante una scarica completa delle stesse effettuata a potenza costante di 40 W. Infatti, il sistema ha controllato opportunamente la corrente di ogni batteria per mantenere lo stato di carica delle due batterie bilanciato durante tutta la scarica, consentendo la piena scarica di entrambe le batterie, massimizzando così la capacità del sistema. Inoltre, l'efficienza complessiva del sistema è stata superiore del 97 %, che è un valore comparabile con quanto ottenuto in letteratura utilizzando convertitori DC/DC classici basati però su complesse architetture.

7.3.2 Conclusioni della sotto attività

Il sistema di parallelizzazione basato su convertitori DC/DC *Partial Power* rappresenta una soluzione promettente per la parallelizzazione di batterie di seconda vita in applicazioni stazionarie come ad esempio le *micro-grid*. I test effettuati dimostrano la validità dell'approccio, confermando efficienze energetiche paragonabili ai classici convertitori DC/DC attualmente utilizzati. Tuttavia, la soluzione proposta sfrutta architetture più semplici e quindi più economiche.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

All'interno di questa linea di attività non sono state usate consulenze esterne.

9 Pubblicazioni scientifiche

- [1] R. Di Rienzo, et al., "Inductive Low-cost System to Measure the Volume Variation of Prismatic Lithium-ion Cells," in 2023 IEEE 2nd Industrial Electronics Society Annual On-Line Conference (ONCON), IEEE, Dec. 2023, pp. 1-6. doi: 10.1109/ONCON60463.2023.10430895.
- [2] L. Crocetti, et al., "On the Necessity, Security Requirements and Performance Requirements of Digital Signature Co-processors in Li-ion BMSs," 2023 IEEE 2nd Industrial Electronics Society Annual On-Line Conference, ONCON 2023, pp. 1-6. Online, doi: 10.1109/ONCON60463.2023.10430964.
- [3] R. Di Rienzo, et al., "Comparison of active energy-balance architectures for second-life battery dynamic equalization," in 2023 IEEE 2nd Industrial Electronics Society Annual On-Line Conference, ONCON 2023- Virtual, Online, 8-10 Dec. 2023.
- [4] G. Simonte, et al., "Comparison of battery string parallelization systems to improve Na-NiCl₂ battery reliability," 2023 IEEE 2nd Industrial Electronics Society Annual On-Line Conference, ONCON 2023, pp. 1-6. Online, doi: 10.1109/ONCON60463.2023.10430964.
- [5] G. Simonte, et al., "Novel Battery Parallelization Approach Using DC/DC Partial Power Converter in Micro-Grids," Lecture Notes in Electrical Engineering, vol. 1110 LNEE, pp. 346-351, 2024, doi: 10.1007/978-3-031-48121-5_49.
- [6] C. Sandri, et al., "Optimal sizing of PCB coils for Lithium-ion cell dilation measurement," in Applications in Electronics Pervading Industry, Environment and Society (ApplePies), 2024, in press.
- [7] G. Simonte, et al., "Development of a Partial Power DC/DC Converter based on buck-boost topology for Battery Parallelization Systems", in Applications in Electronics Pervading Industry, Environment and Society (ApplePies), 2024, in press.
- [8] M. Martino, et al., "A Simulation Platform for Dynamic Equalization Analysis in Second-Life Lithium-Ion Batteries," in 2024 International Conference on Modeling and Simulation of Electric Machines, Converters and Systems (ELECTRIMACS) - Castello de la Plana, Spain, 27-30 May 2024, in press.
- [9] M. Martino, et al., "A Dynamic Equalization Topology Based on Auxiliary Cell: Theoretical and Simulative Analyses," in 2024 IEEE International Conference on Artificial Intelligence & Green Energy (IEEE ICAIGE24)- Yasmine Hammamet, Tunisia, 10-12 Oct. 2024, pp. 1-6.

10 Eventi di disseminazione

Non ci sono stati eventi di disseminazione direttamente legati al progetto. Tuttavia le attività svolte all'interno del progetto e descritte negli articoli riportati nella sezione precedente sono state presentate in diverse conferenze scientifiche.