



Ricerca di Sistema elettrico

Studio sulle caratteristiche funzionali dei BMS per applicazioni automotive e sulle loro possibili implementazioni; valutazioni sull'affidabilità e sulle implicazioni relative alla sicurezza di sistema

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

R. Roncella, R. Saletti

STUDIO SULLE CARATTERISTICHE FUNZIONALI DEI BMS PER APPLICAZIONI AUTOMOTIVE E SULLE LORO POSSIBILI IMPLEMENTAZIONI; VALUTAZIONI SULL'AFFIDABILITÀ E SULLE IMPLICAZIONI RELATIVE ALLA SICUREZZA DI SISTEMA

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

Settembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2017

Area: Efficienza Energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici

Progetto: D7 – Mobilità elettrica sostenibile

Obiettivo: Tecnologie e infrastrutture di ricarica di veicoli elettrici – Sicurezza dei sistemi di accumulo al litio

Responsabile del Progetto: Maria Pia Valentini

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *“Studio sulle caratteristiche funzionali dei BMS per applicazioni automotive e sulle loro possibili implementazioni; valutazioni sull'affidabilità e sulle implicazioni relative alla sicurezza (safety) di sistema”*

Responsabile scientifico ENEA: Cinzia Di Bari

Responsabile scientifico: Roberto Roncella

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 FUNZIONI DEL BMS PER LA SICUREZZA.....	6
2.1 MONITORAGGIO DEI PARAMETRI DI FUNZIONAMENTO.....	7
2.2 GESTIONE PER L'AUMENTO DELLA VITA OPERATIVA.....	8
2.2.1 <i>Equalizzazione</i>	8
3 FUNZIONI DI STIMA DELLO STATO.....	12
3.1 STIMA DELLO STATO DI CARICA E DELL'AUTONOMIA RESIDUA.....	12
3.1.1 <i>Tensione a vuoto</i>	12
3.1.2 <i>Coulomb counting</i>	12
3.1.3 <i>Model-Based</i>	13
3.2 STIMA DELLO STATO DI SALUTE E DELLA VITA UTILE RESIDUA.....	13
3.3 STUDI SULLA SECONDA VITA DELLE BATTERIE.....	14
4 FUNZIONI DI INTEGRAZIONE DI SISTEMA.....	15
4.1 CONSIDERAZIONI SULL'AFFIDABILITÀ DEL BMS.....	15
5 ARCHITETTURE HARDWARE DEI BMS.....	18
5.1 MONITORAGGIO DEI PARAMETRI DI CELLA.....	19
5.2 MISURA DELLA CORRENTE.....	20
5.3 ESECUZIONE DELLE STIME.....	21
6 CONCLUSIONI.....	22
7 ABBREVIAZIONI, ACRONIMI E DEFINIZIONI.....	24
8 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	25
9 CURRICULA DEL GRUPPO DI LAVORO.....	27

Sommario

Il presente rapporto presenta i risultati dello studio sulle caratteristiche funzionali dei BMS per applicazioni automotive e sulle loro possibili implementazioni; vengono poi presentate valutazioni sull'affidabilità dei sistemi elettronici progettati per applicazioni automobilistiche e sulle implicazioni relative alla sicurezza del sistema complessivo, composto dalla batteria e dalla sua elettronica di controllo.

Inizialmente sono prese in considerazione le funzionalità normalmente richieste ai sistemi elettronici associati alla batteria, individuando le diverse aree funzionali in cui operano e le motivazioni che ne giustificano la presenza. In particolare, vengono individuate e descritte le funzioni relative al monitoraggio delle condizioni operative delle celle, essenziali per garantire la sicurezza della batteria, alla gestione e all'ottimizzazione delle prestazioni, alle stime dello stato di funzionamento nel breve e lungo periodo, e all'integrazione di sistema. Vengono poi prese in esame le diverse possibili implementazioni hardware dei sistemi più diffusi, evidenziando le criticità insite nelle diverse soluzioni e le ripercussioni che queste possono avere sulla sicurezza di sistema. In questa sezione sono infine esaminate le problematiche poste dall'affidabilità dell'elettronica e la motivazione che rendono necessaria la progettazione dei BMS secondo stringenti criteri affidabilistici, soggetti al rispetto di apposita normativa tecnica, a similitudine di quanto normalmente viene fatto con sistemi automotive di analogo impatto su funzioni di sicurezza o di rispetto ambientale (es.: drive by wire, brake by wire, ecc.).

Ai fini della valutazione della sicurezza di un sistema completo (batteria + BMS) tramite le metodiche HAZOP, eseguita in collaborazione con il gruppo di ricerca di Unipi presso il DIC1 e presentate in un successivo rapporto, è stato quindi selezionato un BMS "tipico", progettato per applicazioni automotive e potenzialmente conforme alle normative tecniche rilevanti (EU) per questo tipo di applicazione. La scelta è ricaduta sul Fox-BMS, un sistema elettronico open-hardware proposto dall'istituto di ricerca tedesco Fraunhofer IISB e di cui è completamente disponibile la documentazione di progetto, HW e SW, e che è anche stato possibile acquisire fisicamente.

1 Introduzione

L'evoluzione delle batterie con chimica al litio, con la costante riduzione del costo per unità di energia immagazzinata e l'aumento di densità di energia accumulata e di potenza disponibile, rende sempre più attraente l'uso dell'immagazzinamento diretto di energia elettrica in forma elettrochimica. Questa tendenza è particolarmente favorita in applicazioni per la mobilità e veicolari, dove in questo modo può essere eliminato l'uso della combustione di idrocarburi, con un ovvio beneficio in termini di emissioni inquinanti prodotte e disperse in ambito urbano.

Purtroppo le celle al litio attualmente disponibili richiedono per il loro funzionamento il rispetto stringente di limiti prefissati per i principali parametri d'uso - tensione, corrente, temperatura - secondo valori che delimitano un'area di funzionamento sicuro.

La fuoriuscita dall'area di funzionamento sicuro non determina soltanto il rischio di danneggiamento della batteria con le ovvie conseguenze economiche, ma soprattutto espone il sistema a un'elevata probabilità di eventi catastrofici che, dal principio di incendio, possono giungere fino all'esplosione. Per questo motivo, l'uso di batterie al litio senza sistemi di monitoraggio e controllo non è ammissibile in tutte le applicazioni, come quelle automobilistiche, dove un guasto può avere importanti conseguenze fino alla perdita di vite umane.

Quindi normalmente, in ambito automobilistico, la garanzia del funzionamento nell'area di funzionamento sicuro di tutte le celle di una batteria al litio è affidata a un sistema elettronico definito BMS, battery management system, che ha il compito di tenere sotto controllo i parametri chiave di funzionamento di ciascuna cella e di intervenire se la misura dell'insieme di parametri rivela una condizione non ammessa. L'intervento consiste normalmente in un insieme di azioni, in funzione della severità della condizione evidenziata, che possono prevedere il coinvolgimento dell'intelligenza di veicolo, e che vanno dall'emissione di allarmi di vario livello e arrivano a porre autonomamente la batteria in uno stato considerato sicuro (in genere con il distacco della batteria dal circuito e lo spegnimento del veicolo).

Oltre che per la gestione delle funzioni imposte direttamente dalla sicurezza immediata della batteria, i progettisti approfittano in genere della presenza di un sistema elettronico evoluto per introdurre ulteriori funzionalità, dedicate al miglioramento delle prestazioni e dell'affidabilità sul lungo periodo. Tra queste possiamo considerare le capacità di equalizzazione e bilanciamento tra celle, le diverse stime sulla stato della batteria e tutte le funzioni che permettono di integrare la batteria nel sistema di gestione del veicolo.

La presenza di HW e SW per queste ulteriori funzionalità deve comunque essere considerata quando si analizza la funzionalità del BMS, in quanto ha impatto sulla capacità complessiva del sistema di adempiere al suo compito. Infatti, come tutti i sistemi ingegneristici, il BMS è soggetto a malfunzionamenti che devono essere considerati per avere indicazioni sulla sicurezza globale della batteria. Nei successivi paragrafi saranno esaminate in dettaglio le principali funzioni del BMS in modo da evidenziarne l'importanza e l'impatto sulla sicurezza e, oltre alla descrizione della funzione, si prenderanno in esame le più diffuse modalità di realizzazione.

2 Funzioni del BMS per la sicurezza

La batteria al litio, dunque, intesa come connessione serie e/o parallelo di celle elementari agli ioni di litio, deve essere sempre accompagnata da un sistema di controllo chiamato comunemente *Battery Management System* (BMS) [1]. Il BMS deve gestire le singole celle, monitorandone tensione, temperatura e corrente attuando una serie di meccanismi di protezione per evitare che esse escano dai *range* operativi (*Safety Operating Area*, SOA) con conseguente danneggiamento delle stesse [2]. A queste funzioni di base si aggiungono una serie di funzioni secondarie atte a ricavare e controllare una serie di variabili di stato utili ad un sistema di livello superiore o all'utente finale per una corretta gestione del pacco batteria [3]. Le funzioni di un BMS generale possono essere riassunte, a questo punto, in funzioni principali e secondarie (Figura 1). Le prime sono:

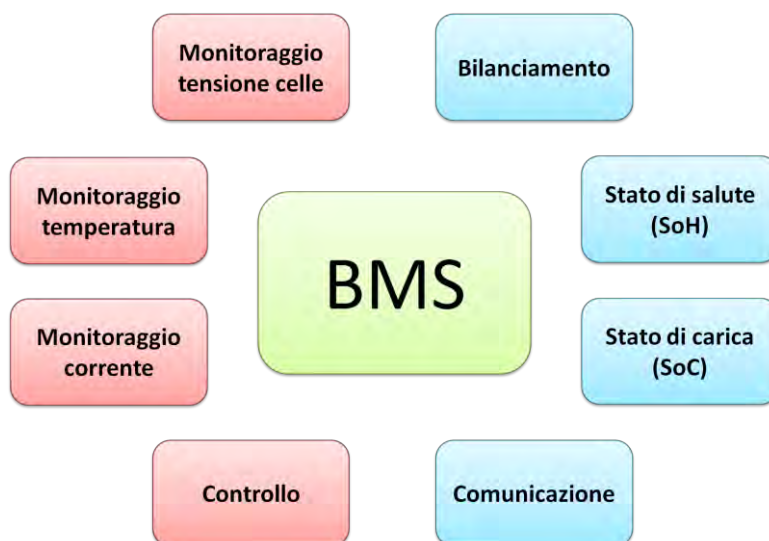


Figura 1-Funzioni standard di un Battery Management System

- Monitoraggio della tensione di cella: è fondamentale che venga fatto per ogni cella, in quanto le tensioni delle celle si diversificano per un gran numero di fattori come: un diverso stato di carica, un gradiente di temperatura presente nella batteria o per una differenza degli elementi “parassiti” della cella stessa
- Monitoraggio della temperatura: può essere fatta sulla singola cella oppure in punti strategici della batteria per limitare il numero di sensori necessari.
- Monitoraggio della corrente: poiché, in genere, la configurazione più usata è con celle in serie, è importante conoscere la corrente che scorre nella batteria (che coincide con quella di ciascuna cella o gruppo di celle) per proteggerla da valori eccessivi non permessi. Inoltre, tale monitoraggio è necessario per implementare le funzioni avanzate di gestione e analisi dello stato di carica delle celle.
- Gestione della sicurezza: è necessario adottare una serie di misure cautelative per evitare la fuoriuscita dai *range* operativi delle celle che comporterebbero il danneggiamento delle stesse.

Le funzioni secondarie più importanti sono:

- La stima dello *State of Charge* (SoC): questo è un parametro importante che definisce appunto lo stato di carica della batteria; è direttamente legato alla carica che la batteria può ancora erogare e quindi all'autonomia residua dell'applicazione.

- La stima dello *State of Health* (SoH): è il parametro usato per descrivere appunto lo stato di salute della batteria; anch'esso, come il SoC, è un parametro di notevole interesse perché legato direttamente alla massima carica che la batteria può contenere e quindi all'autonomia che l'applicazione ha con la batteria totalmente carica.
- La stima dello *State of Function* (SoF): è un parametro usato per definire la massima potenza erogabile dalla batteria. Solitamente viene espresso come rapporto tra l'eccesso di potenza disponibile rispetto a quella richiesta nelle condizioni effettive e l'eccesso valutato in condizioni nominali e a piena carica.
- Il bilanciamento: tra le celle in serie, come vedremo più nel dettaglio in seguito, questa è una funzione necessaria per massimizzare la capacità utilizzabile della batteria.
- La comunicazione: solitamente la batteria è inserita in sistemi più complessi, quindi il BMS deve essere in grado di comunicare con i livelli superiori fornendo tutte le informazioni necessarie a ottimizzare l'uso della batteria. Il protocollo di comunicazione dipende fortemente dall'applicazione e dall'ambiente di utilizzo della stessa. Per i veicoli elettrici lo *standard* di comunicazione è il *CAN-bus*, un protocollo seriale progettato per essere usato in ambienti elettromagneticamente "rumorosi", come appunto quello degli autoveicoli.

2.1 Monitoraggio dei parametri di funzionamento

Come è stato più volte accennato, il BMS deve essere in grado di monitorare le celle per poterne garantire il corretto utilizzo. Le grandezze normalmente misurate sono la tensione, la corrente, e temperatura del contenitore esterno ma possono essere misurate anche altre grandezze. Ad esempio, se le celle si trovano in un contenitore stagno, misurando la pressione nel contenitore il BMS può individuare la fuoriuscita di gas da una o più celle, individuando un potenziale pericolo.

Lasciando fuori da questa trattazione questo tipo di grandezze, sono molto legate a particolari applicazioni possiamo focalizzarci sulle tre grandezze principali.

La misura della tensione di cella è molto importante perché legata direttamente allo stato di carica della batteria e quindi alle condizioni di fine carica e scarica. Infatti, i produttori di cella nei datasheet delle celle indicano solitamente il range di utilizzo normale dando come valori di interruzione delle fasi di carica e scarica (*cut-off*) due valori di tensione. Tali valori dipendono dalla chimica utilizzata e variano da 2 V a 2,8 V come limite inferiore, 3,3 V a 3,6 V come valore nominale e da 3,6 V a 4,2 V come limite superiore di fine carica. Come precedentemente accennato, la tensione è dipendente dallo stato di carica ma tale relazione è influenzata dalle altre condizioni operative (temperatura e corrente) e quindi per stimare lo stato di carica non basta utilizzare la tensione misurata come verrà specificato nella sezione 3.1. Come per il range di tensione, i produttori specificano anche un range di temperatura. Solitamente esso è diverso se la batteria è in fase di carica o scarica e dipende dalla chimica delle celle utilizzate. Nella maggior parte dei casi il range in carica (0 °C/50 °C) è più stringente di quello in scarica (-20 °C/70 °C). Per la corrente il discorso è leggermente diverso in quanto i produttori non forniscono valori unici di massima corrente di carica e scarica, ma legano tali valori al tempo in cui tale corrente è applicata alla cella. Ad esempio, può essere presente sul datasheet il valore della massima corrente di carica e scarica continua e di picco con l'indicazione del tempo massimo per cui tale valore può essere mantenuto, per esempio 1 minuto o meno di 1 secondo. Inoltre, essi sono legati alla capacità della cella e quindi vengono espressi in C-rate. Si ricorda che il C-rate è un valore di corrente normalizzato con la capacità della cella e che quindi il valore 1C indica una corrente che integrata per un'ora è associata a una carica pari alla capacità nominale della cella. I valori di corrente sono solitamente più variabili di quelli di tensione e temperatura perché oltre a dipendere dalla chimica delle celle dipendono fortemente dal tipo di cella che il produttore vuole realizzare. 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*).

Per le soluzioni hardware utilizzate nell'implementare le funzioni di acquisizione si rimanda al capitolo 5 dove vengono presentate le architetture più utilizzate.

2.2 Gestione per l'aumento della vita operativa

Uno degli obiettivi del BMS, secondo solo alla garanzia della sicurezza, è gestire in maniera ottimale la batteria per estenderne la vita utile evitando condizioni che la danneggino irreversibilmente. Per far ciò, nel BMS sono implementate una serie di funzionalità che partendo dalle grandezze misurabili delle celle tentano di mantenere la batteria sempre nelle migliori condizioni. Alcune di queste funzionalità risolvono problemi intrinseci della tecnologia agli ioni di litio come ad esempio lo sbilanciamento dell'energia immagazzinata nelle celle in serie, che verrà trattato nel dettaglio nella successiva sottosezione. Altre invece sono legate fortemente all'applicazione. Ad esempio nell'applicazione automotive una delle funzioni principali è la gestione termica delle celle. Infatti in queste applicazioni alla batteria è richiesta l'erogazione di una notevole potenza che fa incrementare notevolmente la temperatura delle celle. A tale problema si somma la necessità di avere un pacco batteria molto compatto e leggero, per non danneggiare le prestazioni del veicolo, ma che allo stesso tempo risulti robusto ad eventuali impatti per evitare il danneggiamento meccanico delle celle con i relativi problemi di sicurezza. In tale scenario la dissipazione del calore delle celle diventa una notevole sfida ingegneristica e forza i costruttori di batterie e progettisti di BMS a trovare nuove soluzioni. In particolare il BMS dovrà essere in grado di prevedere il più possibile il comportamento termico delle celle in modo da poter intervenire in anticipo aumentando il tempo utile di intervento. La temperatura del contenitore delle celle viene misurata ma la conoscenza di questo valore, in condizione di forte generazione interna di potenza, non è sufficiente a determinare la distribuzione di temperatura all'interno delle celle. Per questo motivo, in letteratura sono stati presentati un gran numero di studi per stimare la temperatura interna alle celle, come ad esempio [4] in cui gli autori stimano tale grandezza usando la lettura dell'impedenza interna della cella.

2.2.1 Equalizzazione

Il bilanciamento è una funzione del BMS molto importante in quanto il suo compito è quello di massimizzare la carica estraibile dal pacco batteria costituito da una serie di celle o gruppi di celle; quando ciò non accade, la batteria viene detta sbilanciata.

Per analizzare le cause e gli effetti dello sbilanciamento partiamo da una condizione di celle ideali, ossia di celle con capacità reale pari a quella nominale. Questa condizione è ideale in quanto le celle, anche se nominalmente identiche a causa di piccole differenze costruttive, posseggono capacità reali diverse tra di loro e da quella nominale [5].

Con questa assunzione, la condizione di sbilanciamento è dovuta a un diverso stato di carica delle celle che connesse in serie formano la batteria. Le cause di questo fenomeno sono molteplici e inevitabili dovute principalmente a differenze costruttive tra le celle, che si riflettono sui parametri elettrici interni. Tale differenza influenza il comportamento delle celle che, dopo diversi cicli d'utilizzo, presentano appunto uno squilibrio nello stato di carica.

Tale squilibrio, in pacchi batteria formati da più celle connesse in serie e quindi sottoposti alla stessa corrente, comporta il raggiungimento "precoce" delle soglie di tensione superiore ed inferiore di alcune celle riducendone la carica immagazzinabile ed estraibile dalla batteria. Per comprendere a fondo tale fenomeno, consideriamo una batteria costituita da 4 celle di uguale capacità ma stato di carica non bilanciato, come mostrato nella Figura 2. Partendo da tale situazione di batteria sbilanciata ed effettuando una carica completa e una successiva scarica completa, si può osservare chiaramente come non venga utilizzata la massima carica immagazzinabile nel pacco batteria. Infatti, la fase di ricarica viene interrotta prima del raggiungimento della completa carica di tutte le celle, non sfruttando la piena capacità della batteria. Nella successiva fase di scarica, le celle meno cariche comporteranno l'interruzione anticipata della scarica della

batteria, in quanto una cella risulterà completamente scarica mentre nelle altre è presente ancora carica che non potrà essere estratta.



Figura 2 – Effetti dello sbilanciamento sulla massima carica estraibile in condizioni ideali (capacità reale uguale alla capacità nominale).

Partendo da tali osservazioni può essere ricavata la massima carica utilizzabile della batteria data la condizione di sbilanciamento:

$$Q_{\max} = C_n * [SoCi + (1 - SoCj)]$$

dove con Q_{\max} viene indicata la massima capacità utilizzabile della batteria, con C_n la capacità nominale, con $SoCi$ lo stato di carica della cella più scarica e con $SoCj$ lo stato di carica della cella più carica.

Tale carica, inoltre, si riduce all'aumentare dei cicli d'utilizzo quindi pare chiaro che nel BMS deve essere implementato un algoritmo capace di portare le celle in una condizione bilanciata, massimizzandone la capacità utilizzabile.

I sistemi capaci di bilanciare le celle possono essere divisi in due grosse categorie: passivi e attivi [6]. Nei primi lo stato di carica viene equalizzato dissipando la carica delle celle con SoC maggiore su un elemento passivo. Nei secondi la carica viene spostata riequilibrando il SoC delle celle.

In particolare, il bilanciamento passivo consiste nello scaricare le celle più cariche su una o più resistenze come mostrato nelle architetture presentate in Figura 3. Ovviamente esso è il più semplice da implementare sia come *hardware* che *software*, ma presenta alcuni problemi di fondo come ad esempio il calore generato nella dissipazione dell'energia. Infatti, se il pacco batteria ha una grossa capacità, come di solito accade nei veicoli elettrici, anche piccoli sbilanciamenti dello stato di carica comportano grosse quantità di energia da dissipare, aumentando la complessità del sistema di gestione termica. Tali tecniche, pur dissipando l'energia immagazzinata nella batteria e presentando i problemi sopra citati, rimangono le più utilizzate a livello commerciale perché sono molto più semplici da implementare e affidabili rispetto alle tecniche attive. Ovviamente nell'implementazione *hardware* di tali tecniche la scelta del valore di resistenza è fondamentale, in quanto determina la corrente di bilanciamento che è legata direttamente alla potenza dissipata ed è inversamente proporzionale al tempo di bilanciamento.

Le architetture *hardware* per realizzare un bilanciamento passivo possono essere di due tipi [7]:

- La prima architettura rappresenta la tecnica più semplice e utilizzata. Essa consiste nell'aggiunta in parallelo a ogni cella di una resistenza e di un interruttore, quindi per scaricare la cella basta chiudere il contatto facendo scorrere corrente nella resistenza.
Tale architettura è molto semplice e il bilanciamento può avvenire in parallelo su tutte le celle riducendo il tempo totale (a parità di corrente di bilanciamento). Di contro, essa ha bisogno di un gran numero di componenti e connessioni, in particolare quest'ultime possono rappresentare un problema soprattutto se, per motivi termici, c'è la necessità di collocare le resistenze lontano dalle celle.
- L'altra architettura invece utilizza una sola resistenza che tramite una matrice di interruttori può essere messa in parallelo alla cella della batteria che si vuole scaricare. In questo modo ovviamente si minimizza il numero di componenti e connessioni rendendo tra l'altro più semplice la gestione termica in quando l'elemento dissipativo diventa unico. Allo stesso tempo, si ha un aumento del tempo di bilanciamento a parità di corrente e l'incremento della complessità dell'algoritmo di gestione della matrice di interruttori. Inoltre, l'accensione simultanea di più interruttori può indurre un guasto catastrofico, la cui eventualità deve essere resa di probabilità trascurabile.

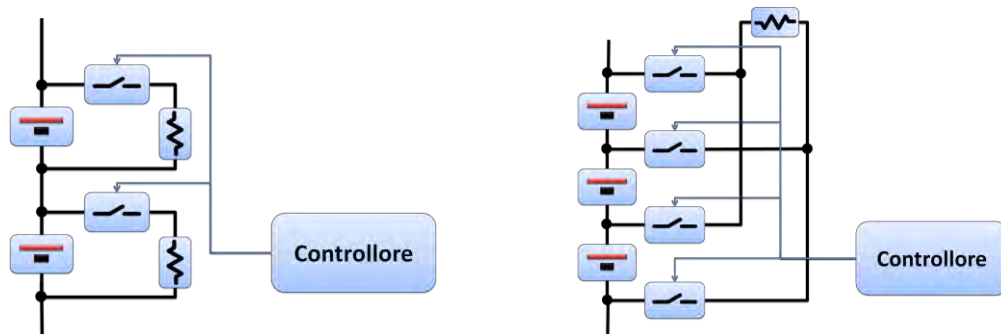


Figura 3 – Bilanciamento passivo con l'utilizzo di una resistenza per ogni cella nella soluzione di sinistra e di una sola resistenza nella soluzione di destra.

Il bilanciamento attivo si contrappone a quello passivo in quanto invece di dissipare l'energia la sposta, riequilibrando il SoC delle celle.

Le tecniche più semplici sono basate sugli *switching capacitors* [8], che si basano sull'idea di spostare la carica dalle celle a SoC maggiore su un condensatore e successivamente da quest'ultimo alle celle meno cariche. Un'architettura che sfrutta tale principio è quella mostrata in Figura 4 in cui le capacità, tramite la matrice di *switch*, possono essere connesse in parallelo a due celle adiacenti equalizzandone il valore di tensione. Una possibile modifica del sistema può essere rappresentata dalla complicazione della matrice di interruttori e l'utilizzo di un solo condensatore, quindi generando una struttura simile a quella presentata per la tecnica passiva. Tale modifica, aumentando la complessità del sistema, minimizza il tempo di bilanciamento e aumenta l'efficienza, in quanto permette di eseguire trasferimenti mirati direttamente dalle celle più cariche a quelle più scariche.

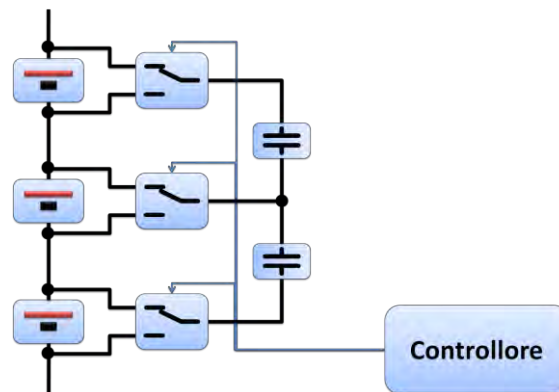


Figura 4 – Bilanciamento attivo basato su approccio switching capacitors

Altre tecniche molto utilizzate sono quelle basate sull'utilizzo di convertitori DC-DC [9]. Esse sembrano molto promettenti sia dal punto di vista del rendimento energetico sia da quello del tempo di bilanciamento. Una possibile architettura è mostrata in Figura 5. Come si può notare, essa utilizza appunto un convertitore DC-DC il cui ingresso è connettibile alla batteria tramite un interruttore e l'uscita può essere connessa alle celle tramite una matrice di *switch*. Il controllo di tale matrice non è banale in quanto, anche in questo caso, un controllo errato può portare a cortocircuiti tra celle con enormi picchi di corrente e conseguenze disastrose per gli interruttori stessi.

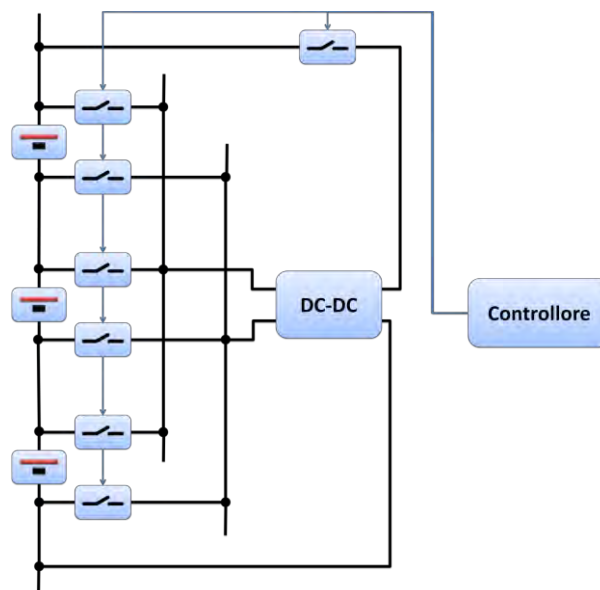


Figura 5 – Bilanciamento attivo basato sull'uso di un convertitore DC-DC

3 Funzioni di stima dello stato

In applicazioni complesse come le auto elettriche (EV) o ibride (HEV) il BMS deve fornire al sistema una serie di variabili di stato che consentano a quest'ultimo di ottimizzare l'uso della batteria e dell'intero sistema. L'esempio emblematico di tale concetto è lo stato di carica che è legato direttamente all'autonomia residua e rappresenta uno dei parametri di principale interesse per l'utilizzatore del veicolo. Nelle seguenti sottosezioni verranno analizzate le principali variabili di stato e gli algoritmi per la loro stima.

3.1 Stima dello stato di carica e dell'autonomia residua

Come brevemente accennato il calcolo dello stato di carica è una funzione di grande interesse soprattutto per l'utente finale dell'applicazione perché direttamente legato all'autonomia residua.

La definizione formale globalmente utilizzata è [10]:

$$\text{SoC} = \frac{Q}{Q_{\max}}$$

dove Q è la carica residua della cella e Q_{\max} è la carica massima immagazzinabile nella cella stessa. Analizziamo nel seguito i metodi di stima del SoC più utilizzati.

3.1.1 Tensione a vuoto

L'algoritmo più semplice si basa sulla relazione univoca tra SoC e tensione a vuoto (OCV) della cella [11]. In particolare, per tensione a vuoto si intende la tensione della cella misurata con corrente nulla dopo un tempo tale da poterla considerare costante. Infatti, se la cella passa da una condizione a corrente non nulla (carica o scarica) in una a corrente nulla si avrà un transitorio dovuto a effetti di rilassamento la cui durata è variabile con la chimica, con la capacità della cella e con le condizioni operative in cui essa si trova a lavorare (come corrente e temperatura).

La relazione OCV-SoC dipende dalla tecnologia della cella e risulta costante, con una buona approssimazione, con l'invecchiamento e al variare della temperatura.

Sfortunatamente, alla semplicità dell'algoritmo appena descritto si contrappone l'impossibilità di avere una stima temporalmente continua, data dall'impossibilità di misurare l'OCV quando le celle sono in uso. Tale caratteristica rende questo metodo poco adatto ad applicazioni ad alta potenza e con usi continuativi su grandi intervalli temporali.

3.1.2 Coulomb counting

Un algoritmo molto utilizzato è il *coulomb counting* che, come si intuisce dal nome, si basa sul conteggio delle cariche che fluiscono dalla o nella cella [12]. Ciò è ottenibile tramite l'integrazione della corrente. In particolare, l'equazione caratteristica tipicamente viene identificata come:

$$\text{SoC}(t) = \text{SoC}_0 - \frac{\int_{t_0}^t i \, d\tau}{Q_{\max}}$$

Dove SoC_0 rappresenta il SoC al tempo t_0 e la frazione è l'integrale della corrente normalizzata rispetto alla carica massima immagazzinabile nella cella; con tale definizione, dunque, lo stato di carica varierà tra 0 (cella totalmente scarica) e 1 (cella totalmente carica). Inoltre è utilizzata la convenzione standard sul segno della corrente, ossia quest'ultima è intesa positiva se uscente dalla batteria, negativa altrimenti. Come è facilmente intuibile, questo algoritmo ha una complessità limitata se l'integrale viene quantizzato come una sommatoria,

il che comporta un primo errore a cui si devono aggiungere gli errori sulla stima di SoC_0 e sulla misura della corrente.

In particolare, gli errori di misura della corrente possono essere divisi in *offset* ed errori di guadagno, di cui i primi, solitamente di entità maggiore, possono essere ridotti con tecniche di misura e correzioni appropriate. Per le caratteristiche dell'algoritmo, quindi, partendo da un valore di SoC_0 noto con una buona precisione, 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 e crescente nel tempo.

3.1.3 Model-Based

In letteratura, infine, sono stati proposti una serie di altri algoritmi definiti *model-based* e basati su grandezze non direttamente misurabili, ma ottenibili a partire da modelli più o meno complessi di cella [13]. Uno dei modelli più utilizzati è il modello elettrico mostrato nella Figura 6.

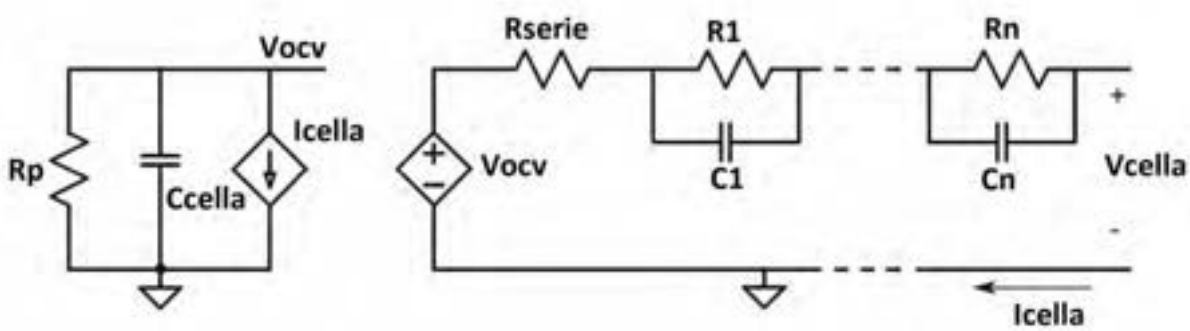


Figura 6 – Modello elettrico per celle agli ioni di litio

Esso è divisibile in due diverse sezioni: la prima utilizzata per modellare l'energia immagazzinata nella cella e formata da C_{cella} , che rappresenta la capacità della cella, dalla resistenza che modella l'autoscarica (R_p), e da un generatore controllato in corrente, che modella la corrente che scorre all'interno della cella. La tensione sulla capacità corrisponde allo stato di carica e viene utilizzata nella seconda parte del modello per pilotare il generatore comandato di tensione. Quest'ultima parte modella l'impedenza interna della cella come la serie di una resistenza (R_{serie}) e un numero variabile di gruppi R-C che descrivono gli effetti di rilassamento sulla variazione della tensione. Il modello diventa tanto più preciso quanto più è alto il numero di gruppo R-C; allo stesso tempo però, l'aumento di tale numero ne aumenta la complessità.

L'idea di fondo di tale metodo è ricavare l'OCV, tramite il modello, partendo dalla tensione e corrente di cella misurate e infine invertire la relazione OCV-SoC per ottenere lo stato di carica.

3.2 Stima dello stato di salute e della vita utile residua

In letteratura e nell'industria non vi è una definizione univoca su cos'è e come si calcola lo stato di salute di una batteria [14]. Tipicamente si definisce come una stima di quanto la batteria reale sia diversa da una nuova e ideale. Di conseguenza è calcolata come percentuale del valore di alcuni parametri misurabili o stimabili rispetto agli stessi parametri nominali della cella.

Negli ultimi anni, grazie all'aumento d'interesse per i veicoli elettrici e ibridi, l'attenzione si è andata focalizzando sulla durata della batteria. Ciò ha reso di grande interesse il parametro della capacità massima della cella, che è direttamente legata all'autonomia massima (con SoC iniziale del 100 %) del veicolo. Per questo motivo, soprattutto in applicazioni automobilistiche, lo stato di salute viene calcolato solitamente come percentuale della capacità reale della batterie rispetto a quella nominale:

$$\text{SoH}_{\%} = \frac{Q_{\max}}{C_n} * 100$$

Dalla definizione del SoH è evidente la necessità di dover stimare la capacità reale della batteria e quindi delle celle. In realtà, essa non è importante solo per la stima del SoH, ma anche per quella dello stato di carica come abbiamo visto precedentemente.

3.3 Studi sulla seconda vita delle batterie

La capacità di stimare lo stato di funzionamento della batteria sulla base del singolo ciclo di carica/scarica - come avviene per la stima del SoC - o su un periodo di tempo relativo a tutta la vita operativa - come per la stima del SoH - non ha in genere implicazioni dirette sulla sicurezza della batteria, ma ha in ogni caso riflessi notevoli sull'affidabilità di sistema. Infatti, la conoscenza accurata dello stato permette una gestione ottimizzata dei profili d'uso del veicolo, limitando il tempo in cui la batteria si trova a funzionare con i parametri in condizioni *borderline*. Pur non uscendo dall'area di funzionamento sicuro, è ipotizzabile che situazioni al limite favoriscano reazioni chimiche parassite e provochino un più rapido invecchiamento delle celle.

Tale osservazione assume particolare rilievo se si tiene conto della recente tendenza dei produttori di EV di prevedere a conclusione della vita operativa utile a bordo del veicolo, una seconda vita a terra, in installazioni di immagazzinamento energetico stazionario [15]. L'aumento del tempo di missione della batteria, seppure con requisiti diversi per la seconda vita stazionaria, pone importanti problemi sulla stima dell'invecchiamento e sulla disponibilità di modelli in grado di quantificarne gli effetti.

Nel caso in cui si attestasse la tendenza dei produttori a distribuire il tempo di vita della batteria tra due applicazioni distinte, al BMS veicolare dovrebbe essere affidato il compito importante di fornire elementi utili per identificare il momento ottimale in cui eseguire la sostituzione della batteria, con il suo trasferimento alla nuova applicazione. In questo caso - ma la ricerca in tal senso è ancora nelle sue fasi preliminari - dovranno essere messe a punto metodologie di misura (anche con l'eventuale introduzione di sensoristica e circuiteria specifica) e tecniche di stima in grado di fornire valutazioni quantitative per la messa a punto di algoritmi di minimizzazione del costo in rapporto all'energia fornita nella vita operativa, tenendo conto del valore residuo che la batteria manterrà e che sarà legato all'aspettativa di vita utile nella nuova applicazione.

4 Funzioni di integrazione di sistema

Storicamente la batteria in un'applicazione è vista come un blocco "poco intelligente" che ha il solo scopo di immagazzinare energia elettrica ma non entra negli algoritmi decisionali dell'applicazione stessa. Per le batterie agli ioni di litio questo paradigma non può essere più utilizzato. Infatti, la presenza del BMS fa sì che la batteria riesca a fornire al controller dell'applicazione una serie di informazioni essenziali per controllare in maniera ottimale l'applicazione in cui essa è assemblata. Inoltre, il controller dovrà garantire una richiesta di potenza tale da mantenere la batteria sempre nella sua SOA evitandone degradazioni premature o condizioni di eventuale pericolo. A tal proposito la batteria e il controller dell'applicazione devono essere in grado di instaurare una comunicazione bidirezionale stabile sulla quale la batteria può inviare il suo stato interno e il controller gestire le operazioni atte a prolungare la vita della batteria, come ad esempio il bilanciamento. In tale ambito, la notifica di eventuali condizioni di allarme è essenziale. Infatti la batteria avendo una comunicazione con il controller può avvisarlo che alcuni parametri stanno per uscire dalla zona operativa sicura e quindi quest'ultimo può intervenire in maniera ottimale per evitare che ciò accada. Ad esempio, se la batteria si accorge che la temperatura di una o più celle si avvicina a valori limite può notificare al controller il bisogno di ridurre la potenza erogata. In questo modo, anche se con prestazioni ridotte, l'applicazione non raggiungerà mai la condizione di blocco data dall'intervento dei sistemi di protezione della batteria, che solitamente interrompono l'erogazione della potenza.

Un altro aspetto importante è dato dalla possibilità della batteria di segnalare eventuali condizioni anomale riscontrate da funzioni di autodiagnosi che dovranno essere controllate da personale specializzato in sede di manutenzione. Tale funzione è fondamentale per evitare che problemi facilmente risolvibili in sede di manutenzione comportino danneggiamenti permanenti della batteria o addirittura situazioni di pericolo per l'utilizzatore dell'applicazione. Questa funzionalità diventa sempre più importante con l'aumento delle richieste prestazionali delle batterie che raggiungono livelli di costo importanti se paragonate al costo totale dell'applicazione.

4.1 Considerazioni sull'affidabilità del BMS

L'uso di circuiti elettronici per monitorare le condizioni di funzionamento delle celle agli ioni di litio e garantire il loro mantenimento in condizioni di sicurezza annulla i rischi dovuti agli abusi a cui sarebbero esposte se ci limitasse a realizzare la batteria come semplice connessione elettrica serie/parallelo delle celle. Come descritto nell'analisi precedente, i principali parametri di funzionamento sono tensione, corrente e temperatura e la fuoriuscita dai limiti di sicurezza forniti per queste grandezze dal produttore (a volte anche in modo articolato, con riferimento all'andamento del tempo delle grandezze, come nel caso delle correnti) aumenta enormemente la probabilità di un evento catastrofico che, a partire dalla singola cella, può portare alla distruzione del veicolo e a rischi illimitati per l'ambiente circostante.

La sicurezza quindi di una batteria con BMS è fortemente condizionata dalla affidabilità del BMS stesso, che può garantire gli effetti di mitigazione dei rischi come da progetto solo se esso stesso è perfettamente operativo. Per quanto l'affidabilità (probabilità di adempiere alla missione assegnata per un tempo di missione prefissato) di un normale sistema elettronico sia mediamente molto elevata, nel caso in esame non può essere considerata sufficientemente alta da trascurare completamente gli effetti di un possibile guasto per due ordini di motivi:

- Nel caso di adozione generalizzata di sistemi di mobilità elettrica, i numeri di sistemi circolanti sarebbero così elevati da rendere rilevante una probabilità di fallimento anche molto bassa.
- Le conseguenze finali derivanti dalla perdita non diagnosticata di operatività del BMS, danni economici rilevantissimi e soprattutto perdita di vite umane, assumono gravità tale da rendere inaccettabile l'uso di sistemi in cui non sia stato fatto tutto ciò che ragionevolmente lo stato dell'arte prevede per applicazioni analoghe.

Per questo motivo quindi la progettazione di un BMS per applicazioni automotive dovrà (dovrebbe) seguire approcci e normative analoghe a quelle di altri sistemi elettronici già presenti a bordo degli autoveicoli e inerenti funzioni con forte impatto sulla sicurezza del veicolo. In particolare hanno rilevanza normative [16] che mirano a definire e valutare quantitativamente un *safety integrity level* adeguato all'applicazione.

Fortunatamente la progettazione elettronica ha raggiunto un livello di maturità tale da permettere l'implementazione di tecniche in grado di garantire il raggiungimento dei livelli di integrità richiesti, ricorrendo a tecniche di ridondanza hardware e software e introducendo nella comunicazione tra i diversi sottosistemi digitali codifiche robuste con rivelazione e - volendo - anche correzione di errore. Poiché l'ottenimento di adeguati livelli di affidabilità è comunque associato a un incremento del costo di produzione, è fondamentale che la normativa stabilisca i target con chiarezza e che le verifiche del raggiungimento degli obiettivi siano affidate anche a enti indipendenti da quelli legati ai produttori dei veicoli (si veda il caso dieselgate per le emissioni inquinanti).

Inoltre, occorre tenere presente che il raggiungimento di un livello adeguato di affidabilità per il BMS non ha alcun effetto sui rischi per la sicurezza posti da guasti critici nelle celle non dovuti a condizioni monitorabili esternamente, quali la fuga termica prodotta da cortocircuiti interni, solitamente indotti da processi di carica con corrente elevata. La mitigazione di questa tipologia di rischi potrebbe essere garantita, e quindi resa cogente nei sistemi automotive, con diversi approcci, la cui efficacia dovrebbe però essere oggetto di sperimentazioni che richiedono la collaborazione dei produttori delle celle e dei costruttori dei veicoli. In particolare:

- Provvedimenti nella progettazione meccanica e termica che limitino la probabilità che la fuga termica di una cella - con conseguente principio di incendio - si propaghi in modo incontrollato al modulo e all'intera batteria.
- Aumento della conoscenza della fisica dei fenomeni che causano guasti catastrofici in modo da associare tramite modelli l'insorgenza e l'evoluzione di questi fenomeni a grandezze misurabili esternamente con tecniche opportune.
- Inserimento nel BMS di funzioni di diagnostica predittiva, in grado di evidenziare tramite la misura accurata di parametri fisici ed elettrici (per esempio tramite l'esecuzione di tecniche di spettroscopia di impedenza) l'aumento di probabilità di certe tipologie di guasto.

Infine occorre valutare i rischi per la sicurezza posti da condizioni decisamente anomale in cui la batteria può venire a trovarsi. La stima delle probabilità di questo tipo di eventi non è semplice e può derivare da un'analisi delle serie storiche degli eventi, ammesso che questi siano registrati e disponibili in qualche forma.

- Tra questi eventi sono sicuramente i più frequenti i danni alla batteria come conseguenza di urto per incidente. Assume rilievo per la valutazione del rischio, la forma e il materiale da cui è formato il contenitore, la posizione all'interno del veicolo, il tipo e la forza dell'urto. Sicuramente nella normale progettazione di un BMS questi eventi non sono considerati, ma non appare impossibile dotare i sistemi di gestione della batteria di sensori ambientali, per esempio accelerometri, in grado di informare il sistema di un evento avverso in tempi dell'ordine del millisecondo, in tempo per adottare un qualche tipo di provvedimento in grado di ridurre le conseguenze dell'impatto.
- Un altro evento avverso può essere costituito dalla penetrazione di corpi metallici nel vano batteria, con lesione del contenitore delle celle e cortocircuiti generalizzati tra le sezioni della batteria coinvolta. Anche per questo tipo di evento possono essere pensate e valutate protezioni passive (corazze, schermi di materiale opportuno) ed elettriche, quali la presenza di fusibili distribuiti in grado di intervenire anche se non è coinvolta la batteria nella sua interezza.

L'elenco potrebbe continuare, ma il principio che interessa evidenziare è che, anche in funzione dell'area geografica di riferimento (per esempio in certi paesi il rischio di allagamenti potrebbe essere superiore ad altri), sulla base di eventi registrati e analizzati, potrebbe essere necessario intervenire sul BMS o sull'intera batteria in modo da valutare e mitigare rischi specifici.

5 Architetture Hardware dei BMS

Le funzionalità del BMS possono essere ottenute con diverse strutture hardware. In batterie di piccole dimensioni (1-20 celle) il BMS viene solitamente sviluppato utilizzando una soluzione centralizzata dove tutte le funzioni vengono sviluppate su un'unica scheda. Tale approccio non è possibile in batterie di grandi dimensioni come quelle automotive, in quanto tale soluzione risulterebbe troppo complessa e onerosa. Inoltre, la connessione in serie di un gran numero di celle e quindi la gestione di elevate tensioni aumenta l'attenzione richiesta rispetto al problema dell'isolamento nella progettazione di un BMS. Tale problema ha le maggiori ripercussioni sulla funzione di monitoraggio, in quanto, il BMS deve poter leggere le tensioni di cella anche se esse presentano valori di tensione a modo comune rispetto al riferimento anche di diverse centinaia di volt.

Per questi motivi i BMS a struttura gerarchica sembrano essere la soluzione più promettente e flessibile per la gestione di accumulatori di grandi dimensioni: questi distribuiscono le funzioni di monitoraggio e gestione su differenti livelli, rendendo più semplice la progettazione del sistema poiché ogni livello svolge solo poche funzioni [17], [18]. Più livelli possono inoltre svolgere la stessa funzione, in modo da incrementarne l'affidabilità.

Le architetture più utilizzate nello sviluppo di BMS sono due. La prima basata su un approccio cella-modulo-batteria in cui il BMS viene diviso su tre livelli come viene mostrato in Figura 7 [19].

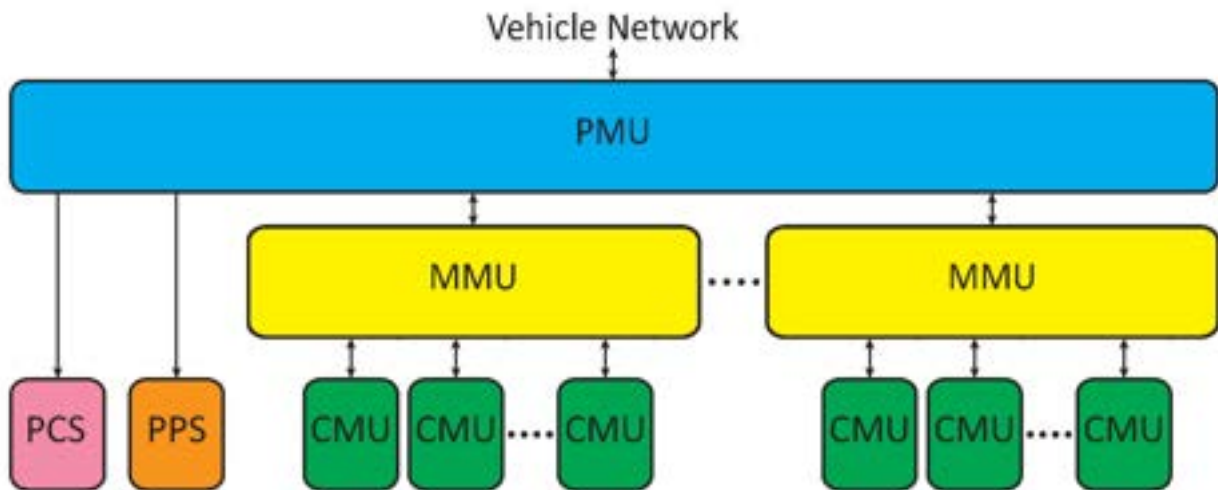


Figura 7 – Schema a blocchi di un possibile architettura cella-modulo-batteria per il BMS gerarchico. Gli acronimi usati sono i seguenti: Pack Management Unit (PMU), Pack Protection Switch (PPS), Pack Current Sensor (PCS), Module Management Unit (MMU), Cell Monitoring Unit (CMU).

Il livello inferiore è costituito da una scheda per cella che solitamente ha il compito di monitorare la sua tensione, temperatura e corrente e di comunicare tali informazioni al livello gerarchico superiore. Solitamente la cella con la relativa scheda viene detta *smart cell* [20]. Il secondo livello di elettronica è formato da una serie di schede che controllano un gruppo di *smart cell* (modulo) ciascuna. Questo livello hanno solitamente il compito di raccogliere le informazioni provenienti dalle celle ed effettuare le stime dei parametri interni delle stesse. Inoltre, le schede di questo livello comunicano con la scheda di gestione della batteria che partendo dalle informazioni provenienti dalle schede dei livelli sottostanti esegue le funzioni di gestione dell'intero pacco. Quest'ultimo livello esegue infine le stime dei parametri di batteria e comunica con il sistema di controllo dell'applicazione per una corretta e ottimizzata gestione della batteria.

La seconda architettura usata nella progettazione di un BMS elimina il livello di elettronica legata alle celle utilizzando un architettura a due livelli modulo-batteria per ridurre il numero di schede diverse nel sistema [21], [22].

Uno schema a blocchi generale di questa architettura è riportato in Figura 8.

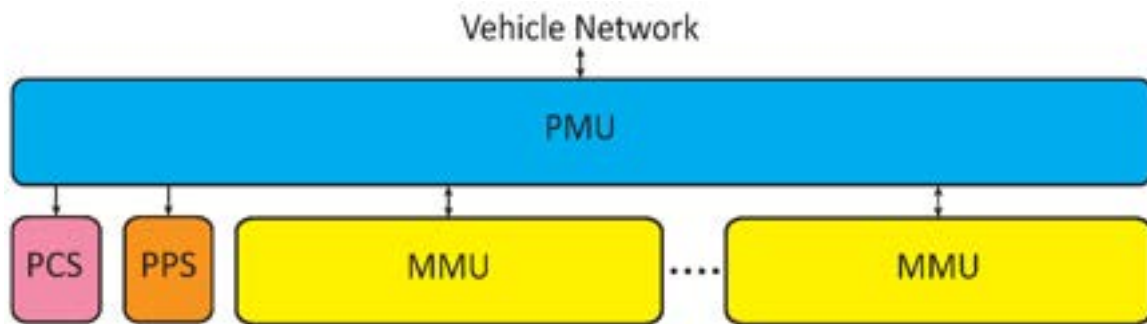


Figura 8 – Schema a blocchi di un possibile architettura modulo-batteria per il BMS gerarchico. Gli acronimi usati sono i seguenti: Pack Management Unit (PMU), Pack Protection Switch (PPS), Pack Current Sensor (PCS), Module Management Unit (MMU).

In tale architettura, la scheda del modulo ha il compito di acquisire tutte le grandezze (tensione corrente e temperatura) delle celle che esso gestisce e di eseguire gli algoritmi di stima delle loro variabili interne. Tali schede comunicano con la scheda di gestione del pacco batteria che come nell'architettura precedente ha il compito di gestire la batteria in accordo con l'applicazione.

5.1 Monitoraggio dei parametri di cella

La funzione di monitoraggio, come già detto è la funzione principale in un BMS. L'Hardware solitamente usato per implementare tale funzione dipende fortemente dall'architettura di BMS scelta [23]. Infatti nel caso di architettura basata su *smart cell* solitamente tale funzione è sviluppata sfruttando le periferiche di acquisizione analogica (ADC) del microcontrollore che gestisce la scheda della cella e un semplice *front-end* analogico con funzione di adattamento dei livelli di tensione e filtraggio.

Nella architettura a due livelli, invece, la funzione di monitoraggio delle grandezze delle celle di un modulo è solitamente sviluppata utilizzando due diversi approcci: circuito custom o circuiti integrati specifici per questa funzione

Nel primo caso, il progettista ha ovviamente maggior flessibilità in quanto progetterà tale funzione partendo dalle specifiche dell'applicazione. Allo stesso tempo, tale soluzione ha diversi svantaggi: è più onerosa, richiede un maggior tempo di sviluppo, è meno flessibile al riuso del BMS per altre applicazioni e soprattutto meno sicura.

Per questi motivi, molte 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 [24]. Tali circuiti solitamente vengono detti chip monitor o stack monitor. E da precisare che tali chip solitamente non posseggono capacità di calcolo per poter implementare algoritmi di controllo e quindi devono o essere sempre affiancati a microcontrollori che ne gestiscono le funzionalità di acquisizione e implementino le restanti funzioni del BMS.

Come si può osservare dalla Tabella 1, in cui sono stati confrontati tre chip monitor di diverse case produttrici, essi solitamente sono in grado di monitorare da 4 a 16 tensioni di celle connesse in serie e alcuni segnali ausiliari, utilizzabili per esempio per acquisire la temperatura delle celle. Solitamente essi sono anche dotati di alcuni segnali digitali di ingresso/uscita con i quali possono acquisire uscite di sensori digitali o controllare semplici sistemi di attuazione (ad esempio delle ventole di raffreddamento).

Un'altra importante caratteristica di tali chip è la possibilità di far comunicare tra loro più chip monitor. Infatti, tali chip sono solitamente dotato di due interfacce di comunicazione isolate attraverso le quali è possibile connettere i moduli secondo un'architettura a daisy-chain. La comunicazione della chain è gestita

completamente dai moduli che devono però essere configurati e controllati da un ulteriore dispositivo, ad esempio un microcontrollore, che comunica con il chip più in basso nella daisy-chain. 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 dal microcontrollore. Per questo solitamente esiste una seconda linea di comunicazione all'interno della chain attraverso la quale i chip dei moduli possono propagare eventuali segnalazioni di errore fino ad avvertire il dispositivo di controllo usando un segnale dedicato. Dunque, usando questa comunicazione il dispositivo di gestione interroga periodicamente tutti i moduli della chain ricevendo in risposta tutte le grandezze misurate e tutti i possibili fault individuati dai chip monitor.

Name Manufacturer	BQ76PL455A-Q1 Texas Instruments	LTC6813-1 Analog Devices	ISL78610 Renesas
Number of cells ICs daisy-chain	from 6 to 16 up to 16	up to 18 up to 17	up to 12 up to 14
Additional inputs	8 analog + 6 GPIOs	9 GPIOs/analog	4 analog
ADC	14 bit	3 x 16 bit	13 bit
Measurement time for all cells	2-40 ms	0.29 ms	0.24 ms
Accuracy (depends on the ADC configuration and temperature range)	from ± 1 mV to ± 7 mV	from ± 2 mV to ± 6 mV	± 10 mV
Communication with host	UART (1 Mb/s)	SPI (1 Mb/s)	SPI (2 Mb/s)
Communication through daisy-chain	proprietary differential	isoSPI	proprietary differential
Balancing	Passive	Passive	Passive
Compliance	AEC-Q100	ISO 26262	AEC-Q100
Cost	12€	13€	8€

Tabella 1 - Tabella riassuntiva delle principali caratteristiche di tre chip monitor commerciali.

Questa possibilità consente al progettista di basare il livello di gestione dei moduli sul solo chip monitor facendo controllare i moduli alla scheda di gestione del pacco, con una riduzione del costo totale dell'elettronica del BMS.

La soluzione basata su chip monitor, inoltre, aumenta anche 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.

5.2 Misura della corrente

La funzione di misura della corrente può essere implementata in diversi livelli della struttura gerarchica del BMS. Solitamente essa viene eseguita nel livello gerarchico superiore in quanto la batteria è formata da celle connesse in serie e quindi basta un unico punto di misura per ottenere la corrente che scorre in tutte le celle. Nella trattazione seguente viene fatta questa assunzione ma i concetti espressi possono essere facilmente generalizzati in caso di soluzioni differenti.

Innanzitutto, per misurare la corrente solitamente vengono utilizzati due tecniche diverse: le resistenze di shunt e i sensori basati su effetto hall. Nelle prime, viene inserita una resistenza di valore molto basso nel percorso di corrente e con un front-end analogico specifico viene letta la caduta di tensione ai suoi capi. Tale caduta ovviamente è proporzionale alla corrente e al valore di resistenza utilizzato. Tale soluzione è molto economica ma introduce una perdita di energia sulla resistenza e necessita di particolari attenzioni progettuali per ottenere una buona accuratezza nella misura della corrente. I sensori basati su effetto hall, invece, 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.

Un'altra scelta importante è il posizionamento del sensore di misura della corrente all'interno della serie delle celle. Esso viene solitamente posto in serie al terminale positivo o negativo della batteria e la scelta tra le due soluzioni dipende fortemente dal sensore scelto. Infatti, nel l'uso delle tecniche basate su resistenza di shunt si predilige montare il sensore di corrente sul terminale negativo altrimenti l'acquisizione della caduta di tensione sulla resistenza risulta essere difficoltosa; in quanto presenta un valore di tensione a modo comune pari alla tensione di batteria e quindi di diverse centinaia di volt.

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 o il polo negativo della stessa e quindi dopo il sensore di corrente. La prima soluzione complica il *front-end* necessario alla lettura della misura di corrente in quanto la tensione di uscita del sensore è negativa, invece la seconda soluzione complica la comunicazione tra la scheda di controllo del pacco batteria con quella dei moduli perché le due schede non hanno lo stesso riferimento di tensione.

5.3 Esecuzione delle stime

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 e per avere ridondanza nella stima. Tale ridondanza può essere ottenuta utilizzando gli stessi algoritmi su più livelli oppure utilizzando algoritmi diversi, più complessi nei livelli superiori che possono essere utilizzati per verificare condizioni particolari evidenziate dagli algoritmi più semplici eseguiti dal livello del BMS inferiore.

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 incrementando 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. In tal modo l'unità di controllo generale può essere sgravata dalla funzione di stima e focalizzarsi sul controllo ottimale della batteria [25].

6 Conclusioni

Nel presente rapporto sono state descritte le principali caratteristiche funzionali dei BMS per applicazioni automotive e sono state esaminate le possibili implementazioni come architettura e soluzioni circuitali; lo studio si è posto in particolare l'obiettivo di individuare il possibile (e auspicabile) impatto di questo importante sistema elettronico a servizio della batteria sull'affidabilità complessiva e sulla sicurezza (per gli aspetti comunemente indicati in modo più appropriato dal termine inglese *safety*) del sistema di accumulo di energia.

L'obiettivo finale della presente ricerca è consistito infatti nel supporto a una analisi con metodologia HAZOP sviluppata in stretta collaborazione con l'unità di ricerca di Unipi presso il DICl, coordinata dal prof. Carcassi, relativa a un sistema batteria, ipotetico ma del tutto realistico, costituito, oltre che dalle celle agli ioni di litio, da un vero BMS per applicazioni automobilistiche. Il BMS considerato è stato scelto per le sue caratteristiche di completezza e per il rispetto della normativa tecnica rilevante nelle applicazioni automotive e inoltre perché completamente documentato in modo aperto e accessibile [26]. I risultati di questa parte di attività costituiscono il contenuto di un secondo report specifico prodotto dall'unità di ricerca.

A conclusione dell'attività, possono essere sottolineati alcuni aspetti importanti per prevedere l'evoluzione delle caratteristiche di sicurezza della mobilità elettrica e di cui si dovrà tenere conto nella gestione "politica" - fatta di normative tecniche, prescrizioni e obblighi per i diversi soggetti interessati, investimenti in infrastrutture pubbliche, incentivi - dell'evoluzione della mobilità elettrica.

- Il dato fondamentale per valutare la sicurezza di un sistema di accumulo elettrochimico è dato dall'affidabilità delle celle usate. I sistemi elettronici progettati per la corretta gestione della batteria possono mitigare tutti i rischi legati ai normali parametri di funzionamento, indirizzando il sistema verso una condizione *fail-safe* nel caso in cui questi parametri escano dagli intervalli consentiti. Sono molto minori le possibilità di intervento rispetto a guasti catastrofici interni delle celle, causati in modo aleatorio da meccanismi di guasto legati solo marginalmente alle condizioni di funzionamento.
- Per valutazioni quantitative delle probabilità degli eventi avversi che possono coinvolgere le celle - in condizioni di riposo, durante il normale funzionamento entro l'area di funzionamento sicuro e in condizione di abuso - occorre la collaborazione dei produttori con l'eventuale coinvolgimento di enti certificatori, che dovrebbero arricchire i *datasheet* di dati affidabilistici completi, svolgendo ampie campagne di rilevamento su lotti consistenti di celle elementari.
- Per gli eventi legati alle comuni condizioni operative, il BMS può mitigare praticamente tutte le cause di rischio individuate, eseguendo un monitoraggio con le dovute caratteristiche di accuratezza e velocità di acquisizione e intervenendo a vari livelli, sia dialogando con l'intelligenza di gestione del veicolo, sia operando autonomamente nella direzione di una condizione *fail-safe*.
- Visto che l'intervento del BMS in questi casi diviene elemento integrante della sicurezza della batteria e quindi del veicolo, la sua progettazione deve sottostare a rigorosi criteri affidabilistici, a somiglianza di quanto già avviene per gli attuali componenti elettronici di bordo *safety-critical*, come le centraline che gestiscono ABS, cruise control, drive-by-wire, ecc. Le valutazioni quantitative dell'affidabilità di questi sistemi complessi possono essere condotte con tecniche analitiche e sfruttare il bagaglio tecnico e normativo messo a punto a partire già da oltre un decennio.
- Le considerazioni fatte non coprono le condizioni particolari che si creano, per esempio, in caso di incidente, allagamenti o altro evento eccezionale in cui il veicolo a batteria sia coinvolto. La gestione della sicurezza della batteria per questi casi, e l'adozione di misure in grado di mitigare le conseguenze peggiori (incendio, esplosione, elettrocuzione), richiede sicuramente molto altro lavoro, in vari settori e con notevoli investimenti, a similitudine di quanto nel recente passato è stato fatto

per la sicurezza della mobilità con i crash test e lo sviluppo di modellistica in grado di prevedere e simulare il comportamento delle parti strutturali di un veicolo in caso di incidente. Di importanza essenziale, per la valutazione delle probabilità dei vari eventi e dell'efficacia delle soluzioni adottate dai vari produttori, l'esistenza di un registro pubblico obbligatorio e aperto, relativo agli incidenti in cui la batteria del veicolo ha avuto un ruolo importante (come causa o nel determinare le conseguenze).

7 Abbreviazioni, acronimi e definizioni

ADC	Analog Digital Converter
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
BMS	Battery Management System (Sistema elettronico associate ad un pacco che controlla e gestisce in modo sicuro lo stato elettrico e termico lo l'ambiente e che comunica lo stato della batteria al controllore del il suo complesso (es: Vehicle Management System (VMS) e/o Energy nt System (EMS)).
CAN	Controller Area Network
CMU	Cell Monitoring Unit
DICI	Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale
EV	Electric vehicle (Veicolo elettrico)
HAZOP	Hazard and Operability Analysis.
HEV	Hybrid Electric Vehicle (Veicolo elettrico ibrido)
HW	Hardware
IC	Integrated Circuit
MMU	Module Management Unit
OCV	Open Circuit Voltage (Tensione a vuoto)
PCS	Pack Current Sensor
PMU	Pack Monitoring Unit
PPS	Pack Protection Switch
SOA	Safe Operation Area
SoC	State of Charge (Capacità disponibile della batteria o sistema in uso, er stimare la corrente di carica di una batteria in uso).
SoF	State of Function
SoH	State of Health
SW	Software
Unipi	Università di Pisa

8 Riferimenti bibliografici

- [1] L. Lu, X. Han, J. Li, J. Hua, and M. Ouyang, "A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles," *J. Power Sources*, vol. 226, pp. 272–288, Mar. 2013.
- [2] "IEEE Guide for the Characterization and Evaluation of Lithium-Based Batteries in Stationary Applications," Dec. 2018.
- [3] H. Rahimi-Eichi, U. Ojha, F. Baronti, and M.-Y. Chow, "Battery Management System: An Overview of Its Application in the Smart Grid and Electric Vehicles," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 7, no. 2, pp. 4–16, 2013.
- [4] R. Schwarz, K. Semmler, M. Wenger, V. R. H. Lorentz, and M. März, "Sensorless Battery Cell Temperature Estimation Circuit for Enhanced Safety in Battery Systems," in *IECON 2015 - 41st Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.*, 2015, pp. 1536–1541.
- [5] A. C. Baughman and M. Ferdowsi, "Double-tiered switched-capacitor battery charge equalization technique," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 6, pp. 2277–2285, Jun. 2008.
- [6] J. Cao, N. Schofield, and A. Emadi, "Battery balancing methods: A comprehensive review," in *2008 IEEE Veh. Power Propuls. Conf.*, 2008, pp. 1–6.
- [7] J. Qi and D. Dah-Chuan Lu, "Review of battery cell balancing techniques," in *2014 Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC 2014 - Proceedings*, 2014, pp. 1–6.
- [8] M. Daowd, N. Omar, P. Van Den Bossche, and J. Van Mierlo, "Passive and active battery balancing comparison based on MATLAB simulation," in *2011 IEEE Veh. Power Propuls. Conf.*, 2011, pp. 1–7.
- [9] F. Baronti, C. Bernardeschi, L. Cassano, A. Domenici, R. Roncella, and R. Saletti, "Design and Safety Verification of a Distributed Charge Equalizer for Modular Li-Ion Batteries," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 10, no. 2, pp. 1003–1011, May 2014.
- [10] S. Piller, M. Perrin, and A. Jossen, "Methods for state-of-charge determination and their applications," in *Journal of Power Sources*, 2001, vol. 96, no. 1, pp. 113–120.
- [11] G. (Gianfranco) Pistoia, *Lithium-ion batteries : advances and applications*. Elsevier, 2014.
- [12] I. Baccouche, A. Mlayah, S. Jemmali, B. Manai, and N. E. Ben Amara, "Implementation of a Coulomb counting algorithm for SOC estimation of Li-Ion battery for multimedia applications," in *12th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, SSD 2015*, 2015, pp. 1–6.
- [13] R. Morello, W. Zamboni, F. Baronti, R. Di Rienzo, R. Roncella, G. Spagnuolo, and R. Saletti, "Comparison of State and Parameter Estimators for Electric Vehicle Batteries," in *IECON 2015 - 41st Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.*, 2015, pp. 5433–5438.
- [14] B. Balagopal and 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 *Proceeding - 2015 IEEE International Conference on Industrial Informatics, INDIN 2015*, 2015, pp. 1302–1307.
- [15] J. Knox, "Nissan, ABB link to evaluate second-life storage applications for Nissan LEAF battery packs," *Automot. Ind. AI*, vol. 192, no. 1, 2012.
- [16] International Organization for Standardization, "ISO 26262-1:2011 Road Vehicles — Functional Safety." 2011.
- [17] H. Kim and K. G. Shin, "DESA: Dependable, Efficient, Scalable Architecture for Management of Large-Scale Batteries," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 8, no. 2, pp. 406–417, 2012.
- [18] C.-H. Kim, M.-Y. Kim, and G.-W. Moon, "A Modularized Charge Equalizer Using a Battery Monitoring IC for Series-Connected Li-Ion Battery Strings in Electric Vehicles," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 8, pp. 3779–3787, 2013.
- [19] F. Baronti, G. Fantechi, R. Roncella, R. Saletti, and P. Terreni, "Hardware building blocks of a hierarchical battery management system for a fuel cell HEV," in *IECON 2012 - 38th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.*, 2012, pp. 4041–4047.
- [20] F. Baronti, G. Fantechi, R. Roncella, and R. Saletti, "Intelligent cell gauge for a hierarchical battery management system," in *2012 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, ITEC 2012*, 2012, pp. 1–5.

- [21] F. Baronti, R. Di Rienzo, R. Moras, R. Roncella, R. Saletti, G. Pede, and F. Vellucci, "Implementation of the fast charging concept for electric local public transport: The case-study of a minibus," in *2015 IEEE 13th Int. Conf. Ind. Informatics*, 2015, pp. 1284–1289.
- [22] R. Di Rienzo, F. Baronti, F. Vellucci, F. Cignini, F. Ortenzi, G. Pede, R. Roncella, and 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 and International Transportation Electrification Conference, ESARS-ITEC 2016*, 2017, pp. 1–6.
- [23] J. Li, S. Wang, C. Fernandez, N. Wang, and H. Xie, "The Battery Management System Construction Method Study for the Power Lithium-ion Battery Pack," *2017 2nd Int. Conf. Robot. Autom. Eng.*, pp. 285–289, Dec. 2017.
- [24] P. Weicker, *A Systems Approach to Lithium-Ion Battery Management*. Publishers, Artech House, 2013.
- [25] R. Morello, F. Baronti, X. Tian, T. Chau, R. Di Rienzo, R. Roncella, B. Jeppesen, W. H. Lin, T. Ikushima, and R. Saletti, "Hardware-in-the-Loop Simulation of FPGA-based State Estimators for Electric Vehicle Batteries," in *to be presented at ISIE 2016*.
- [26] M. Giegerich, M. Akdere, C. Freund, T. Fühner, J. L. Grosch, S. Koffel, R. Schwarz, S. Waldhör, M. Wenger, V. R. H. Lorentz, and M. März, "Open, flexible and extensible battery management system for lithium-ion batteries in mobile and stationary applications," in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2016, vol. 2016–Novem, pp. 991–996.

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. Dopo una borsa di studio svolta presso il DII, ha conseguito nel 2018 il dottorato di ricerca in Ingegneria dell'Informazione. Attualmente è beneficiario di un assegno di ricerca cofinanziato dalla regione Toscana. 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 state svolte nell'ambito dell'agricoltura di precisione, in cui si è concentrato nello studio e sviluppo di un sistema di misura, basato sensori ultrasonici low-cost, in grado di eseguire una scansione tridimensionale di una coltivazione per estrarne informazioni sul volume vegetativo da utilizzare per ottimizzare le lavorazioni agricole da eseguire su di essa.

Andrea Carloni

Ha conseguito la laurea in Ingegneria Elettronica presso l'università di Pisa nel 2017. È attualmente al secondo anno del Dottorato di Ricerca in Ingegneria dell'Informazione presso la stessa università. Svolge attività di ricerca 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.