



Ricerca di Sistema elettrico

Caratteristiche dei BMS per sistemi di accumulo second life e linee guida per la progettazione

F. Baronti, A. Carloni, R. Di Rienzo, R. Roncella, R. Saletti

CARATTERISTICHE DEI BMS PER SISTEMI DI ACCUMULO “SECOND LIFE” E LINEE GUIDA PER LA PROGETTAZIONE

F. Baronti, A. Carloni, R. Di Rienzo, R. Roncella, R. Saletti (Università di Pisa)

Dicembre 2020

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - Il annualità

Obiettivo: *Tecnologie*

Progetto: *Sistemi di accumulo, compresi elettrochimico e power to gas, e relative interfacce con le reti*

Work package: *WP1 – Accumulo Elettrochimico*

Linea di attività: LA5.15 - Caratteristiche dei BMS per sistemi di accumulo second life e linee guida per la progettazione

Responsabile del Progetto: Ing. Giulia Monteleone ENEA

Responsabile del Work package: Dr. Pier Paolo Proisini ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione ENEA-Università per una attività di ricerca dal titolo: “BMS per sistemi di accumulo second life”

Responsabile scientifico ENEA Ing. Manlio Pasquali

Responsabile scientifico Università di Pisa: *Prof. Roberto Roncella*

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 BATTERY MANAGEMENT SYSTEM.....	5
2.1 MONITORAGGIO DELLE CELLE	7
2.2 FUNZIONI SECONDARIE	8
2.2.1 <i>Stima dello stato di carica</i>	8
2.2.2 <i>Stima dello stato di salute</i>	10
2.2.3 <i>Stima dello stato di potenza</i>	11
2.3 BILANCIAMENTO	12
3 ARCHITETTURE DI UN BATTERY MANAGEMENT SYSTEM.....	16
4 BATTERIE DI SECOND-LIFE.....	18
4.1 CONCETTO DI “SECOND-LIFE”	18
4.2 APPLICAZIONI	19
4.3 ASSEMBLAGGIO DEL PACCO BATTERIA	20
4.4 COSTI E NECESSITÀ DI REGOLAMENTAZIONI	23
5 LINEE GUIDA PER LA PROGETTAZIONE DI UN BMS PER APPLICAZIONI DI SECOND-LIFE	24
5.1 ARCHITETTURA DI UN PACCO BATTERIA DI SECOND-LIFE	24
5.2 BATTERY MANAGEMENT SYSTEM	26
5.3 MONITORAGGIO TENSIONI DI CELLA E TEMPERATURA	26
5.4 MONITORAGGIO DI CORRENTE E SISTEMI DI SICUREZZA	28
5.5 STIME DELLO STATO DI CARICA E BILANCIAMENTO ATTIVO.....	30
6 CONCLUSIONI.....	32
7 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	33
8 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	35
9 CURRICULA DEL GRUPPO DI LAVORO	35

Sommario

Grazie alle prestazioni in termini di densità di potenza e di energia, le batterie al litio sono sempre più utilizzate come sistema di accumulo in numerose applicazioni: dagli smartphone e notebook fino ai veicoli ibridi e elettrici. In particolar modo per il settore automobilistico è previsto un aumento di veicoli elettrici consistente nei prossimi decenni. Infatti, si stima che 85 milioni di autovetture elettriche circoleranno a livello mondiale nel 2030. In questo scenario, si rende necessario lo studio preventivo di nuove strategie, tecnologie, industrie, norme e regolamenti che si occupino dell'intero ciclo di vita di una batteria al litio partendo: dal suo primo utilizzo, dalla sostituzione, dall'eventuale riutilizzo e in fine del riciclaggio. Se non si procederà in questo senso, tra qualche anno, ci ritroveremo a dover gettare via un gran numero di batterie che hanno, si, terminato il loro primo ciclo di vita ma che potrebbero essere riutilizzate in applicazioni di "second-life" che richiedono una densità di potenza e di energia inferiore (per esempio i sistemi di accumulo stazionario dell'energia).

Pertanto, l'obiettivo di questo report è quello di definire le caratteristiche di un pacco batteria di second life e di fornire delle linee guida di progettazione di un battery management system da usare in applicazioni di questo tipo. Infatti, il BMS deve tenere conto della variabilità dei parametri delle celle all'interno del pacco batteria costituito da celle già utilizzate e riassemblate, provenienti prevalentemente, ma non solo, dal settore automobilistico. Pertanto, oltre alle funzionalità di un battery mangament system generico, quello utilizzato in applicazioni second-life dovrà prevedere funzioni aggiuntive.

Quindi il report è stato strutturato nel seguente modo. Dopo una breve introduzione, nel secondo capitolo, vengono descritte le funzionalità di un BMS generalmente utilizzato in pacchi batteria nuovi. Nel terzo capitolo, invece, il report si concentra sulle principali architetture hardware di un BMS. Nel quarto capitolo, viene introdotto il concetto di "second-life" e delle procedure di riassemblaggio e riuso di un pacco batteria, con una discussione sui costi finali al kilowattora che si possono ottenere da un pacco batteria costituito da celle già usate. Dopodiché, nel quinto capitolo si analizzerà la struttura generica di un pacco batteria di second-life utilizzato in applicazioni stazionarie di immagazzinamento dell'energia e vengono illustrate le linee guida di progettazione di un battery mangement system per questo tipo di sistema. Infine, le conclusioni completano il report.

1 Introduzione

Grazie al miglioramento delle prestazioni e all'abbassamento dei costi di produzione, le batterie al litio sono sempre più utilizzate come sistema di accumulo elettrochimico in svariate applicazioni: da quelle a bassa potenza e bassa energia (smartphone e notebook) fino a quella a più alta potenza e di grande energia (veicoli elettrici e sistemi di accumulo stazionario di energia). Tuttavia, a differenza di altri tipi di batteria realizzati con tecnologie più mature, per questo tipo di batterie il ciclo di vita non è ancora del tutto definito, a causa della mancanza di precise regolamentazioni nazionali (e/o sovranazionali) e infrastrutture specifiche per il riciclaggio. Pertanto, nei prossimi anni, in assenza di specifici provvedimenti, quando le batterie utilizzate nei dispositivi attualmente in uso raggiungeranno lo stato di fine vita, c'è il rischio concreto di avere una notevole quantità di oggetti da smaltire senza che sia previsto un percorso efficace di recupero, riciclo o riuso, con gravi ripercussioni ambientali ed economiche. Tra le strategie per affrontare queste problematiche, da qualche anno nella letteratura scientifica di settore si trova proposta l'idea di riutilizzare le batterie provenienti dal settore automotive, normalmente ritirate per carenza di prestazioni quando la batteria ha ancora una funzionalità residua non trascurabile, prevedendo una seconda vita, in applicazioni in cui è sufficiente una densità di potenza ed energia inferiore, come per esempio nei sistemi di accumulo stazionario che offrono servizi alla rete elettrica in energia, tipicamente abbinati a sistemi di generazione da fonte rinnovabile.

I sistemi di accumulo per applicazioni automobilistiche hanno infatti limiti della vita operativa utile legati alla capacità e alla potenza residua del pacco batteria, che devono essere compatibili con le prestazioni dichiarate del veicolo. Il raggiungimento della condizione di fine vita normalmente non corrisponde alla mancata funzionalità del pacco batteria ma è associata al degrado di parametri prestazionali che impediscono al veicolo di mantenere le caratteristiche attese. Per questo motivo la sostituzione del sistema di accumulo porta alla disponibilità di interi moduli ancora funzionanti, seppure con specifiche degradate. Purtroppo, anche a parità di caratteristiche iniziali (per lo stesso tipo e modello di veicolo), i moduli disponibili in second life presentano una elevata variabilità, dovuta al diverso uso e ai diversi criteri di ritiro, come pure le celle all'interno dello stesso modulo, a causa dei gradienti termici che ne possono comportare un invecchiamento non omogeneo. I sistemi di gestione per sistemi di accumulo basati su questa tipologia di elementi, nella loro seconda vita operativa, devono quindi tenere conto di questa variabilità, potendo contare su una limitata possibilità di matching degli elementi disponibili dovuta anche al costo in termini temporali ed economici della caratterizzazione di tutte le celle.

Per quanto detto, l'obiettivo di questo report è quello di fornire delle linee guida per la progettazione di un Battery Management System (BMS) adibito alla gestione di un pacco batteria di second-life utilizzato in applicazioni di accumulo stazionario che tenga conto della variabilità dei parametri di cella e sarà così strutturato. Inizialmente, nel Capitolo 2, verranno descritte le funzionalità primarie e secondarie di un BMS generico e nel Capitolo 3, saranno riportate le principali architetture hardware. Il Capitolo 4 si focalizzerà sul concetto di second-life, sui benefici che può portare all'ambiente il riutilizzo di pacchi batteria prima del loro smaltimento o riciclo, le procedure di disassemblaggio e riutilizzo di un pacco batteria second-life e una discussione sui costi finali al kilowattora su un pacco batteria riutilizzato. Dopodiché si analizzerà la struttura di un pacco batteria per celle in second-life da utilizzare in applicazioni stazionarie, le caratteristiche che un BMS dovrebbe avere per controllarlo e le linee guida di progettazione. Infine, nel Capitolo 6, verranno mostrate le conclusioni.

2 Battery management system

IL Battery Management System (BMS) è il sistema elettronico di controllo di una batteria al litio [1]. Generalmente un pacco batteria viene inteso come un gruppo di celle elementari connesse in serie e/o in parallelo. Ogni cella è considerata sicura se viene utilizzata all'interno di range specifici di: temperatura, tensione e corrente. La zona di sicurezza racchiusa da questi limiti viene generalmente chiamata Safe Operating Area (SOA) e cambia a seconda della chimica e del produttore della cella [2]. La fuoriuscita dalla SOA da parte di una o più celle potrebbe innescare una serie di eventi pericolosi a danno del pacco batteria e dell'utilizzatore. Pertanto, il BMS ha come obiettivo principale quello di mantenere ogni cella all'interno

della sua SOA tramite delle strategie che possono cambiare anche in funzione dell'applicazione in cui viene utilizzata la batteria.

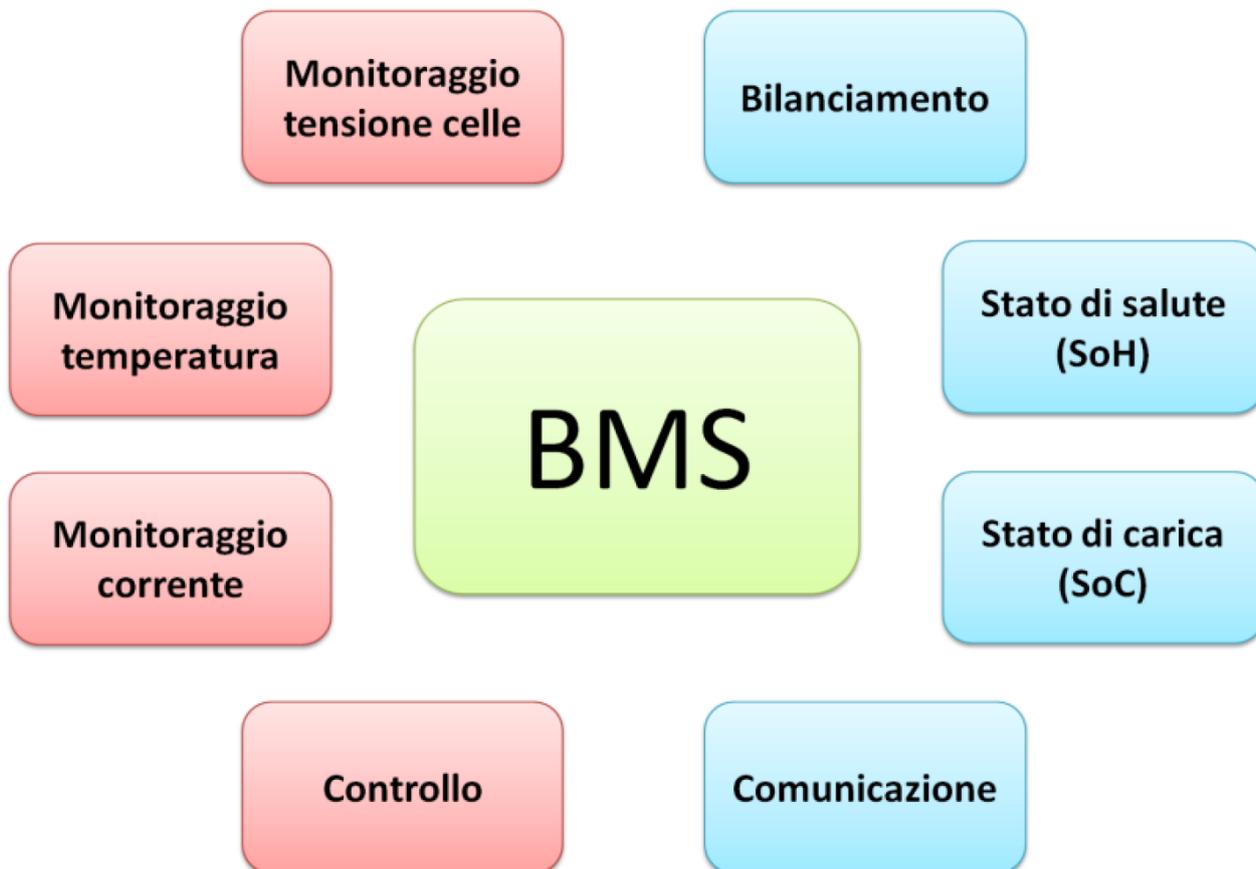


Figura 1 Funzioni principali di un BMS. In rosso sono rappresentate le funzioni primarie, direttamente legate alla sicurezza, e in blu quelle secondarie

A questa funzione primaria si aggiungono anche ulteriori funzioni, preposte alla stima dello stato della batteria, utili al sistema a più alto livello (per esempio il gestore di veicolo nel settore automotive o al gestore dell'applicazione in genere) per una corretta gestione del pacco batteria [3]. Pertanto, più in generale, le funzioni di un BMS possono essere suddivise in funzioni primarie e secondarie (vedi Figura 1). Le prime sono strettamente correlate alla gestione e alla sicurezza del pacco, mentre le seconde hanno come obiettivo la stima dei parametri di batteria e delle sue variabili di stato.

Le funzioni primarie si suddividono, a loro volta, in una parte di misurazione e in una di controllo che, sulla base dei valori misurati, può intraprendere azioni correttive a tutela della sicurezza e della corretta operatività. Nello specifico, il BMS sarà equipaggiato con componenti elettronici in grado di misurare la tensione, la temperatura e la corrente di ogni singola cella. Inoltre, dopo ogni misurazione fatta, l'unità di controllo dovrà verificare che:

1. le tensioni di tutte le singole celle siano comprese all'interno dei limiti (o cut-off) specificati dal produttore;
2. la temperatura di ogni cella non superi la temperatura massima di lavoro consentita o non sia inferiore a quella minima specificate dal produttore;
3. la corrente che scorre in ogni cella non superi la massima consentita dal produttore.

Qualora una delle precedenti assunzioni venisse a mancare, la parte di controllo del BMS attiverà delle misure cautelative volte a riportare la batteria all'interno della sua SOA.

Le funzioni secondarie più comuni sono:

1. la stima dello State of Charge (SoC) che rappresenta lo stato di carica della batteria ed è direttamente legato alla quantità di carica che la batteria può ancora erogare.
2. la stima dello State of Health (SoH) o stato di salute della batteria che fornisce al sistema un'indicazione in percentuale della massima capacità di carica che ha la batteria nel momento della stima rispetto alla capacità di carica nominale (uno SoH = 80% significa che la batteria ha perso il 20 % della sua massima capacità di carica rispetto a quella nominale);
3. la stima dello State of Function (SoF) è un valore logico (può assumere 0 o 1) e indica la capacità della batteria di poter erogare la potenza richiesta dal carico;
4. la stima dello State of Power (SoP) fornisce un'indicazione percentuale sulla massima potenza erogabile dalla batteria nel momento della stima rispetto a quella nominale (uno SoP = 40% significa che la massima potenza erogabile dalla batteria sarà il 40% di quella nominale);
5. il bilanciamento della batteria, che consiste nell'equalizzare lo SoC di ogni cella all'interno del pacco per massimizzare la capacità utilizzabile della batteria;
6. la comunicazione con i sistemi elettronici a più alto livello delle informazioni necessarie a ottimizzare l'uso della batteria (con protocolli di comunicazione fortemente dipendenti dall'applicazione).

2.1 Monitoraggio delle celle

Come accennato in precedenza, ogni cella del pacco batteria deve lavorare all'interno di specifici range di funzionamento indicati dal produttore. Un eventuale superamento di questi limiti potrebbe portare a un deterioramento accelerato e/o a un danneggiamento permanente della batteria con possibili implicazioni sulla sicurezza del sistema e dell'utilizzatore. Per questo motivo, il BMS deve costantemente monitorare ogni cella del pacco. Le misurazioni fondamentali che un BMS deve avere essere in grado di acquisire riguardano la tensione, la corrente, e temperatura di ogni singola cella. Tuttavia, BMS più avanzati e progettati per applicazioni specifiche possono essere in grado di monitorare anche altre grandezze come la pressione in particolari punti, la deformazione della cella, ecc...

I produttori di celle al litio solitamente definiscono tre intervalli di normale funzionamento in termini di tensione, corrente e temperatura. Partendo dal primo, l'intervallo operativo in tensione è definito dai due valori limite superiore e inferiore (cut-off). Il valore dei due cut-off dipende sia dalla chimica che da scelte cautelative del produttore. Generalmente, il valore del cut-off inferiore può variare tra 2 V e 2,8 V, mentre quello superiore tra 3,6 V a 4,2 V. Pertanto, la misurazione della tensione di cella è essenziale per interrompere la fase di scarica quando una o più celle raggiungono il cut-off inferiore, o interrompere la fase di carica quando una o più celle raggiungono il cut-off superiore. Questa misurazione viene eseguita prelevando la tensione di cella direttamente ai suoi terminali.

Anche per la temperatura i produttori definiscono un intervallo di sicurezza che non dipende solo dalla chimica utilizzata, ma, per una certa di chimica, può variare tra la fase di carica e quella di scarica della cella. Nella maggior parte dei casi la temperatura delle celle deve essere contenuta tra 0°C e 50°C durante la carica e tra -20°C e 70°C durante la scarica. Generalmente, la misurazione della temperatura avviene inserendo degli opportuni sensori a contatto con il contenitore della cella. Il numero di sensori utilizzato all'interno del pacco batteria può variare da applicazione a applicazione. Per esempio, in applicazioni poco critiche dove il target principale è il costo basso sul prodotto finale, si inserisce un numero di sensori inferiore al numero di celle presenti, in punti strategici del pacco. Mentre in applicazioni critiche dove il monitoraggio della temperatura delle celle è uno dei target principali, il numero di sensori può essere anche superiore al numero di celle presenti all'interno pacco batteria.

Infine, per quanto riguarda la corrente, i produttori forniscono più specifiche: una sulla massima corrente che la cella può sopportare continuamente e le altre sulla massima corrente, di valore maggiore, che può sostenere per intervalli di tempo predeterminato (per esempio 5 s, 30 s e 1 min). I massimali di corrente variano tra la fase di carica e quella di scarica della stessa cella e possono essere diversi anche per celle con la stessa chimica perché dipendono da aspetti realizzativi legati alle scelte tecnologiche del produttore. Infatti, a parità di chimica, l'azienda produttrice può decidere di progettare una cella ad alte prestazioni capace di fornire alte correnti e potenze a discapito di una minore energia immagazzinabile. Oppure, se la

cella viene progettata per immagazzinare più energia, le prestazioni in potenza saranno ridotte rispetto al caso precedente. In altre parole, un produttore, a parità di chimica utilizzata, può scegliere se la cella sarà capace di immagazzinare maggiore energia a discapito della potenza (celle high-energy) oppure viceversa (celle high-power). Nel caso in cui le celle sono tutte collegate in serie, la corrente di batteria sarà la stessa che scorre in ogni cella e, quindi, la misurazione della corrente viene eseguita prelevandola direttamente in un solo punto. Nel caso di una configurazione mista serie/parallelo (per esempio una batteria composta da più stringhe in parallelo, a loro volta costituite da celle in serie) la corrente verrà misurata in più punti, uno per ciascuna stringa.

2.2 Funzioni secondarie

Il BMS deve fornire al sistema una serie di variabili di stato che individuano, in tempo reale, lo stato della batteria. La stima e la comunicazione delle variabili di stato con gli altri apparati elettronici è di essenziale importanza per ottimizzare l'uso della batteria e ottenere un uso più efficiente dell'intero sistema. Pertanto nelle seguenti sottosezioni verranno descritte brevemente le principali variabili di stato stimate da un BMS che sono: SoC, SoH e SoP.

2.2.1 Stima dello stato di carica

La stima dello stato di carica (SoC) è di fondamentale importanza per il sistema e l'utente finale, perché costituisce la principale variabile di stato e dà un'indicazione sull'autonomia residua del sistema in questione. La definizione di SoC è riportata in (1) ed equivale al rapporto tra la carica attualmente immagazzinata nella batteria (o nella singola cella), Q , e la massima carica immagazzinabile dalla stessa, Q_{MAX} , [4].

$$SoC = \frac{Q}{Q_{MAX}} \quad (1)$$

Risulta chiaro, a questo punto, che la stima dello stato di carica passa dalla stima della carica attualmente immagazzinata dalla batteria o dalla cella. Generalmente, a Q_{MAX} viene associata la carica nominale di batteria che fornisce il produttore al momento della vendita della cella. Tuttavia, questo parametro non rimane costante durante la vita utile della batteria ma degrada con il suo utilizzo. Infatti, nei sistemi più sofisticati anche questo parametro sarà di fondamentale importanza per la determinazione dello SoC.

L'algoritmo più semplice si basa sulla misurazione, quando possibile, della tensione a vuoto o Open Circuit Voltage (OCV). La OCV è definita come la tensione presente ai terminali di cella quando quest'ultima è completamente rilassata, ovvero quando tutti i transistori di trasporto delle cariche e delle reazioni chimiche in corrispondenza della superficie degli elettrodi sono terminate. In queste condizioni, la tensione misurata ai terminali ha una relazione univoca con il SoC [5]. La relazione OCV-SoC cambia a seconda della tecnologia della cella scelta ma risulta indipendente, in buona approssimazione, dalla temperatura di utilizzo e dal suo stato di salute. Al contrario, se la batteria non è completamente rilassata, la tensione ai terminali di cella non equivale all'OCV. In questa condizione si commetterebbe un errore grossolano nella stima del SoC continuando ad utilizzare questa strategia. Dal momento che per raggiungere il suo stato di rilassamento la cella può impiegare anche qualche ora, alla semplicità dell'algoritmo si contrappone l'impossibilità di avere una stima in tempo reale del SoC durante l'utilizzo della batteria. Pertanto, l'impossibilità di misurare l'OCV durante l'uso delle celle rende questa strategia di stima poco adatta ad applicazioni con usi continuativi e ripetuti del sistema.

In questi casi, uno degli algoritmi più utilizzati è il coulomb counting che si basa sull'integrazione della corrente durante le fasi di carica e scarica che caratterizzano il normale funzionamento della cella [6]. L'algoritmo indicato in (2) si basa sulla conoscenza: dello stato di carica di partenza della cella e sulla carica massima immagazzinabile, Q_{MAX} . Il conteggio delle cariche che fluiscono dalla o verso la cella viene eseguito integrando la corrente di cella i , normalizzandola rispetto a Q_{MAX} .

In questo modo lo stato di carica sarà definito tra 0 (cella totalmente scarica) e 1 (cella totalmente carica).

$$SOC(t) = SOC_0 - \frac{\int_{t_0}^t i(\tau) d\tau}{Q_{MAX}} \quad (2)$$

Inoltre, la convenzione solitamente utilizzata sul segno della corrente è la seguente: una corrente positiva indica una $i(t)$ uscente dalla batteria mentre una $i(t)$ negativa indica una corrente entrante nella cella. In linea di principio questo algoritmo è semplice da implementare in un BMS generico. Tuttavia, le principali criticità rimangono prevalentemente due. La prima è legata alla stima dello stato di carica di partenza, SOC_0 . Generalmente, quanto la batteria è nello stato completamente carico o scarico, lo SoC di partenza è relativamente semplice da determinare. Mentre lo è meno se il punto di partenza non è uno dei due indicati sopra. In questo caso alcuni algoritmi di stima dello SoC implementano una combinazione mista del coulomb counting e della misurazione della tensione di OCV. Ove l'applicazione lo permetta, se la cella si rilassa in un punto intermedio dello SoC, si sfrutta la misurazione dell'OCV per stimare lo SoC_0 e per inizializzare di nuovo l'algoritmo. La seconda criticità è legata alla presenza dell'errore di misura della corrente. In particolare, l'errore di offset, integrato per un periodo di tempo più o meno lungo, può portare a un errore consistente sulla stima dello SoC. Pertanto, per ridurre questo effetto indesiderato si cerca di calibrare il sensore per compensare l'errore di offset. Per le caratteristiche dell'algoritmo, partendo da un valore di SoC_0 noto come per esempio $SoC_0=0$ (cella totalmente scarica) o $SoC_0=1$ (cella totalmente carica) si ha un errore minimo all'inizio dell'intervallo di integrazione ma potenzialmente crescente nel tempo.

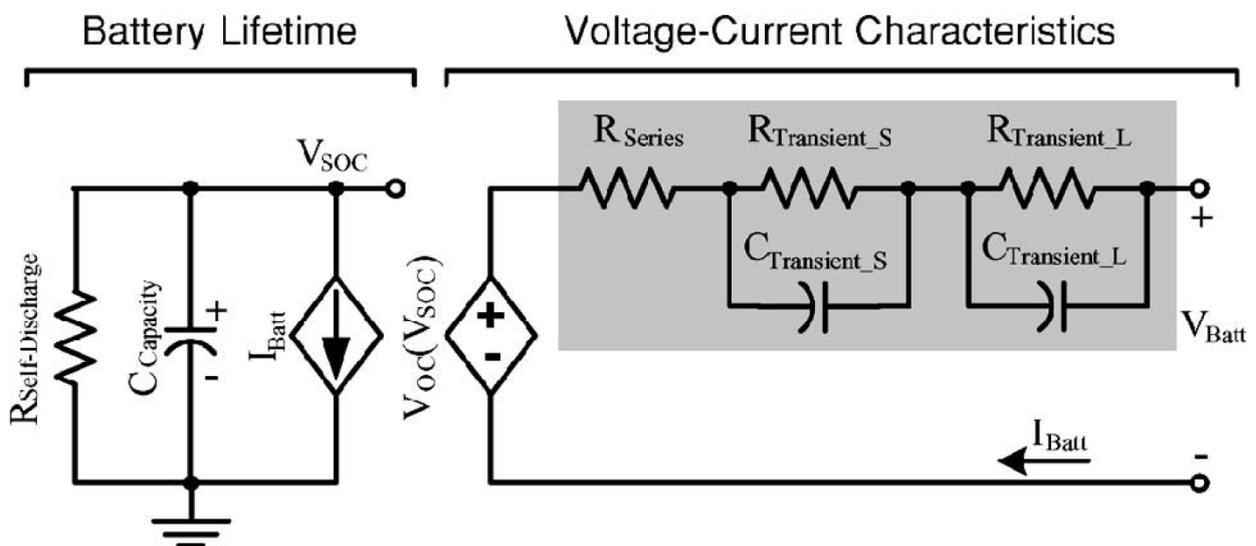


Figura 2 Modello elettrico equivalente a parametri concentrati di una cella al litio (modello di Randles) [7]

Infine, esistono le stime basate su dei modelli equivalenti di batteria (o Model-based) [8]. Queste sono stime che non si basano su una misurazione diretta delle grandezze fisiche sulla cella ma, bensì, ottenibili a partire da modelli più o meno complessi di cella. In letteratura scientifica esistono varie tipologie di modelli: empirici, elettrochimici ed elettrici. Attualmente, il miglior compromesso tra accuratezza delle stime e complessità del software all'interno del BMS viene rappresentato dai modelli elettrici equivalenti. Un esempio è mostrato in Figura 2.

Il modello di Randles (vedi Figura 2), è caratterizzato da due parti. Una prima che modella la carica immagazzinata nella cella e una seconda che tratta la caratteristica tensione-corrente della cella. Nello specifico $C_{capacity}$ rappresenta la massima carica immagazzinabile dalla cella, espressa in coulomb, ed è funzione dell'invecchiamento e dalla temperatura. Viene definita come in (3) dove Q_n è la carica nominale espressa in ampere-ora che la cella può immagazzinare, f_1 e f_2 sono dei fattori di correzione che tengono conto del numero di cicli carica-scarica a cui la cella è stata sottoposta e della temperatura di cella. Infatti, $C_{capacity}$ diminuisce con l'invecchiamento e per temperatura via via più basse.

$$C_{cella} = 3600 \cdot Q_n \cdot f_1(Cicli) \cdot f_2(Temp) \quad (3)$$

La tensione V_{SoC} è definita tra 0 e 1 V e rappresenta lo stato di carica della cella (0 V la cella è completamente scarica, 1 V la cella è completamente carica). I_{Batt} rappresenta la corrente che scorre nei terminali di cella. Quando la cella viene caricata o scaricata il generatore di corrente comandato dalla corrente I_{Batt} viene utilizzato per caricare o scaricare $C_{capacity}$ in questo modo V_{SoC} cambia dinamicamente. La resistenza $R_{self-discharge}$ tiene conto dei fenomeni di auto-scarica della cella. Il generatore di tensione V_{OC} comandato dalla tensione V_{SoC} rappresenta la relazione non lineare OCV-SoC. Questo tipo di relazione viene estratta misurando la tensione di OCV per più punti di SoC (tra lo 0% e il 100%) di una cella specifica. I restanti parametri elettrici costituiti dalla resistenza serie, R_{series} , e dai due gruppi RC ($R_{Transient_S}$, $C_{Transient_S}$ e $R_{Transient_L}$, $C_{Transient_L}$) tengono conto della risposta transitoria che ha una cella al litio in risposta ad un impulso di corrente (vedi Figura 3). Generalmente, questa risposta è costituita da due fasi: un gradino di tensione (modellato dalla resistenza serie), seguito da un andamento esponenziale multiplo (modellato dai gruppi RC). Una volta estratti tutti i parametri caratteristici della cella al Litio, la stima del SoC può essere fatta partendo dalla tensione e dalla corrente presenti sui terminali di cella. Utilizzando il secondo principio di Kirchoff è possibile ricavare la V_{OC} e tramite la relazione OCV-SoC precedentemente estratta è possibile risalire al SoC(t'). Come si può dedurre, più alto sarà il numero di gruppi RC, più elevata sarà l'accuratezza della stima dello SoC a discapito di una più elevata complessità computazionale da parte del BMS. In conclusione, Il miglior compromesso tra questi due parametri attualmente sembrerebbe quello di utilizzare due gruppi RC.

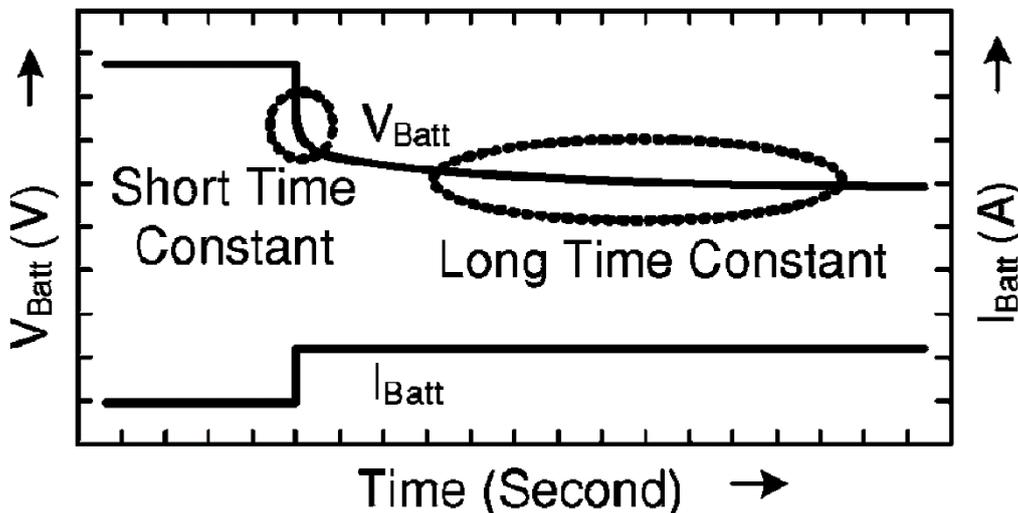


Figura 3 Risposta di una cella al Litio a un impulso di corrente [7]

2.2.2 Stima dello stato di salute

In letteratura e nell'industria non vi è una definizione univoca di SoH di una batteria [9]. Tipicamente, si cerca di confrontare uno o più parametri caratteristici di una cella in momenti temporali differenti. O meglio si tiene traccia di quanto si è degradato un parametro confrontandolo con il valore che aveva al momento del primo utilizzo della cella (valore nominale).

Negli ultimi anni, l'aumento di interesse verso i veicoli elettrici e ibridi ha focalizzato l'attenzione sull'autonomia del veicolo e quindi sulla massima carica immagazzinabile dalla batteria. La stima di Q_{MAX} , durante la vita utile della batteria, viene usata come parametro di riferimento per il calcolo SoH. Infatti, lo stato di salute viene calcolato come percentuale della capacità utile della batteria rispetto a quella nominale (come indicato in (4))

$$SOH = \frac{Q_{MAX}}{Q_N} \cdot 100 \quad (4)$$

Dalla definizione del SoH è evidente la necessità di dover stimare la capacità reale della batteria e quindi delle celle. La procedura più semplice consiste nell'integrare la corrente di batteria durante il suo utilizzo partendo da uno stato di carica noto come lo 0 % e il 100 % (coulomb counting). Se però il profilo d'uso della batteria prevede di non scaricare o caricare completamente la batteria, l'inizializzazione del punto di partenza è molto più difficile e l'errore commesso nella sua stima può aumentare al crescere del tempo di misurazione, se si utilizza solo il coulomb counting. Quindi in questo caso si utilizzano tecniche combinate con la misurazione dell'OCV (se il profilo d'uso della batteria prevede una fase di rilassamento più o meno lunga) oppure si utilizzano degli algoritmi di stima più avanzati come per esempio quelli basati sull'extended Kalman filter [5].

2.2.3 Stima dello stato di potenza

La stima dello stato di potenza o SoP è un parametro che indica in percentuale qual è la massima potenza $P_{MAX}(t)$ che una cella è in grado di erogare in un dato momento della sua vita utile rispetto al suo valore di partenza (o nominale), P_N . La definizione di SoP è rappresentata qui di seguito in (5).

$$SOP(t) = \frac{P_{MAX}(t)}{P_N} \cdot 100 \quad (5)$$

La sua stima è correlata al calcolo della potenza massima erogabile, $P_{MAX}(t)$, dalla cella per un periodo di tempo Δt (più o meno lungo) prima che esca dalla sua regione di sicurezza (SOA). Esistono varie tecniche di stima della $P_{MAX}(t)$ che si basano su modelli più o meno complessi di cella, e che tengono conto dell'influenza del SoC e dalla temperatura sui parametri di cella. Tuttavia, la trattazione specifica e la comparazione di queste tecniche esulano dallo scopo di questo report. Per quanto detto, quindi, ci concentreremo su uno dei metodi di stima più semplice per il calcolo della massima potenza istantanea erogabile dalla batteria [10]. Anche se meno accurato di altri, ci dà un'indicazione rapida su qual è il fattore limitante della potenza erogabile dalla batteria. In questo caso, la P_{MAX} viene calcolata:

1. modellando la cella con il circuito equivalente di R_{int} rappresentato in Figura 4 composto da un generatore di tensione comandato in tensione e da una resistenza serie (quindi, la stima del SoP può essere calcolata se il BMS è in grado di stimare con accuratezza il SoC e la resistenza serie di ogni cella del pacco);
2. considerando che la tensione di cella $v_k(t)$ deve rispettare sempre la seguente relazione (data dai limiti della regione SOA) $v_{MIN} \leq v_K \leq v_{MAX}$ dove v_{min} e v_{max} sono i cut-off di tensione indicati dal produttore;
3. tenendo conto della resistenza serie di cella in fase di scarica, R_{dis} , e di carica, R_{chg} .

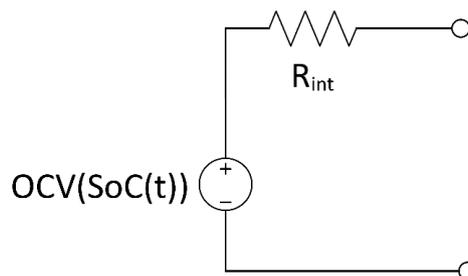


Figura 4 Modello elettrico equivalente di cella (R_{int})

Pertanto, la tensione delle k-esima cella, v_k , viene rappresentata in (6) dove R è la resistenza serie della cella, $SoC(t)$ il suo stato di carica e $i_k(t)$ la corrente.

$$v_k(t) = OCV(SoC(t)) - Ri_k(t) \quad (6)$$

Assumendo il segno della corrente come positivo in fase di scarica e negativo in fase di ricarica e tendo conto che la resistenza cambia in funzione della fase di carica/scarica in atto oltre che al SoC e alla temperatura, la massima corrente istantanea che la cella è in grado di erogare senza che la tensione di cella oltrepassi i range di sicurezza viene indicata in (7) e in (8), rispettivamente per la scarica e la carica.

$$i_{max,k}^{dis} = \frac{OCV(SoC(t)) - v_{MIN}}{R^{dis}} \quad (7)$$

$$i_{min,k}^{chg} = \frac{OCV(SoC(t)) - v_{MAX}}{R^{chg}} \quad (8)$$

A questo punto le massime potenze istantanee che la batteria può erogare o assorbire sono indicate in (9) e (10) per la fase di scarica e ricarica, dove n_s e n_p sono, rispettivamente, il numero di celle connesse in serie e in parallelo all'interno della batteria.

$$P_{max}^{dis} = n_s \cdot n_p \cdot \min(v_{MIN}, i_{max,k}^{dis}) \quad (9)$$

$$P_{min}^{chg} = n_s \cdot n_p \cdot \max(v_{MAX}, i_{min,k}^{chg}) \quad (10)$$

Come si può notare, la massima potenza istantanea, in valore assoluto, durante le fasi di carica/scarica di un pacco è limitata dalla cella che ha la resistenza serie più elevata (a parità di SoC). Nel caso in cui la stima dei due valori di corrente superi il massimo valore di corrente consentito dal produttore, comunque quest'ultimo limite rimane quello massimo utilizzabile dalla batteria per rimanere all'interno della sua SOA. In questo specifico caso il SoP viene fissato al 100%.

Questa trattazione semplificata, come detto in precedenza, utilizza un modello di batteria non molto accurato e fornisce solo un'indicazione sulla massima potenza istantanea erogabile dalla batteria. Esistono tecniche più sofisticate che possono dare informazioni sulla massima potenza erogabile per un intervallo di tempo Δt più o meno lungo [10].

2.3 Bilanciamento

Uno degli obiettivi secondari del BMS è quello di gestire in maniera efficiente la batteria massimizzando le prestazioni del sistema e estendendone la vita utile. Per questo motivo, il BMS partendo dalle grandezze misurabili delle celle e dalla caratterizzazione dei suoi parametri elettrici, cerca di mantenere la batteria sempre in condizioni ottimali. Una delle principali funzioni di questo tipo è il bilanciamento, che ha come obiettivo quello di massimizzare la carica estraibile dal pacco batteria. Prima di analizzare nel dettaglio le tecniche è necessario stabilire che cosa si intende per sbilanciamento di un pacco batteria e quali sono le sue principali cause. Un pacco batteria si dice sbilanciato quando una o più celle, al suo interno, ha un SoC differente rispetto alle altre. I fenomeni che portano allo sbilanciamento del pacco sono svariati e per individuarli si può partire da un esempio esemplificativo. Supponiamo, al tempo t_0 , di disporre di una batteria assemblata con tutte le celle connesse in serie. Assumiamo, inoltre, che le capacità di tutte le celle al tempo t_0 sono identiche, come il loro SoC di partenza. In questo caso la massima capacità utilizzabile dalla batteria è pari alla capacità delle celle che la compongono (la batteria è in condizioni ottimali). Tuttavia, dopo un ripetuto utilizzo della batteria, al tempo t_1 , l'utente nota che l'autonomia del sistema si è notevolmente ridotta e che il BMS notifica che c'è un effettivo sbilanciamento tra più celle.

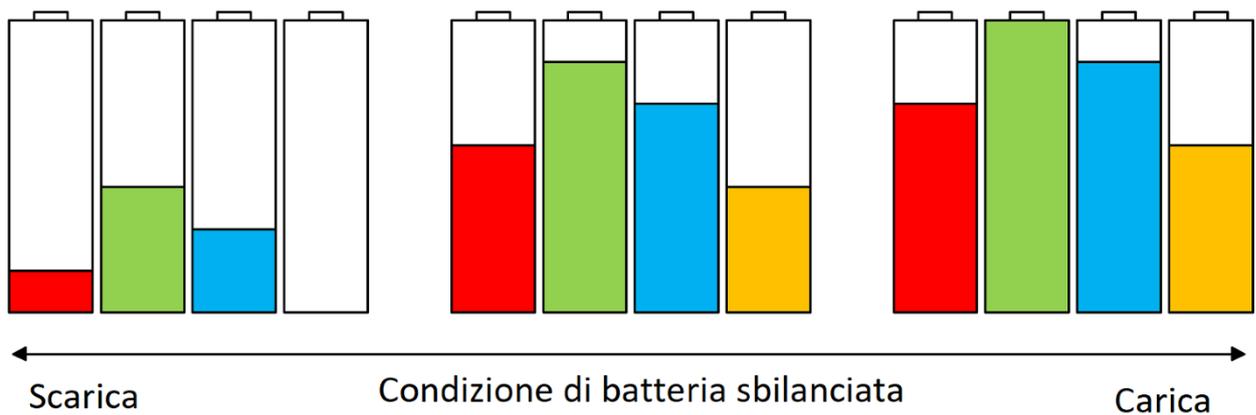


Figura 5 Sbilanciamento ed effetti sulla massima carica utilizzabile dalla batteria

In queste condizioni la ridotta autonomia non è dovuta direttamente a un degrado o a un invecchiamento delle celle ma è legata, maggiormente, a uno stato non ottimale della batteria stessa. Quindi, supponiamo che l'immagine centrale in Figura 5 rappresenti lo stato di sbilanciamento della batteria al tempo t_1 .

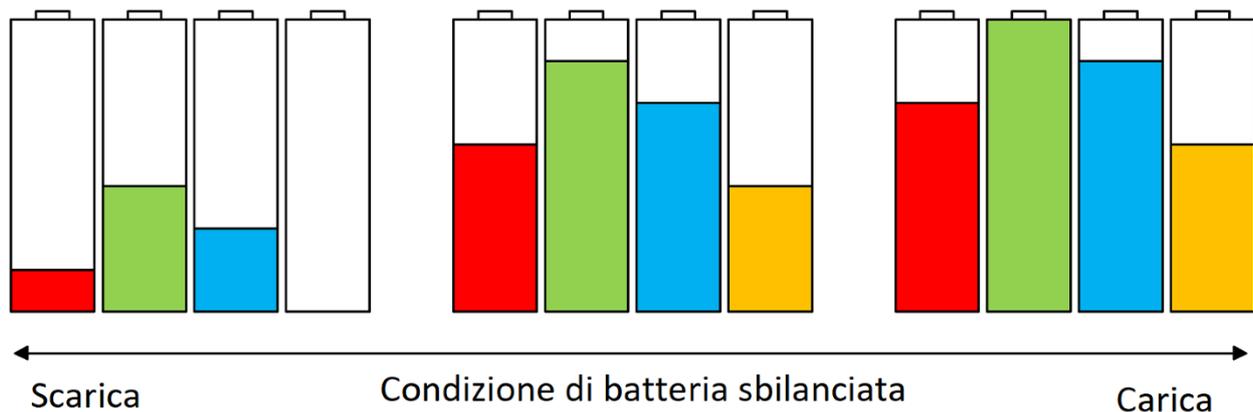


Figura 5L'altezza delle barre colorate fornisce un'indicazione dello stato di carica delle celle che compongono la batteria. Si nota subito che la cella verde e gialla sono rispettivamente quelle con il più alto e il più basso SoC. Successivamente, la batteria viene scaricata fino quando la cella gialla raggiunge il cut-off tensione inferiore e il BMS interrompe la scarica al tempo t_2 . Vale la pena notare, che la cella gialla sarà la prima a raggiungere il cut-off inferiore perché la carica estratta da ogni cella sarà identica visto che le celle sono connesse in serie e quindi sono attraversate dalla stessa corrente. Come si può notare questa condizione non è ottimale in quanto il sistema, se fosse bilanciato, avrebbe potuto ancora fornire la carica immagazzinata nelle altre tre celle. Successivamente la batteria viene ricaricata fino a quando la cella verde raggiunge il cut-off di tensione superiore, al tempo t_3 . Quindi, il BMS interrompe la carica della batteria anche se le altre celle non hanno raggiunto la condizione di carica completa. Risulta chiaro, quindi, che le celle con il SoC più alto e più basso limitano la massima carica immagazzinabile dalla batteria, Q_{MAX} , che può essere espressa come in (11). Dove C_n rappresenta la capacità nominale, SoC_i e SoC_j lo stato di carica della cella più scarica e più carica rispettivamente. Pertanto, maggiore sarà la differenza di SoC tra la cella più carica e quella meno carica, minore sarà la carica disponibile della batteria.

$$Q_{MAX} = C_n \cdot [SoC_i + (1 - SoC_j)] \quad (11)$$

Generalmente, i fenomeni che si celano dietro lo sbilanciamento di un pacco batteria possono essere vari. Una causa viene dal fatto che i processi industriali non sono ideali, pertanto, le celle prodotte avranno una certa variabilità dei parametri caratteristici [11]. Quindi, celle dello stesso modello avranno una leggera variazione delle loro capacità nominali e delle correnti di auto-scarica (celle con correnti di auto-scarica più

alte tenderanno a scaricarsi prima). Inoltre, anche la struttura e il posizionamento delle celle all'interno del pacco possono influire indirettamente sullo sbilanciamento della batteria. Infatti, la distribuzione della temperatura all'interno del pacco non sarà la stessa in ogni punto. Tendenzialmente, le celle più interne tenderanno a scaldarsi di più rispetto a quelle esterne del pacco, quando sono in esercizio, a causa del diverso scambio termico che hanno con l'ambiente circostante. Tuttavia, la temperatura influisce pesantemente sulla capacità, l'autoscarica e l'invecchiamento della singola cella. Quindi una differenza di temperatura durante l'utilizzo della batteria porta sicuramente a una asimmetria dei parametri caratteristici delle celle. Giunti a questo punto, risulta chiaro che un BMS deve essere in grado sia di rilevare un eventuale sbilanciamento del pacco sia di bilanciarlo equalizzando la carica di ogni singola cella.

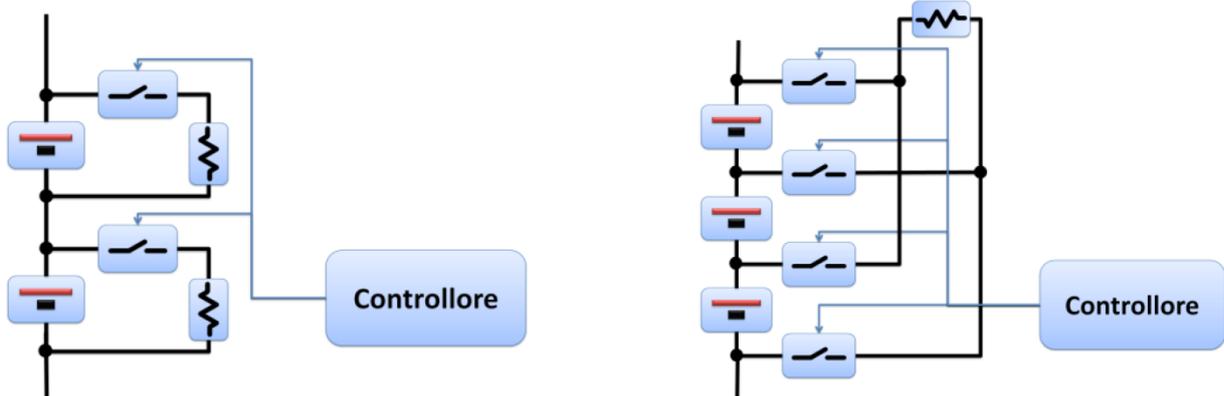


Figura 6 Bilanciamento passivo: soluzione con una resistenza in parallelo ad ogni cella a sinistra e soluzione con un'unica resistenza a destra.

Le principali tecniche di bilanciamento possono essere suddivise in due grandi categorie: passive e attive [12]. La strategia dei sistemi di bilanciamento passivi consiste nello scaricare la cella con SoC più alto su un elemento passivo (come un resistore) dissipando l'eccesso di energia sotto forma di calore. I sistemi di bilanciamento attivi, invece, spostano la carica in eccesso da una cella con SoC più alto a una con un SoC più basso. Non dovendo dissipare l'energia in eccesso su un elemento passivo, quest'ultima tecnica presenta generalmente una maggiore efficienza energetica a discapito di una più alta complessità circuitale. In Figura 6 vengono mostrate due possibili architetture di bilanciamento passivo della batteria [13]: una che adotta un resistore in parallelo ad ogni cella e una che implementa un unico resistore su cui dissipare l'eccesso di energia contenuto in una o più celle. In questo tipo di sistemi, il tempo di bilanciamento è direttamente proporzionale al valore del resistore. Più bassa sarà la resistenza, più alte saranno le correnti di scarica della cella, minore sarà il tempo di bilanciamento richiesto. Tuttavia, se il pacco batteria ha una grande capacità (come accade nei veicoli elettrici) anche piccole asimmetrie di SoC tra le celle richiederebbero delle correnti di bilanciamento consistenti per equalizzare la carica in tempi accettabili. Il sistema, quindi, dovrà essere in grado di smaltire il calore generato dalle potenze in gioco attraverso complessi sistemi di dissipazione termica. Ritornando in Figura 6 l'architettura sulla sinistra rappresenta la tecnica più utilizzata. L'aggiunta in parallelo a ogni cella di una resistenza e di un interruttore controllato dal modulo di controllo del BMS permette di scaricare selettivamente le singole celle. Il vantaggio di questa tecnica è che è possibile ridurre il tempo totale della fase di bilanciamento chiudendo più contatti contemporaneamente. Lo svantaggio consiste nel numero di componenti e connessioni che si dovrebbero adottare in batterie di grandi dimensioni. Al contrario, la seconda architettura in Figura 6 utilizza un solo resistore. Una matrice di interruttori viene gestita dal controllore del BMS per collegare singolarmente una cella al resistore. La connessione simultanea di più celle al resistore porterebbe a un guasto catastrofico della batteria, la cui eventualità deve essere resa di probabilità trascurabile. In questo caso il vantaggio è la minimizzazione dei componenti passivi sulla scheda, che rende a sua volta il problema della dissipazione del calore più semplice visto che viene utilizzato un solo componente passivo. Allo stesso tempo, però, il tempo necessario a completare bilanciamento potrebbe incrementare notevolmente rispetto al caso precedente (a parità di correnti di bilanciamento). Inoltre, anche la complessità dell'algoritmo di gestione della matrice di interruttori sarà più elevata. Le tecniche passive rimangono, in genere, le più utilizzate a livello commerciale

per la loro affidabilità e semplicità circuitale nonostante siano meno efficienti dal punto di vista energetico rispetto alle tecniche di bilanciamento attivo.

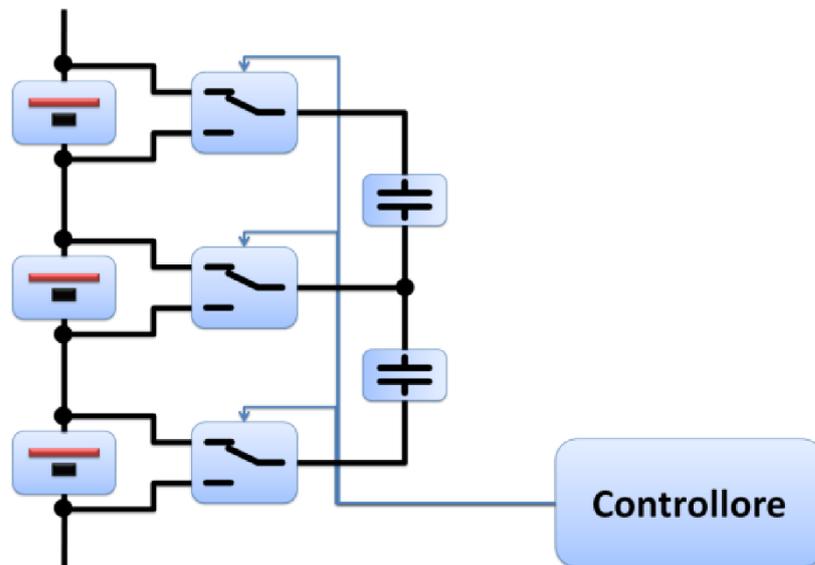


Figura 7 Bilanciamento attivo architettura switch capacitor

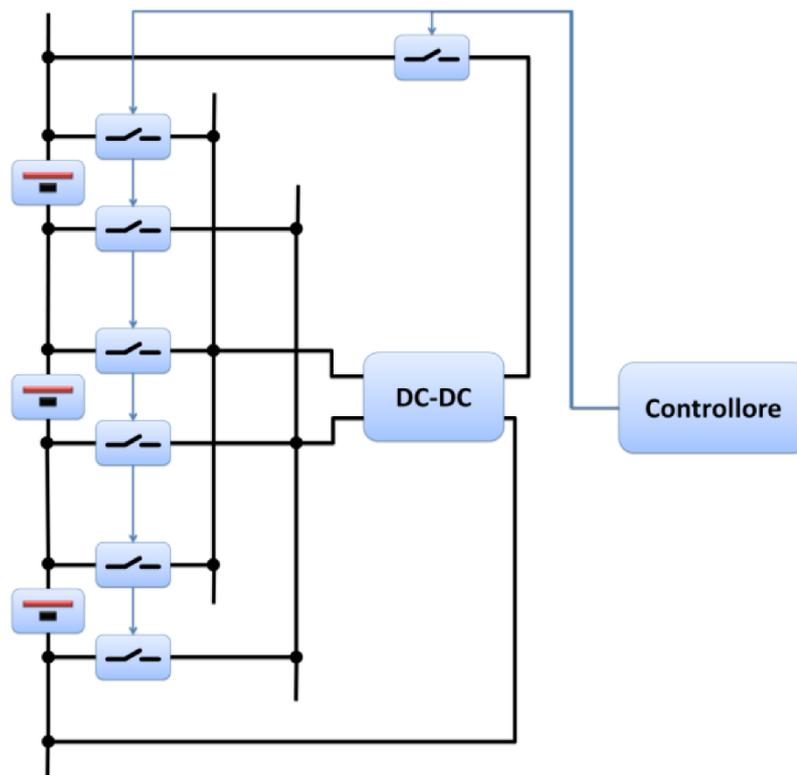


Figura 8 Bilanciamento attivo architettura con DC-DC

Per quanto riguarda il bilanciamento attivo sono state presentate varie strategie più o meno complesse in letteratura scientifica. In questo report, ne approfondiremo brevemente due: quelle basate sugli switching capacitors [14] e quelle che si basano sull'utilizzo di un convertitore DC-DC. In Figura 7 viene mostrata l'architettura di un sistema di bilanciamento a switched capacitors [14] che è costituita da una matrice di

interruttori e da una di condensatori. In questo modo il controllore del BMS, gestendo gli interruttori, può trasferire l'eccesso di carica da una cella, con elevato SoC, nel condensatore (che fa da buffer di carica) per poi convogliarla in una cella adiacente caratterizzata da un SoC più basso rispetto a quella di partenza. Come visto per le architetture a bilanciamento passivo, anche in questo caso è possibile utilizzare una configurazione con un solo condensatore di buffer. Questa soluzione permetterebbe di eseguire trasferimenti mirati direttamente dalle celle più cariche a quelle più scariche (anche se non adiacenti). Pertanto, aumenterebbe l'efficienza del sistema e diminuirebbe il tempo necessario al bilanciamento. Tuttavia, la complessità della matrice di switch e il software di controllo si complicherebbero notevolmente. In Figura 8 viene mostrata un'architettura di bilanciamento attiva basata su una matrice di switch e da un convertitore DC-DC [15]. Il convertitore viene interposto tra i terminali di batteria e una matrice di interruttori. In questo caso, il DC-DC preleva carica direttamente dalla batteria e la trasferisce alla cella con il più basso SoC attraverso la matrice di interruttori. Quest'ultima architettura risulta attraente sia dal punto di vista del rendimento energetico che del tempo di bilanciamento necessario all'equalizzazione. Tuttavia, il controllo della matrice di interruttori dovrà ridurre al minimo l'eventualità di cortocircuitare due o più celle all'intero del pacco evitando il verificarsi di eventi catastrofici. Il software di gestione, quindi, avrà una complessità elevata.

3 Architetture di un battery management system

I BMS, come detto nei capitoli precedenti, sono sistemi elettronici più o meno complessi che hanno come obiettivo la gestione della sicurezza della batteria e l'ottimizzazione dei parametri che ne rendono efficiente l'uso allungandone la vita utile. La complessità dei pacchi batteria, e quindi dei BMS, varia da applicazione ad applicazione (per esempio il BMS di un cellulare dovrà gestire solo una singola cella, mentre quello di un'automobile centinaia). Pertanto, in questa sezione, andremo ad indicare le principali soluzioni hardware utilizzate nella progettazione di un BMS che si possono suddividere in strutture sviluppate su un unico livello e strutture gerarchiche (sviluppate su più livelli hardware).

Nelle batterie di piccole dimensioni (1-20 celle) il BMS viene solitamente sviluppato utilizzando una soluzione che si sviluppa su un unico livello hardware dove tutte le funzionalità vengono implementate su un'unica scheda. Tuttavia, quando la complessità del pacco inizia a crescere come in applicazioni automotive, la gestione di tutte le funzionalità su un singolo livello diventa complicata e molto dispendiosa in termini di costo. Per esempio, il BMS deve essere in grado di prelevare la tensione di ogni cella nel pacco. Però la misurazione sarà complicata soprattutto per le celle vicine al terminale positivo di batteria che sono caratterizzate da una tensione a modo comune rispetto alla massa del BMS molto spesso superiore a centinaia di volt. Questo livello di tensioni a modo comune potrebbe creare problemi di misura e di isolamento.

Per questi motivi, in batterie con un numero di celle elevato vengono utilizzati BMS con struttura gerarchica e modulare. Infatti, le funzioni di controllo, monitoraggio e sicurezza vengono distribuite su più livelli riducendo la complessità di progettazione dell'hardware (ogni livello svolgerà solo poche funzioni specifiche) [16] [17]. Inoltre, se l'obiettivo è aumentare l'affidabilità del sistema attraverso la ridondanza delle informazioni, la stessa funzione può essere svolta e processata su più livelli. Generalmente, esistono diverse architetture di tipo gerarchico, tra le quali si identificano quella Cella-Modulo-Batteria (3 livelli) e quella Modulo-Batteria (2 livelli). Uno schema esemplificativo della prima architettura viene mostrato in Figura 9 [18].

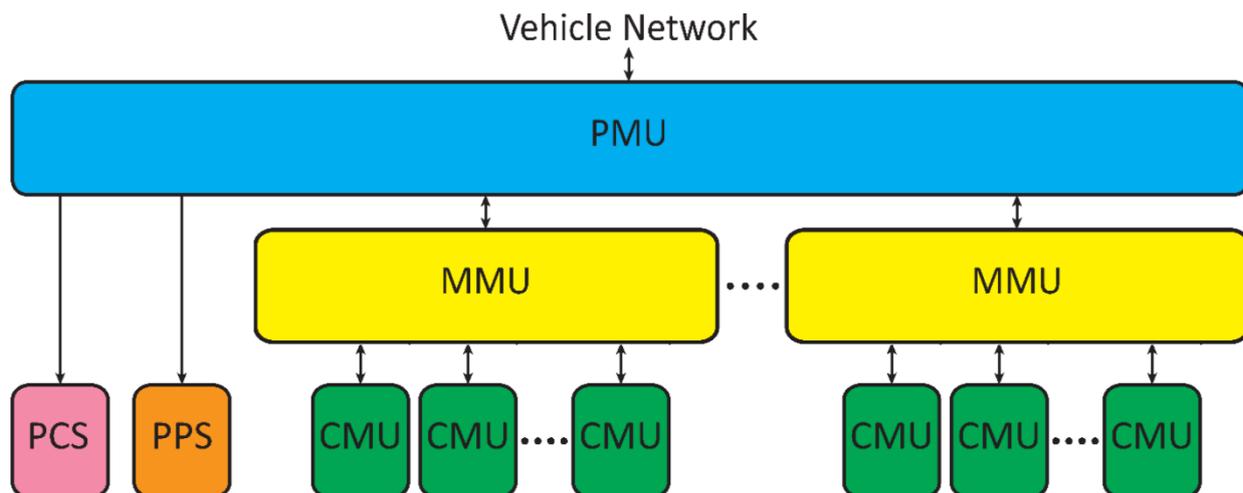


Figura 9 Schema a blocchi di una possibile architettura cella-modulo-batteria per il BMS gerarchico. Gli acronimi usati sono i seguenti: Pack Management Unit (PMU), Pack Protection Switch (PPS), Pack Current Sensor (PCS), Module Management Unit (MMU), Cell Management Unit.

Ogni cella viene equipaggiata con una scheda elettronica Cell Management Unit (CMU). Solitamente, il compito principale di questo livello è quello di monitoraggio della tensione, temperatura e corrente di cella. Non ha potere decisionale, o di calcolo e le informazioni vengono inviate al livello superiore. In generale è opportuno sottolineare che la cella equipaggiata con la sua CMU viene indicata in letteratura come smart cell [19]. Il secondo livello di elettronica è caratterizzato da uno o più Module Management Unit (MMU) che gestiscono le informazioni provenienti da un gruppo (o modulo) di smart cells del livello inferiore. Le funzioni principali delle MMU sono le stime dei parametri interni delle smart cells appartenenti al modulo controllato e l'invio delle informazioni al livello superiore. Tuttavia, le MMU solitamente non hanno potere decisionale o di controllo del pacco. Caratteristica che invece ha il livello più alto o Pack Management Unit (PMU). Tra le principali funzioni della PMU ci possono essere l'elaborazione dei dati provenienti dai livelli inferiori, l'implementazione delle stime a livello di batteria, la verifica del rispetto della SOA da parte di tutte le celle ed eventualmente la salvaguardia della sicurezza e l'ottimizzazione della vita utile del pacco. Il potere decisionale e di controllo appartiene quindi alla PMU che può gestire lo stato degli interruttori di potenza (Pack Power Swtiches – PPS) e misurare la corrente di batteria tramite il Pack Current Sensor (PCS). La PMU infine comunica tutte le stime e lo stato attuale della batteria al controllore dell'autoveicolo (in sistemi automotive) oppure al gestore del dispositivo più in generale. Infine, vale la pena sottolineare che spesso il sistema di bilanciamento viene implementato nel secondo livello di gerarchia, quello delle MMU. La MMU, quindi, eseguirà delle stime su ogni cella all'interno del suo modulo e le comunicherà alla PMU. Solo la PMU deciderà di attivare o meno la procedura di bilanciamento su uno o più moduli inviando un comando specifico alle MMU.

In Figura 10 viene proposta una seconda architettura che non prevede il livello delle CMU. In questo modo, è possibile ridurre il numero di schede presenti sul pacco batteria a discapito di una maggiore complessità circuitale delle MMU [20] [21]. Infatti, ora l'elettronica di modulo oltre che a produrre le stime sullo stato della cella dovrà provvedere anche alla misurazione delle grandezze fisiche di cella come: tensione, corrente e temperatura.

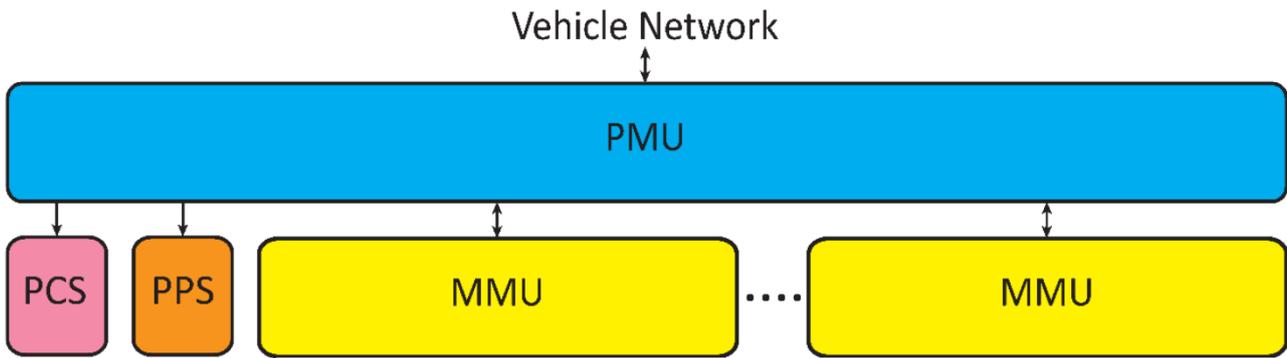


Figura 10 Schema a blocchi di un possibile architettura modulo-batteria per il BMS gerarchico. Gli acronimi usati sono i seguenti: Pack Management Unit (PMU), Pack Protection Switch (PPS), Pack Current Sensor (PCS), Module Management Unit (MMU).

4 Batterie di second-life

Dopo una breve descrizione del concetto di batterie di second-life e le applicazioni di maggiore interesse, verranno indicati i principali processi che interessano il ciclo di vita di una batteria, partendo dalla sua rimozione da un'autovettura elettrica fino al suo riutilizzo e/o riciclo. Infine, viene fatta una breve analisi sulle stime dei costi finali di un pacco batteria utilizzabile in applicazioni stazionarie per un secondo ciclo di vita prima del suo definitivo smaltimento. Specificatamente, questa sezione si basa su due review paper presentati in [22] [23].

4.1 Concetto di "Second-Life"

Grazie alle prestazioni e all'abbassamento dei costi di produzione, le batterie al litio sono sempre più utilizzate come sistema di accumulo elettrochimico in svariate applicazioni: da quelle a bassa potenza (smartphone e notebook) fino a quella a più alta potenza (veicoli elettrici e sistemi di accumulo di energia stazionario) [24]. Tuttavia, a differenza della tecnologia al piombo, questo tipo di batterie non sono ancora del tutto riciclabili, a causa della mancanza di precise regolamentazioni nazionali (e/o sovranazionali) e infrastrutture specifiche per il riciclaggio [22]. Pertanto, se le cose rimarranno così nei prossimi anni, quando le batterie impiegate nei dispositivi attualmente in uso raggiungeranno lo stato di fine vita, ci troveremo di fronte a un grande numero di batterie che verranno gettate via senza essere riutilizzate o recuperate, con gravi ripercussioni ambientali.

Per far fronte a queste mancanze, da qualche anno in letteratura scientifica di settore, è nata l'idea di riutilizzare le batterie provenienti dal settore automotive, prevedendo una seconda vita in applicazioni che richiedono una densità energetica inferiore, come in sistemi elettrochimici di accumulo stazionario [22]. La scelta del settore automotive, come prima scelta per il riutilizzo dei pacchi batteria, è dovuto principalmente a due motivi. Il primo riguarda la previsione sul tasso di crescita delle vendite dei veicoli elettrici nel prossimo decennio. Secondo uno studio riportato in [25] nel 2030 sono previsti 85 milioni di veicoli elettrici circolanti a livello mondiale. Pertanto, il numero di pacchi batteria a fine vita da riutilizzare in applicazioni di second-life, provenienti da questo settore, potrebbe essere predominante rispetto a quelle provenienti da altre applicazioni. La seconda motivazione è correlata al fatto che una batteria considerata a fine vita per il settore automotive, ha ancora a disposizione circa l'80 % della capacità iniziale. Infatti, secondo lo US Advanced Battery Consortium (USABC) [26], una batteria al litio usata in questo settore è considerabile a fine vita quando perde il 20 % della sua capacità nominale e/o se ha perso il 20 % della potenza nominale quando lo stato di carica della batteria si trova al 20 % dello SoC. A questo punto arriviamo alla definizione di un pacco batteria di seconda vita o, in inglese, Second Life Battery (SLB). Un SLB è un pacco batteria che ha terminato il suo primo ciclo di vita nel settore automobilistico e viene riutilizzato in applicazioni stazionarie di immagazzinamento dell'energia per un secondo ciclo di vita operativo.

Se questa possibilità non venisse sfruttata, il tempo e gli investimenti fatti per realizzare nuove batterie al litio non verrebbero sfruttati a pieno, con gravi ripercussioni ambientali in termini di utilizzo non ottimale

delle risorse. Per esempio, consideriamo il pacco batteria della Nissan Leaf (prima versione) che è in grado di immagazzinare una quantità di energia pari a 24 kWh. A termine del suo primo ciclo di vita l'energia rimanente sarà circa 19,2 kWh. Se, inoltre, consideriamo di utilizzare solo l'80% di Deep of Discharge (DOD) della batteria in applicazioni che richiedono correnti ridotte, quest'ultima potrà ancora immagazzinare 15 kWh per diversi anni [22]. Quindi, per enfatizzare il concetto di second-life sulla base di quanto appena detto, secondo uno studio riportato in [27] nel 2028 si potranno sfruttare circa 548 GWh da batterie usate nel settore automotive, e riutilizzabili nel settore dell'energia, in applicazioni stazionarie con numerosi benefici. Ad esempio, il costo del pacco batteria di un'automobile elettrica potrebbe abbassarsi in quanto l'azienda potrebbe ricavare introiti dalla vendita del pacco batteria usato per applicazioni di second-life. Potrebbero nascere nuove aziende che si occupano del recupero delle batterie usate e dell'assemblaggio di batterie SLB. La produzione di nuove batterie, con sfruttamento indiscriminato di risorse ambientali, ed effetti negativi economici e sociali, potrebbe ridursi perché la richiesta di nuove batterie utilizzate nel settore dell'accumulo stazionario si ridurrebbe di conseguenza. Inoltre, si posticiperebbe un eventuale riciclo della batteria, alleggerendo le problematiche di gestione dello smaltimento dei rifiuti.

4.2 Applicazioni

Le batterie durante il loro secondo ciclo di vita, generalmente, vengono utilizzate nei sistemi di accumulo elettrochimico stazionario che non richiedono un'elevata densità energetica e di potenza come per il settore automotive. Complessivamente, come indicato Tabella 1, i sistemi di accumulo possono essere utilizzati in tre macro-categorie: applicazioni residenziali, applicazioni commerciali e applicazioni industriali.

Questi sistemi di accumulo stazionario vengono posizionati tra il carico (che può essere rappresentato dalle utenze domestiche, da strumenti industriali ecc.), sistemi di generazione dell'energia basati su fonte di energia rinnovabile (come pannelli fotovoltaici o sistemi eolici) e la rete elettrica. A seconda dell'applicazione scelta la presenza di una batteria è estremamente utile e può [28]:

- in Renewable Firming, essere utilizzata per compensare la variabilità della potenza generata da una fonte di energia rinnovabile non programmabile in modo da ottenere un profilo di potenza erogata verso la rete elettrica il quanto più possibile costante nel tempo;
- in load-levelling, omogenizzare la distribuzione del carico di potenza visto dalla rete elettrica e richiesta da un'utenza, portando dei vantaggi al gestore della rete in quanto non sarebbe più necessario dimensionare la rete sui picchi di potenza perché tale picco sarebbe fornito dal sistema di accumulo e la rete vedrebbe un carico abbastanza costante durante il decorso della giornata;
- in peak-shaving, permettere all'utente di non dimensionare il suo impianto sul picco di potenza e di stipulare con l'ente fornitore dell'energia un contratto con una potenza massima inferiore; sarà il sistema di accumulo a fornire il picco di potenza richiesta al di sopra del livello massimo stabilito dagli accordi con l'ente fornitore dell'energia elettrica;
- in back-up, viene utilizzata per fornire servizi di riserva e deve avere una capacità di accumulo sufficientemente elevata per essere in grado di alimentare un determinato carico per circa 1 o 2 ore.
- in transmission-stabilization, viene usata per stabilizzare le variazioni di frequenza e di tensione della rete elettrica attraverso l'erogazione di piccoli impulsi di potenza;

Come si può notare facilmente guardando la Tabella 1, la maggior parte dei cicli di scarica/carica in queste applicazioni è caratterizzato da correnti non superiori a $C/2$ (dove $1 C$ rappresenta la corrente in grado idealmente di scaricare una cella/batteria completamente carica in 1 h) con DOD intorno al 50-60% e quindi adatte all'utilizzo di batterie riassembleate per un secondo uso. Infatti, come dimostrato in [29], è possibile estendere a 16 anni la vita operativa in second life di una batteria al litio, se i cicli di carica/scarica vengono fatti tra il 15% e il 65% di SoC. Tuttavia, la capacità di accumulo richiesta dal sistema e quindi la complessità aumenta via via con il passare da applicazioni domestiche alle applicazioni industriali. L'aumento di complessità del pacco batteria, quindi, potrebbe rendere poco pratico l'uso di SLB in applicazioni industriali e commerciali [22].

Tabella 1 Insieme delle applicazioni e caratteristiche di carico di un pacco batteria di second-life [22].

Stoccaggio	Applicazioni	Capacità
Residenziale	Inseguimento del carico	-Una scarica profonda e numerose scariche poco profonde per giorno -Tipica corrente di scarica pari a C/3
	sistema di backup	-Fino a 25 kWh per applicazioni non in rete -Moderate scariche giornaliere oltre il 50% della DoD
Commerciale	Inseguimento del carico	-Da 75 a 100 kWh -Tipica corrente di scarica pari a C/3 -Una scarica profonda e numerose scariche poco profonde per giorno
	sistema di backup	-Alimentazione in standby -Corrente di scarica occasionali pari a C/5
	Limatura di picco	-Da 3.000 a 4.000 kWh -Scariche giornaliere a correnti pari a C/2 o C
Industriale	Livellamento di carico	-100.000 kWh
	Sostegno alle rinnovabili	-Da 1.000 a 10.000 kWh -Scariche frequenti a correnti pari a C/5
	Regolazione della riserva rotante	-Da 5.000 a 7.500 kWh -Correnti di scarica occasionali pari a C/2 o C
	Limatura di picco	-Da 3.000 a 4.000 kWh -Scariche giornaliere a correnti pari a C/2 o C
	Stabilizzazione della trasmissione	-Scariche da 140 kWh a 500.000 kWh -5/10 impulsi al secondo una volta al mese

Ad esempio, ipotizzando di ricondizionare un numero più o meno elevato di pacchi batteria provenienti dalle autovetture Nissan Leaf che hanno una capacità energetica nominale di 24 kWh e di ricondizionarle quando la capacità energetica residua raggiunge il 70% di quella nominale, il numero di SLB richiesti per raggiungere le specifiche di progetto di un sistema di accumulo stazionario con funzione di peak-shaving (Vedi Tabella 1) sarà compreso tra 178 e 238 [30]. Questo grande numero di batterie ricondizionate richiesto per l'applicazione di peak shaving rende la complessità del pacco molto elevata e questo è uno dei motivi per cui l'utilizzo delle batterie SLB a livello commerciale potrebbe essere frenato. Tuttavia, questo concetto di SLB può essere, invece, molto adatto per implementare sistemi di accumulo di load levelling che richiedono energie molto minori tra 75 kWh e 100 kWh (vedi Tabella 1).

4.3 Assemblaggio del Pacco Batteria

In attesa di regolamentazioni e normative nazionali e/o sovranazionali per la regolazione del ciclo di vita e fine vita di un pacco batteria nel settore automobilistico, in un mondo ipotetico completamente basato su un'economia circolare, il ciclo di vita di una batteria al litio potrebbe essere descritto dalle "5 R" [31]. Le "5 R" sono: Repair (riparazione), Remanufacturing (Rigenerazione), Refurbishing (Ristrutturazione), Repurposing (Riutilizzo) e Recycling (riciclaggio).

Per Riparazione e Remanufacturing si intende il servizio di riparazione e di garanzia che un'azienda di accumulatori al litio dovrebbe fornire al cliente. Generalmente, le grandi aziende di autoveicoli dispongono già di questi servizi attraverso l'utilizzo di infrastrutture proprietarie progettate ad hoc, mentre le piccole e medie imprese, non disponendo delle infrastrutture adeguate, non riescono a supplire pienamente a questo servizio. Quindi si rendono necessarie delle industrie terze in grado di garantire la manutenzione e la riparazione di pacchi batteria per conto dei produttori e a favore dei loro clienti.

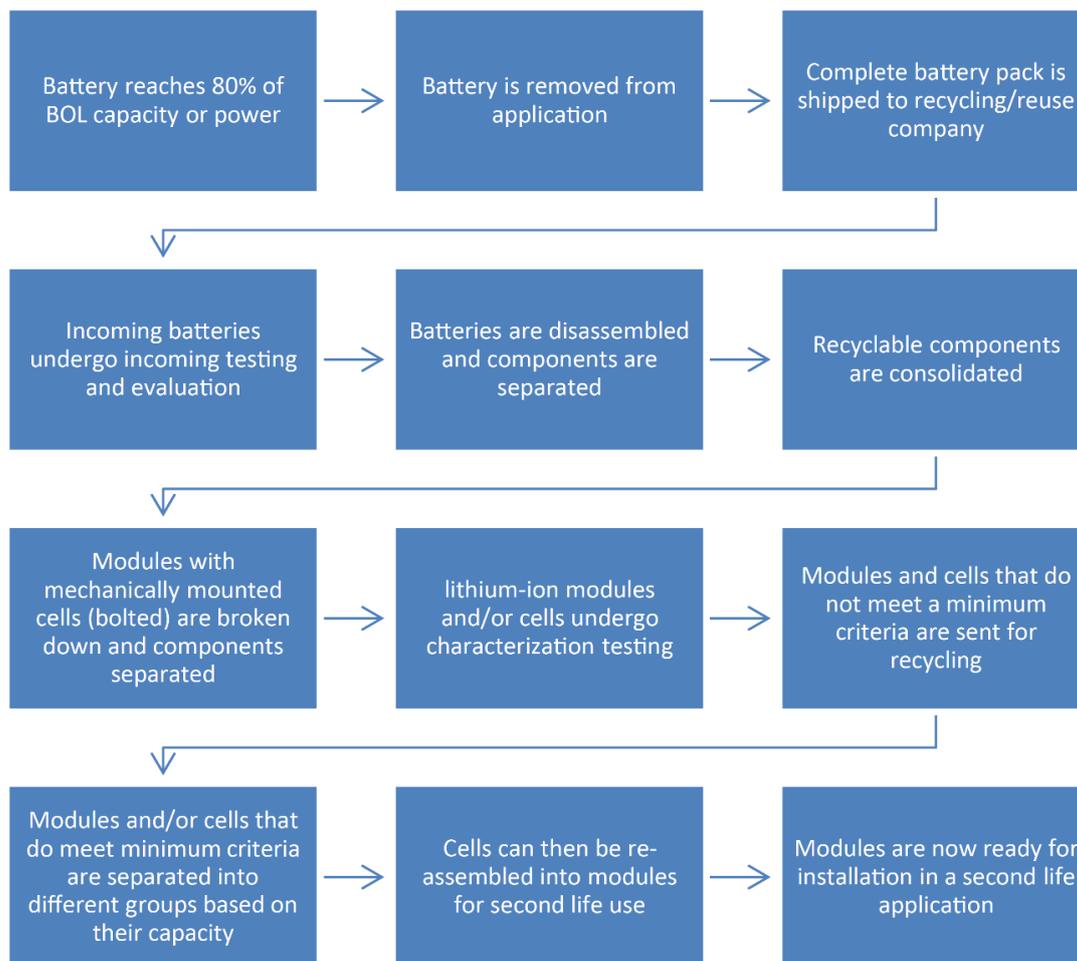


Figura 11 Ciclo di ricondizionamento di pacchi batteria di second-life [31]

Per Refurbishing, Repurposing and Recycling si intendono tutte le fasi che caratterizzano il passaggio di un pacco batteria al termine della sua prima vita operativa al suo riutilizzo in applicazioni di second-life e Infine al recupero dei materiali attraverso il riciclaggio. In Figura 11 il diagramma a flusso specifica tutte le fasi del processo in questione. Come detto, il processo di second-life parte quando il pacco batteria perde il 20 % della sua capacità nominale. La prima fase consiste, quindi, nel rimuovere il pacco batteria dal veicolo attraverso un personale altamente specializzato e certificato (in quanto i pacchi batteria utilizzati nei veicoli elettrici possono raggiungere tensioni anche superiori a 400 V). Una volta estratto il pacco verrà inviato ad aziende specializzate nel riuso e/o nel riciclo del pacco batteria al litio. A questo punto il pacco batteria viene sottoposto a test preliminari volti a valutarne la performance in termini di tensione, capacità e potenza residue. Successivamente, il pacco batteria viene disassemblato e i componenti che lo costituiscono vengono separati. Questo passaggio è di fondamentale importanza ed è caratterizzato da un buon grado di complessità procedurale a causa del gran numero di parti di cui è composto un pacco batteria. Per esempio, in Figura 12 vengono mostrati i componenti, plastici, metallici ed elettronici che generalmente compongono un pacco batteria utilizzato in applicazioni automobilistiche. Inoltre, come indicato in [22], questa procedura dovrebbe essere fatta in un ambiente atmosferico controllato, senza la presenza di aria, per evitare l'ossidazione che si produrrebbe sui catodi delle celle. I componenti del pacco, che non costituiscono le celle, vengono raggruppati in base alle loro caratteristiche fisiche (plastica, metallo ecc.) e vengono riciclati.

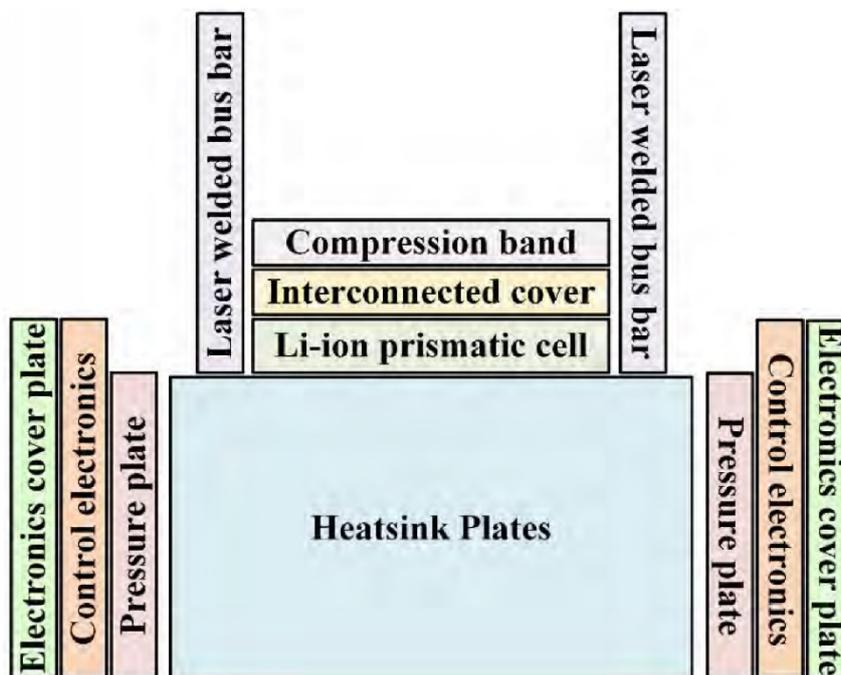


Figura 12 Componenti di un pacco batteria automobilistico che dovranno essere rimossi al primo passo per permettere di riutilizzare la batteria in applicazioni accumulo elettrochimico stazionario di second-life [22].

Rimossi i componenti esterni, i moduli di batteria devono essere smantellati. Generalmente, i moduli sono costituiti da più celle connesse assieme attraverso dei collegamenti metallici chiamati bus-bar. Nel caso in cui le celle sono connesse al bus-bar con dei bulloni, la rimozione risulta essere più semplice. Al contrario, se le case produttrici saldano direttamente le celle alle bus-bar la rimozione è molto più complicata in quanto è necessario rompere tutti i collegamenti interni al modulo senza danneggiare le celle [31]. Dopodiché, tutte le singole celle verranno sottoposte a una prima analisi visiva per verificarne lo stato. Ad esempio, celle gonfie o caratterizzate dalla presenza di perdite verranno scartate e inviate al processo di riciclo. Le rimanenti verranno, invece, sottoposte a dei test di caratterizzazione che consistono nel verificarne la tensione e la capacità residua, le correnti di auto-scarica e altri fattori utili a determinarne lo stato di salute. Tutte le celle che non riusciranno a soddisfare i requisiti minimi per essere riusate in un secondo ciclo di vita verranno scartate e mandate al processo di riciclo. Le celle, quindi, dovranno essere raggruppate in modo da avere i parametri caratteristici più simili possibili tra loro. Infatti, come abbiamo visto nelle sezioni precedenti, se non fosse presente all'interno del nuovo pacco batteria una buona omogeneità delle capacità residue delle singole celle, la massima quantità di carica estraibile dal pacco sarebbe notevolmente limitata dalla cella con la capacità residua più bassa. Inoltre, le celle devono seguire un altro criterio di accoppiamento che tenga conto del loro stato di salute e/o dello stato di potenza. Infatti, raggruppare celle con resistenze serie molto differenti tra loro andrebbe a limitare la massima potenza erogabile dal pacco batteria e il fattore limitante sarebbe rappresentato dalla cella più degradata (o invecchiata). Inoltre, se volessimo inserire un modulo al 60 % del SoH in un pacco costituito da moduli vicini a un SoH del 80 % il modulo più vecchio potrebbe rompersi prima degli altri addirittura danneggiandoli irreversibilmente e riducendo lo SoH totale drasticamente. Una volta raggruppate, le celle vengono riassemblate in un nuovo pacco batteria che sarà utilizzato in una delle applicazioni di accumulo di energia stazionario illustrate in Tabella 1 per il loro secondo ciclo di vita operativo.

4.4 Costi e necessità di regolamentazioni



Figura 13 Comparazione dei costi tra un pacco batteria nuovo e uno di second-life [23]

Come accennato nelle sezioni precedenti, riutilizzare pacchi batteria che hanno terminato il loro primo ciclo di vita in applicazioni automotive nel settore degli accumulatori elettrochimici stazionari può portare a numerosi benefici. In particolare, il pacco batteria di un'auto elettrica rappresenta una parte consistente del costo totale del sistema. Tuttavia, se i produttori di autoveicoli potessero riottenere proventi dalla vendita del pacco batteria al termine del primo ciclo di vita, il costo finale di un autoveicolo elettrico potrebbe ridursi notevolmente. Inoltre, potrebbero crearsi numerose aziende terze che si occupano della manutenzione, del disassemblaggio, del riutilizzo e riciclo dei pacchi batteria provenienti dal settore automotive con possibilità di creazione di un nuovo mercato mondiale che si potrebbe tradurre in nuovi posti di lavoro. Le aziende nel settore dell'energia, o gli stessi utenti domestici, potrebbero essere in grado di acquistare pacchi batteria per applicazioni stazionarie a un prezzo ridotto rispetto quello di mercato di un nuovo pacco batteria.

Risulta quindi chiaro che tutti questi benefici possono esistere, in assenza di regolamentazioni nazionali o sovranazionali a tutela dell'ambiente, solo se il prezzo del pacco batteria di second-life è inferiore al prezzo di mercato di un pacco batteria con caratteristiche analoghe ma nuovo. Nella letteratura scientifica di settore esistono dei pareri discordanti in merito [23] e le domande principali che ancora necessitano di un chiarimento riguardano quale dovrebbe essere il prezzo di vendita di un SLB e quale sia un costo accettabile del processo di disassemblaggio e riassetto della batteria per applicazioni di second-life.

Come mostrato in Figura 13 il costo finale di un SLB (selling price) è composto dai costi di acquisto del pacco batteria che ha terminato il suo primo ciclo utile di vita in applicazioni automotive (SLB Buying price) e dai costi di re-purposing che si intendono come i costi dovuti principalmente al test di caratterizzazione delle celle, all'assemblaggio del nuovo pacco batteria e al trasporto. Un altro studio [32] afferma che il buying price deve tenere conto del prezzo di vendita di un pacco batteria nuovo, dello stato di salute al termine del primo ciclo di vita, dei costi re-purposing, del margine di vendita e di un fattore di sconto per incoraggiarne l'acquisto. In Figura 14 viene presentato un'altra stima sulla tipologia dei costi presenti durante il recupero e il riutilizzo dei pacchi batteria di second-life dove si nota che il costo principale sul prezzo finale di un SLB è costituito principalmente dall'acquisto della batteria al termine del suo primo ciclo di vita operativo.

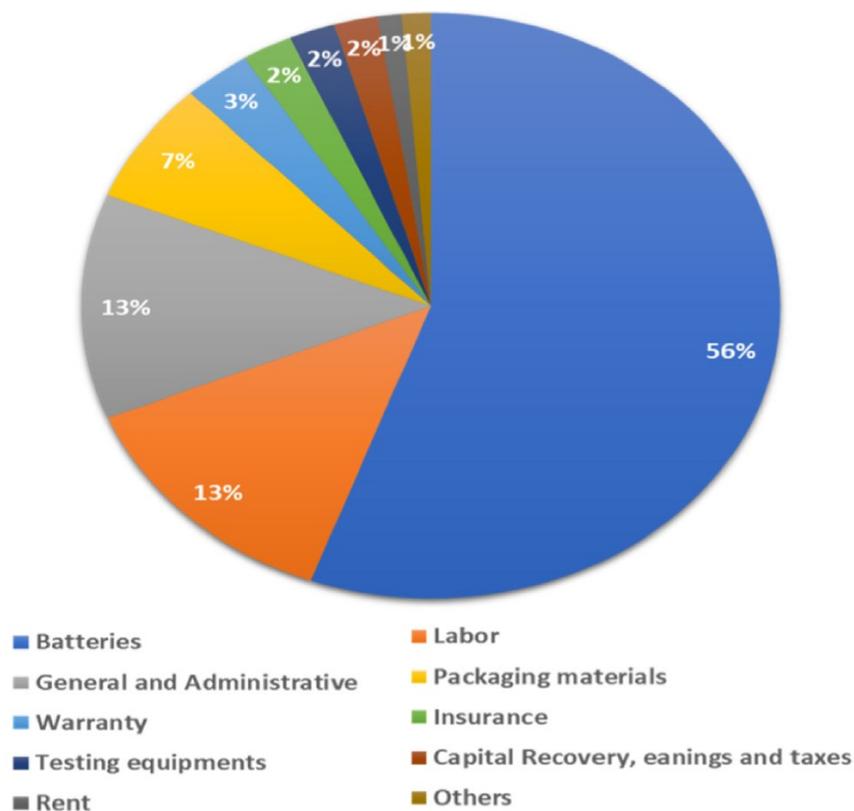


Figura 14 Contributo dei costi di Re-purposing sul prezzo di vendita di un pacco batteria di second-life [23]

Inoltre, è opportuno rimarcare che l’economia e l’analisi dei costi nella letteratura scientifica di settore non è del tutto chiara e necessita di ulteriori investigazioni. Per essere appetibile al mercato il costo finale di un SLB deve essere inferiore almeno al 60 % di quello di un pacco batteria nuovo [29]. Dato che il costo attuale di un pacco batteria nuovo è di circa 150-200 \$/kWh (vedi Figura 14) e che stime attuali prevedono un nuovo abbassamento nel prossimo decennio, produrre SLB più convenienti diventa una sfida ingegneristica molto interessante che dovrà essere supportata da politiche nazionali e/o sovranazionali a tutela dell’ambiente. Infine, un review paper [23], dopo aver raggruppando i principali lavori sulla stima del costo finale di un pacco SLB, afferma che tale costo potrebbe variare tra 44 \$/kWh e 300 \$/kWh.

5 Linee guida per la progettazione di un BMS per applicazioni di Second-Life

Le principali caratteristiche architetture di un sistema di accumulo elettrochimico al litio usato in applicazioni stazionarie e le linee guida per la progettazione di un battery management system per il controllo la gestione e le stime su sistemi di second-life sono i due principali argomenti trattati in questo capitolo.

5.1 Architettura di un pacco batteria di Second-Life

Come abbiamo visto nelle sezioni precedenti, le applicazioni di accumulo di energia stazionaria possono richiedere pacchi batteria ad elevata energia (ordine di grandezza che va dalle decine alle centinaia di kilowattora) e quindi che richiedono un numero di celle molto elevato. Pertanto, generalmente, la struttura hardware per la costruzione di un pacco batteria di second-life è di tipo gerarchico [23] come mostrato in Figura 15. Quindi le celle che hanno superato i test di caratterizzazione nel processo di Refurbishing e Repurposing, descritti nel capitolo precedente, vengono assemblate in un modulo composto da gruppi di celle in parallelo a loro volta inseriti in serie all’interno del modulo (Module Level). L’assemblaggio delle celle in moduli permette di semplificare la complessità architetture del sistema e ne facilita la manutenzione. I

moduli, ovviamente, devono prevedere tutte le misurazioni delle grandezze fisiche necessarie a monitorare le singole celle e stimarne lo stato. Quindi verranno inseriti dei chip per il monitoraggio di tensione, e temperatura. Inoltre, dovrà essere previsto un sistema di gestione termico e di comunicazione dati con i livelli di gerarchia più alti. A questo punto i moduli vengono collegati in serie per formare delle stringhe (Rack level). Le stringhe devono prevedere un sensore per la misurazione della corrente e della tensione di stringa, ma anche dei relè che gestiscono le fasi di scarica e carica della stringa stessa e che svolgono anche funzioni di sicurezza uniti alla presenza di fusibili. Successivamente, le stringhe vengono messe in parallelo per formare interi armadi (Cabinet Level). A questo livello dovranno essere presenti dei sistemi di gestione della temperatura, di sicurezza e di controllo di sistema. Infine, più armadi vengono collegati insieme per raggiungere le specifiche richieste dall'applicazione stazionaria e vengono assemblati a formare il sistema di accumulo stazionario elettrochimico (Integrated Energy Storage System).

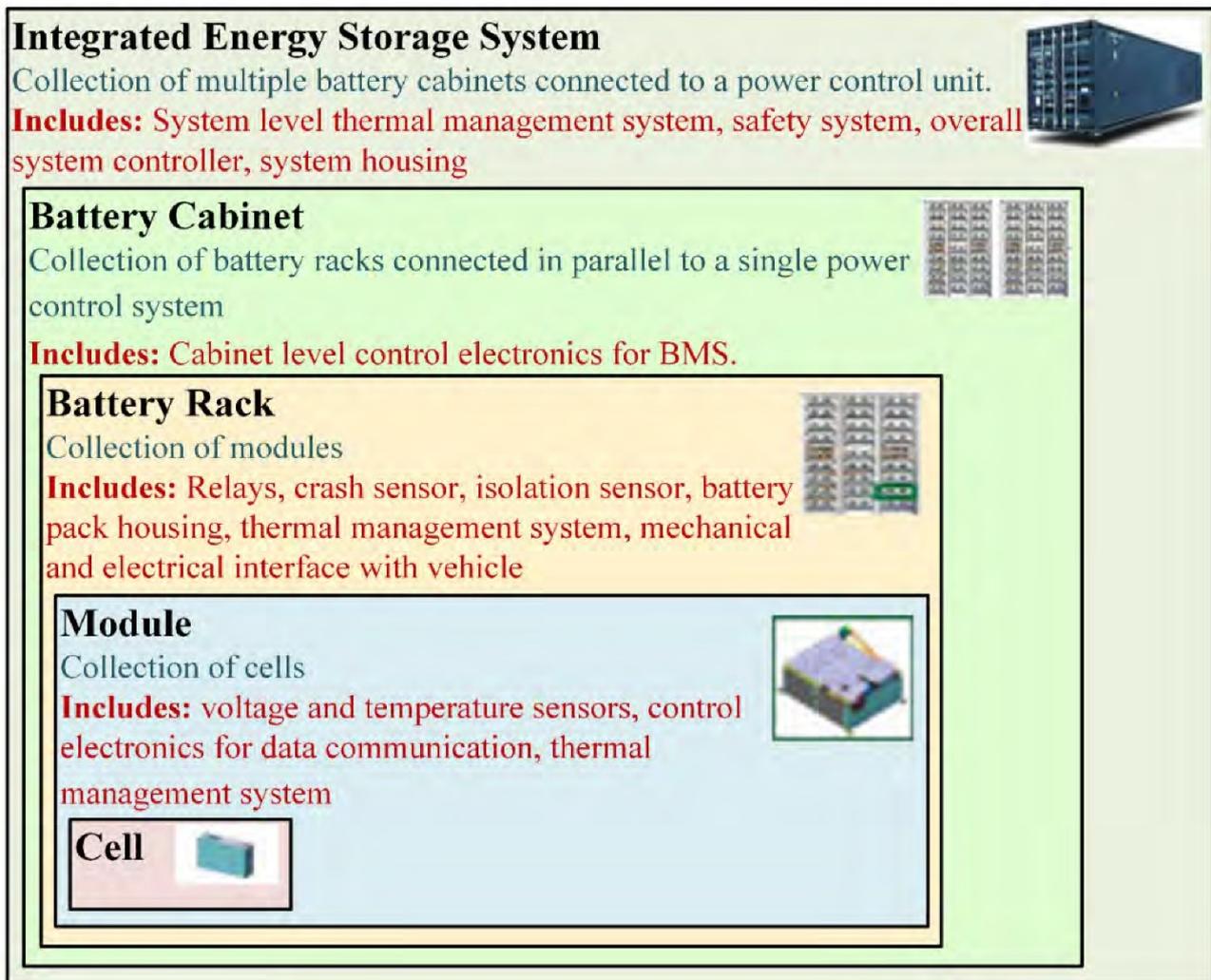


Figura 15 Architettura di un pacco batteria di second-life per applicazioni di accumulo stazionario [22]

Infine, vale la pena rimarcare che l'architettura di un sistema di questo tipo è la medesima delle architetture generalmente utilizzate nei sistemi di accumulo elettrochimico stazionario composto da celle completamente nuove. Le uniche due differenze risiedono nel fatto che in questo caso le celle sono state recuperate e riutilizzate dal settore automobilistico, quindi hanno già concluso il loro primo ciclo di vita utile e il BMS dovrà essere leggermente più sofisticato di un BMS comune prevedendo delle funzioni aggiuntive per ottimizzare lo stato operativo della batteria [22].

5.2 Battery management system

Nella sezione precedente è stata illustrata un'architettura generica di un pacco batteria utilizzato in applicazioni di accumulo di energia stazionario. La struttura è molto complessa e può contenere un elevato numero di celle e di moduli, di conseguenza anche la struttura del BMS dovrà essere gerarchica, in quanto la complessità di progettazione e sviluppo di un sistema elettronico su un unico livello sarebbe troppo elevata. Pertanto, una soluzione appetibile sarà quella di adottare una delle architetture gerarchiche proposte nel capitolo 3; in questo modo sarà possibile distribuire la complessità sia hardware sia software sui diversi livelli gerarchici della batteria. Per esempio, si potrebbe prevedere di utilizzare smart-cell, MMU e PMU all'interno delle singole stringhe (o Battery Rack) e un'unità centrale di controllo e gestione dello stato delle stringhe all'interno del battery Cabinet.

Tuttavia, le celle di un pacco batteria di second-life hanno subito cicli d'uso e eventi di stress differenti l'una dall'altra durante il loro primo ciclo di vita operativo. Pertanto, la storia distinta di ogni singola cella potrebbe portare a un disallineamento dei parametri caratteristici delle celle all'interno del modulo durante l'utilizzo in second-life anche se, inizialmente, sono state raggruppate all'interno dei moduli in modo da avere caratteristiche di capacità residua e invecchiamento simili. Per questo motivo, rispetto ad applicazioni che usano pacchi batteria costituiti da celle al litio nuove, il BMS usato in applicazioni di second-life deve prevedere funzionalità aggiuntive, tra cui algoritmi di stima dello stato di carica e salute avanzati che possano stimare lo stato della singola cella all'interno del modulo e un sistema per il bilanciamento attivo [22]. Di seguito verranno evidenziate le principali strategie usate per il monitoraggio delle tensioni di cella e della corrente all'interno della singola stringa (o battery rack) e della stima dello stato di carica.

5.3 Monitoraggio tensioni di cella e temperatura

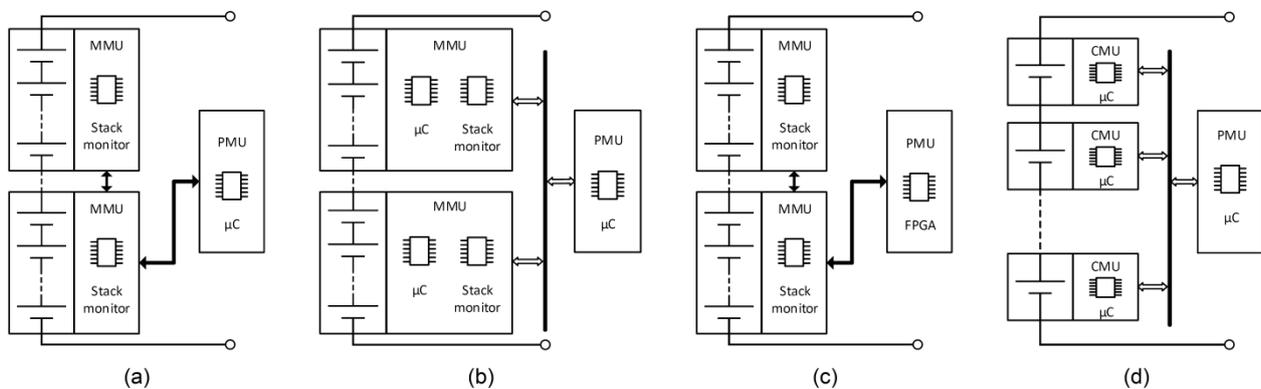


Figura 16 Strutture gerarchiche di un BMS: Module Management Unit (MMU) con il solo stack monitor e la Power Management Unit (PMU) con microcontrollore in (a); MMU costituite da stack monitor e microcontrollore e PMU con microcontrollore in (b); MMU con solo stack monitor e PMU con FPGA in (c); smart-cell o Cell Management Unit (CMU) e PMU con microcontrollore in (d)

Il monitoraggio delle tensioni e delle temperature di cella rappresentano la funzione principale di un BMS perché direttamente collegate alla sicurezza del sistema. L'hardware solitamente usato per implementare tale funzione dipende fortemente dall'architettura gerarchica scelta [33]. In Figura 16 vengono mostrate le configurazioni più comuni che riguardano il livello cella, modulo e pacco di un BMS. A seconda della configurazione scelta si va a partizionare la complessità hardware e software nei vari livelli in maniera differente. Ad esempio, se vengono confrontate la Figura 16(a) a la Figura 16(b), la prima avrà come vantaggio una bassa complessità hardware. Infatti, le MMU hanno solo funzione di misura e tutte le funzioni di controllo, gestione e stima dello stato del pacco ricadono sulla PMU (complessità software elevata). La seconda invece che affianca un microcontrollore ad ogni stack monitor, nelle MMU, avrà un'architettura hardware più sofisticata ma permette di suddividere la complessità del software su due livelli. Nel caso di

architettura basata su smart cell la lettura della tensione e della temperatura avviene direttamente a livello cella solitamente sfruttando le periferiche di acquisizione analogica (ADC) del microcontrollore che gestisce la scheda elettronica della smart-cell. Invece, se si utilizza un'architettura su due livelli, la funzione di monitoraggio delle tensioni di cella viene implementata a livello di modulo (MMU). In questo caso specifico, le funzioni di monitoraggio possono essere inserite utilizzando due diversi approcci: quello che si basa sulla realizzazione di circuiti custom (creati ad hoc da un progettista) o quello che si basa su circuiti integrati già esistenti sul mercato e ottimizzati per questo tipo di applicazione. Nel primo caso, il progettista ha ovviamente maggior flessibilità in quanto è libero di progettare la scheda a suo piacimento e in funzione delle specifiche richieste dell'applicazione. Allo stesso tempo, però, questa tecnica soffre di alcuni svantaggi: è più onerosa, richiede un maggior tempo di sviluppo, ed essendo costruita ad hoc per un predeterminato pacco batteria è difficilmente riutilizzabile in altre applicazioni.

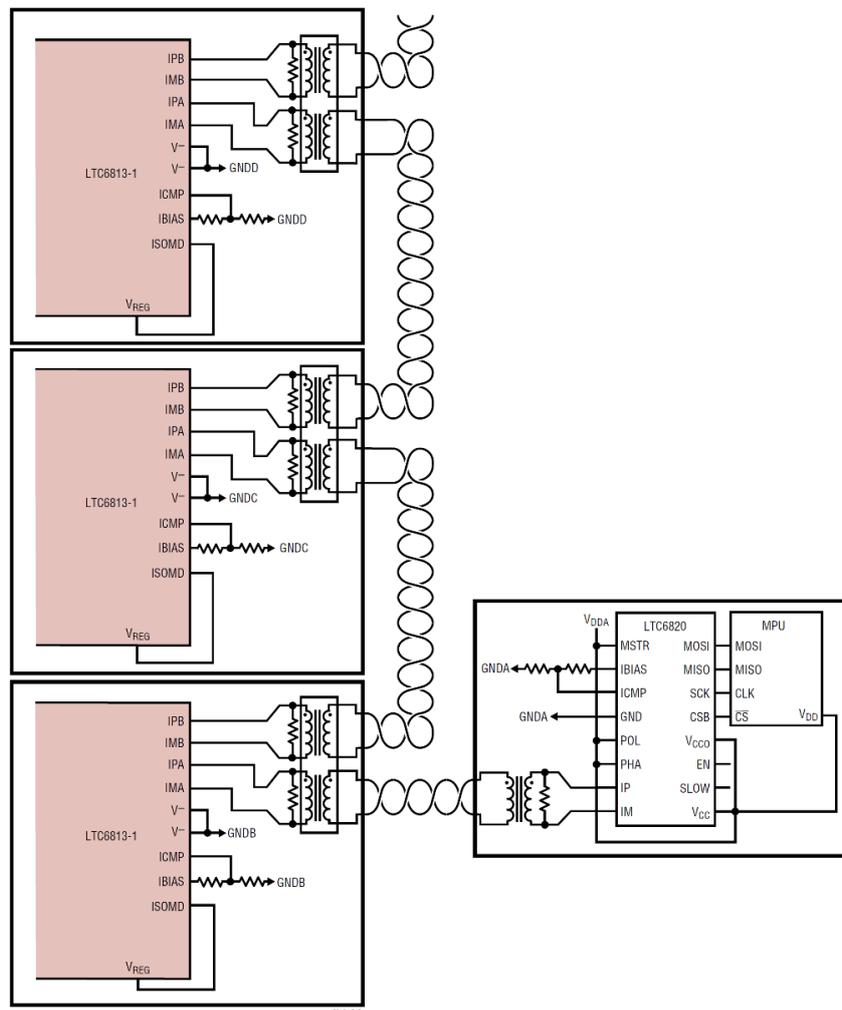


Figura 17 esempio architetturale dove le singole MMU sono connesse in serie e sfruttano la comunicazione daisy chain con la PMU che dispone di un microcontrollore per la gestione del pacco batteria e della comunicazione con i moduli [34]

Nel secondo caso, invece, si tende ad utilizzare circuiti integrati commerciali chiamati stack monitor. Le principali case produttrici di chip, negli ultimi anni, stanno investendo in circuiti integrati specifici per il monitoraggio delle tensioni e temperature di celle agli ioni di litio connesse in serie [35]. In generale lo stack monitor è in grado di misurare le tensioni e le temperature delle singole celle all'interno di un modulo, ma allo stesso tempo non dispone di una capacità di calcolo molto elevata e quindi dovrà necessariamente essere

affiancato da un microcontrollore che supplirà a tali mancanze che consistono nella comunicazione dei dati raccolti ai livelli superiori e all'implementazione di algoritmi di controllo e gestione tipici di un BMS. A seconda della strategia architetturale implementata il microcontrollore potrebbe essere inserito sia a bordo delle singole MMU a fianco allo stack monitor o può essere previsto a livello superiore nella PMU (vedi Figura 17).

In questo caso tutte le funzioni di elaborazione dati, stime e controllo dell'intero pacco batteria vengono associate alla PMU mentre le MMU svolgono solo funzioni di raccolta dati e attivano funzioni secondarie come il bilanciamento del pacco batteria ma solo su comando della PMU stessa. Questo ultimo schema architetturale è reso possibile grazie alle numerose funzionalità di uno stack monitor. Generalmente, questi chip sono in grado di monitorare da 4 a 16 tensioni di cella e dispongono di alcuni segnali ausiliari utilizzabili per acquisire la temperatura in più punti del modulo. Vale la pena rimarcare che la lettura delle temperature è di fondamentale importanza nelle applicazioni di second-life. Infatti, un aumento ingiustificato della temperatura di una singola cella rispetto alle altre, all'interno di un modulo, potrebbe essere indice di un invecchiamento accelerato e quindi di una rottura imminente. Pertanto, sarà fondamentale prelevare le temperature di tutte le celle e non solo in alcuni punti del modulo. Inoltre, gli stack monitor sono dotati di alcuni segnali digitali di ingresso/uscita per controllare semplici sistemi di attuazione (ad esempio delle ventole di raffreddamento) o acquisire dati da sensori digitali. Molti di questi chip integrati sono dotati di due interfacce di comunicazione isolate attraverso le quali è possibile connettere i moduli secondo un'architettura di tipo daisy-chain (vedi Figura 17). La comunicazione, quindi, è gestita completamente dai moduli che devono però essere configurati e controllati da un ulteriore dispositivo, ad esempio un microcontrollore, che comunica con il primo chip della daisy-chain. Una delle configurazioni più utilizzate prevede di implementare il microcontrollore in una scheda separata, posizionata al livello gerarchico superiore. Dopo la configurazione di ciascun modulo, i messaggi che il microcontrollore invia al primo elemento della chain vengono propagati automaticamente lungo tutta la catena. Essendo la chain passiva rispetto alla comunicazione con il microcontrollore, i moduli non possono comunicare se prima non interrogati. Inoltre, esiste anche una seconda linea di comunicazione all'interno della chain, separata dalla prima, attraverso la quale i chip dei moduli possono propagare eventuali segnalazioni di errore verso il microcontrollore, senza essere interrogati da quest'ultimo, con l'obiettivo di avvertire il dispositivo di controllo velocizzando la propagazione di una possibile indicazione di guasto del sistema. Se viene utilizzata questa architettura, quindi, il compito di monitoraggio delle celle all'interno dei moduli è associabile ai soli stack monitor mentre la gestione delle informazioni e il controllo della stringa è associato alla PMU. Questa strategia può ridurre il costo totale dell'elettronica del BMS e aumentare la robustezza del sistema in quanto solitamente i chip sono progettati per seguire le normative in termini di sicurezza come, ad esempio, ISO 26262 o la AEC-Q100. Tuttavia, se la gestione di tutte queste informazioni richiede una complessità troppo elevata per la PMU, si potrebbe distribuire la potenza di calcolo sui due livelli, inserendo un microcontrollore su ogni MMU a fianco gli stack monitor (vedi Figura 16(b)).

5.4 Monitoraggio di corrente e sistemi di sicurezza

La funzione di misura della corrente può essere implementata in diversi livelli della struttura gerarchica del BMS. Nel caso in cui il pacco batteria è composto da moduli e/o celle connesse in serie la lettura di corrente viene eseguita in un solo punto al livello gerarchico più alto, in quanto tutte le celle sono attraversate dalla stessa corrente. Ad esempio, nel caso di un sistema di accumulo elettrochimico di second-life la misura di corrente viene eseguita a livello della singola stringa (vedi Figura 18). Nel caso opposto in cui moduli costituiti da celle in serie vengono parallelizzati per formare la stringa, i punti di prelievo della corrente saranno trasferiti al livello più basso, quello del modulo (MMU).

La misura di corrente viene generalmente acquisita utilizzando due tecniche diverse: i resistori di shunt e i sensori basati su effetto Hall. Nel primo caso si sfrutta la legge di Ohm su un resistore di piccolo valore che viene inserito in un punto strategico della stringa. La corrente che scorre sul resistore provocherà una caduta di tensione ai suoi capi che verrà misurata ad esempio da un microcontrollore tramite un front-end analogico progettato ad hoc. Questa soluzione è molto economica, ma necessita di particolari accorgimenti progettuali per ottenere una buona accuratezza sulla misura. Come, ad esempio, la scelta nel posizionamento del

sensore. Normalmente come punto di prelievo della stringa si scelgono o il terminale positivo o quello negativo di stringa. Tuttavia, se si utilizza uno shunt si predilige montare il sensore sul terminale negativo. Infatti, l'acquisizione della caduta di tensione ai capi della resistenza risulterebbe difficoltosa, nel caso si scegliesse il terminale positivo, per via dell'elevato valore di modo comune che, coincidendo con la tensione di stringa, può superare anche le centinaia di volt. Inoltre, prevedendo il sensore di corrente sul polo negativo della batteria il progettista dovrà scegliere se mantenere come riferimento di tensione del sistema il terminale negativo della prima cella della batteria (prima del sensore di corrente) o il terminale negativo di batteria (dopo il sensore di corrente). Le due soluzioni hanno entrambe vantaggi e svantaggi e in ogni caso deve essere progettato con attenzione un front-end necessario alla lettura della misura di corrente in cui la tensione ai capi dello shunt può risultare negativa in carica o scarica. Inoltre, nel caso in cui la scheda di controllo del pacco batteria e quella di controllo dei moduli non abbiano lo stesso riferimento di tensione, si complica la gestione della comunicazione (come solitamente avviene nelle architetture costituite da moduli connessi in serie). Invece, i sensori basati su effetto Hall rappresentano una soluzione più semplice e veloce da implementare perché sono isolati e sono solitamente dotati di circuiti analogici o analogici/digitali che forniscono direttamente la misura di corrente in segnali facilmente acquisibili con un microcontrollore. Inoltre, spesso, sono dotati di due o più range di misura per poter acquisire con lo stesso sensore in maniera ottimale tutta la dinamica della corrente. Allo stesso tempo, però, sono più costosi e hanno un'elettronica di condizionamento che richiede un maggiore consumo di energia anche in fase di stand-by e possono essere affetti da un errore di offset significativo.

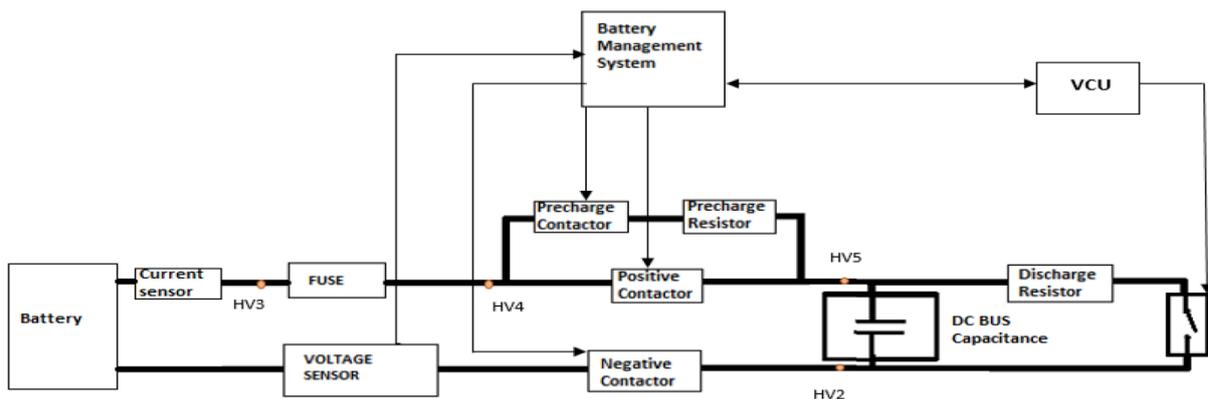


Figura 18 Esempio di un circuito di precharge usato per caricare una batteria al litio [36]

Infine, ogni stringa dovrà prevedere un numero di relè per gestire le fasi di carica/scarica della stringa stessa. I relè avranno anche delle funzioni di sicurezza, come ad esempio l'interruzione del percorso di corrente quando il BMS rileva una criticità che può essere catastrofica per il sistema se non trattata tempestivamente. La gestione dei relè di stringa viene normalmente affidata alla PMU. Questa può eseguire un comando proveniente dal livello superiore (Cabinet level) come la richiesta di avvio di una fase di ricarica o scarica dell'intero pacco. Oppure può decidere di prendere delle decisioni indipendenti di messa in sicurezza scollegando la stringa dal sistema, se viene rilevata qualche anomalia dopo aver processato i dati provenienti dai livelli inferiori (Module level). Generalmente, i relè di potenza sono affiancati anche dalla presenza di un fusibile che viene dimensionato sul picco di corrente massimo sopportabile dalla stringa. In Figura 18 viene mostrata l'architettura principalmente utilizzata dei relè di potenza a gestione della stringa. Generalmente si utilizzano tre relè posizionati nel terminale positivo e negativo di stringa, e di precarica. Il relè di precarica (precharge) viene posizionato in serie a un resistore e si trova in parallelo al relè posizionato nel terminale positivo di stringa. Il ramo di precharge serve a limitare la corrente che si avrebbe in chiusura in presenza di un carico fortemente capacitivo. Pertanto, la sequenza di accensione dei relè sarà:

1. il relè di precharge e quello sul terminale negativo di stringa vengono accessi;

2. ci sarà una prima fase caratterizzata da una forte corrente di stringa, la cui entità è limitata dalla presenza del resistore in serie al relè di precharge e che cala esponenzialmente con la carica del condensatore sul carico;
3. quando la tensione raggiungerà il suo valore di regime, il relè principale sul terminale positivo di stringa viene attivato e quello di precharge viene disattivato;
4. al termine di ogni fase di carica o scarica tutti i relè vengono aperti.

5.5 *Stime dello stato di carica e bilanciamento attivo*

Anche gli algoritmi scelti per eseguire le stime dello stato delle celle hanno un impatto sull'hardware del BMS. In particolare, avendo a disposizione più livelli di schede elettroniche è possibile partizionare le funzionalità di stima su più livelli per ridurre il carico computazionale dei livelli superiori. Un altro aspetto importante degli algoritmi di stima è l'accuratezza richiesta. Infatti, se l'applicazione richiede maggiore precisione, gli algoritmi di stima da utilizzare risultano solitamente più complessi e quindi richiedono maggior potenza di calcolo nei dispositivi di controllo usati. Negli ultimi anni sono stati presentati un gran numero di algoritmi anche molto complessi che però riescono a fornire stime molto accurate. Di conseguenza la complessità e la potenza di calcolo dei BMS sta lentamente crescendo e non è difficile trovare nelle soluzioni moderne insieme a processori multicore, chip molto potenti come Field Programmable Gate Array (FPGA) o Application Specific Integrated Circuit (ASIC) in cui vengono realizzati acceleratori hardware capaci di implementare algoritmi di stima complessi con tempi di esecuzione molto ridotti (vedi Figura 16(c)). In tal modo l'unità di controllo generale può essere sgravata dalla funzione di stima e focalizzarsi sul controllo ottimale della batteria [37]. Come detto per più volte, un pacco batteria di second-life è costituito da celle raggruppate in modo da avere all'inizio della loro seconda vita operativa caratteristiche molto simili tra loro. Tuttavia, il loro utilizzo nel primo ciclo di vita potrebbe essere stato anche profondamente diverso. In assenza di una standardizzazione/normativa che prevede di tenere traccia della storia delle celle durante il loro primo utilizzo è quasi impossibile raggruppare le celle in base alla loro storia passata. Storia che inciderà nel secondo utilizzo portando a differenze sostanziali tra le celle sia in termini di invecchiamento sia in termini di capacità effettiva. Pertanto, un BMS per applicazioni second-life dovrà prevedere degli algoritmi di stima avanzati e differenziati a livello di cella e un sistema di bilanciamento attivo per recuperare velocemente e con un alto rendimento l'inevitabile sbilanciamento dello stato di carica delle celle.

Per quanto riguarda il primo, abbiamo visto nella sezione 2.2.1 che gli algoritmi di stima del SoC che offrono il compromesso migliore tra complessità computazionale e accuratezza della stima sono quelli basati sui circuiti equivalenti elettrici. Inoltre, tra i circuiti elettrici equivalenti conosciuti in letteratura scientifica, quello più utilizzato per svolgere questa funzione è quello mostrato in Figura 2 nella sezione 2.2.1 che prevede un generatore di tensione comandato in tensione, una resistenza serie, e uno/due gruppi RC. In applicazioni che prevedono l'utilizzo di celle nuove, il modello equivalente elettrico è generalmente unico e tiene conto dei parametri elettrici a livello di batteria (in modo mantenere limitata la complessità computazionale del BMS). Più precisamente vengono stimati i parametri elettrici che considerano una cella equivalente costituita dall'unione di tutte le celle della batteria. Tuttavia, in applicazioni di second-life la variabilità dei parametri di cella potrebbe essere anche molto elevata durante il decorso del secondo utilizzo e quindi il BMS dovrebbe prevedere l'identificazione dei parametri del modello per ogni cella. Quindi, per ogni cella del pacco, il BMS dovrà prevedere un'area di memoria dedicata in cui mantenere aggiornati i parametri del modello elettrico equivalente. Pertanto, anche tutte le stime dovranno essere eseguite a livello di cella in modo da valutare in maniera molto accurata lo SoC e lo SoH delle singole celle. In questo modo, la PMU potrà decidere di attivare la procedura di bilanciamento attivo durante l'utilizzo della batteria mantenendo sempre il suo stato operativo in condizioni ottimali. Inoltre, potrà segnalare al controllore di sistema se è presente un invecchiamento accelerato/anomalo di una cella o gruppo di celle rispetto alle altre, in modo da poter prendere dei provvedimenti prima di giungere a un guasto della batteria. Tuttavia, utilizzare un modello elettrico equivalente a livello di cella comporta un costo computazionale a carico del BMS molto elevato che dovrà essere ripartito tra i vari livelli di gerarchia.

Il bilanciamento attivo, come già visto, consiste nel trasferire carica tra più celle all'interno del pacco batteria senza dissipare energia su un elemento passivo. Generalmente, questo tipo di funzionalità viene

implementata a livello delle MMU del BMS (cioè a livello di modulo). Inoltre, Il bilanciamento attivo è estremamente necessario in applicazioni di second-life principalmente per due motivi:

1. compensare le differenze in termini di correnti di autoscarica delle celle equalizzandone lo stato di carica (spostando carica dalla cella con SoC più elevato verso la cella più scarica);

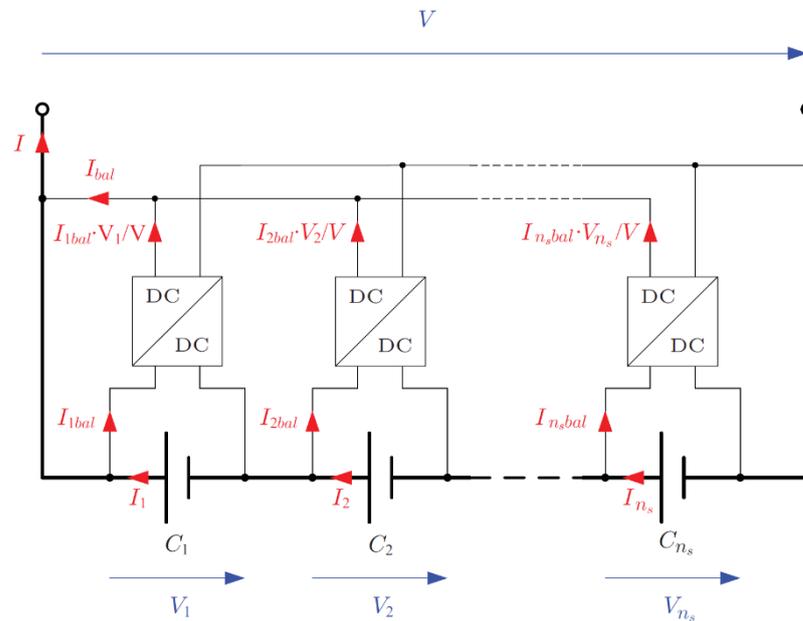


Figura 19 Esempio di bilanciamento attivo in pacchi batteria costituiti da celle con chimiche diverse e capacità residue molto differenti tra di loro [38]

compensare le differenze di capacità residua delle singole celle trasferendo la carica in eccesso dalla cella con capacità residua più alta a quella con capacità più bassa (in questo modo si può posticipare il raggiungimento dei cut-off delle celle più deboli massimizzando la carica estraibile dal pacco durante le fasi di carica e scarica); Infine, il bilanciamento attivo può supplire in parte anche alla mancanza di standard sulla progettazione delle celle nel settore automotive che rallentano le procedure di riassettaggio e di recupero delle batterie. Infatti, a seconda del produttore di auto, le celle possono cambiare nella forma del contenitore (cilindrico, prismatico o pouch) e nella composizione chimica del catodo (LCO, NMC, LFPO ecc.) rendendo il riassettaggio più difficile. Tuttavia, le differenze presenti nella relazione OCV-SoC e nelle tensioni di cut-off delle diverse chimiche possono essere compensate dallo spostamento di carica tra una cella e l'altra attraverso il bilanciamento attivo. Ad esempio, il lavoro in [38] evidenzia il fatto che è possibile creare pacchi batteria costituiti da celle con chimiche e capacità residue molto diverse tra loro. In questo lavoro gli autori attraverso l'uso di un convertitore DC-DC in parallelo ad ogni cella vanno a controllare selettivamente le correnti di scarica e carica di ognuna (vedi Figura 19). L'idea è che la cella con capacità residua più bassa si scarichi con correnti più basse. Questa soluzione è molto costosa soprattutto in pacchi batteria che richiedono la presenza di un gran numero di celle. Tuttavia, un'altra soluzione più economica a livello di costi, ma dispendiosa in termini di complessità del software di gestione, potrebbe essere quella di usare una cella cosiddetta di buffer che preleva carica dalla cella più carica (questo significa aumentare la corrente di scarica dalla cella su cui si sta facendo il prelievo) per poi passarla alla cella con capacità residua più bassa (come effetto si ha un abbassamento della corrente di scarica della cella). In questa architettura il numero di convertitori DC-DC richiesti si riduce a uno, ma allo stesso tempo è necessario implementare una matrice di interruttori che selezionano la cella da cui estrarre o immettere carica e la collegano tramite il convertitore DC-DC bidirezionale alla cella buffer.

6 Conclusioni

I sistemi di accumulo per applicazioni automobilistiche hanno limiti della vita operativa utile legati alla capacità e alla potenza residua del pacco batteria, che devono essere compatibili con le prestazioni dichiarate del veicolo. Il raggiungimento della condizione di fine vita normalmente non corrisponde alla mancata funzionalità del pacco batteria ma è associata al degrado di parametri prestazionali che impediscono al veicolo di mantenere le caratteristiche attese. Per questo motivo la sostituzione del sistema di accumulo porta alla disponibilità di interi moduli ancora funzionanti, seppure con specifiche degradate. Purtroppo, anche a parità di caratteristiche iniziali (per lo stesso tipo e modello di veicolo), i moduli disponibili in second life presentano una elevata variabilità, dovuta al diverso uso, come pure le celle all'interno dello stesso modulo, a causa dei gradienti termici che ne hanno comportato un invecchiamento non omogeneo. I sistemi di gestione per sistemi di accumulo basati su questa tipologia di elementi, nella loro seconda vita operativa, devono quindi tenere conto di questa variabilità, potendo contare su una limitata possibilità di matching degli elementi disponibili.

Per quanto detto, l'obiettivo di questo report è stato quello di fornire delle linee guida per la progettazione di un Battery Management System (BMS) da utilizzare per gestire un pacco batteria di second-life per applicazioni di accumulo stazionario. Dopo una breve descrizione delle principali funzioni e architetture di un BMS comune, il report ha esaminato specificamente le applicazioni second-life. Partendo dalla definizione di pacco batteria di second-life, sono state dettagliate le principali nozioni procedurali a riguardo del disassemblaggio e riutilizzo dei pacchi batteria giunti al termine del primo ciclo di vita utile nel settore automobilistico per produrre pacchi batteria da usare in applicazioni stazionarie. Successivamente, una breve analisi dei costi delle procedure di Refurbishing e Repurposing dei pacchi batteria di second-life ha evidenziato la necessità di maggiori investigazioni sulla stima del costo finale di un pacco batteria di second-life. Inoltre, per essere appetibile al mercato, il pacco batteria riutilizzato dovrebbe avere un costo inferiore al 60 % di un pacco batteria con le stesse caratteristiche, ma nuovo. Dopodiché, passando da una sintetica descrizione delle possibili applicazioni, è stata analizzata la struttura di un pacco batteria di second-life in applicazioni stazionarie e infine sono state discusse le linee guida per la progettazione di un BMS per applicazioni di second-life.

In conclusione, le principali linee guida da rispettare sono le seguenti:

1. Il BMS deve prevedere un architettura hardware e software gerarchica in modo da ripartire la complessità hardware e software su più livelli (in quanto i sistemi di accumulo elettrochimico stazionario sono molto complessi e possono essere costituiti da decine a centinaia di celle);
2. il BMS deve prevedere dei modelli di stima del SoC e SoH avanzati basati su modelli elettrici equivalenti a livello di cella (le celle di un pacco batteria, seppur riassemblate seguendo un criterio di somiglianza dei parametri caratteristici, nel loro primo ciclo di vita avranno subito storie anche molto diverse, che possono portare a un disallineamento dei parametri durante l'utilizzo in second-life);
3. il BMS deve prevedere un sistema di bilanciamento attivo in grado di equalizzare lo SoC della batteria, ma anche di compensare la differenza nella capacità residua delle celle con diverso invecchiamento, con l'obiettivo di massimizzare la carica estraibile e/o immagazzinabile dalla batteria, ottimizzandone le prestazioni.

7 Riferimenti Bibliografici

1. L. Lu, X. Han, J. Li, J. Hua e M. Ouyang, «A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles,» *Journal of Power Sources*, vol. 226, p. 272–288, 3 2013.
2. *IEEE Guide for the Characterization and Evaluation of Lithium-Based Batteries in Stationary Applications*, IEEE.
3. H. Rahimi-Eichi, U. Ojha, F. Baronti e M.-Y. Chow, «Battery Management System: An Overview of Its Application in the Smart Grid and Electric Vehicles,» *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 7, p. 4–16, 6 2013.
4. S. Piller, M. Perrin e A. Jossen, «Methods for state-of-charge determination and their applications,» *Journal of Power Sources*, vol. 96, p. 113–120, 6 2001.
5. A. Vezini, «Lithium-Ion Battery Management,» in *Lithium-Ion Batteries*, Elsevier, 2014, p. 345–360.
6. I. Baccouche, A. Mlayah, S. Jemmali, B. Manai e N. E. B. Amara, «Implementation of a Coulomb counting algorithm for SOC estimation of Li-Ion battery for multimedia applications,» in *2015 IEEE 12th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD15)*, 2015.
7. M. Chen e G. A. Rincon-Mora, «Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I–V Performance,» *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, p. 504–511, 6 2006.
8. R. Morello, W. Zamboni, F. Baronti, R. D. Rienzo, R. Roncella, G. Spagnuolo e R. Saletti, «Comparison of state and parameter estimators for electric vehicle batteries,» in *IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2015.
9. B. Balagopal e M.-Y. Chow, «The state of the art approaches to estimate the state of health (SOH) and state of function (SOF) of lithium ion batteries,» in *2015 IEEE 13th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 2015.
10. G. L. Plett, «High-Performance Battery-Pack Power Estimation Using a Dynamic Cell Model,» *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 53, p. 1586–1593, 9 2004.
11. A. C. Baughman e M. Ferdowsi, «Double-Tiered Switched-Capacitor Battery Charge Equalization Technique,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, p. 2277–2285, 6 2008.
12. J. Cao, N. Schofield e A. Emadi, «Battery balancing methods: A comprehensive review,» in *2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2008.
13. J. Qi e D. D.-C. Lu, «Review of battery cell balancing techniques,» in *2014 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, 2014.
14. M. Daowd, N. Omar, P. V. D. Bossche e J. V. Mierlo, «Passive and active battery balancing comparison based on MATLAB simulation,» in *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2011.
15. F. Baronti, C. Bernardeschi, L. Cassano, A. Domenici, R. Roncella e R. Saletti, «Design and Safety Verification of a Distributed Charge Equalizer for Modular Li-Ion Batteries,» *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, p. 1003–1011, 5 2014.
16. C.-H. Kim, M.-Y. Kim, Y.-D. Kim e G.-W. Moon, «A modularized charge equalizer using battery monitoring IC for series connected Li-Ion battery strings in an electric vehicle,» in *8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia*, 2011.
17. H. Kim e K. G. Shin, «DESA: Dependable, Efficient, Scalable Architecture for Management of Large-Scale Batteries,» *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 8, p. 406–417, 5 2012.
18. F. Baronti, G. Fantechi, R. Roncella, R. Saletti e P. Terreni, «Hardware building blocks of a hierarchical battery management system for a fuel cell HEV,» in *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2012.
19. F. Baronti, G. Fantechi, R. Roncella e R. Saletti, «Intelligent cell gauge for a hierarchical battery management system,» in *2012 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, 2012.
20. F. Baronti, R. D. Rienzo, R. Moras, R. Roncella, R. Saletti, G. Pede e F. Vellucci, «Implementation of the fast charging concept for electric local public transport: The case-study of a minibus,» in *2015 IEEE 13th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 2015.

21. R. D. Rienzo, F. Baronti, F. Vellucci, F. Cignini, F. Ortenzi, G. Pedè, R. Roncella e R. Saletti, «Experimental analysis of an electric minibus with small battery and fast charge policy,» in *2016 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)*, 2016.
22. E. Hossain, D. Murtaugh, J. Mody, H. M. R. Faruque, M. S. H. Sunny e N. Mohammad, «A Comprehensive Review on Second-Life Batteries: Current State, Manufacturing Considerations, Applications, Impacts, Barriers & Potential Solutions, Business Strategies, and Policies,» *IEEE Access*, vol. 7, p. 73215–73252, 2019.
23. M. H. S. M. Haram, J. W. Lee, G. Ramasamy, E. E. Ngu, S. P. Thiagarajah e Y. H. Lee, «Feasibility of utilising second life EV batteries: Applications, lifespan, economics, environmental impact, assessment, and challenges,» *Alexandria Engineering Journal*, vol. 60, p. 4517–4536, 10 2021.
24. M. A. Hannan, M. M. Hoque, A. Hussain, Y. Yusof e P. J. Ker, «State-of-the-Art and Energy Management System of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicle Applications: Issues and Recommendations,» *IEEE Access*, vol. 6, p. 19362–19378, 2018.
25. P. G. Pereirinha, M. González, I. Carrilero, D. Anseán, J. Alonso e J. C. Viera, «Main Trends and Challenges in Road Transportation Electrification,» *Transportation Research Procedia*, vol. 33, p. 235–242, 2018.
26. I. N. E. L. U. S. D. E. I. F. O. Gary Hunt, *USABC Electric Vehicle Battery Test Procedures Manual Revision 2*, 1996.
27. H. Ambrose, D. Gershenson, A. Gershenson e D. Kammen, «Driving rural energy access: a second-life application for electric-vehicle batteries,» *Environmental Research Letters*, vol. 9, p. 094004, 9 2014.
28. M. Conte, G. Graditi, M. G. Ippolito, E. R. Sanseverino, E. Telaretti e G. Zizzo, «Analisi e definizione di strategie di gestione e controllo di sistemi di accumulo elettrico per applicazioni in reti di distribuzione attive automatizzate Report 1 – Analisi dello stato dell’arte,» 2011.
29. I. Mathews, B. Xu, W. He, V. Barreto, T. Buonassisi e I. M. Peters, «Technoeconomic model of second-life batteries for utility-scale solar considering calendar and cycle aging,» *Applied Energy*, vol. 269, p. 115127, 7 2020.
30. M. C. Fintan McLoughlin, «Secondary Re-Use of Batteries From Electric Vehicles for Building Integrated Photo-Voltaic (BIPV) applications,» 2015.
31. J. Warner, *The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design* 1st Edition, E. Science, A cura di, Elsevier Science, 2015.
32. B. Sanghai, D. Sharma, K. Baidya e M. Raja, «Refurbished and Repower: Second Life of Batteries from Electric Vehicles for Stationary Application,» in *SAE Technical Paper Series*, 2019.
33. J. Li, S. Wang, C. Fernandez, N. Wang e H. Xie, «The battery management system construction method study for the power lithium-ion battery pack,» in *2017 2nd International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE)*, 2017.
34. *18-Cell Battery Stack Monitor with Daisy Chain Interface*.
35. Phil Weicker, *A Systems Approach to Lithium-Ion Battery Management*, Artech house, 2013.
36. C. Gera e S. Sharma, «A Method to Diagnose Failures in High Voltage Contactors and Fuse for Safe Operation of Battery Pack,» in *2019 IEEE Transportation Electrification Conference (ITEC-India)*, 2019.
37. R. Morello, F. Baronti, X. Tian, T. Chau, R. D. Rienzo, R. Roncella, B. Jeppesen, W. H. Lin, T. Ikushima e R. Saletti, «Hardware-in-the-loop simulation of FPGA-based state estimators for electric vehicle batteries,» in *2016 IEEE 25th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2016.
38. M. Einhorn, R. Permann, C. Kral, F. V. Conte, W. Guertlschmid, T. Blochberger, R. Kumpusch e J. Fleig, «Current equalization of serially connected battery cells for a possible second life application,» in *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2011.
39. A. Carloni, F. Baronti, R. D. Rienzo, R. Roncella e R. Saletti, «Preliminary Study of a Novel Lithium-Ion Low-Cost Battery Maintenance system,» in *Lecture Notes in Electrical Engineering*, Springer International Publishing, 2021, p. 241–245.

8 Abbreviazioni ed acronimi

ADC	Analog Digital Converter
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
BMS	Battery Management System (Sistema elettronico associato a un pacco batteria che controlla e gestisce in modo sicuro lo stato elettrico e termico controllando l'ambiente e che comunica lo stato della batteria al controllore del Sistema nel suo complesso (es: Vehicle Management System (VMS) e/o Energy Management System (EMS)).
CMU	Cell Monitoring Unit
DOD	Deep of Discharge
FPGA	Field Programmable Gate Array
MMU	Module Management Unit
OCV	Open Circuit Voltage (Tensione a vuoto)
PCS	Pack Current Sensor
PMU	Pack Monitoring Unit
PPS	Pack Protection Switch
SLB	Second Life Battery
SOA	Safe Operation Area
SoC	State of Charge (Capacità disponibile della batteria o sistema in uso, utilizzato per stimare la corrente di carica di una batteria in uso).
SoF	State of Function
SoH	State of Health
SoP	State of power
USABC	United States Advanced Battery Consortium

9 Curricula Del Gruppo Di Lavoro

Roberto Roncella

Il Prof. Roberto Roncella ha conseguito con lode la laurea in Ingegneria Elettronica nel 1984. Nel 1989 ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca. Ha poi prestato servizio come borsista del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CSMDR, Pisa). Dal 1990 presta servizio presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione (DII) dell'Università di Pisa, prima come ricercatore e dal 1998 come professore associato, ricoprendo numerosi insegnamenti del raggruppamento di Elettronica. Ha ricoperto il ruolo di responsabile scientifico di unità di ricerca dipartimentali nell'ambito di diversi progetti nazionali, con finanziamento da parte del Consiglio Nazionale delle Ricerche, del Ministero dell'Istruzione, dello Sviluppo Economico e da fondazioni bancarie. Svolge attività come referee per diverse riviste internazionali. Le sue attività di ricerca sono orientate al progetto e collaudo di circuiti integrati ad alta prestazione, quali circuiti per linee di ritardo ad alta risoluzione o circuiti a bassa dissipazione di potenza, alla proposta di nuove architetture VLSI per l'elaborazione numerica dei segnali e più recentemente, alla realizzazione di sistemi elettronici per la gestione e la sicurezza di sistemi basati su accumulatori al litio. In collaborazione con ENEA, è stato responsabile dello sviluppo di un sistema di BMS (*Battery Management System*) per un modulo costituito da celle al litio destinato ad applicazione in veicoli off-road. Nell'ambito di ricerche con finanziamento industriale, si occupa della progettazione di sistemi innovativi applicati all'ambito biomedicale, automobilistico e relativi alla gestione di sistemi di

“energy storage” basate su accumulatori con chimica al litio per diverse applicazioni. Sulle proprie attività ha pubblicato più di cento lavori su riviste o atti di congressi internazionali.

Roberto Saletti

Il Prof. Roberto Saletti ha conseguito con lode la laurea in Ingegneria Elettronica presso l'Università degli Studi di Pisa nel 1981. È stato ricercatore del Consiglio Nazionale delle Ricerche dal 1983 al 1992. Nel 1987 è stato visiting scientist presso la Cornell University, Ithaca, New York. In servizio dal 1992 al 2001 come professore associato e dal 2001 ad oggi come professore ordinario presso il "Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione" nella Scuola di Ingegneria dell'Università di Pisa. Dal 2003 al 2010 è stato Presidente del Consiglio dei Corsi di Studio in Ingegneria Elettronica e responsabile regionale dell'Indirizzo Scientifico-Tecnologico della Scuola di Specializzazione per l'Insegnamento Secondario (SSIS). Dal 2016 è senatore accademico dell'Università di Pisa. Ha collaborato alla fondazione, sviluppo e gestione del Centro per le Tecnologie e Applicazioni Microelettroniche (Centro TEAM) di Pisa Ricerche, finanziato dall'Unione Europea e responsabile scientifico di progetti di ricerca nazionali o su commessa di partner industriali quali Piaggio S.p.A, Pershing, Ferretti Yacht, Global Garden Products, FIAMM, etc.. Le sue attività di ricerca sono nell'area del progetto, collaudo e applicazione di sistemi elettronici ad alta prestazione, in particolare di “sistemi embedded”, per l'acquisizione ed elaborazione dati, l'interfacciamento di sensori e il controllo di attuatori su piattaforma elettronica a basso costo. Le principali applicazioni riguardano i sistemi elettronici per il mercato "automotive", sia esso nel campo dei veicoli a due e quattro ruote che delle imbarcazioni da crociera. Le attività recenti sono nel campo dell'elettrificazione dei veicoli, e in particolare verso il monitoraggio e la gestione dei sistemi di accumulo di energia basati su batterie di ultima generazione. E' Senior Member dello IEEE e co-fondatore dello IEEE-IES Technical Committee su “Energy Storage Devices and Systems”.

Federico Baronti

Il Prof. Federico Baronti ha conseguito con lode la laurea in Ingegneria Elettronica presso l'Università di Pisa nel 2001 e il titolo di Dottore di Ricerca, sempre presso la stessa università, nel 2005. Dopo il dottorato, ha prestato servizio presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione dell'Università di Pisa, prima come assegnista di ricerca, poi come ricercatore universitario e dal 2017 come professore associato. Le sue attività di ricerca hanno riguardato lo studio e progetto di sistemi innovativi mirati a migliorare le prestazioni, sicurezza e comfort dei veicoli terrestri. Più recentemente sta lavorando alla modellizzazione delle batterie agli ioni di litio, allo sviluppo di algoritmi per la stima dello stato interno della batteria e alla progettazioni di “Battery Management System”. È stato ed è responsabile di vari progetti finanziati dalla comunità europea e da aziende private. Sulle sue attività ha pubblicato più di 100 lavori su riviste e atti di conferenze internazionali. Baronti è *Senior Member* dell'IEEE, è stato chair dal 2015 al 2017 del comitato tecnico sull'Energy Storage dell'IEEE *Industrial Electronics Society* (IES), per la quale ha prestato servizio come *AdCom Member* dal 2015 al 2018. È associate editor per la rivista *Transactions on Industrial Informatics*. Ha svolto il ruolo di guest editor in diverse *special section* delle *Transactions on Industrial Electronics and Industrial Informatics*, *track chair* e organizzatore di *special session* in diverse conferenze sponsorizzate dall'IES, dove ha tenuto vari seminari su tematiche relative all' *energy storage*. Ha ricevuto il premio come miglior *paper* dell'*Industrial Electronics Magazine* nel 2013.

Roberto Di Rienzo

Si è laureato in Ingegneria Elettronica presso l'Università di Pisa nel 2014 dove nel 2018 ha conseguito il dottorato di ricerca in Ingegneria dell'Informazione. Dopo aver prestato servizio come assegnista di ricerca presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione dell'Università di Pisa e attualmente occupato come ricercatore universitario presso lo stesso dipartimento. Dopo il dottorato, ha prestato servizio presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione dell'Università di Pisa, prima come assegnista di ricerca, poi come ricercatore universitario e dal 2017 come professore associato. Nelle sue attività di ricerca si è focalizzato sui sistemi di immagazzinamento dell'energia elettrica con particolare attenzione sulle batterie agli ioni di litio. In tale ambito, ha collaborato alla modellizzazione elettrica di diverse tecnologie di celle agli

ioni di litio, allo sviluppo di algoritmi avanzati di stima dello stato di carica e salute di queste celle e alla progettazione e realizzazione di sistemi elettronici di gestione di batterie di medio e grande formato. Attività di ricerca più recenti sono focalizzate sull'uso di sistemi elettrochimici di accumulo di energia, alla gestione dei flussi energetici e di controllo nell'ambito delle smart e micro-grid

Andrea Carloni

Ha conseguito la laurea in Ingegneria Elettronica presso l'Università di Pisa nel 2017. Attualmente è in attesa del conseguimento del titolo del corso di Dottorato in Ingegneria dell'Informazione presso la stessa Università. Le principali attività di ricerca del corso di dottorato si sono concentrate sul tema della ricarica senza fili di batterie e sullo sviluppo di strumentazione completamente open-source per la caratterizzazione di singole celle agli ioni di litio e in generale su sistemi di accumulo elettrochimico. Da maggio 2021 ha vinto un assegno di ricerca presso l'università di Pisa in collaborazione con ENEA per lo studio, la progettazione e la realizzazione di un BMS in grado di gestire un pacco batteria di second-life.