RdS
RICERCA DI SISTEMA

ENEA
AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE, L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

MINISTERO DELL'AMBIENTE E DELLA SICUREZZA ENERGETICA

# Ricerca di Sistema elettrico

# LA3.5 - Studi preliminari di funzionalità innovative per la gestione delle batterie


Federico Baronti, Luca Crocetti, **Roberto Di Rienzo**, Roberto Roncella, Roberto Saletti, Alessandro Verani
Dipartimento Ingegneria dell'Informazione (DII) – Università di Pisa


UNIVERSITÀ DI PISA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE


RdS_PTR 22-24_PR 1.7_LA3.5_016

*LA 3.5 - Studi preliminari di funzionalità innovative per la gestione delle batterie*

Federico Baronti, Luca Crocetti, Roberto Di Rienzo, Roberto Roncella, Roberto Saletti, Alessandro Verani - Dipartimento Ingegneria dell'Informazione (DII) – Università di Pisa

Giugno 2023

Report Ricerca di Sistema Elettrico

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

Obiettivo: *Decarbonizzazione/Digitalizzazione ed evoluzione delle reti*
Progetto: Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali
Linea di attività: *3.5*
Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA
Responsabile Linea di Attività: *Roberto Di Rienzo (DII-UNIPI)*
Mese inizio previsto: 1
Mese inizio effettivo: 1
Mese fine previsto: 18
Mese fine effettivo: 18

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*"
Responsabile scientifico ENEA: Manlio Pasquali
Responsabile scientifico Co-beneficiario: Di Rienzo Roberto

# Indice


1 RISULTATI ATTESI ..... 3
2 RISULTATI OTTENUTI ..... 4
3 PRODOTTI ATTESI ..... 5
4 PRODOTTI SVILUPPATI ..... 6
5 ANALISI DEGLI SCOSTAMENTI SU ATTIVITÀ E RISULTATI ..... 7
6 SINTESI DELLE ATTIVITÀ SVOLTE ..... 8
7 DETTAGLIO DELLE ATTIVITÀ SVOLTE ..... 9
8 CONTRIBUTO DELLE EVENTUALI CONSULENZE ALLE ATTIVITÀ SOPRA DESCRITTE ..... 13
9 PUBBLICAZIONI SCIENTIFICHE ..... 14
10 EVENTI DI DISSEMINAZIONE ..... 15

# 1 Risultati attesi

Questa linea di attività produrrà un'analisi approfondita delle funzionalità innovative, per la gestione della batteria, presentate negli ultimi anni. L'analisi valuterà l'impatto delle varie funzionalità sulla gestione della batteria e il loro peso in termini di aumento della complessità e di costo della stessa. Verranno evidenziate, infine, le funzionalità più promettenti da sviluppare e testare nella linea di attività 3.6. Tali osservazioni verranno infine descritte in un rapporto tecnico che sintetizza l'attività di analisi delle funzionalità innovative per l'ottimizzazione della gestione delle batterie al litio.

# 2 Risultati ottenuti

Come dettagliatamente descritto nell'allegato tecnico "Studi preliminari di funzionalità innovative per la gestione delle batterie", questa linea di attività ha consentito di individuare le principali problematiche ancora aperte della gestione sicura delle batterie agli ioni di litio in applicazioni di prima e seconda vita. Inoltre, ha consentito di evidenziare le soluzioni più promettenti presentate nella letteratura degli ultimi anni, analizzandole criticamente rispetto all'impatto che esse potranno avere sulla complessità e sul costo del sistema elettronico di gestione, Battery Management System (BMS), di batterie commerciali. Inoltre, sono state evidenziate le funzioni principali da esplorare nella linea di attività 3.6 che verrà svolta nella seconda metà dell'accordo di collaborazione.

# 3 Prodotti attesi

Questa linea di attività non prevede lo sviluppo di prodotti hardware/software.

# 4 Prodotti sviluppati

Questa linea di attività non prevede lo sviluppo di prodotti hardware/software.

# 5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Non ci sono stati scostamenti significativi nello sviluppo della linea di attività rispetto a quanto pianificato.

# 6 Sintesi delle attività svolte

Il continuo aumento del numero di applicazioni che utilizzano batterie agli ioni di litio sta introducendo nuove sfide nella progettazione del loro sistema di controllo e nelle funzionalità necessarie a garantire un controllo ottimale e sicuro delle batterie. Questa linea di attività ha individuato tre macro problematicità: la necessità di migliorare gli algoritmi di stima dello stato interno delle celle che compongono la batteria e l'aumento della capacità di prevenzione degli eventi potenzialmente distruttivi per la batteria e pericolosi per l'applicazione e i suoi utenti; le problematicità di sicurezza informatica legate a una batteria che deve essere sempre più connessa con il mondo esterno; le problematiche legate al riutilizzo di batterie considerate esauste per le applicazioni di prima vita in applicazioni di seconda vita, che richiedono livelli prestazionali meno stringenti. Per ognuna di queste problematicità sono state individuate le soluzioni più promettenti presentate in letteratura, che potranno essere implementate nei futuri pacchi batteria commerciali. Tali soluzioni verranno approfondite nella linea di attività 3.6.

# 7 Dettaglio delle attività svolte

Le batterie agli ioni di litio sono diventate negli anni la tecnologia di elezione per alimentare applicazioni portatili o garantire una alimentazione senza interruzioni in applicazioni particolarmente critiche. Infatti, grazie alla loro elevata densità di energia e potenza consentono di ottenere prestazioni paragonabili se non superiori alle tecnologie precedenti con ingombro e peso estremamente ridotto. Allo stesso tempo, esse presentano diversi problemi di sicurezza che devono essere mitigati tramite un controllo accorto della batteria da parte del sistema ausiliare di controllo, denominato Battery Management System (BMS). Il BMS misura la tensione, corrente e temperatura di ogni cella elementare che compone il pacco batterie e adotta una serie di politiche di sicurezza per evitare che queste grandezze fuoriescano da specifici range di sicurezza, forniti dal produttore delle celle. Inoltre, esso implementa una serie di funzioni atte ad ottimizzare l'uso della batteria, come ad esempio il bilanciamento della carica immagazzinata nelle celle e la stima dello stato di carica e di invecchiamento.

Con il crescente numero di applicazioni che sfruttano i vantaggi delle batterie agli ioni di litio, il BMS si trova ad affrontare sempre nuove sfide per garantire un controllo sicuro e ottimale della batteria. Questa linea di attività mira ad individuare le principali problematiche di cui il BMS dovrà permettere il superamento, nelle applicazioni future e presenta i risultati di una ricerca bibliografica che evidenzia le soluzioni più promettenti attualmente disponibili in letteratura, che potranno essere ingegnerizzate all'interno delle future batterie agli ioni di litio. Le soluzioni individuate sono state analizzate criticamente per valutare l'impatto delle funzionalità sulle prestazioni della batteria in relazione all'aggravio di complessità e quindi di costo introdotto nel BMS. Nelle successive sottosezioni sono stati riportate le tre principali problematicità individuate nella linea di attività, le relative funzionalità innovative da aggiungere al BMS per mitigarle o risolverle e il loro impatto economico sulla batteria.

## *7.1 Individuazione preventiva di aventi critici e miglioramento algoritmi di stima*

Con l'aumento delle vendite delle auto elettriche, l'opinione pubblica e gli organi legislativi a vari livelli stanno aumentando l'attenzione rispetto alla sicurezza di questo tipo di mobilità. Infatti, sempre più stringenti normative vengono introdotte per garantire un uso sicuro dei veicoli elettrici. I due punti maggiormente trattati sono l'individuazione preventiva di eventuali situazioni anomale che possono portare a condizioni poco sicure della batteria e il miglioramento delle stime dello stato interno delle celle che consentono all'utente un uso più accurato della batteria, estendendone le vita e minimizzando comportamenti potenzialmente dannosi per le sue celle.
Diversi approcci sono stati presentati in letteratura per migliorare la stima dello stato interno. Essi sfruttano numerosi approcci, che spaziano dall'incremento della tipologia e precisione delle misure dirette effettuate sulle celle, all'utilizzo di modelli che sempre più complessi per prevederne il comportamento, fino ad arrivare a tecniche puramente matematiche che cercano di individuare relazioni empiriche tra le misure effettuate e lo stato interno delle celle.
Tra i vari approcci, quelli basati sul concetto di "sensor fusion", ovvero l'incremento delle tipologie di misure effettuate sulle celle e la loro interpretazione congiunta, sembrano essere i più promettenti sia rispetto all'incremento dell'accuratezza degli algoritmi di stima che all'identificazione preventiva di potenziali criticità della sicurezza. Tali approcci si basano sull'idea di acquisire ulteriori grandezze relative alle celle, complementari alle misure di tensione, corrente e temperatura già disponibili nella quasi totalità dei BMS, con misure di altre grandezze chimico/fisiche, come ad esempio le deformazioni delle celle e la misura della concentrazione di eventuali gas emessi.

Infatti, una cella durante il normale uso cambia il proprio volume al variare dello stato in cui si trova. Ad esempio, quando una cella viene caricata e scaricata il suo volume aumenta e diminuisce, rispettivamente, per l'effetto di intercalazione e de-intercalazione degli ioni litio all'interno dell'anodo di grafite. Anche l'invecchiamento gioca un ruolo fondamentale nella variazione di volume della cella, che mediamente si espande al verificarsi di eventi degradativi. Quindi, combinando la misura della deformazione delle celle con le altre misure effettuate dal BMS è possibile migliorare la stima sia dello stato di carica che dello stato di salute delle celle. Inoltre, l'analisi dell'espansione delle celle consente di individuare variazioni repentine di volume che sono sintomo di condizioni anomale del materiale interno della cella e che possono portare a situazioni poco sicure. Infatti, la maggior parte delle condizioni poco sicure della cella è conseguenza di reazioni indesiderate che avvengono all'interno della cella e la fanno espandere. Un'altra conseguenza di tali reazioni è la generazione di gas, che aumenta la pressione interna della cella. Solitamente, l'involucro della cella è dotato di una valvola di sicurezza (venting) che consente la fuoriuscita del gas prodotto nella cella in caso di un aumento eccessivo della sua pressione. La presenza di tale valvola rende la cella un sistema non completamente chiuso e quindi da essa posso fuoriuscire piccole quantità di gas anche durante il normale utilizzo della cella. L'analisi di questi gas può essere utilizzata nelle tecniche basate su "sensor fusion" per individuare le reazioni indesiderate che avvengono all'interno della cella, aumentando l'accuratezza della stima dello stato interno e l'individuazione preventiva di possibili guasti.

Dunque, dall'analisi della letteratura è emerso che le tecniche basate su "sensor fusion" possono migliorare sensibilmente l'uso sicuro delle batterie agli ioni di litio e che la deformazione delle celle e l'analisi dei loro gas emessi possono essere due grandezze chiave per ottenere tale scopo; prendendo spunto da questa analisi, in una pubblicazione sottomessa alla seconda edizione della conferenza annuale online della IEEE electronics society (ONCON 2023) sono analizzate possibili soluzioni hardware da implementare all'interno di batterie commerciali per analizzare la deformazione delle celle.

Nella line di attività 3.6 verrà portata avanti esplorazione della possibilità di effettuare tali misure con sistemi elettronici compatibili con le batterie commerciali sia dal punto di vista economico che di ingombro.

## *7.2 Aumento della sicurezza informatica*

Un altro aspetto sempre più importante dell'uso delle batterie riguarda la sicurezza informatica. Infatti, in un mondo sempre più connesso, i paradigmi "internet of things" e "cloud computing" si stanno affacciando prepotentemente nel mondo dei sistemi di accumulo dell'energia, sia in applicazioni di mobilità che in applicazioni stazionare. Con lo scambio remoto di informazioni è importante che la batteria sia in grado di implementare meccanismi di protezione informatica per individuare attacchi malevoli che possono minare la sicurezza della batteria e dell'applicazione in cui essa è utilizzata. I tipo di attacchi possono essere molteplici e possono avere obbiettivi molto diversi. Ad esempio, attacchi diversi potrebbero mirare ad interrompere la comunicazione tra il BMS e la rete, avere accesso ai dati scambiati tra BMS e i server remoti al fine di ottenere informazioni sensibili sull'utente, o fornire dati falsi al BMS stesso inducendo errori di stima che possono rivelarsi fatali per la salute della batteria e, di conseguenza, del suo utilizzo da parte dell'utente. A questi aspetti si aggiunge anche la necessità di proteggere i componenti della batteria, a partire dalle celle e comprendendo tutta la parte di controllo, da una eventuale sostituzione malevola che potrebbe avvenire durante la manutenzione o durante le operazioni necessarie a rendere la batteria compatibile con le applicazioni di seconda vita.

Al fine di garantire questi requisiti, il BMS deve essere in grado, quindi, di poter attuare meccanismi di protezione che lo rendano in grado di proteggere l'applicazione da eventuali contraffazioni, e al contempo garantire l'autenticità delle sorgenti dalle quali riceve i dati, così come l'integrità e la confidenzialità dei dati

stessi. Dall'analisi della letteratura esistente emerge che, al fine di poter garantire questi requisiti è necessario dotare il BMS di alcune funzionalità hardware e software relative alla sicurezza. In particolare, si ritengono necessarie primitive che implementino meccanismi di generazione di identificatori unici e non clonabili, firma digitale, funzioni di hash e cifratura dei dati. Attraverso la combinazione di questi elementi è possibile dunque andare a implementare i protocolli di sicurezza comunemente impiegati in ambito di cybersicurezza. Una prima analisi di confronto tra le varie tecniche implementabili all'interno del BMS è stata riassunta nell'articolo sottomesso alla seconda edizione della conferenza annuale online della IEEE electronics society (ONCON 2023). Inoltre, il lavoro presenta una prima implementazione di un coprocessore hardware da inserire all'interno del BMS per realizzare la funzionalità della firma digitale.

## *7.3 Uso delle batterie in applicazioni di seconda vita*

Con l'aumento dei volumi di produzione delle batterie al litio i problemi relativi all'approvvigionamento delle materie prime che le compongono e la loro dismissione alla fine del ciclo operativo stanno diventando sempre più importanti. Inoltre, nella mobilità elettrica la batteria viene sostituita quando raggiunge una capacità residua di circa 80 % della capacità iniziale in quanto ritenuta non più soddisfacente a garantire l'autonomia e le prestazioni necessarie all'utilizzo del veicolo. Allo stesso tempo, queste batterie possono essere ancora utilizzate in applicazioni meno stringenti dal punto di vista della densità di energia e potenza specifica, come ad esempio, le applicazioni stazionarie per la gestione ottimale delle energie rinnovabili. In questo modo si hanno diversi vantaggi: la riduzione delle nuove batterie da produrre, la diminuzione delle batterie da smaltire e l'incremento delle applicazioni che possono sfruttare i vantaggi delle batterie al litio per garantire un servizio migliore all'utente. Allo stesso tempo, l'utilizzo di batterie di seconda vita richiede un maggior controllo per garantire un uso sicuro e ottimale delle batterie.
Le problematiche sulla sicurezza possono essere affrontate con le tecniche presentate precedentemente nelle sottosezioni 7.1 e 7.2. Invece, per garantire un uso ottimale della batteria, il BMS deve esse in grado di sopperire alla forte variabilità del grado di invecchiamento tra le celle che compongono la batteria. Infatti, le celle dello stesso pacco batteria possono presentare un grado di invecchiamento molto diverso tra di loro che può superare il 10-15 % della capacità iniziale. Inoltre, essendo le celle connesse in serie, la capacità della batteria è pari a quella della cella meno performante. Di conseguenza, una parte significativa dell'energia immagazzinabile nel pacco batteria non può essere sfruttata dall'applicazione.
La funzionalità più promettente in tale ambito è il bilanciamento dinamico. Questa tecnica prevede l'uso di un sistema elettronico di potenza in grado di variare selettivamente la corrente che scorre nelle varie celle cercando di ottimizzare il valore di corrente di ogni cella in funzione della sua capacità. In questo modo le celle possono essere caricate e scaricate completamente durante i cicli operativi ottimizzando la capacità utilizzabile della batteria. Di contro, il sistema di bilanciamento dinamico deve poter spostare quantità di carica considerevole tra le celle, quindi, diventa molto importante la scelta dell'architettura hardware utilizzata per implementare tale tecnica.
A tale proposito è stato realizzato uno studio teorico preliminare, sottomesso alla seconda edizione della conferenza annuale online della IEEE electronics society (ONCON 2023), che mira a quantificare l'effettivo beneficio del bilanciamento dinamico in pacchi batteria di seconda vita e confronta le principali architetture hardware presentate in letteratura. Lo studio dimostra che il guadagno in termini di capacità può raggiungere valori tra il 5 e l'11 % partendo da batterie di seconda vita con distribuzioni realistiche, aventi deviazione standard pari al 5 % della capacità nominale. Di conseguenza si consiglia di approfondire il concetto di bilanciamento dinamico applicato a batterie di seconda vita nella linea di attività 3.6 con approccio simulativo e, in caso di risultati positivi, realizzando eventuali prototipi in scala delle architetture hardware più promettenti.

Un’altra funzionalità innovativa che può essere aggiunta ad un sistema di accumulo per applicazioni stazionarie costituito da batterie di seconda vita e/o batterie basate su chimiche meno performanti del litio, come ad esempio le batterie al sodio caldo, è la gestione intelligente della parallelizzazione di più pacchi batterie. Infatti, le applicazioni stazionarie solitamente richiedono una quantità di energia immagazzinabile maggiore rispetto alla capacità di una singola batteria di un veicolo elettrico. Quindi, più batterie devono essere collegate in parallelo per aumentare la capacità complessiva dell’accumulo.
La connessione parallelo di pacchi batteria va eseguita con particolare attenzione per evitare potenziali correnti distruttive che possono scorrere da batterie con tensione maggiore (più cariche) a batterie con tensione minore (meno cariche). Tali correnti possono essere evitare con l’utilizzo di semplici circuiti basati su diodi che però introducono forti perdite di energia abbassando il rendimento complessivo del sistema di accumulo. Una soluzione diametralmente opposta consiste nell’utilizzare un convertitore DC/DC per ogni batteria che consente di controllare la potenza prelevata e immessa in ogni pacco batteria con efficienze che possono raggiungere il 97-98 %. Di contro, questa soluzione aumenta fortemente la complessità e il costo del sistema. Per confrontare tutte le principali modalità di parallelizzazione di pacchi batterie è stato realizzato uno studio comparativo basato su un approccio simulativo i cui risultati sono stati sottomessi alla seconda edizione della conferenza annuale online della IEEE electronics society (ONCON 2023). Lo studio evidenza che la soluzione basata su circuiti di potenza che implementano funzioni assimilabili a interruttori controllati presenta un buon compromesso tra complessità, costo e prestazioni. Inoltre, un’architettura innovativa per parallelizzare pacchi batteria di seconda vita o batterie di diversa tecnologia è stata presentata nella conferenza “International Conference on Applications in Electronics Pervading Industry, Environment and Society” (ApplePies 2023). Questa architettura sfrutta il concetto dei convertitori “DC/DC partial power” che sono in grado di controllare la corrente che scorre nelle singole batterie connesse in parallelo che formano l’accumulo di energia, intervenendo solo su una parte della potenza fornita al carico, aumentando il rendimento complessivo del sistema e minimizzandone costo e complessità.

# 8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Nella linea di attività 3.5 non sono state utilizzate consulenze esterne.

# 9 Pubblicazioni scientifiche

Elenco delle pubblicazioni scientifiche eventualmente risultanti dall'attività svolta

- R. Di Rienzo, C. Sandri, A. Verani, N. Nicodemo, F. Baronti, R. Roncella, and R. Saletti, "Inductive Low-cost System to Measure the Volume Variation of Prismatic Lithium-ion Cells," **submitted to** 2023 IEEE 2nd Industrial Electronics Society Annual On-Line Conference (ONCON).

- L. Crocetti, L. Montemaggi, R. Di Rienzo, F. Baronti, R. Roncella, and R. Saletti, " On the Necessity, Security Requirements and Performance Requirements of Digital Signature Co-processors in Li-ion BMSs," **submitted to** 2023 IEEE 2nd Industrial Electronics Society Annual On-Line Conference (ONCON).

- R. Di Rienzo, A. Verani, N. Nicodemo, F. Baronti, R. Roncella, and R. Saletti, "Comparison of active energy-balance architectures for second-life battery dynamic equalization," **submitted to** 2023 IEEE 2nd Industrial Electronics Society Annual On-Line Conference (ONCON).

- G. Simonte, R. Di Rienzo, A. Verani, N. Nicodemo, F. Baronti, R. Roncella, and R. Saletti, " Comparison of battery string parallelization systems to improve Na-NiCl2 battery," **submitted to** 2023 IEEE 2nd Industrial Electronics Society Annual On-Line Conference (ONCON).

- G. Simonte, R. Di Rienzo, N. Nicodemo, A. Verani, F. Baronti, R. Roncella and R. Saletti, “Novel battery parallelization approach using DC/DC partial power converter in micro-grids” **presented on** the International Conference on Applications in Electronics Pervading Industry, Environment and Society” (ApplePies 2023), 28-29 September 2023, Genova.

# 10 Eventi di disseminazione