

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA ELETTRONICA

Corso di Laurea triennale in INGEGNERIA ELETTRONICA

Studio di architetture e algoritmi per il

Battery Management System (BMS)

Study of architectures and Battery

Management System (BMS) algorithms

Relatore: Chiar.mo Prof. Simone Orcioni Tesi di Laurea di David Ratti

Correlatore: Chiar.mo Prof. Massimo Conti

A.A. 2019/2020

Sommario

I BMS: Definizione, caratteristiche e obiettivi principali 4 1.1 Dalle batterie singole ai pacchetti batteria 5 1.2 Componenti di un pacco batteria ad alta tensione (HV) 6 1.3 Utilizzo dei circuiti integrati (IC) nel BMS 7 1.4 Elenco delle 32 tipologie BMS disponibili 7 2 SOTTOCOMPONENTI DEL BMS E TOPOLOGIE 17 2.1 BMS Centralizzato 17 2.2 BMS Modulare e Master-Slave 18 2.3 BMS Distribuito 18 2.4 Architettura software del BMS 20 3 VARIABILI DI STATO NELLA BATTERIA: SoC, SoH 21 3.1 Lo Stato di Carica 21 3.2 Stima del SoC: metodi Ampere-hour counting o Coulomb counting 21 3.3 Test di scarica 22 3.4 Open Circuit Voltage method (OCV method) 22 3.5 Model based method 22 3.6.1 RUL (Remaining Useful Life) 23 3.6.2 Dob (Depth of Discharge) 23 3.6.3 Eot e EOD 23 3.6.4 Gettione dell'e	IN	TROE	OUZIONE			
1.1 Dalle batterie singole ai pacchetti batteria 5 1.2 Componenti di un pacco batteria ad alta tensione (HV) 6 1.3 Utilizzo dei circuiti integrati (IC) nel BMS 7 1.4 Elenco delle 32 tipologie BMS disponibili 7 2 SOTTOCOMPONENTI DEL BMS E TOPOLOGIE 17 2.1 BMS Centralizzato 17 2.2 BMS Modulare e Master-Slave 18 2.3 BMS Distribuito 18 2.4 Architettura software del BMS 20 3 VARIABILI DI STATO NELLA BATTERIA: SoC, SoH 21 3.1 Lo Stato di Carica 21 3.2 Stima del SoC: metodi Ampere-hour counting o Coulomb counting 21 3.3 Test di scarica 22 3.4 Open Circuit Voltage method (OCV method) 22 3.5 Model based method 22 3.6.1 RUL (Remaining Useful Life) 23 3.6.2 Do (Depth of Discharge) 23 3.6.3 EoL e EoD 23 3.6.3 EoL e EoD 23 3.6.4 Gestione dell'energia termica della batteria <t< th=""><th>1</th><th>BI</th><th colspan="4">BMS: Definizione, caratteristiche e obiettivi principali</th></t<>	1	BI	BMS: Definizione, caratteristiche e obiettivi principali			
1.2 Componenti di un pacco batteria ad alta tensione (HV) 6 1.3 Utilizzo dei circuiti integrati (IC) nel BMS 7 1.4 Elenco delle 32 tipologie BMS disponibili 7 2 SOTTOCOMPONENTI DEL BMS E TOPOLOGIE 17 2.1 BMS Centralizzato 17 2.1 BMS Centralizzato 17 2.2 BMS Modulare e Master-Slave 18 2.3 BMS Distribuito 18 2.4 Architettura software del BMS 20 3 VARIABILI DI STATO NELLA BATTERIA: SoC, SoH 21 3.1 Lo Stato di Carica 21 3.2 Stima del SoC: metodi Ampere-hour counting o Coulomb counting 21 3.3 Test di scarica 22 3.4 Open Circuit Voltage method (OCV method) 22 3.5 Model based method 22 3.6.1 RUL (Remaining Useful Life) 23 3.6.2 DoD (Depth of Discharge) 23 3.6.3 EoL e EoD 23 3.6.4 FOD 23 3.6.3 EoL e EoD 23 3.6.4 Gestio		1.1	Dalle batterie singole ai pacchetti batteria5			
1.3 Utilizzo dei circuiti integrati (IC) nel BMS 7 1.4 Elenco delle 32 tipologie BMS disponibili 7 2 SOTTOCOMPONENTI DEL BMS E TOPOLOGIE 17 2.1 BMS Centralizzato 17 2.2 BMS Modulare e Master-Slave 18 2.3 BMS Distribuito 18 2.4 Architettura software del BMS 20 3 VARIABILI DI STATO NELLA BATTERIA: SoC, SoH 21 3.1 Lo Stato di Carica 21 3.2 Stima del SoC: metodi Ampere-hour counting o Coulomb counting 21 3.3 Test di scarica 22 3.4 Open Circuit Voltage method (OCV method) 22 3.5 Model based method 22 3.6 Parametri secondari della batteria 23 3.6.1 RUL (Remaining Useful Life) 23 3.6.2 DoD (Depth of Discharge) 23 3.6.3 EoL e EoD 23 4 GESTIONE TERMICA DELLA BATTERIA DI ALIMENTAZIONE 24 4.1 Gestione dell'energia termica della batteria 26 4.2 Gestione termica mediante PCM (Phase Chan		1.2	Componenti di un pacco batteria ad alta tensione (HV)6			
1.4 Elenco delle 32 tipologie BMS disponibili 7 2 SOTTOCOMPONENTI DEL BMS E TOPOLOGIE 17 2.1 BMS Centralizzato 17 2.2 BMS Modulare e Master-Slave 18 2.3 BMS Distribuito 18 2.4 Architettura software del BMS 20 3 VARIABILI DI STATO NELLA BATTERIA: SoC, SoH 21 3.1 Lo Stato di Carica 21 3.2 Stima del SoC: metodi Ampere-hour counting o Coulomb counting 21 3.3 Test di scarica 22 3.4 Open Circuit Voltage method (OCV method) 22 3.5 Model based method 22 3.6.1 RUL (Remaining Useful Life) 23 3.6.2 DoD (Depth of Discharge) 23 3.6.3 EoL e EoD 23 3.6.3 EoL e EoD 23 4 GESTIONE TERMICA DELLA BATTERIA DI ALIMENTAZIONE 24 4.1 Gestione dell'energia termica della batteria 26 4.2 Gestione termica mediante PCM (Phase Change Materials) 29 4.3 Analisi delle prestazioni dei PHEV in condizioni di b		1.3	Utilizzo dei circuiti integrati (IC) nel BMS7			
2 SOTTOCOMPONENTI DEL BMS E TOPOLOGIE 17 2.1 BMS Centralizzato 17 2.2 BMS Modulare e Master-Slave 18 2.3 BMS Distribuito 18 2.4 Architettura software del BMS 20 3 VARIABILI DI STATO NELLA BATTERIA: SoC, SoH 21 3.1 Lo Stato di Carica 21 3.2 Stima del SoC: metodi Ampere-hour counting o Coulomb counting 21 3.3 Test di scarica 22 3.4 Open Circuit Voltage method (OCV method) 22 3.5 Model based method 22 3.6.1 RUL (Remaining Useful Life) 23 3.6.2 DoD (Depth of Discharge) 23 3.6.3 EoL e EOD 23 3.6.3 EoL e EOD 23 3.6.3 EoL e EOD 23 3.6.4 GESTIONE TERMICA DELLA BATTERIA DI ALIMENTAZIONE 24 4.1 Gestione dell'energia termica della batteria 26 4.2 Gestione dell'energia termica della batteria 30 5 BILANCIAMENTO PASSIVO E ATTIVO E RELATIVE CONFIGURAZIONI CIRCUITALI 32		1.4	Elenco delle 32 tipologie BMS disponibili7			
2.1 BMS Centralizzato 17 2.2 BMS Modulare e Master-Slave 18 2.3 BMS Distribuito 18 2.4 Architettura software del BMS 20 3 VARIABILI DI STATO NELLA BATTERIA: SoC, SoH 21 3.1 Lo Stato di Carica 21 3.2 Stima del SoC: metodi Ampere-hour counting o Coulomb counting 21 3.3 Test di scarica 22 3.4 Open Circuit Voltage method (OCV method) 22 3.5 Model based method 22 3.6 Parametri secondari della batteria 23 3.6.1 RUL (Remaining Useful Life) 23 3.6.2 DoD (Depth of Discharge) 23 3.6.3 Eol e EoD 23 3.6.4 GESTIONE TERMICA DELLA BATTERIA DI ALIMENTAZIONE 24 4.1 Gestione dell'energia termica della batteria 26 4.2 Gestione termica mediante PCM (Phase Change Materials) 29 4.3 Analisi delle prestazioni dei PHEV in condizioni di bassa temperatura 30 5 BILANCIAMENTO PASSIVO E ATTIVO E RELATIVE CONFIGURAZIONI CIRCUITALI 32	2	sc	OTTOCOMPONENTI DEL BMS E TOPOLOGIE17			
2.2 BMS Modulare e Master-Slave 18 2.3 BMS Distribuito 18 2.4 Architettura software del BMS 20 3 VARIABILI DI STATO NELLA BATTERIA: SoC, SoH 21 3.1 Lo Stato di Carica 21 3.2 Stima del SoC: metodi Ampere-hour counting o Coulomb counting. 21 3.3 Test di scarica 22 3.4 Open Circuit Voltage method (OCV method) 22 3.5 Model based method 22 3.6 Parametri secondari della batteria 23 3.6.1 RUL (Remaining Useful Life) 23 3.6.2 DoD (Depth of Discharge) 23 3.6.3 EoL E EoD 23 3.6.3 EoL E EoD 23 3.6.4 Gestione termica mediante PCM (Phase Change Materials) 29 4.3 Analisi delle prestazioni dei PHEV in condizioni di bassa temperatura 30 5 BILANCIAMENTO PASSIVO E ATTIVO E RELATIVE CONFIGURAZIONI CIRCUITALI 32 5.1 Classificazione dei metodi di bilanciamento 32 5.2 Bilanciamento passivo 33		2.1	BMS Centralizzato			
2.3 BMS Distribuito 18 2.4 Architettura software del BMS 20 3 VARIABILI DI STATO NELLA BATTERIA: SoC, SoH 21 3.1 Lo Stato di Carica 21 3.2 Stima del SoC: metodi Ampere-hour counting o Coulomb counting 21 3.3 Test di scarica 21 3.3 Test di scarica 22 3.4 Open Circuit Voltage method (OCV method) 22 3.5 Model based method 22 3.6 Parametri secondari della batteria 23 3.6.1 RUL (Remaining Useful Life) 23 3.6.2 DoD (Depth of Discharge) 23 3.6.3 EoL e EoD 23 3.6.3 EoL e EoD 23 3.6.4 Gestione termica mediante PCM (Phase Change Materials) 29 4.3 Analisi delle prestazioni dei PHEV in condizioni di bassa temperatura 30 5 BILANCIAMENTO PASSIVO E ATTIVO E RELATIVE CONFIGURAZIONI CIRCUITALI 32 5.1 Classificazione dei metodi di bilanciamento 32 5.2 Bilanciamento passivo 33		2.2	BMS Modulare e Master-Slave18			
2.4 Architettura software del BMS. 20 3 VARIABILI DI STATO NELLA BATTERIA: SoC, SoH. 21 3.1 Lo Stato di Carica 21 3.2 Stima del SoC: metodi Ampere-hour counting o Coulomb counting. 21 3.3 Test di scarica 22 3.4 Open Circuit Voltage method (OCV method) 22 3.5 Model based method. 22 3.6 Parametri secondari della batteria 23 3.6.1 RUL (Remaining Useful Life) 23 3.6.2 DoD (Depth of Discharge) 23 3.6.3 EoL e EoD 23 3.6.4 GESTIONE TERMICA DELLA BATTERIA DI ALIMENTAZIONE 24 4.1 Gestione dell'energia termica della batteria 26 4.2 Gestione termica mediante PCM (Phase Change Materials) 29 4.3 Analisi delle prestazioni dei PHEV in condizioni di bassa temperatura 30 5 BILANCIAMENTO PASSIVO E ATTIVO E RELATIVE CONFIGURAZIONI CIRCUITALI 32 5.1 Classificazione dei metodi di bilanciamento 32 5.2 Bilanciamento passivo 33 5.3 Analesi de metodi di bilanci		2.3	BMS Distribuito			
3 VARIABILI DI STATO NELLA BATTERIA: SoC, SoH		2.4	Architettura software del BMS20			
3.1 Lo Stato di Carica 21 3.2 Stima del SoC: metodi Ampere-hour counting o Coulomb counting. 21 3.3 Test di scarica 22 3.4 Open Circuit Voltage method (OCV method) 22 3.5 Model based method 22 3.6 Parametri secondari della batteria 23 3.6.1 RUL (Remaining Useful Life) 23 3.6.2 DoD (Depth of Discharge) 23 3.6.3 EoL e EoD 23 3.6.4 GESTIONE TERMICA DELLA BATTERIA DI ALIMENTAZIONE 24 4.1 Gestione dell'energia termica della batteria 26 4.2 Gestione termica mediante PCM (Phase Change Materials) 29 4.3 Analisi delle prestazioni dei PHEV in condizioni di bassa temperatura 30 5 BILANCIAMENTO PASSIVO E ATTIVO E RELATIVE CONFIGURAZIONI CIRCUITALI 32 5.1 Classificazione dei metodi di bilanciamento 32 5.2 Bilanciamento passivo 33	3	V	ARIABILI DI STATO NELLA BATTERIA: SoC, SoH21			
3.2 Stima del SoC: metodi Ampere-hour counting o Coulomb counting. 21 3.3 Test di scarica 22 3.4 Open Circuit Voltage method (OCV method) 22 3.5 Model based method 22 3.6 Parametri secondari della batteria 23 3.6.1 RUL (Remaining Useful Life) 23 3.6.2 DoD (Depth of Discharge) 23 3.6.3 EoL e EoD 23 3.6.3 EoL e EoD 23 4 GESTIONE TERMICA DELLA BATTERIA DI ALIMENTAZIONE 24 4.1 Gestione dell'energia termica della batteria 26 4.2 Gestione termica mediante PCM (Phase Change Materials) 29 4.3 Analisi delle prestazioni dei PHEV in condizioni di bassa temperatura 30 5 BILANCIAMENTO PASSIVO E ATTIVO E RELATIVE CONFIGURAZIONI CIRCUITALI 32 5.1 Classificazione dei metodi di bilanciamento 32 5.2 Bilanciamento passivo 33		3.1	Lo Stato di Carica21			
3.3 Test di scarica 22 3.4 Open Circuit Voltage method (OCV method) 22 3.5 Model based method 22 3.6 Parametri secondari della batteria 23 3.6.1 RUL (Remaining Useful Life) 23 3.6.2 DoD (Depth of Discharge) 23 3.6.3 EoL e EoD 23 3.6.3 EoL e EoD 23 3.6.4 GESTIONE TERMICA DELLA BATTERIA DI ALIMENTAZIONE 24 4.1 Gestione dell'energia termica della batteria 26 4.2 Gestione termica mediante PCM (Phase Change Materials) 29 4.3 Analisi delle prestazioni dei PHEV in condizioni di bassa temperatura 30 5 BILANCIAMENTO PASSIVO E ATTIVO E RELATIVE CONFIGURAZIONI CIRCUITALI 32 5.1 Classificazione dei metodi di bilanciamento 32 5.2 Bilanciamento passivo 33		3.2	Stima del SoC: metodi Ampere-hour counting o Coulomb counting21			
3.4 Open Circuit Voltage method (OCV method) 22 3.5 Model based method 22 3.6 Parametri secondari della batteria 23 3.6.1 RUL (Remaining Useful Life) 23 3.6.2 DoD (Depth of Discharge) 23 3.6.3 EOL e EOD 23 3.6.4 GESTIONE TERMICA DELLA BATTERIA DI ALIMENTAZIONE 24 4.1 Gestione dell'energia termica della batteria 26 4.2 Gestione termica mediante PCM (Phase Change Materials) 29 4.3 Analisi delle prestazioni dei PHEV in condizioni di bassa temperatura 30 5 BILANCIAMENTO PASSIVO E ATTIVO E RELATIVE CONFIGURAZIONI CIRCUITALI 32 5.1 Classificazione dei metodi di bilanciamento 32 5.2 Bilanciamento passivo 33 5.2.1 Bilanciamento con Passitore Shunt 32		3.3	Test di scarica22			
3.5 Model based method 22 3.6 Parametri secondari della batteria 23 3.6.1 RUL (Remaining Useful Life) 23 3.6.2 DoD (Depth of Discharge) 23 3.6.3 EOL e EOD 23 3.6.3 EOL e EOD 23 3.6.4 GESTIONE TERMICA DELLA BATTERIA DI ALIMENTAZIONE 24 4.1 Gestione dell'energia termica della batteria 26 4.2 Gestione termica mediante PCM (Phase Change Materials) 29 4.3 Analisi delle prestazioni dei PHEV in condizioni di bassa temperatura 30 5 BILANCIAMENTO PASSIVO E ATTIVO E RELATIVE CONFIGURAZIONI CIRCUITALI 32 5.1 Classificazione dei metodi di bilanciamento 32 5.2 Bilanciamento passivo 33		3.4	Open Circuit Voltage method (OCV method)22			
3.6 Parametri secondari della batteria 23 3.6.1 RUL (Remaining Useful Life) 23 3.6.2 DoD (Depth of Discharge) 23 3.6.3 EoL e EoD 23 4 GESTIONE TERMICA DELLA BATTERIA DI ALIMENTAZIONE 24 4.1 Gestione dell'energia termica della batteria 26 4.2 Gestione termica mediante PCM (Phase Change Materials) 29 4.3 Analisi delle prestazioni dei PHEV in condizioni di bassa temperatura 30 5 BILANCIAMENTO PASSIVO E ATTIVO E RELATIVE CONFIGURAZIONI CIRCUITALI 32 5.1 Classificazione dei metodi di bilanciamento 32 5.2 Bilanciamento passivo 33 5.2 Bilanciamento con Besistore Shurt 32		3.5	Model based method			
3.6.1 RUL (Remaining Useful Life) 23 3.6.2 DoD (Depth of Discharge) 23 3.6.3 EoL e EoD 23 4 GESTIONE TERMICA DELLA BATTERIA DI ALIMENTAZIONE 24 4.1 Gestione dell'energia termica della batteria 26 4.2 Gestione termica mediante PCM (Phase Change Materials) 29 4.3 Analisi delle prestazioni dei PHEV in condizioni di bassa temperatura 30 5 BILANCIAMENTO PASSIVO E ATTIVO E RELATIVE CONFIGURAZIONI CIRCUITALI 32 5.1 Classificazione dei metodi di bilanciamento 32 5.2 Bilanciamento passivo 33 5.2.1 Bilanciamento con Besistore Shunt 23		3.6	Parametri secondari della batteria23			
3.6.2 DoD (Depth of Discharge) 23 3.6.3 EoL e EoD 23 4 GESTIONE TERMICA DELLA BATTERIA DI ALIMENTAZIONE 24 4.1 Gestione dell'energia termica della batteria 26 4.2 Gestione termica mediante PCM (Phase Change Materials) 29 4.3 Analisi delle prestazioni dei PHEV in condizioni di bassa temperatura 30 5 BILANCIAMENTO PASSIVO E ATTIVO E RELATIVE CONFIGURAZIONI CIRCUITALI 32 5.1 Classificazione dei metodi di bilanciamento 32 5.2 Bilanciamento passivo 33 5.2.1 Bilanciamento con Resistore Shunt 33		3.6	5.1 RUL (Remaining Useful Life)			
3.6.3 EOL E EOD 23 4 GESTIONE TERMICA DELLA BATTERIA DI ALIMENTAZIONE 24 4.1 Gestione dell'energia termica della batteria 26 4.2 Gestione termica mediante PCM (Phase Change Materials) 29 4.3 Analisi delle prestazioni dei PHEV in condizioni di bassa temperatura 30 5 BILANCIAMENTO PASSIVO E ATTIVO E RELATIVE CONFIGURAZIONI CIRCUITALI 32 5.1 Classificazione dei metodi di bilanciamento 32 5.2 Bilanciamento passivo 33 5.2.1 Bilanciamento con Resistore Shunt 23		3.6	5.2 DoD (Depth of Discharge)			
4 GESTIONE TERMICA DELLA BATTERIA DI ALIMENTAZIONE 24 4.1 Gestione dell'energia termica della batteria. 26 4.2 Gestione termica mediante PCM (Phase Change Materials) 29 4.3 Analisi delle prestazioni dei PHEV in condizioni di bassa temperatura 30 5 BILANCIAMENTO PASSIVO E ATTIVO E RELATIVE CONFIGURAZIONI CIRCUITALI 32 5.1 Classificazione dei metodi di bilanciamento 32 5.2 Bilanciamento passivo 33 5.2.1 Bilanciamento con Besistore Shunt 22	_	3.6	5.3 EoL e EoD			
4.1 Gestione dell'energia termica della batteria	4	4 GESTIONE TERMICA DELLA BATTERIA DI ALIMENTAZIONE2				
 4.2 Gestione termica mediante PCM (Phase Change Materials)		4.1	Gestione dell'energia termica della batteria26			
 4.3 Analisi delle prestazioni dei PHEV in condizioni di bassa temperatura		4.2	Gestione termica mediante PCM (Phase Change Materials)29			
5 BILANCIAMENTO PASSIVO E ATTIVO E RELATIVE CONFIGURAZIONI CIRCUITALI 32 5.1 Classificazione dei metodi di bilanciamento 32 5.2 Bilanciamento passivo 33 5.2.1 Bilanciamento con Resistore Shunt 32		4.3	Analisi delle prestazioni dei PHEV in condizioni di bassa temperatura			
 5.1 Classificazione dei metodi di bilanciamento	5	BILANCIAMENTO PASSIVO E ATTIVO E RELATIVE CONFIGURAZIONI CIRCUITALI				
5.2 Bilanciamento passivo		5.1	Classificazione dei metodi di bilanciamento			
		5.2	Bilanciamento passivo			

5.3	Meto	odi di bilanciamento attivi	.34
5	.3.1	Metodi di bilanciamento a Shuttling Capacitivo	34
5	.3.2	Metodi di bilanciamento con Induttori e Trasformatori	36
5	.3.3	Metodi di bilanciamento mediante convertitori di energia	40
6 A	LGOR	ITMI DI EQUALIZZAZIONE PER LE BATTERIE AGLI IONI DI LITIO	.48
6.1	Algo	ritmo di equalizzazione di carica per applicazioni EV	48
6	.1.1	Descrizione algoritmo di equalizzazione di carica	51
6.2	Algo	ritmo SOC-Particle Filter (SOC-PF)	. 53
6	.2.1	Descrizione Algoritmo SOC	55
6.3	Algo	ritmo di bilanciamento delle batterie Li-Ion per BMS basato sul modello di rilevamento	
ano	malo ii	n real time	57
6.4	Algo	ritmo di stima del SoC per pacchi batteria LifePo4 (LITIO-FERRO-FOSFATO) implementato	su
арр	licazio	ni a trazione	61
6	.4.1	Stima dello stato di carica (SOC) basato sul ECC con modelli OCV e CVCD	62
6	.4.2	Stima del SOC a livello cella	63
6	.4.3	Modello CC (Constant Current)	64
6	.4.4	Modello CVCD (Constant Voltage Charge Detector)	64
6	.4.5	Modello OVC(SOC)	64
6	.4.6	Stima del SOC a livello del modulo-batteria	66
7 (CONCL	USIONI	.67
8 E	Bibliog	rafia	.69

INTRODUZIONE

Le batterie agli ioni di Litio (Li-Ion batteries) costituiscono la fonte di energia per eccellenza per la scelta dei veicoli elettrici (EV). Pur essendo caratterizzate da buone prestazioni energetiche come elevate densità di energia, pesi e volumi ridotti, la composizione chimica delle Li-ion batteries è molto suscettibile alle temperature, a sovratensioni, sovracorrenti e scarica profonda. Il pericolo maggiore in queste batterie è costituito dall'eventualità di fuga termica [1]. Per raggiungere i livelli di tensione e corrente richiesti nei veicoli elettrici, in molti casi le batterie agli ioni di Litio sono connesse in serie e in parallelo.

La richiesta di batterie connesse in serie necessita l'implementazione e il controllo di misure di sicurezza per l'Alta Tensione.

Queste batterie hanno come svantaggio principale la perdita di capacità e l'aumento della resistenza interna nel corso del loro ciclo vitale. A questo fenomeno va associato l'invecchiamento o ageing, che viene ulteriormente accelerato dal fattore temperatura. Lo sbilanciamento nelle celle riduce la capacità totale riutilizzabile del pacco batteria, sia perché la cella meno carica determina la fine del periodo di scarica, sia perché la cella avente carica maggiore sancisce la fine del periodo di carica; come conseguenza si rende inaccessibile l'energia disponibile alle altre celle [1].

Il primo Capitolo introduce la definizione di Battery Management System assieme alle sue caratteristiche e funzionalità principali, l'impiego del BMS a livello delle singole celle fino ad arrivare ai pacchi batteria ed elenca le 33 tipologie BMS attualmente disponibili sul mercato.

Il Capitolo due analizza il BMS da un punto di vista hardware e le principali architetture topologiche del BMS e una breve analisi dal punto di vista software. Il Capitolo 3 definisce le principali variabili di stato della batteria, tra cui il SOC (State of Charge), il SoH (State of Health) e i principali metodi e tecniche di stima dello stato di carica.

Il Capitolo 4 affronta la gestione del BMS dal punto di vista termico e vengono elencate le principali celle a combustibile impiegate nel BMS con un paragrafo dedicato alla gestione termica mediante l'impiego delle celle a combustibile a polimeri solidi (PEMFC). Infine, viene effettuata una breve analisi delle prestazioni dei PHEV (Plug- in Hybrid Electric Vehicles) in condizioni di basse temperature.

Il Capitolo 5 descrive i principali metodi di bilanciamento passivo e attivo e le relative configurazioni circuitali.

Il Capitolo 6, infine, descrive alcuni algoritmi di equalizzazione di SOC per le Li-Ion batteries e un algoritmo di stima del SOC per pacchi batteria LiFePo4 (Ferro-Litio-Fosfato).

1 BMS: Definizione, caratteristiche e obiettivi principali

Il BMS è un dispositivo analogico e/o digitale e costituisce una circuiteria elettronica di sicurezza e controllo [1].

Nell'ambito generale i requisiti del BMS sono i seguenti:

- Acquisizione dati
- Elaborazione dati e memorizzazione dati
- Monitoraggio elettrico
- Monitoraggio termico
- Gestione della sicurezza
- Comunicazione

Il BMS trova largo impiego nell'industria automotive, specialamente nei veicoli elettrici (EV) e in quelli ibridi (PHEV, Plug-in Hybrid Elettric Vehicles).

I PHEV sono ricaricabili elettricamente inserendo semplicemente la spina nella normale presa di casa o utilizzando un'apposita colonnina, pertanto utilizzando una fonte di energia elettrica esterna. Negli EV i requisiti essenziali di un BMS sono

- Aumentare la sicurezza e l'affidabilità dei sistemi a batterie.
- Preservare ogni cella del pacco e il pacco batteria stesso da eventuali danni.
- Migliorare l'efficienza energetica della batteria.
- Prolungare l'arco vitale della batteria stessa.

Da questi requisiti si possono tracciare le funzioni individuali del BMS, le quali possono essere raggruppate in 5 sezioni [1]:

- Rilevazione e controllo dell'Alta Tensione: il BMS deve misurare le tensioni sulle celle del pacco batteria, le temperature dei moduli (i moduli sono dei raggruppamenti di celle considerati come unità singola) e la corrente del pacco batteria.
- 2) Protezione: il Battery Management System deve includere in sé una logica e una elettronica rivolte alla protezione dell'utente e del pacco batterie stesso da eventuali sovraccariche, sovrascariche, cortocircuiti e temperature estreme.
- 3) Interfacciamento: il BMS deve poter comunicare regolarmente con l'applicazione che il pacco batteria alimenta, riportando informazioni utili sull'energia e potenza disponibili.
- 4) Monitoraggio delle prestazioni: il BMS deve essere in grado di stimare lo stato di carica di tutte le celle del pacco batteria e bilanciare le celle contenute nel pacco stesso. Il range di sicurezza per le operazioni di carica e scarica va da -20 °C a 60 °C.
- 5) Diagnostica: Infine, il BMS deve essere in grado di stimare lo stato di salute del sistema.

Le batterie agli ioni di Litio costituiscono la fonte di energia per eccellenza per la scelta degli EV.

La composizione chimica delle Li-ion batteries è molto suscettibile alle temperature, a sovratensioni, sovracorrenti e scarica profonda. Il pericolo maggiore in queste batterie è costituito dall'eventualità di fuga termica. Tale fenomeno è causato dal verificarsi di condizioni di abuso come [1]:

- surriscaldamento
- elevati tassi di carica (charge rates), specialmente alle basse temperature

- urti meccanici che possono causare cortocircuiti interni od esterni.

1.1 Dalle batterie singole ai pacchetti batteria:

Le batterie agli ioni di litio funzionano sul principio della inserzione (intercalazione) di ioni di litio nelle strutture attive del catodo e dell'anodo. L'anodo intercala ioni di Litio durante la carica, mentre il catodo riceve ioni di Litio durante la scarica. Il materiale costituente gli elettrodi è collegato ad un Current Collector allo scopo di migliorare la conducibilità elettrica. A differenza dei serbatoi a benzina o diesel nelle comuni macchine con motore a combustione, gli accumulatori agli Ioni di Litio contengono sia un ossidante (o catodo) che un combustibile (anodo), strettamente legati all'interno di un contenitore sigillato. In condizioni normali, il combustibile e l'ossidante convertono l'energia chimica in energia elettrica, col minimo sviluppo di gas e calore. Tuttavia, in caso di avaria o se la batteria opera al di fuori dei limiti specificati (in termini di temperatura, tensione e corrente), la reazione può rapidamente diventare incontrollabile ed esotermica [1]. Tutto ciò può condurre a fuga termica, che è un processo irreversibile dove viene rilasciato molto calore; questo processo può a sua volta condurre a incendio o esplosione e mettere a gran rischio l'ambiente. Di base, esistono tre differenti geometrie per gli accumulatori Li-Ion, tra cui:

- le celle a marsupio (Pouch bag cells);
- celle tonde;
- celle prismatiche rigide;

I tipici pacchetti batteria comprendono 8/12 celle connesse in serie. Per aumentare la capacità invece, diverse singole celle vengono connesse in parallelo per formare la cosiddetta "supercella", o addirittura diversi moduli, cioè raggruppamenti di celle, sono connessi in parallelo per formare il pacco batteria. Cosi, mediante la connessione in serie, il livello di tensione del pacco batteria può essere definito mentre con le connessioni in parallelo, può esserne definita la capacità.

La norma internazionale ISO-6469-3 definisce l'intervallo dell'alta tensione nel range 60V -1500 V per la tensione in corrente continua, mentre un range di 30 V - 1000 V per la tensione in corrente alternata. Complessivamente, una batteria può essere quindi considerata come una struttura gerarchica consistente di tre strati:

- cella (elemento base con circa 3V- 4V nel caso di batterie Li-ion);
- modulo (raggruppamento di celle in serie in un contenitore fisico dedicato, fino a 60 V;
- pacco batteria (connessione di moduli disposti in serie e/o parallelo).

1.2 Componenti di un pacco batteria ad alta tensione (HV)

A fianco ai componenti base del BMS, anche l'impiego di componenti speciali è importante [1]. Questi vengono impiegati in una struttura a elevata tensione del pacco batteria. Di base, nel caso dei veicoli elettrici a batteria (BEV), tale struttura è composta dai moduli batteria, un BMS, un sistema di raffreddamento, un'unità di disconnessione della batteria (BDU), il contenitore (abitacolo) e le interfacce per le connessioni dati e Alta Tensione (High Voltage). La BDU è spesso chiamata "switch box". Su ogni modulo batteria è localizzato un BMS Slave, che esegue il monitoraggio diretto delle celle ed è connesso al BMS Master. La BDU contiene un fusibile, un sensore di corrente totale e un sensore di tensione totale, una resistenza di precarico e un isometro. La resistenza di precarica limita l'afflusso di corrente e l'isometro verifica se l'abitacolo o la massa del veicolo sono sufficientemente isolati dai componenti ad alta tensione. Il BMS può inoltre gestire attivamente la temperatura del pacchetto controllando un riscaldatore per mantenerlo alla sua minima temperatura di funzionamento, oppure monitorando un ventilatore o un sistema di raffreddamento liquido per mantenere il pacchetto al di sotto della sua massima temperatura di funzionamento. A seguito è mostrato lo schema dei componenti principali di un pacco batteria ad alta tensione.



Fig. 1.1) Schema dei componenti principali di un BMS ad Alta Tensione [1]

1.3 Utilizzo dei circuiti integrati (IC) nel BMS

Un BMS utilizza circuiti integrati come microchip per implementare le sue funzioni [1]. I circuiti integrati impiegati nel BMS possono essere suddivisi in Battery sensors che forniscono le misure delle tensioni sulle celle e le relative temperature e in microcontrollori, che usano i valori dei sensori per determinare lo stato del pacco batteria e prevenire il funzionamento delle celle al di fuori delle regioni sicure di funzionamento. Nei BMS vengono impiegati anche gli FPGA (Field Programmable Gate Array) i quali possono essere usati per accelerare l'intensa complessità computazionale, come il filtraggio di Kalman per l'identificazione dei parametri delle batterie.

1.4 Elenco delle 32 tipologie BMS disponibili:

In commercio esistono attualmente diverse tipologie di BMS disponibili. Di seguito ve ne sono riportate 33 (con BMS centralizzato o BMS modulare) Queste tipologie sono, in ordine alfabetico, le seguenti [1]:

- 1. Ashwoods Energy's BMS (Vayon)
- 2. AVL's BMS
- 3. Calsonic Kansei's Nissan Leaf-BMS
- 4. Delphi Automotive PLC Battery Management Controller
- 5. DENSO's Toyota Prius PlugIn-BMS
- 6. Elite Power Solutions' Energy Management System
- 7. Elithion's Lithiumate Pro
- 8. Electric Vehicle Power System Technology Co., Ltd's (EVPST) BMS-1
- 9. Ford Fusion Hybrid's BMS
- 10. Hitachi's Chevrolet Malibu Eco-BMS
- 11. I + ME ACTIA's BMS
- 12. JTT Electronics LTD's S-line
- 13. JTT Electronics LTD's X-line
- 14. LG Chem's Chevrolet Volt-BMS
- 15. Lian Innovative's BMS
- 16. Lithium Balance's S-BMS
- 17. Lithium Balance's S-BMS 9-16
- 18. Manzanita Micro's Mk3x-line
- 19. Mitsubishi iMiEV's BMS
- 20. Navitas Solutions' Wireless BMS (WiBMS)
- 21. Orion BMS Extended Size

- 22. Orion BMS Junior
- 23. Preh GmbH's BMW i3-BMS
- 24. REAPsystems' BMS
- 25. Sensor Technik Wiedemann's (STW) mBMS
- 26. Tesla Motors' Model S-BMS
- 27. Tritium's IQ BMS
- 28. Valence U-BMS
- 29. Ventec SAS iBMS 8-18S:
- 30. Altera's BMS
- 31. Fraunhofer's foxBMS
- 32. LION Smart's Li-BMS V4
- 33. SBM (SBM-Smart Battery Modules), sviluppato da John Chatzakis, Kostas Kalaitzakis, Nicholas C. Voulgaris e Stefanos N. Manias. Le ultime tre tipologie sono versioni prototipo in fase di attuale ricerca e perfezionamento.
- Il BMS di Ashwoods Energy è un sistema modulare con moduli della gestione della batteria multipli (BMM), un modulo di interfaccia col sistema (SIM, System Interface Module), e un sensore di corrente CAN (CCS, ovvero Can Current Sensor). Il BMM combina le proprietà del PMU Pack Management Unit) come la stima del SOC, il bilanciamento del MMU e le misurazioni di tensione e temperatura del CMU (Cell Monitoring Unit), mentre la SIM mostra solo le caratteristiche del PMU. Il CSS viene utilizzato per misurare la corrente del pacco e pilotare i contattori di batteria fino a 1000 V [2].
- 2) Il BMS modulare della AVL è composto da due strati chiamati Battery Control Unit (BCU) e Module Control Unit (MCU) e viene utilizzato per tutte le applicazioni automobilistiche. Mentre le CMU misurano le tensioni e temperature delle celle, la BCU ha lo scopo di eseguire e controllare tutte le funzioni BMU. Il livello massimo di tensione del sistema è 800 V [3].
- Il BMS della Nissan-Leaf di Calsonic Kansei ha una architettura centralizzata. Tutti i requisiti CMU, MMU (Module Management Unit) e PMU sono soddisfatti da una scheda che controlla il sistema a 360 V[4].
- 4) Il Controller di gestione batteria PLC della Delphi Automotive: i sistemi modulari di gestione della batteria di Delphi sono strutturati in un controller ibrido e in diversi controller di gestione della batteria. Il controller ibrido funge da gateway

tra la batteria e i controller del veicolo esterno, mentre il controller di gestione della batteria fornisce tutte le funzioni vitali di un BMS per sistemi fino a 450 V [5].

- 5) Il BMS per la Toyota Prius della DENSO utilizza il BMS master / slave modulare di Denso per il suo PlugIn Prius. Con quattro slave, che monitorano 56 celle seriali, la batteria funziona a una tensione di pacco totale di 207 V. Una particolarità di questo BMS è che, a differenza di tutti gli altri sistemi, il bilanciamento attivo è eseguito nel plug-in Toyota Prius [4].
- 6) Sistema di gestione energetica della Elite Power Solutions: l'azienda fornisce un BMS che mostra una tipica topologia master / slave. Il master, chiamato EMS-CPU, contiene tutte le funzioni PMU e controlla una moltitudine di schede di rilevamento 4SB-V7, 4SB20-V2 o 4SB200-V7. Queste sono schede slave che soddisfano le funzioni MMU e CMU. Con una tensione totale fino a 500 V è in grado di gestire batterie BEV, PHEV e HEV [6].
- 7) Elithion's Lithiumate Pro: il Lithiumate Pro di Elithion divide i compiti del BMS tra un controller chiamato Lithium Pro Master (con funzioni PMU) e diverse schede-celle (con funzioni CMU + MMU) per una singola batteria, o più schede-celle (con funzioni CMU + MMU) che gestiscono fino a 16 celle in serie. La tensione massima del pacco è limitata a 840 V e tutti gli usi EV sono dichiarati possibili [7].
- 8) Electric Power System Technology co., Ltd, EPSVT BMS-1: il BMS-1 contiene un modulo di controllo (CM) con proprietà PMU e fino a quattro moduli di test (TM) con qualità MMU e CMU. L'unico scopo pubblicizzato di questo sistema a 240 V è l'applicazione in BEV [8].
- 9) BMS di Ford Fusion Hybrid: questo BMS utilizza un'unica scheda centralizzata, che soddisfa tutti i compiti relativi alla batteria per Fusion Hybrid. 76 celle seriali nella batteria si sommano a una tensione di sistema totale di 275 V [9].
- Hitachi's Chevrolet Malibu Eco-BMS: la combinazione di 32 celle seriali crea una tensione di pacco di 115 V nella batteria di Malibu Eco. Questo sistema è supervisionato da un'unica scheda di gestione della batteria centralizzata. [9]
- I + ME ACTIA'S BMS: questo BMS è costituito da una scheda master 4.5 e un set di schede slave 6. La topologia è chiaramente un'architettura modulare master / slave e destinata ad essere utilizzata in diverse applicazioni EV [10].

- 12) JTT Electronics LTD's S-line: JTT Electronics offre due diversi sistemi per applicazioni automobilistiche: la serie S di BMS è composta da 4 diversi moduli centralizzati e indipendenti per batterie di dimensioni diverse (S1, S2, S3, S4). La linea offre soluzioni per esercizi EV piccoli da 55, 110, 165 e 200 V [11].
- 13) JTT Electronics LTD's X-line: Per veicoli più grandi o in applicazioni generali che richiedono livelli di tensione più elevati, JTT fornisce la linea X. Questo sistema combina un X-BCU - master - con diversi controller X-MCUP - slave - per ottenere tutte le funzioni necessarie di un BMS [11].
- 14) LG Chem's Chevrolet Volt-BMS: questo BMS modulare di LG Chem, costituito da una scheda master e quattro slave, fornisce il controllo di supervisione per il veicolo elettrico Volt di Chevrolet, in cui 90 celle seriali si sommano a 360 V a livello di confezione [4].
- 15) Lian Innovative's BMS: utilizza un'architettura modulare per formare il loro BMS. Consiste in un'unità di controllo dell'alimentazione (PCU), un'unità di controllo centrale (CCU) e schede cellulari (CB), InnoCab, InnoLess o InnoTeg. L'unità di controllo dell'alimentazione misura la tensione e la corrente del pacco e collega / scollega la batteria al carico / caricatore, l'unità di controllo centrale gestisce le attività PMU rimanenti per tutte le applicazioni di trazione e fino a 900 V. InnoLess sono schede di celle wireless, ogni scheda è collegato a una singola cella. InnoCab fa lo stesso, ma cablato e la scheda InnoTeg è una soluzione cablata che rileva cinque celle per scheda [12].
- 16) Lithium Balance's S-BMS: L'S-BMS è composto da una scheda master, unità di controllo gestione batteria, schede di monitoraggio e unità di monitoraggio locale. SBMS e S-BMS 9-16 mostrano un'architettura master / slave convenzionale con funzioni MMU + CMU e PMU su schede diverse [13].
- 17) Lithium Balance's S-BMS 9-16: L'S-BMS modulare 9-16 al contrario è limitato a pacchetti da 48 V. La supervisione è ottenuta da due unità di monitoraggio locali e un'unità di controllo della gestione della batteria [13].
- 18) Manzanita Micro's Mk3x-line: offre tre diversi sistemi centralizzati di varie dimensioni: Mk3 Lithium BMS. Le schede multiple di ciascun sistema possono essere disposte in fila per aumentare la massima tensione pacco - sistema distribuito. Complessivamente, le schede possono gestire celle seriali 120 (Mk3x4smt), 240 (Mk3x8) o 254 (Mk3x12) per qualsiasi applicazione automobilistica [14].

- 19) Mitsubishi iMiEV's BMS: il BMS di Mitsubishi si avvale di un'architettura modulare con un master e 11 unità slave. Ogni slave è in grado di monitorare 8 celle seriali, il che si traduce in una tensione di pacco totale di 330 V per Mitsubishi iMiEV [4].
- 20) Navitas Solutions' Wireless BMS (WiBMS): offre un BMS modulare per tutte le applicazioni automobilistiche, che consiste in un modulo di gestione della batteria (MM) master e diversi moduli di rilevamento della batteria (SM) slave. Le caratteristiche peculiari di questo BMS sono la comunicazione dei moduli di rilevamento e del modulo di gestione tramite protocollo wireless (Wireless Local Area Network) nonché la possibilità di raggiungere tensioni pacco di oltre 1000 V [15].
- 21) Orion BMS -Dimensione estesa: è un sistema centralizzato con la possibilità di collegare più schede in serie (topologia distribuita) per ottenere un sistema più grande con tensioni fino a 2000 V. Tutte le applicazioni di trazione elettrica possono essere gestite con questo sistema [16].
- 22) Orion BMS Junior: è una versione più piccola sulla stessa base senza la possibilità di formare un'architettura distribuita. L'uso previsto include applicazioni a 48 V per dispositivi di trazione mobili leggeri [16].
- 23) Preh GmbH's BMW i3-BMS: fornisce alla BMW i3 un BMS modulare composto da un master e 8 schede di controllo slave. Ogni slave può monitorare 12 celle seriali, risultando in 96 celle seriali e una tensione totale del pacchetto di 360 V [17].
- 24) REAPsystems' BMS: produce un BMS agli ioni di litio centralizzato in grado di formare un sistema in topologia distribuita per ogni applicazione automobilistica. Tutte le singole schede sono in grado di gestire 14 celle seriali [18].
- 25) Sensor Technik Wiedemann's (STW) mBMS: il mBMS di STW è un sistema tripartito modulare. I suoi componenti comprendono un supervisore principale della batteria con funzioni PMU (stima SOC / SOH e controllo di tensione / temperatura / corrente, una scheda di misurazione dell'alimentazione (PMB), che svolge anche alcune attività PMU (interruttore di disconnessione, monitoraggio della corrente e diversi circuiti del sensore cellulare (CSC)). Con una dimensione massima del pacchetto di 800 V, questo BMS è in grado di soddisfare tutte le applicazioni di trazione elettrica [19]. Un diagramma di questo BMS è mostrato sotto nella Figura 1.3:



Fig.1.2) BMS della STW [19].

- 26) Tesla Motors' Model S-BMS: un altro esempio per una tipica architettura modulare, master/slave è il BMS del modello S di Tesla Motors. Tutti i 16 slave sono in grado di misurare i valori di 6 celle seriali, ottenendo un sistema a 400 V con 96 celle di fila [20].
- 27) Tritium's IQ BMS: l'IQ BMS di Tritium rappresenta anche una tipica architettura master / slave con un'unità di gestione della batteria (BMU), che funge da master, e diverse unità di gestione delle celle (CMU), che funzionano come slave. È possibile combinare fino a 256 celle in serie per formare un pacco batterie da 1000 V [21].
- 28) Valence U-BMS: offre quattro varianti di sistema centralizzate per batterie di dimensioni diverse: U-BMS-LV, U-BMS-LVM, U-BMS-HV e U-BMS-SHV. U-BMS-LVM consente di collegare più unità a un sistema distribuito fino a 1000 V [22].
- 29) Ventec SAS iBMS 8-18S: L'iBMS 8-18s è l'unico sistema di Ventec per applicazioni automobilistiche: piccoli veicoli elettrici. Ha una struttura centralizzata e distribuita. Ogni singolo modulo gestisce 18 celle, la tensione di pacco totale è limitata a 1000 V [23].
- **30)** Altera's BMS: Altera offre una piattaforma di controllo flessibile basata su FPGA che può essere configurata dal cliente, migliorando prestazioni ed efficienza. È in grado di stimare SOC, SOH con un filtro Kalman per 96 celle seriali [24].
- Fraunhofer's foxBMS: è una piattaforma BMS flessibile, supportata anche da FPGA, che normalmente funziona con il master fox BMS e gli slaves fox BMS.
 Tuttavia, è anche possibile escludere gli slaves e quindi ottenere un sistema con

architettura centralizzata, in cui le proprietà CMU e MMU sono coperte anche dal modulo master [25].

- 32) LION Smart's Li-BMS V4: il BMS di LION Smart è costituito da un master Lion Control Module - e diversi slave - Lion Measure Module, e segue la struttura tipica di un sistema modulare con un'unità combinata CMU / MMU e un'unità PMU separata. È possibile collegare 16 slave, 12 celle seriali ciascuno per formare una batteria fino a 800 V per applicazioni EV. Li-BMS V4 offre un codice open source basato per la regolazione del software da parte dei clienti [26].
- 33) SBM è un sistema costituito da un certo numero di moduli batteria intelligenti (SBM-Smart Battery Modules), ciascuno dei quali provvede al bilanciamento, monitoraggio e protezione della corrispondente batteria [27].



Fig.1.3) Diagramma a blocchi del SBM descritto in [27].

Il diagramma a blocchi del SBM in [27] è mostrato in Fig1.3. Ciascun SBM consiste di un microcontrollore (μ CU), un convertitore di equalizzazione, un certo numero di interruttori capaci di disconnettere completamente una batteria dal pacco batteria di cui fa parte.

Come precedentemente detto, le batterie sono collegate mediante relè di tipo latch al BSM. Questa topologia consente la completa disconnessione di un pacco batteria, in caso di malfunzionamento. Se ciò accadesse, l'equalizzatore conserva la tensione della batteria mediante l'energia fornita attraverso il percorso di scambio della corrente da parte delle batterie in buono stato.



Fig.1.4) Diagramma di flusso dell'Algoritmo BSM proposto in [27].

Il BSM può avere due tipi di sensori, uno con uscita analogica multiplexata al fine di pilotare un convertitore A/D e un altro sensore con uscita digitale capace di comunicare col microcontrollore (μ CU) attraverso una delle interfacce più comunemente usate (Bus II^C, SPI, ecc...) [27]. I sensori ad uscita analogica sono sensori di corrente, e i sensori a interfaccia digitale sono principalmente di temperatura.

Poi un multiplexer (MUX) seleziona sequenzialmente ogni segnale e pilota un amplificatore da strumentazione che alimenta l'ingresso del convertitore A/D. Il microcontrollore (μ CU) controlla invece l'equalizzatore ed analizza sequenzialmente tutti i sensori. Il microcontrollore comunica mediante una porta seriale standard (SSP) con il modulo master. Poiché solo un singolo accesso è consentito alle interconnessioni della batteria, ogni corrente di cella deve essere misurata indirettamente. Tale misurazione di corrente non implica perdite aggiuntive prima dell'avvio dell'equalizzazione.

Descrizione algoritmo

Il programma del microcontrollore deve essere in grado di ripristinare in qualsiasi condizione di errore [27]. Ci sono molte ragioni che possono causare errori, in caso di malfunzionamento del sistema. Picchi di alta tensione/corrente, campi elettromagnetici elevati, cadute di tensione di alimentazione di breve durata o persino scariche elettrostatiche causate da contatti umani che toccano parti del BMS possono essere prodotti e causare l'uscita del programma dal microcontrollore o la ricezione di dati danneggiati. Un microcontrollore con un timer watchdog è suggerito per questa applicazione insieme a routine software per il rilevamento e la correzione degli errori. Una memoria non volatile aiuta il microcontrollore a funzionare senza perdere dati dopo un'interruzione di corrente. La porta seriale dovrebbe funzionare con un segnale di interruzione, che utilizza un piccolo buffer seriale, rendendo così le comunicazioni del modulo molto veloci. La routine di comunicazione controlla il buffer seriale e, se il primo byte è l'ID del modulo o il numero ID globale, viene elaborato il comando emesso dal modulo master. Altrimenti, il comando viene scartato e l'esecuzione del programma continua normalmente. Il diagramma di flusso dell'algoritmo è mostrato in Fig. 1.4. Ogni compito dell'algoritmo è una procedura complicata e lo schema semplificato del diagramma di flusso mostra le fasi del programma per eseguire continuamente letture di misurazione. Al fine di verificare il progetto teorico e di identificare i problemi che si manifestano in un sistema reale, è stato costruito un prototipo sperimentale SBM e testato in laboratorio. Tale prototipo è illustrato nella sottostante Fig.4.3. Il sistema è basato su un modulo a microcontrollore Dallas DS2250T. Questo è costituito da un microcontrollore DS5000FP, 64-kB NV-RAM, una cella di batteria al litio un clock in tempo reale. Il chip DS5000FP ha un timer watchdog e può gestire la sua RAM senza sacrificare nessuna delle porte IO standard 8051.

È stato utilizzato un convertitore AD a 10 bit e il segnale di ingresso è stato alimentato attraverso un amplificatore di livello e un multiplexer analogico. Il circuito integrato DS1624 è stato utilizzato come sensore di temperatura. Questo chip utilizza un'interfaccia a due fili che può contenere fino a otto sensori, rendendo così il progetto flessibile e facile. Il convertitore di equalizzazione è stato implementato usando i MOSFET tipo IRF44N e un trasformatore HF ad avvolgimenti multipli, avvolto su un nucleo di ferrite tipo E653227. La frequenza operativa del convertitore di equalizzazione è stata mantenuta a 16 kHz per evitare spostamenti di fase nel percorso di scambio corrente, anche in stringhe molto lunghe.



Fig. 1.5 Diagramma funzionale a blocchi del SBM sperimentale [27].

2 SOTTOCOMPONENTI DEL BMS E TOPOLOGIE

In generale, il BMS può essere considerato come una struttura gerarchica a tre strati [1]. Tipicamente i sottocomponenti di un BMS sono circuiti stampati (PCB, Printed Circuit Board). Questi layer sono:

- CELL MONITORING UNIT (CMU): è l'unita di gestione della cella e rappresenta il livello più basso della gerarchia. Ad ogni cella è associata una CMU.
 Questa unità misura le tensioni e le temperature delle celle e deve fornire un bilanciamento delle stesse.
- MODULE MANAGEMENT UNIT (MMU): è l'unità di controllo del modulo e rappresenta il livello medio della struttura, gestisce e controlla un gruppo di CMU e quindi anche le celle stesse (in un numero tra 8 e 12). La MMU fornisce una funzione di bilanciamento tra le celle.
- PACK MANAGEMENT UNIT (PMU): l'unita di gestione del pacco è il livello più alto della gerarchia, gestisce e controlla le MMU. La PMU comunica con i sistemi esterni e controlla i dispositivi di sicurezza del pacco batteria. Utilizzando questa classificazione su tre livelli si possono introdurre le tre varianti topologiche del BMS.

2.1 BMS Centralizzato

In un BMS centralizzato tutti i tre livelli o strati precedentemente descritti sono combinati a formare un'unica entità, il PCB, il quale gestisce tutti i task richiesti dal BMS ed è connesso direttamente con le batterie [1]. Questa topologia è rappresentata nella Fig.2.1:



Fig.2.1) Topologia BMS Centralizzato [1].

2.2 BMS Modulare e Master-Slave

Nella topologia modulare, la MMU è suddivisa in blocchi multipli e separati; questi possono essere adiacenti ai moduli batteria, riducendo cosi la complessità del cablaggio [1]. Lo schema di questa topologia è indicato nella Fig 2.2. Le MMU inviano poi le misure dei parametri delle celle alla PMU attraverso una comunicazione ad interfaccia (esempio BUS CAN o isoSPI). Diversamente dalla topologia del BMS centralizzato, l'unita PMU è solo connessa indirettamente alle singole celle. Una variante avanzata della topologia modulare è quella master-slave. Qui, le diverse funzioni e gli elementi dei dispositivi slave, chiamati anche circuiti di supervisione (CSC), sono ridotti al minimo e le funzioni riguardanti il sistema batteria completo sono realizzate solamente dal Master.



Fig.2.2 Topologia BMS Modulare [1].

2.3 BMS Distribuito

In questa topologia, esistono diverse PMU autonome che supervisionano il proprio set di celle "supercelle". Le differenti PMU possono comunicare l'una con l'altra, oppure ricevere comandi di controllo da altre PMU.

Per concludere: i BMS centralizzati sono economici, ma meno flessibili e scalabili. I BMS distribuiti sono i più costosi ma anche i più versatili e più facili da installare. I BMS modulari e quelli master-slave offrono un buon compromesso tra le altre due topologie proposte. Questa topologia di BMS è illustrata in Fig.2.3 [28]:



Fig.2.3 Topologia BMS Distribuito [28].

2.4 Architettura software del BMS

Analogamente all'hardware, anche la parte software del BMS può essere strutturata in modalità diverse. Nella topologia BMS Centralizzato che usa un solo microprocessore, questa unità è responsabile della realizzazione di tutte le funzioni software in una singola applicazione software. In una architettura modulare o master-slave, ogni dispositivo slave ha un microprocessore responsabile almeno delle misurazioni di tensione e temperatura e dell'equalizzazione delle celle.

Le funzioni Software del BMS possono essere suddivise in differenti layers [1]:

- Layer di basso livello per i driver di periferica e routine di interfaccia hardware.
- Layer intermedi che forniscono la realizzazione dei protocolli di comunicazione e interpretazione delle misure fisiche.
- Layer di livello superiore per calcoli di alto livello come il SOC o il calcolo dei limiti di potenza.
- Layer per applicazioni Top Level responsabili delle decisioni basate sulle informazioni fornite dai layer di livello inferiore. L'utilizzo rigoroso di questo approccio multilivello e i suoi layer di astrazione massimizza la riutilizzabilità del codice software per il BMS. Di conseguenza non è necessario l'utilizzo di un algoritmo di calcolo per il SOC al solo fine di comprendere come i suoi ingressi, tra cui tensione, temperatura e corrente siano elaborati. La maggior parte delle architetture software BMS realizzano un ambiente multitasking per le differenti funzioni del BMS. Le topologie di BMS centralizzato offrono soluzioni semplici economiche ma una limitata scalabilità. Quasi ogni BMS considerato usa almeno una linea di comunicazione a bus CAN; il motivo di ciò è dovuto al fatto che il CAN rappresenta uno degli interfacciamenti più facili ad altri controllori nell'ambiente Automotive. Infine, ci sono le configurazioni BMS wireless che sostituiscono la comunicazione interna tra i vari moduli con la rete wireless e determinano vantaggi derivanti dalla riduzione della complessità del cablaggio, numero di connettori ecc.. [1].

3 VARIABILI DI STATO NELLA BATTERIA: SoC, SoH

3.1 Lo Stato di Carica

Lo Stato di Carica o SoC (State of Charge) e lo Stato di Salute o SoH (State of Health) sono due parametri usati come stima dello stato della batteria [1]. Il SoC è un parametro legato alla concentrazione di litio nei due elettrodi: indica, cioè, la carica residua che la batteria è in grado di fornire al sistema che alimenta.

Lo Stato di Carica (SoC) in una batteria può essere espresso come la relazione tra la capacità residua della batteria allo stato attuale $_{C_r}$ e la capacità totale della batteria C_{actual} dopo che la batteria è stata caricata completamente, espressa in percentuale (%):

$$SOC = \frac{C_r}{C_{actual}} \cdot 100\%$$

Invece, il SoH (State of Health) o stato di salute, è un parametro che indica la massima quantità di carica che la cella è in grado di immagazzinare; tale carica diminuisce durante la vita e l'uso della batteria. Per la stima di questo parametro occorre conoscere la capacità attuale della batteria e l'impedenza:

$$SOH_{C} = \frac{C_{actual}}{C_{nominal}}$$
$$SOH_{R} = \frac{R_{actual}}{R_{nominal}}$$

3.2 Stima del SoC: metodi Ampere-hour counting o Coulomb counting

Una tecnica diffusa per la determinazione del SoC della batteria sta nel conteggio degli Ampere-hour o conteggio dei Coulomb, che consiste nel calcolo dell'integrale temporale della corrente nella batteria, ovvero [1]:

$$SOC(t_2) = SOC(t_1) + \frac{1}{C_{actual}} \int_{t_1}^{t_2} \frac{\eta i(t)}{3600} dt$$

Dove t_1 e t_2 rappresentano l'arco temporale in cui viene applicato il metodo, η è la efficienza di Coulomb ($\eta \approx 1$ per le celle agli ioni di Litio), un parametro che tiene conto della diversa efficienza di trasferimento di carica tra le fasi di carica e scarica; i(t) rappresenta invece la corrente attraverso i morsetti della batteria.

Per applicare questa semplice tecnica, occorre conoscere il valore iniziale SoC (t_1) e per la capacità attuale della batteria, si usa la seguente:

$$C_{actual} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \frac{\eta i(t)}{3600} dt}{SOC_{OCV}(t_2) - SOC_{OCV}(t_1)}$$

La capacità attuale viene calcolata come il rapporto tra gli Ampere-ora che sono stati caricati o scaricati e la differenza calcolata in termini di SoC ($\Delta SOCOCV$) stimata dalle curve di tensione a circuito aperto (OCV, Open Circuit Voltage).

3.3 Test di scarica

Questa tecnica consiste in una scarica controllata a corrente costante ed una seguente ricarica [29]. È il metodo più sicuro in termini di stima dello stato di carica, ma il suo grosso svantaggio è che non è utilizzabile in applicazioni real-time, sia perché bisogna aspettare il tempo di una scarica, sia perché durante il test la batteria non è connessa al carico (serve una corrente costante) e dunque il funzionamento del sistema è interrotto.

3.4 Open Circuit Voltage method (OCV method)

In applicazioni low-power, che lavorano con piccole correnti di carico, si può risalire allo stato di carica della batteria a partire dalla tensione a vuoto OCV. C'è infatti una relazione che lega il SoC all'OCV: lo stato di carica, infatti, è legato alla quantità di ioni che, a loro volta, determinano la tensione di cella; questa corrispondenza permette di ricavare il valore esatto di SoC a partire da una misura della tensione a vuoto. Per ottenere una misura esatta di OCV occorre attendere alcune ore che corrispondono al tempo di rilassamento della cella che deve essere scollegata dal carico. Inoltre, la relazione OCV(SoC) non è lineare e presenta una zona quasi piatta (dipende dalla chimica) in cui ad un intervallo di SoC più o meno ampio corrisponde un piccolo intervallo [29].

3.5 Model based method

Un metodo di stima basato su un modello di cella è utile quando l'applicazione richiede una stima online del SoC, quando, cioè, occorre conoscere il valore di tale parametro durante la normale fase operativa del sistema. Il modello deve essere in grado di riprodurre in maniera fedele il comportamento reale della cella e, di conseguenza, di fornire delle informazioni (tra cui lo stato di carica) quando come ingressi riceve le grandezze misurabili della batteria, ovvero tensione e corrente [29].

3.6 Parametri secondari della batteria

3.6.1 RUL (Remaining Useful Life)

I parametri caratteristici di una batteria non sono solo il SoC e il SoH ma anche altri come la RUL, DoD (Depth of Discharge), EoL (End of Life) e EoD (End of Discharge). Il BMS gioca un ruolo determinante nel determinare la RUL, ovvero la vita residua utile delle batterie. Più precisamente, la RUL è l'arco temporale rimanente dallo stato presente alla fine della batteria [30].

$$RUL = Tf - Tc$$

Tf è la variabile temporale di tipo random di avaria/guasto quando è rilevata una degradazione.

3.6.2 DoD (Depth of Discharge)

La DoD, ovvero la profondità di scarica, indica la percentuale della capacità della batteria che è stata scaricata [30]. È espressa come percentuale della capacità massima. Dove

$$DOD(t) = 1 - SOC(t) = \frac{Q_0 - \int_0^t I_b(\tau) d\tau}{Q_0} \times 100\%$$
$$SOC(t) = \frac{\int_0^t I_b(\tau) d\tau}{Q_0} \times 100\%$$

 $I_{\rm b}(\tau)$ è la corrente di carica; $\int_{t_0}^t I_b(\tau) d\tau$ è la carica convogliata sulla batteria

3.6.3 EoL e EoD

Il parametro EoL (End of Life) indica il momento in cui una batteria non è più in grado di avere prestazioni affidabili, il che può provocare un guasto [30]. Infine, vi è il parametro EoD, ovvero la fine del periodo di scarica; esso rappresenta il valore più basso della capacità della batteria causato da una perdita di energia che si verifica all'interno della stessa. Il EoD stima il tempo in cui viene raggiunta una determinata tensione di soglia di cutoff.

4 GESTIONE TERMICA DELLA BATTERIA DI ALIMENTAZIONE

Il miglioramento delle prestazioni di potenza nei EV (Electric Vehicles), richiede batterie sempre più ampie ed elevate correnti di scarica [31]. Tali batterie producono molto calore durante i rapidi cicli di carica/scarica a valori di corrente elevati, come nei processi di rapida accelerazione, a cui fanno seguito numerose reazioni chimiche ed elettrochimiche. I rischi per la sicurezza, come il surriscaldamento, combustione ed esplosioni aumentano all'aumentare dell'energia termica situata all'interno della batteria /pacco batteria. Tutto ciò richiede un valido sistema di gestione dell'energia termica. Il crescente sviluppo dei veicoli alimentati a batteria, richiede la realizzazione di batterie di grandi dimensioni. L'aumento delle dimensioni implica l'insorgere di una serie di problemi di stabilità termica. È fondamentale conoscere il meccanismo di degradazione delle prestazioni delle batterie; nelle batterie agli ioni di litio, per esempio il calore può essere generato nello strato dell'interfaccia elettrolitica solida (SEI, Solid Electrolyte Interface). La generazione di calore può essere espressa così [31]:

$$q = \sum_{j} \alpha_{sj} i_{nj} (\phi_s - \phi_e - U_j) + \sum_{j} \alpha_{sj} i_{nj} T \frac{\partial U_j}{\partial T} + \sigma^{eff} \nabla \phi_s \nabla \phi_s$$
$$+ k^{eff} \nabla \phi_e \nabla \phi_e + K_D^{eff} \nabla \ln c_e \nabla \phi_e$$

 α_{sj} è l'area della superficie di interfaccia per unità di volume (cm²/cm³);

 i_{nj} è la densità della corrente di trasferimento (A/cm²) ;

 $\phi_{\rm S}$ è il potenziale nella matrice di fase (V);

 ϕ_e è il potenziale nella soluzione di fase (V);

- U_j è il potenziale all'equilibrio (V);
- T è la temperatura (K);
- $\sigma_{e\!f\!f}$ è la matrice di conduttività effettiva ($\Omega^{-1}\,{
 m cm}^{-1}$) ;
 - C_e è la concentrazione dell' elettrolita (mol/cm³);

Il calore prodotto all'elettrodo positivo è circa 3 volte quello della batteria totale. Per raggiungere un buon equilibrio tra prestazioni e durata della vita della batteria il range di funzionamento nelle batterie Li-Ion è di 25°- 40 °C. In generale la temperatura pregiudica negativamente le prestazioni della batteria, tra cui:

- il generico sistema elettrolitico;
- la capacità di potenza ed energia;
- affidabilità;
- durata della batteria e costi.

4.1 Gestione dell'energia termica della batteria:

Al fine di ottimizzare le prestazioni della batteria o del pacco/modulo [31], il monitoraggio dell'energia termica (TEM, Thermal Energy management) dovrebbe avere:

- ottimi range di temperatura di funzionamento per ciascuna cella e tutti i moduli batteria, respingendo il calore in condizioni climatiche calde o aggiungendo calore in caso di temperature basse;
- piccole variazioni di temperatura all'interno della cella e del modulo;
- dimensioni ridotte e peso leggero;
- apparato di ventilazione nel caso in cui la batteria generi gas potenzialmente pericolosi.
- Il TEM può essere suddiviso in quattro categorie a seconda del materiale usato:
- aria per riscaldamento/raffreddamento/ventilazione (Fig 5.1 sotto):



Fig. 4.1 Gestione termica mediante utilizzo di aria [31]

- liquido per riscaldamento/raffreddamento (fig.5.2 seguente):



(c) Active cooling (high temperature)/heating (cold temperature)

4.2) Gestione Termica utilizzando un liquido [31].

- Materiali a cambiamento di fase;
- Combinazioni dei materiali/mezzi indicati precedentemente.

Inoltre, il TEM può essere passivo (solo l'ambiente circostante viene utilizzato) o attivo (sorgenti che forniscono riscaldamento/raffreddamento installate sul sistema).

Spesso la scelta di utilizzare aria per il monitoraggio termico della batteria risulta essere l'approccio più semplice, sia per il costo che per i limiti di spazio.

Ci sono due modi con cui l'aria fluisce attraverso la batteria, come mostrato nella fig.4.3 sottostante:



Fig.4.3 Flusso d'aria attraverso la batteria [31].

Le batterie agli ioni di litio hanno elevate densità di potenza, tuttavia la loro potenza è fortemente limitata alle basse temperature (es: -30°C). Esistono due modi per riscaldare rapidamente la batteria, mediante dei riscaldatori elettrici insiti all'interno della batteria oppure riscaldando il refrigerante della batteria con il calore trasportato dal refrigerante del motore. Tuttavia, per riscaldare completamente la batteria, è preferibile usare un fluido anzichè aria, come l'acqua che possiede una maggiore conduttività dell'aria. Può essere realizzata mediante un involucro che riveste la batteria immergendo i moduli in un dielettrico fluido per diretto contatto, oppure adagiando i moduli su delle piattaforme riscaldate o raffreddate a liquido (Heat Sinks, o dissipatori) [31].

4.2 Gestione termica mediante PCM (Phase Change Materials)

L'impiego di PCM, cioè di materiali a cambiamento di fase per la gestione termica delle batterie, determina prestazioni migliori non solo per la dissipazione di calore, ma anche per il riscaldamento in ambienti freddi [31].

I PCM si suddividono in organici, inorganici ed eutettici. Molti ricercatori concordano sul fatto che l'adozione di un sistema di immagazzinamento di calore latente usando PCM è un modo efficace per il convoglio di energia termica. Allo stato attuale, la paraffina risulta essere il PCM di elezione, grazie alla sua assenza di tossicità, non corrosività, stabilità, basso costo e valori alti di calore latente. Nella figura seguente è mostrato uno schema di gestione termica mediante PCM:



Fig.4.4 Gestione termica tramite PCM [31]

4.3 Analisi delle prestazioni dei PHEV in condizioni di bassa temperatura

In ambienti a temperature sotto lo zero, i PHEV subiscono una perdita drammatica della loro autonomia elettrica a causa delle riduzioni di potenza ed energia specie nelle batterie LiFePo4 [32].

Ciò determina una riduzione della vita della batteria stessa. Le prestazioni dei PHEV in condizioni di basse temperature sono valutate considerando tre fattori: costo del combustibile, costo dell'energia elettrica e costo di degradazione della batteria. I PHEV possono ridurre il consumo di carburante ridimensionando il motore. Le batterie agli ioni di Litio possono subire importanti perdite della capacità per diverse ragioni: in primo luogo l'elettrolita diventa viscoso e anche parzialmente solidificato; da ciò consegue una ridotta conduttività ionica; poi la compatibilità tra elettrolita ed elettrodo è deteriorata; infine il catodo risulta privo di litio e l'anodo ne è sovraccarico. Ne consegue un ispessimento dello strato di interfaccia elettrolita diminuisce alle basse temperature. Per evitare tutto ciò si può preriscaldare il pacco batteria prima dell'accensione del veicolo. Esistono diverse strategie di gestione energetica: quella on line e quella off line.

Quelle online, possono essere adottate nelle applicazioni real time. Un esempio è la strategia di controllo del termostato (TCS) O la strategia di svuotamento-sostenimento della carica (CD-CS, ovvero Charge Depletion-Charge Sustaining), ampiamente utilizzata nei PHEV. Il pacco batteria può essere riscaldato mediante un dispositivo di riscaldamento convettivo in condizioni di basse temperature.

Questo dispositivo, che impiega un riscaldatore resistivo e un ventilatore, è impiegato per la sua efficiente capacità di riscaldamento rapido. La resistenza di riscaldamento trasforma l'energia elettrica in calore e il ventilatore crea un flusso convettivo per aumentare il trasferimento di calore dal riscaldatore alla batteria. Esiste una relazione tra potenza di ingresso e potenza di uscita, cioè [32]:

$$P_{bat} + P_{EGU} = P_{dem} + P_{heat}$$

 P_{bat} è la potenza della batteria

 P_{dem} è la potenza dell'unità di controllo elettronico

 P_{EGU} è la potenza richiesta dal Bus.

 P_{heat} è la potenza di riscaldamento.

La funzione di preriscaldamento è già integrata nella strategia CD-CS. Poiché il PHEV può essere caricato dalla rete (Grid), ci sono tre sorgenti di alimentazione utilizzabili per preriscaldare la batteria, cioè la rete stessa, l'unità di controllo (EGU) e la batteria stessa. Quando il Bus è in esecuzione, la EGU è l'unica sorgente di alimentazione per sostenere la potenza di riscaldamento, dal momento che la rete non è disponibile. Il completo processo di gestione energetica è riportato nella seguente Fig.4.5:



Fig.4.5 Processo di gestione energetica [32].

Inoltre, le quattro modalità riportate nella Fig.4.5:

- modalità carica-calore
- modalità carica-no calore
- modalità no carica-calore
- modalità no carica-no calore

sono utilizzate per rappresentare ogni scenario di potenza.

Ad esempio, il riscaldamento senza carica significa che la batteria deve essere caricata ma il processo di riscaldamento non viene applicato. Inoltre, si suppone che tutta l'energia del processo di frenata rigenerativa del PHEV possa essere recuperata dalla batteria.

5 BILANCIAMENTO PASSIVO E ATTIVO E RELATIVE CONFIGURAZIONI CIRCUITALI

5.1 Classificazione dei metodi di bilanciamento

Le topologie di bilanciamento possono essere classificate come bilanciamento passivo e attivo, come mostrato in Fig 5.1. I metodi di bilanciamento passivo rimuovono la carica in eccesso dalle celle completamente cariche, attraverso un elemeno passivo, il resistore, fino a quando la carica non arriva ad assumere la stessa delle celle meno cariche presenti nel pacco batteria o un valore di riferimento. I metodi di bilanciamento attivo rimuovono invece la carica dalle celle a energia più elevata e la convogliano alle celle aventi minore energia. I metodi di bilanciamento attivi possono essere estesi solo alle batterie agli Ioni di Litio dal momento che la temperatura di queste batterie deve rientrare rigorosamente nel range di funzionamento di sicurezza. I metodi di bilanciamento possono essere raggruppati in 4 categorie [33]:

- 1) Metodo dissipativo.
- 2) Metodo da singola cella a pacchetto batteria.
- 3) Metodo da pacchetto a singola cella.
- 4) Metodo da singola cella a singola cella.
- A seconda della topologia circuitale adottata, tali metodi sono classificabili come [33]:
- 1) Metodo Shunting:
 - Resistore Shunt fisso;
 - Resistore Shunt commutato (SR, Switched Shunting Resistor)
 - Shunting controllato con una modulazione a larghezza di impulsi (PWM, Pulse Width Modulation)
 - Convertitore risonante
 - Boost shunting
 - Shunting completo.
- Metodo shuttling che viene realizzato mediante il condensatore commutato (SC, Switched Capacitor) e il condensatore commutato singolo (SSW, Single Switched Capacitor).
- 3) Metodo a convertitore di energia:
 - Convertitore a rampa.
 - Convertitore Ćuk.
 - Trasformatore commutato (ST, Switched Transformer).
 - Convertitore Buck/Boost (ovvero convertitore riduttore/elevatore) che consiste di un convertitore Buck (o anche step-down) seguito da un convertitore Boost (o step-up).

- Convertitore Flyback.
- Convertitore Quasi-risonante.
- Convertitore Full Bridge.

Nella figura 5.1 sotto riportata, vengono illustrati con una struttura ad albero i principali metodi di bilanciamento passivi e attivi:



Fig.5.1 Struttura ad albero dei principali metodi di bilanciamento [33].

5.2 Bilanciamento passivo

Il bilanciamento passivo consiste nella rimozione della carica in eccesso dalla cella pienamente carica, mediante un elemento passivo, cioè una resistenza, fino a che la sua carica non raggiunge il livello delle celle aventi carica minore nel pacchetto batteria o un determinato valore di riferimento [33].

5.2.1 Bilanciamento con Resistore Shunt

Esistono due sottocategorie di questa topologia di bilanciamento di tipo shunt: quello a resistore fisso (FR, Fixed Resistor) il quale bypassa costantemente tutte le celle e la resistenza è regolata per limitare le tensioni sulle celle. Può essere utilizzato solo per batterie al Piombo acido e Nickel. Le sue caratteristiche sono la sua semplicità, basso costo, ma presenta una costante energia dissipata come calore per tutte le celle. Questa configurazione è rappresentata nel Fig 5.2-a:



Fig.5.2 Resistore shunt a) resistore fisso e b) resistore commutato [33]

Il secondo metodo è chiamato Resistore Shunt commutato (SR): tale topologia, riportata in Fig.5.2-b, si basa sulla rimozione di energia dalle celle maggiormente cariche, (non in maniera costante ma controllata), usando appositi interrutori/relè. Questo metodo è più efficiente del primo, è semplice, affidabile e può essere impiegato anche nelle batterie agli ioni di Litio. Il principale svantaggio di questi due metodi è che l'energia in eccesso prelevata dalle celle maggiormente cariche è dissipata in calore per effetto Joule: ciò richiede un accurato monitoraggio termico del sistema. Entrambi i metodi sono realizzabili per applicazioni a bassa potenza con corrente di dissipazione < 10 mA/Ah [33].

5.3 Metodi di bilanciamento attivi

Tali metodi usano la rimozione della carica dalle celle maggiormente cariche e la indirizzano a quelle aventi carica minore. Vengono impiegati elementi attivi come condensatori, induttori, trasformatori e convertitori di energia.

5.3.1 Metodi di bilanciamento a Shuttling Capacitivo

Questi metodi utilizzano dei condensatori come dispositivi esterni di accumulo energia, per il trasferimento di energia tra le celle del pacco batteria. Esistono 3 topologie di condensatori shunt:

- il condensatore standard commutato (SC, Switched Capacitor);
- il condensatore a singola commutazione (SSC, Single Switched Capacitor)
- il condensatore commutato a due livelli (DTSC, Double Tiered Switched Capacitor).
Condensatore commutato (Fig5.3): richiede N-1 condensatori e 2N interruttori per bilanciare N celle. Ha una semplice strategia di controllo avendo solamente due stati. Lo svantaggio di questo metodo di bilanciamento è l'elevato tempo di equalizzazione.



Fig. 5.3 Condensatore base commutato (SC) [33].

2) Condensatore a singola commutazione (SSC): è una derivazione del condensatore standard commutato, ma utilizza un unico condensatore. Il SSC Richiede per l'appunto un condensatore, N+5 interruttori per bilanciare le celle. Ha una semplice strategia di controllo; il controllore seleziona la cella avente carica maggiore e quella avente carica minore e attiva i corrispondenti interruttori per il trasferimento di energia tra loro. Questo tipo di condensatore è raffigurato nella Fig.5.4 seguente:



Fig.5.4 Condensatore a singola commutazione [33].

3) Condensatore commutato a due livelli (DTSC): questa terza topologia di bilanciamento usa due livelli o piani di condensatori per il trasporto di energia. Richiede N condensatori e 2N interruttori per bilanciare N celle. Il vantaggio di questa topologia è che il secondo livello di condensatori riduce il periodo di bilanciamento ad 1/4 del tempo richiesto dal metodo SC. La Fig.5.5 rappresenta il DTSC:



Fig. 5.5 Condensatore commutato a due livelli [33].

5.3.2 Metodi di Bilanciamento con Induttori e Trasformatori

Questi metodi di bilanciamento delle celle a conversione di energia usano induttori e trasformatori per trasferire l'energia da una cella/gruppo di celle ad un'altra cella/gruppo di celle. Grazie alla propria corrente di bilanciamento molto alta, essi offrono un tempo di esecuzione di bilanciamento minore. Il loro svantaggio è il relativo elevato costo e le perdite magnetiche per i trasformatori. Tra questi metodi vi sono:

- 1) Induttore a singola/multipla commutazione (SSI, Single Switched Inductor/ MSI, Multiple Switched Inductor).
- Trasformatore a singolo avvolgimento detto anche autotrasformatore (SWT, Single Winding Transformer).
- 3) Trasformatore ad avvolgimenti multipli/multitrasformatore.

1) Induttore a singola/multipla commutazione: l'utilizzo di uno o più induttori per il bilanciamento delle celle è raffigurato in Fig.5.6 sottostante:



Fig. 5.6 Induttore a singola (a)/multipla commutazione (b) [33]

L'induttore a singola commutazione (SSI) è mostrato in Fig.5.6-a: è un sistema di bilanciamento che impiega un solo induttore per il trasferimento di energia all'interno dello stesso pacchetto batteria. Il sistema di controllo rileva le tensioni sulle celle e seleziona le due celle che saranno impiegate per il trasferimento di energia. Invece l'induttore a commutazione multipla (MSI), impiega N-1 induttori per bilanciare N celle (vedere Fig.5.6-b), dove il sistema di controllo rileva la differenza di tensione tra due celle adiacenti, per applicare una modulazione a larghezza di impulsi (PWM, Pulse Width Modulation), con la condizione che la cella a potenziale maggiore sia connessa per prima. Entrambe queste topologie hanno un tempo di equalizzazione rapido. Il principale svantaggio del MSI è che ci vuole un tempo relativamente lungo per trasferire l'energia dalla prima all'ultima cella, specialmente per pacchi batteria molto estesi. Il metodo SSI ha un tempo di equalizzazione inferiore rispetto al metodo MSI.

2) Trasformatore a singolo avvolgimento (SWT, Single Winding Transformer):

tale metodo è un convertitore di energia selezionabile e prevede due tecniche di bilanciamento per le celle. La prima tecnica è chiamata topologia da pacco a cella (come mostrato in Fig.5.7): è basata sul trasporto di energia dall'intero pacco batteria attraverso il trasformatore commutato alle celle aventi minore energia, utilizzando il corrispondente interruttore. La seconda tecnica è detta da cella a pacco batteria e si basa sul trasferimento di energia, attraverso il trasformatore, dalle celle aventi maggiore energia al pacco batteria.



Fig. 5.7 Trasformatore a singolo avvolgimento [33].

3) Trasformatore ad avvolgimenti multipli (MWT): la topologia di bilanciamento MWT è mostrata in Fig.5.8. Due diverse strutture possono essere impiegate, la prima è nota come "trasformatore condiviso", mostrata in Fig.5.8, e la seconda è nota come trasformatori multipli (Multiple Transformers) mostrata in seguito in Fig.5.9. La topologia a trasformatore condiviso ha un singolo nucleo magnetico con un avvolgimento primario e avvolgimenti secondari multipli, uno per ciascuna cella. Ha due configurazioni circuitali, la prima è definita Flyback, la seconda Forward.



Fig.5.8 Trasformatore ad avvolgimenti multipli a) Flyback b) Forward [33]. Nella struttura Flyback l'interruttore connesso al lato primario del trasformatore è acceso. Così una parte dell'energia è immagazzinata nel trasformatore. Poi quando l'interruttore viene spento, l'energia è convogliata sul trasformatore secondario. La maggior parte della corrente indotta sarà fornita alle celle a tensione minore attraverso il diodo. Nella struttura Forward quando la differenza di tensione è rilevata, l'interruttore connesso alla cella a tensione maggiore viene acceso e l'energia è trasferita da questa cella alle altre attraverso il trasformatore e i diodi antiparallelo dell'interruttore. La seconda topologia, nota come bilanciamento mediante trasformatori multipli è mostrata in Fig.5.9





Essa utilizza diversi trasformatori multicore, cioè un nucleo per ciascuna cella.

5.3.3 Metodi di bilanciamento mediante convertitori di energia

I convertitori di energia sono:

- 1) Convertitore Ćuk
- 2) Convertitore Buck o/e Boost
- **3)** Convertitore Flyback
- 4) Convertitore a rampa
- 5) Convertitore Full-Bridge
- 6) Convertitore Quasi-Risonante

 Convertitore Ćuk: è un convertitore bidirezionale; può essere considerato come una topologia di equalizzatore di singole celle, che bilancia ciascuna coppia di celle tra loro adiacenti. Richiede N-1 equalizzatori per bilanciare N celle. Ogni ICE (Individual Cell Equalizer), ovvero ciascun equalizzatore ha due induttori, due interruttori, e un condensatore. Tale topologia richiede un lungo tempo di bilanciamento.

Questa topologia è riportata nella Fig.5.10 seguente:



Fig.5.10 Convertitore Cuk [33].

2) Convertitore Buck o/e Boost: I convertitori di energia riduttori (Buck o step-down) ed elevatori (Boost o Step-up) sono convertitori a corrente continua. Il convertitore Buck è usato per trasferire energia da una sorgente di alimentazione o dal pacco batteria alla cella (celle) deboli, mentre il convertitore Boost è impiegato per rimuovere l'energia in eccesso dalla singola cella (celle) al pacco batteria. Infine, c'è il convertitore Buck-Boost che può essere usato per rimuovere l'energia in eccesso al collegamento DC o a una batteria EV ausiliaria e ritrasferirla nuovamente alla cella debole (celle deboli).

I metodi citati sono molto dispendiosi e complessi ma molto adatti al design modulare. Questa topologia è illustrata nella Fig.5.11 seguente:



Fig. 5.10 Convertitore Buck-Boost [33].

3) Convertitore Flyback: questi convertitori possono essere sia unidirezionali che bidirezionali, come illustrato in Fig.5.11. Nella topologia unidirezionale l'energia della cella più carica è immagazzinata nel trasformatore quando l'interruttore accoppiato è acceso, mentre viene convogliata nel pacco batteria quando è spento. Il convertitore flyback bidirezionale è più flessibile nella trasmissione di energia poiché l'energia stessa può anche essere trasferita dal pacco batteria alle celle. Gli svantaggi di questa topologia sono le perdite magnetiche.



Fig.5.11 Convertitore Flyback [33].

4) Convertitore a rampa: lo schema di equalizzazione è mostrato nella Fig.5.12. Richiede un solo avvolgimento secondario per ogni coppia di celle anziché per singola cella. Durante la prima metà del periodo di bilanciamento, la maggior parte della corrente è impiegata per caricare le celle dispari a potenziale minore, mentre la seconda metà del periodo di bilanciamento impiegata per caricare le celle pari. Ecco il motivo per cui è chiamato convertitore a rampa.



Fig.5.12 Convertitore a rampa [33].

5) Convertitore Full-Bridge: è un convertitore di energia (Fig.5.13) che impiega una modulazione a larghezza di impulsi (PWM, Pulse Width Modulation). Può essere utilizzato in modalità AC-DC o DC-DC. La modalità AC-DC è molto idonea per applicazioni PHEV. Entrambe hanno bisogno di un controllo intelligente e sono più adatte a estesi pacchi batteria ed elevata potenza. Il principale svantaggio di questa topologia è l'elevato costo e la complessità di controllo.



Fig. 5.13 Convertitore Full-Bridge [33].

6) Convertitore Quasi-Risonante: questa ultima topologia può essere sia quasi risonante a tensione zero, sia quasi ristorante a corrente zero. Anziché utilizzare una strategia di controllo intelligente per generare un segnale PWM, i circuiti risonanti impiegati in questa struttura, servono sia a trasferire energia che a pilotare gli interruttori. Il principale vantaggio di tale topologia È che può ridurre le perdite da commutazione (Switch losses) aumentando così l'efficienza del sistema di bilanciamento. Questa topologia è illustrata nella Fig.5.14 seguente:



Fig.5.14 Convertitore Quasi-Risonante a corrente zero [33].

5.4 Confronto delle topologie di bilanciamento attivo

In questo paragrafo vengono confrontati le varie tipologie di bilanciamento descritte nel paragrafo 5.3. Vengono descritte le correnti medie per i metodi di bilanciamento attivi, considerando che i trasferimenti di energia vengono ripetuti velocemente (1/T), migliaia di volte al secondo. Le caratteristiche delle traiettorie di tensione e corrente rimangono le stesse e variano solo in base alle tensioni delle celle della batteria. Pertanto, le traiettorie possono essere rappresentate da valori medi per la durata del ciclo T. Per i bilanciamenti attivi basati su condensatori, uno o più condensatori sono collegati in parallelo a una cella. La differenza di tensione ΔU tra la cella e il condensatore conduce a un trasferimento di

$$i_{\rm C}(t) = \frac{\Delta U}{R_{\rm C}} \cdot e^{-t/\tau}$$

Dove:

 $R_{\rm C}$ è la resistenza capacitiva.Cè la capacità. $\tau = R_{\rm C}C$ è la costante di tempo.

Commutando il condensatore ad una cella diversa avente differente tensione, la carica fluisce verso questa cella. Supponendo che i valori assoluti delle correnti di carica e scarica siano noti come [34] :

$$\overline{I} = \overline{I}_{\rm in} = \overline{I}_{\rm out}$$

per un Flying Capacitor, avente capacità C, la corrente media risultante dal processo di bilanciamento risulta essere:

Dove:

$$\overline{I}_{in} = \overline{I}_{out} = \frac{C}{T}(U_i - U_j) \tanh(\frac{T}{4\tau})$$

T è l'intervallo di commutazione

 U_i è la tensione più alta della i-esima cella.

 U_i La tensione più bassa della j-esima cella.

Per il condensatore commutato (SC, Switched Capacitor), si ha:

$$\overline{I}_{\text{in}} = \overline{I}_{C_k} = \frac{C}{T} (U_k - U_{k+1}) \tanh(\frac{T}{4\tau})$$

Con N condensatori e N celle, $\forall k \in [1, N-1] \ U_k \in U_{k+1}$ le tensioni di due celle adiacenti, la cella k-esima e la cella (k+1) esima, rispettivamente. Invece, per il condensatore commutato a due livelli (DTSC, Double Tiered Switched Capacitor) si hanno (N-1) condensatori nel primo livello e (N-2) condensatori nel secondo livello. La corrente dei condensatori del primo livello può essere calcolata $\forall k \in [1, N-1]$ sempre con la formula precedente del condensatore commutato.

La corrente dei condensatori del secondo livello, sono calcolati con la seguente [34]:

$$\overline{I}_{C2_{k}} = \frac{C_{2}}{T} (u_{k} - u_{k+2}) \tanh(\frac{T}{4\tau_{2}}), \forall k \in [1, N-2]$$

la quale conduce alle correnti delle celle:

$$\overline{I}_{\text{in}} = \overline{I}_{\text{out}} = \frac{C_1}{T} \Delta U_1 \tanh(\frac{T}{4\tau_1}) + \frac{C_2}{T} \Delta U_2 \tanh(\frac{T}{4\tau_2})$$

Dove ΔU_1 e ΔU_2 sono le differenze di potenziale che dipendono dalla posizione della singola cella nel pacco batteria. C_1 e C_2 sono le capacità e possono differire l'una dall'altra. Per quanto riguarda i metodi di bilanciamento induttivi, con l'impiego di induttori e trasformatori, sussiste la seguente relazione che esprime la corrente media dell'elemento induttivo:

$$t \in [0,T]:$$
 $\frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{L}}(t)}{\mathrm{d}t} = -\frac{R_{\mathrm{L}}}{L}i_{\mathrm{L}}(t) \pm \frac{U_{k}}{L}$

- L è l'induttanza
- $R_{\rm L}~$ è la resistenza dell'elemento induttivo per l'intervallo di carica t_1 e quello di scarica $t_2~(t_1 + t_2 = T)$

Per un singolo induttore si richiedono due equazioni relative alla corrente media. La corrente media di scarica \overline{I}_{out} della cella con tensione U_i è data dalla[34]:

$$\overline{I}_{\text{out}} = \frac{1}{2} I_{\max} \frac{1}{\frac{U_j}{U_i} + 1} \tag{1}$$

Dove

 I_{\max} è la corrente massima ovvero $I_{max} = \frac{U_i}{L} t_1$

Invece la corrente di carica della cella a più basso potenziale elettrico U_j è data da:

$$\overline{I}_{\rm in} = \frac{1}{2} I_{\rm max} \frac{1}{\frac{U_i}{U_j} + 1}$$
(2)

Il trasformatore commutato (SC, Swtiched Capacitor) consiste di L_p avvolgimenti primari e L_s avvolgimenti secondari per N celle. Considerando i trasferimenti di energia unidirezionali, l'energia prelevata da tutte le celle in un modulo con la corrente media di scarica è data dalla seguente [34]:

$$\overline{I}_{\text{out}} = \overline{I}_{\text{Mod,out}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L_{\text{s}}}{L_{\text{p}}}} I_{\text{s,max}} \frac{1}{\frac{U_{\text{Mod}}}{U_{j}} \sqrt{\frac{L_{\text{s}}}{L_{\text{p}}}} + 1}$$
(3)

Dove:

 U_{Mod} è la tensione del modulo batteria

 $I_{
m s,max}$ è la corrente massima del singolo avvolgimento

L'energia è temporaneamente immagazzinata nel nucleo. In seguito, l'energia viene direzionata e convogliata nella cella a tensione U_j e la corrente di carica \overline{I}_{in} espressa nella formula seguente, serve per bilanciare i livelli energetici delle celle [33].

$$\overline{I}_{\rm in} = \frac{1}{2} I_{\rm s,max} \frac{1}{\frac{U_j}{U_{\rm Mod}} \sqrt{\frac{L_{\rm p}}{L_{\rm s}}} + 1}$$
(4)

Mentre per il caso dei trasformatori multipli vi sono N trasformatori. In questo caso l'avvolgimento primario è connesso a tutte le celle del modulo batteria, mentre quelli secondari sono connessi ciascuno ad una singola cella.

$$\overline{I}_{ ext{out}} = \overline{I}_{ ext{Cellout}} - \sum \overline{I}_{ ext{Mod},i}$$

 $\overline{I}_{\mathrm{out}}$

è la corrente di una singola cella e descrive il trasferimento di energia unidirezionale da una singola cella al modulo batteria.

 $\overline{I}_{Cell_{out}}$ è la corrente della cella selezionata a cui va sottratta la somma delle correnti del modulo batteria. Le correnti per tutte le altre celle del modulo sono date dalla seguente espressione:

$$\overline{I}_{\mathrm{in}} = \sum \overline{I}_{\mathrm{Mod},i}$$

Mentre il trasferimento unidirezionale di energia dal modulo batteria alle singole celle è dato dalla seguente:

$$\overline{I}_{\text{out}} = \sum \overline{I}_{\text{Mod},i}$$

La precedente formula è valida per ogni cella del modulo batteria; la effettiva corrente risultante della singola cella è:

$$\overline{I}_{\rm in} = \overline{I}_{\rm Cell_{\rm in}} - \sum \overline{I}_{{\rm Mod},i}$$

Per il convertitore Buck-Boost (riduttore-elevatore) si hanno invece N-1 induttori per il trasferimento di energia tra cella adiacenti. Per la prima o ultima cella in un modulo batteria la corrente media (aritmetica) è calcolabile riutilizzando le formule (1) e (2) menzionate precedentemente (fine pag.44), con i = 1, j = 2 oppure i = N-1 e j = N, rispettivamente. Per tutte le altre celle adiacenti, $\forall j \in [2, N-1]$, le correnti medie si calcolano mediante la seguente espressione:

$$\overline{I}_{\text{out}} = \frac{1}{2} I_{\max} \frac{1}{\frac{U_j}{U_{j+1}} + 1} + \frac{1}{2} I_{\max} \frac{1}{\frac{U_j}{U_{j-1}} + 1}$$
$$\overline{I}_{\text{in}} = \frac{1}{2} I_{\max} \frac{1}{\frac{U_{j+1}}{U_j} + 1} + \frac{1}{2} I_{\max} \frac{1}{\frac{U_{j-1}}{U_j} + 1}$$

Passiamo poi al trasformatore ad avvolgimenti multipli e al convertitore Flyback. Il Flyback si differenzia dal trasformatore ad avvolgimenti singoli (avente un singolo avvolgimento secondario sul nucleo) per il fatto di avere per ogni cella avvolgimenti secondari sul nucleo. Le espressioni (3) e (4) possono essere usate per il calcolo delle correnti di bilanciamento [34].

Infine, il convertitore Ćuk: consente il trasferimento bidirezionale di energia per N celle. Il circuito consiste di 2N-2 interruttori, diodi, induttori e N-1 condensatori. Le correnti medie di carica e scarica sono le seguenti:

$$\overline{I}_{\text{out}} = \overline{I}_{\text{in}} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{U_j}{U_{j+1}}\right) \frac{U_j}{L} D^2 T_j$$

Queste correnti sono equivalenti per la costante 0 < D < 0,5 per l'intervallo di commutazione T. In conclusione, quest'ultimo convertitore può essere considerato come un convertitore Boost seguito da un convertitore Buck con una capacità C per accoppiare l'energia.

6 ALGORITMI DI EQUALIZZAZIONE PER LE BATTERIE AGLI IONI DI LITIO

6.1 Algoritmo di equalizzazione di carica per applicazioni EV

Le batterie agli ioni di litio rappresentano la fonte di alimentazione primaria nelle applicazioni EV [35]. Tali batterie hanno comunque alcuni svantaggi tra quali il sovraccaricamento della cella che può provocare esplosione, mentre una cella sottocaricata riduce il ciclo vitale della batteria. L'algoritmo preso in esame è realizzato per batterie connesse in serie di 15,5 Ah e 3,7 V come tensione nominale, ognuna delle quali possiede un circuito integrato che monitora lo stato della batteria. Viene realizzata l'equalizzazione di un pacchetto batteria da otto celle mediante l'uso di un convertitore Flyback DC-DC bidirezionale. I convertitori di potenza come il Buck-Boost, e i convertitori risonanti sono molto impiegati negli Electric Vehicles, grazie alla loro elevata velocità di equalizzazione, alto rendimento e affidabilità. Questi dispositivi sono convertitori DC-DC bidirezionali con degli interruttori. L'algoritmo di equalizzazione di carica descritto in questa sezione della tesi è capace di monitorare una serie di batterie fino a un numero di 12 ma è anche in grado di comunicare con altri circuiti integrati per gestire fino ad alcune centinaia di batterie. Il circuito integrato comunica con un microcontrollore NImyRIO ed esegue l'algoritmo di modularizzazione. Lo sviluppo di questo algoritmo è suddiviso in due parti, la prima consiste di una scheda madre che comprende il microcontrollore e il convertitore Flyback dc-dc, e di una scheda modulo. Quanto detto è illustrato in Fig.6.1-a e Fig.6.1-b. La Fig.6.1-a propone un diagramma a blocchi dell'algoritmo di controllo di equalizzazione, mentre la Fig.6.1-b propone lo stesso algoritmo mediante un diagramma schematico:



Fig.6.1-a Diagramma a blocchi dell'algoritmo di equalizzazione descritto [35].



Fig.6.1-b Diagramma schematico dell'algoritmo di controllo di equalizzazione [35]

Il microcontrollore comunica con il circuito integrato il quale monitora lo stato delle celle e accende o spegne gli interruttori bidirezionali della cella. Il microcontrollore esegue l'algoritmo di equalizzazione di carica e genera un segnale PWM (modulazione a larghezza di impulsi) per il convertitore dc-dc Flyback per proteggere e bilanciare la cella scaricando quella sovraccarica o caricando quella sottocaricata. Il convertitore flyback dc-dc, mostrato in Fig.6.2, fornisce il canale di flusso della corrente durante il processo di carica o scarica. L'interruttore di cella consente a una cella specifica di essere collegata tramite il convertitore al pacchetto celle, al fine di caricarsi o scaricarsi, a seconda che sia debolmente carica o sovraccarica. La media dell'energia convogliata nella cella meno carica (durante il periodo di equalizzazione) dal pacco celle è [35]:

$$Q_1(T_e) = \frac{1}{7} \left(\sum_{i=2}^{8} Q_i(T_e) \right)$$

Si ricorda che nel pacco batteria vi sono 8 celle.

Mentre la potenza media $P_{\text{out_avg}}$ estratta dal pacchetto batteria è uguale alla potenza media di ingresso moltiplicata per il rendimento η del convertitore:



Fig.6.2 Configurazione circuitale del convertitore dc-dc Flyback impiegato [35].

Identificando con D_{\max} il massimo lavoro del segnale PWM per il convertitore Flyback, η il rapporto di trasformazione del trasformatore C_f il filtro condensatore del convertitore dc-dc e L_m la mutua induttanza del trasformatore, si possono introdurre le seguenti espressioni:

$$D_{\max} = \frac{V_{\text{ds_nom}} - V_{\text{in_min}}}{V_{\text{ds_min}} + V_{\text{ds_nom}} - V_{\text{in_max}}}$$
$$n = \frac{N_1}{N_2} = \frac{\eta V_{\text{in_max}} D_{\text{max}}}{V_{\text{out}} (1 - D_{\text{max}})}$$
$$C_f = \frac{\eta P_{\text{in}} D_{\text{max}}}{V_{\text{out}} f V_{c_max}}$$
$$L_m = \frac{(nV_{\text{out}} (1 - D_{\text{max}}))^2}{2\eta P_{\text{in}} f}$$

Dove:

 V_{in_\min} e V_{in_\max} sono i valori minimo e massimo di tensione del pacco batteria.

 $V_{\rm ds_min}\,$ e $V_{\rm ds_nom}$ sono le cadute di tensione minima e nominale sull'interruttore.

 N_1 e N_2 sono i numeri degli avvolgimenti primari e secondari.

 $V_{\rm out}$ è la tensione di uscita.

 $P_{\rm in}$ è la potenza in ingresso.

f è la frequenza di commutazione.

 $\eta~$ è il rendimento del convertitore

Nel paragrafo successivo verrà descritto nel dettaglio l'algoritmo per applicazioni EV precedentemente menzionato.

6.1.1 Descrizione algoritmo di equalizzazione di carica

Il metodo di modularizzazione è una tecnica di equalizzazione di tipo attivo. Il circuito integrato di controllo è il sensore che effettua le misurazioni sullo stato della cella. Esso analizza il livello di tensione delle celle e lo comunica al microcontrollore. Il microcontrollore raccoglie i dati forniti dall' IC di controllo, poi stima il SOC e confronta il risultato con il valore di soglia impostato, rileva la cella sbilanciata ed invia istruzioni all'IC di controllo per attivare l'interruttore bidirezionale della corrispondente cella rilevata e per attivare il funzionamento del convertitore Flyback dc-dc per eseguire l'equalizzazione di carica. Il diagramma di flusso dell'algoritmo è riportato in Fig.6.3 [35]:



Fig.6.3 Diagramma di flusso dell'algoritmo descritto [35].

L'Algoritmo descritto nel diagramma di flusso sopra riportato consiste dei seguenti passaggi [35]:

- 1) Inizializzazione del sistema.
- 2) Registrazione delle letture di tensione V_i delle batterie disposte in ordine crescente, V_1-V_8 .
- Verificare lo stato delle celle se sono normali o anomale. Se le celle funzionano normalmente, si procede allo step due, altrimenti se una cella risulta malfunzionante procedere allo step successivo.
- 4) Esaminare le condizioni della cella. Se $V_1 > V_{max}$ la cella viene ritenuta sovraccarica.
- 5) Eseguire la modularizzazione di sovraccarica e andare allo step 7. Se $V_8 < V_{\min}$ una cella è ritenuta scarsamente carica.
- 6) Eseguire la modularizzazione di sottocarica e procedere allo step 7.
- 7) Iniziare il processo di equalizzazione della cella.
- 8) Stimare il SOC_i corrispondente dellecelle.
- 9) Esaminare il SOC per il bilanciamento di scarica. Se $SOC_1 > OSOC$, la cella con SOC₁ è considerata sovraccarica. SOC₁ è il valore più elevato di SOCdella batteria, mentre OSOC è il valore di soglia di SOC relativa alla cella sovraccarica, che corrisponde a V_{max}
- 10) Eseguire la modalità di scarica.
- 11)Controllare l'interruttore MOSFET bidirezionale, corrispondente alla batteria esaminata, generare il segnale PWM per scaricare la batteria con eccesso di carica, controllare il convertitore dc-dc step-up Flyback e consentire la corrente di bilanciamento per la scarica.
- 12) Esaminare il bilanciamento della cella meno carica.

Se $|SOC_1 - SOC_{avg}| > 2\%$ la rispettiva cella è sbilanciata, dove SOC_{avg} è la SOC media di tutte le batterie e $|SOC_1 - SOC_{avg}|$ è la ΔSOC . Procedere allo step 7, altrimenti se la cella è bilanciata, tornare allo step 2.

- 13) Analizzare il valore SOC per il bilanciamento di carica. Se $SOC_8 < USOC$ la rispettiva batteria con SOC_8 è rilevata come cella sottocaricata, dove SOC_8 è il più basso valore di SOC delle batterie e USOC è il valore di soglia della SOC della cella meno carica che corrisponde a V_{min} .
- 14) Eseguire la modalità di scarica.
- 15) Controllare l'interruttore MOSFET bidirezionale corrispondente alla cella rilevata, generare il segnale PWM per caricare la cella a minore carica, controllare il convertitore dc-dc step-down Flyback (riduttore) e consentire l'invio della corrente di equalizzazione per il caricamento.

16) Esaminare il bilanciamento della cella sottoposta a caricamento. Se $|SOC_8 - SOC_{avg}| > 2 \%$ la rispettiva cella è sbilanciata, dove $|SOC_8 - SOC_{avg}| = \Delta SOC$ procedere allo step 7, altrimenti se la cella è bilanciata, andare allo step 2.

L'algoritmo si ripete per mantenere l'esecuzione continua del processo di equalizzazione di carica delle celle. Infine, il microcontrollore utilizzato è il National Instruments NImyRIO. La sua principale funzione con l'IC di controllo è produrre il segnale PWM per il convertitore dc-dc. L'IC di controllo impiegato è l'LTC5804-2 prodotto dalla Linear Technology. L'equalizzatore di carica descritto ha una eccellente velocità di bilanciamento, buona esecuzione, buon controllo e ottimo rendimento [35].

6.2 Algoritmo SOC-Particle Filter (SOC-PF)

Gli algoritmi di equalizzazione possono essere suddivisi in due classi, la prima nota come "Voltage Based" algorithm e la seconda come "SOC Based" algorithm, cioè algoritmi sviluppati in relazione alle capacità delle celle costituenti il pacco batteria. La prima classe di algoritmi è impiegata nella maggior parte dei sistemi real-time. La seconda classe di algoritmi richiede invece una stima precisa della capacità residua e del SOC delle celle, risultando essere la classe migliore per le batterie agli ioni di Litio. Questo è dovuto al fatto che le curve di carica/scarica delle batterie Li-Ion hanno caratteristiche non lineari, e pertanto una piccola variazione di tensione può determinare un'ampia discontinuità nel livello di capacità, specialmente nella regione piatta di carica/scarica.

Le differenze tra le celle in un pacco batteria è un fenomeno inevitabile a causa delle tolleranze di fabbricazione. Di conseguenza l'equalizzazione delle celle è fondamentale. Verrà descritto un algoritmo di equalizzazione attivo, in relazione alla quantità di capacità residua delle celle, implementabile per i pacchetti di batterie Li-Ion negli EV. Il metodo del Particle Filter [36] è impiegato per stimare gli stati di carica delle celle durante il processo di equalizzazione al fine di eliminare il rumore di deriva (Drift Noise) dei sensori di corrente. Negli EV, i circuiti di equalizzazione sono usati per scaricare la cella avente un SOC più elevato nel pacco batteria e analogamente sono usati per caricare le celle aventi un livello di SOC minore dall'intero pacco batteria.

Pertanto, una topologia di equalizzazione attiva consiste nel trasferimento bidirezionale della carica ed è riportata nella Figura 6.4 seguente:



Fig.6.4 Topologia di equalizzazione attiva bidirezionale [36].

Gli interruttori di bypass e il convertitore dc-dc bidirezionale sono pilotati dal controllore di equalizzatore (EC, Equalizer Controller). Nel caso di equalizzazione da cella a pacco batteria, la cella da equalizzare ha un livello di SOC maggiore del SOC di riferimento. Il SOC di riferimento è solitamente il valore di soglia (0,5-1,5% più alta della SOC media). Nel caso di equalizzazione da pacco batteria a cella, invece, la cella da bilanciare ha un SOC minore rispetto al valore di soglia (0,5-1,5% più bassa della SOC media). La SOC come noto, esprime la capacità residua delle celle. Lo stato di carica è esprimibile come [36]:

$$\operatorname{SOC}(t) = \operatorname{SOC}(t_0) + \eta_{\mathsf{C}} \int_{t_0}^t (i(\tau) + i_{\mathsf{E}}(\tau)) \mathrm{d}\tau / C_{\mathsf{N}}$$

Dove:

SOC(t)è il valore di SOC all'istante t.SOC(t_0)è il valore di SOC all'istante iniziale t_0 C_N è il valore della capacità nominale $i(\tau)$ è il valore di corrente al tempo τ $i_E(\tau)$ è il valore della corrente di equalizzazione al tempo τ η_C è il valore della efficienza di Coulomb

La tensione a circuito aperto (OCV, Open Circuit Voltage), può essere espressa cosi:

$$OCV(t) = E(t) + (i(t) + i_{E}(t))R$$

= $E_0 - K_0 SOC(t) - K_1 / SOC(t) + K_2 \ln(SOC(t))$
+ $K_3 \ln(1 - SOC(t))$

Dove:

OCV(t)	è la tensione a circuito aperto all'istante t
E(t)	è la tensione ai terminali all'istante t
R	è la resistenza interna
i(t)	è la corrente all'istante t
E_0	è la tensione iniziale di circuito aperto.
$K_i (i = 0,$	1, 2, 3) sono i coefficienti del modello

I parametri del modello SOC della cella includono la capacità nominale, SOC iniziale, efficienza di Coulomb, corrente e tensione di circuito aperto (OCV). Il modello del pacco batteria consiste incorpora una serie di modelli di singole celle con i relativi SOC, un BMS e di tipologie di equalizzazione e algoritmi.

6.2.1 Descrizione Algoritmo SOC

Attraverso la discretizzazione delle due equazioni (SOC e OCV) del paragrafo 6.2 precedente, si arriva alla definizione delle equazioni dello spazio di stato a tempo discreto descritte dalle seguenti [36]:

$$\begin{cases} x_k = f(x_{k-1}, u_{k-1}) + w_{k-1} \\ y_k = g(x_k, u_k) + v_k \\ \Leftrightarrow \\ \begin{cases} \text{SOC}_k = \text{SOC}_{k-1} + (i_{k-1} + i_{E,k-1})\Delta t / C_N + w_{k-1} \\ E_k = E_0 - K_0 \text{SOC}_k - K_1 / \text{SOC}_k + K_2 \ln(\text{SOC}_k) + K_3 \ln(1 - \text{SOC}_k) \\ -(i_{k-1} + i_{E,k-1})R + v_k \end{cases}$$

Dove:

X è la variabile di stato

y è la variabile osservata

u è l'ingresso del modello

 Δt è il periodo di campionamento

 $\{w\}, \{v\}$ sono i rumori Gaussiani del sistema e dell'osservazione, aventi rispettivamente Qw e Qv come covarianze.

Errori di misura sono inevitabili nella stima del SOC. Poiché vi sono errori cumulati a causa delle misurazioni di rumore dovute a correnti e tensioni, viene introdotto l'algoritmo di equalizzazione SOC-PF based.

Questo algoritmo è molto usato per risolvere i problemi di stima ottima per i modelli di spazio di stato non lineari e non Gaussiani. L'algoritmo è costituito da 2 steps, ovvero [36]:

- Inizializzazione: k = 0 Genera casualmente n particelle iniziali xⁱ₀ (i = 1, 2, ..., n) per SOC.
- 2) Per k=0,1,2... avviene la stima dello stato per il SOC:
- Campionamento dell'importanza: il peso delle particelle viene calcolato secondo la seguente equazione:

$$w_k^i = \exp\left(-\frac{1}{2R}(y_k - y_k^i)\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi R}}$$

- Normalizzare i pesi di importanza: $w_k^i = w_k^i / \sum_{i=1}^n w_k^i$
- Valutare la dimensione effettiva del campione $N_{\text{eff}} = 1/\sum_{i=1}^{n} (w_k^i)^2$ per stabilire se è necessario un ricampionamento.
- Il SOC dopo il completamento dell'algoritmo è: $SOC_k = \sum_{i=1}^n w_k^i x_k^i$

La Fig.6.5 illustra il diagramma schematico dell'algoritmo di stima del SOC del Particle Filter:



Fig.6.5 Algoritmo del Particle Filter combinato con il diagramma di flusso del processo di stima del SOC [37].

6.3 Algoritmo di bilanciamento delle batterie Li-Ion per BMS basato sul modello di rilevamento anomalo in real time:

Nelle batterie, il processo di caricamento deve fermarsi non appena una cella è completamente carica mentre il processo di scarica deve fermarsi non appena una cella è completamente scarica [38]. I due tipici algoritmi utilizzati per il bilanciamento delle celle sono quelli "Voltage based" e quelli "SoC based". I primi si usano quando la differenza di tensione tra una cella e il valore medio di tensione delle altre celle supere il valore di soglia, quindi la cella è probabilmente sbilanciata. Tale metodo è semplice e di agevole funzionamento ma il valore esterno della cella è condizionato dal suo stato interno e dall'ambiente. Invece gli algoritmi SoC based controllano l'intervallo di SOC in modo che sia minore del SOC di soglia.

Comunque, il SOC è soggetto ai fenomeni di autoscarica e temperatura che possono essere calcolati indirettamente. Tuttavia, allo stato attuale risulta ancora difficile ottenere un preciso ed accurato valore di SOC per ciascuna cella.

L'algoritmo affrontato in questo paragrafo, è in grado di riconoscere le batterie anomale, ovvero quelle sbilanciate e di migliorare le prestazioni del pacco batteria, aumentare l'energia riutilizzabile e prolungare l'arco vitale del pacco stesso. Una volta identificate le celle sbilanciate, esse vengono equalizzate mediante un metodo di bilanciamento passivo. Il metodo di bilanciamento proposto include due moduli, un modulo di riconoscimento delle celle sbilanciate e un modulo di controllo del bilanciamento. Il primo modulo rileva le celle normali e quelle anomale tramite questo algoritmo, il secondo modulo invece equalizza le celle sbilanciate e invia una risposta al primo modulo. Nella figura 6.6 viene riportato lo schema dell'algoritmo descritto.



Fig. 6.6 Schema dell'algoritmo di bilanciamento per il rilevamento anomalo [38].

RICONOSCIMENTO DELLE CELLE SBILANCIATE: le celle anomale sono identificate dal primo modulo come punto erratico. Dapprima, il metodo standardizzato z-score è impiegato per preelaborare l'attributo della batteria. In seguito, è adottato il metodo di rilevamento dei valori erratici, basato sulla distanza dell'attributo multidimensionale per calcolare il valore erratico ciascuna cella ed è la somma delle distanze di una cella da tutte le altre. In terzo luogo, il pacco batteria sarà bilanciato se il range anomalo supera la soglia segnata come VOA1, altrimenti le celle sbilanciate saranno rilevate dal metodo di equalizzazione cluster. Gli ingressi sono le N celle il valore di soglia anomalo VOA1. L'algoritmo di bilanciamento per il rilevamento anomalo consiste di 5 steps [38]: STEP 1: se i valori delle batterie sono uguali, il processo termina e il pacchetto batteria è considerato bilanciato; altrimenti procedere allo step 2.

STEP 2: il metodo standardizzato medianti i punti z (z-score), viene applicato per la preelaborazione dei parametri caratteristici, cioè si applica l'espressione per preelaborare la tensione U e il SOC nel seguente modo [38]:

$$Z_{ij} = \frac{\operatorname{Cell}_{ij} - \overline{\operatorname{Cell}}_j}{\delta_j}$$

$$\overline{\operatorname{Cell}}_j = \frac{\sum_{i=1}^n \operatorname{Cell}_{ij}}{n},$$

$$\delta_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\operatorname{Cell}_{ij} - \overline{\operatorname{Cell}}_j\right)}{n-1}},$$
(1)

Dove:

 Z_{ij} (i = 1, ..., 40 and j = 1, 2) è la forma di standardizzazione del parametro caratteristico. j-esimo della i-esima cella. (Per esempio Z_{12} indica lo standard SOC della prima cella)

 Cell_{ii} è il valore originale del parametro caratteristico j-esimo della i-esima cella.

 $\overline{\text{Cell}}_i$ indica la media del parametro j-esimo.

- δ_j Indica la deviazione standard della tensione o del SOC quando j= 1 o 2, rispettivamente. Pertanto, se j=1 si indica come parametro la tensione; se invece j=2 si indica il SOC come parametro della cella.
- *n* è il numero di celle.

La distanza Euclidea è usata per calcolare il valore erratico di ciascuna cella nel pacco batteria. Pertanto:

$$D_{2}(Z_{m}, Z_{n}) = \sqrt{|Z_{m1} - Z_{n1}|^{2} + |Z_{m2} - Z_{n2}|^{2}},$$

$$W(Z_{m}) = \sum_{m=1}^{n} \sum_{j=1}^{2} D_{2}(Z_{m}, Z_{n}),$$
(2)

Dove:

 $D_2(Z_m, Z_n)$ $(m = 1, ..., 40, n = 1, ..., 40, m \neq n)$ è la distanza Euclidea tra la m-esima cella e la n-esima cella.

 Z_m rappresenta la m-esima cella avente due attributi, cioè $Z_m = (Z_{m1}, Z_{m2})$. $W(Z_m)$ rappresenta la somma delle distanze Euclidee tra la m-esima cella e tutte le altre. Più piccola risulta essere $W(Z_m)$ tanto più normale o corretta viene considerata la m-esima cella. Al contrario, la m-esima cella è probabilmente anomala.

STEP 3: se il range dei valori erratici o anomali delle celle è minore della soglia VOA1, il processo termina e il pacco batteria viene ritenuto bilanciato, altrimenti procedere allo step 4.

$$VOA1 = \frac{\sum_{m=1}^{n} W(Z_m)}{n}$$

STEP 4: impostare le celle con il minore e maggiore valore anomalo come centroide iniziale del cluster.

STEP 5: le altre celle sono assegnate (tutte in una volta) secondo la loro posizione rispetto al centroide del cluster più vicino. Quindi le altre celle vengono riassegnate individualmente e in tal caso si ridurranno le somme degli errori quadratici e i centroidi del cluster vengono ricalcolati dopo ogni riassegnazione. Il processo per ottenere le somme minime dell'errore quadratico J_e è formulato come segue:

$$\begin{split} J_m &= \sum_{m=1}^{N_m} \left\| Z_m - C_j \right\|^2, \quad Z_m \in S_j, \\ J_e &= \sum_{j=1}^k J_m = \sum_{j=1}^k \sum_{m=1}^{N_m} \left\| Z_m - C_j \right\|^2, \quad Z_m \in S_j, \end{split}$$

Dove:

- J_m è l'errore quadratico della m-esima cella.
- J_e è la somma di tutti gli errori quadratici
- C_i è il centroide iniziale del cluster.
- S_i è la categoria normale o anomala delle celle

Quando J_e converge a un minimo globale, il processo salta allo step successivo. Come uscita si ha il pacco batteria bilanciato o sbilanciato. Da questo momento, le celle sbilanciate verranno rilevate mediante l'algoritmo precedentemente descritto e posso essere bilanciate con un metodo di bilanciamento passivo. La figura 6.7 mostra i 5 steps dell'algoritmo di bilanciamento descritto:



Fig.6.7 Diagramma a blocchi dell'algoritmo di bilanciamento per il rilevamento anomalo [38].

6.4 Algoritmo di stima del SoC per pacchi batteria LifePo4 (LITIO-FERRO-FOSFATO) implementato su applicazioni a trazione

Un'accurata stima dello stato di carica (SOC) on board è una delle funzioni chiave per la gestione della batteria. Il sistema BMS deve funzionare per fornire la gestione ottimale delle prestazioni del sistema batteria sotto controllo.

In questo paragrafo, viene presentato, per le batterie LiFePO4, un algoritmo di stima del SOC mediante Coulomb Counting potenziato (ECC, Enhanced Coulomb Counting), basato sui modelli di rilevamento di carica a tensione costante (CVCD) e tensione a circuito aperto (OCV), rispettivamente [39]. Progettato per l'implementazione di un sistema BMS integrato (a bordo), è caratterizzato dalla sua relativa semplicità e operatività in condizioni operative estese (con diversi profili di carico, temperature, SoC, ecc.). L'algoritmo viene descritto sia a livello di cella che a livello di modulo batteria. Inoltre, la sua validità sperimentale online è stata testata in tre differenti applicazioni a trazione in una piattaforma di validazione in tempo reale: celle da 2,5 Ah (Tipo A) in un'applicazione per ascensore residenziale, celle da 8 Ah (Tipo B) in un veicolo elettrico su strada e celle da 100 Ah (tipo C) in un'applicazione per veicoli elettrici ferroviari. Come parte integrante dell'approccio diagnostico, il BMS realizza la stima del SOC a bordo del veicolo elettrico. Il metodo del Coulomb Counting (CC), è la tecnica più semplice per tale stima. Comunque, è un metodo molto sensibile agli errori di misura che si accumulano nel corso del tempo e conducono ad un allontanamento tra i valori di SOC reali e quelli di SOC stimati della batteria. Al fine di migliorarli, vengono impiegati algoritmi di ricalibrazione a circuito aperto (misure OCV), quelli di correzione a circuito chiuso (per esempio i filtri di Kalman), e tecnica di stima che impiegano l'intelligenza artificiale. In generale, i primi algoritmi enunciati sono caratterizzati dalla loro relativa semplicità per la realizzazione del BMS. Nelle prossime pagine verrà illustrato un algoritmo di stima del SOC per le batterie al Ferro-Litio-Fosfato, caratterizzato dall'essere di facile implementazione, assieme alla modularità e scalabilità. L'algoritmo in questione consiste della tecnica del Coulomb Counting migliorato, basato su un rilevatore di carica a tensione costante CVCD (Constant Voltage Charge Detector) e su un preciso modello OCV(SOC) per la ricalibrazione dinamica.

6.4.1 Stima dello stato di carica (SOC) basato sul ECC con modelli OCV e CVCD

Mentre l'errore nella stima del SOC causata dal semplice Coulomb Counting cresce nel tempo discostando il suo valore da quello reale, l'algoritmo ibrido presentato in questa sezione della tesi mira a stabilizzare tale valore [39]. Oltre a garantire la precisione indipendentemente dal tempo di ciclo della batteria, esso è caratterizzato dall'essere semplice, flessibile (modulare e scalabile), versatile e affidabile. Queste caratteristiche rendono questo algoritmo perfettamente idoneo per il suo BMS di bordo. Nella figura 6.8 viene illustrato l'algoritmo introdotto:



Fig.6.8 Algoritmo di stima del SOC basato sul ECC con modelli OCV e CVCD a livello cella [39].

6.4.2 Stima del SOC a livello cella

L'algoritmo di diagnosi dello stato di carica a livello cella è illustrato in fig.6.9. È basato [39] su un su un rilevatore dello stato di sistema (State machine), che a seconda delle misure in tempo reali della cella (corrente, tensione e temperatura) ne rileva il suo stato attuale: se la cella si sta caricando o scaricando, se a riposo o in uno stato di equilibrio. Inoltre, durante un processo di carica a corrente costante e tensione costante (CC-CV, Constant Current-Constant Voltage), esso può determinare se la cella è coinvolta nello step di carica a tensione costante CV. A seconda dello stato identificato dall'automa a stati (state machine) viene impiegato il metodo di stima di SOC appropriato. Quando il sistema è coinvolto in un processo di carica scarica, viene applicata la tecnica a corrente costante (CC). Nel caso in cui l'automa a stati identifica un processo di carica a tensione costante CV viene applicato il metodo di stima CVCD, basato cioè sul rilevamento di carica a tensione costante. Infine, se la cella si trova in uno stato di equilibrio verrà applicato il modello OCV(SOC) basato sulle tensioni a circuito aperto. Ognuna delle tecniche citate è basata su un modello che, avendo le acquisizioni del BMS come ingressi fornisce i valori di stima di SOC come uscite. In questa disposizione ibrida, tutte le uscite del modello (SOC_{CC}, SOC_{CVCD}, SOC_{OCV}) partecipano in maniera specifica alla stima del SOC globale. Oltre ad eseguire la stima del SOC, l'algoritmo considera anche i massimi errori che ogni tecnica di stima introduce: $(\Delta SOC_{CC}(I,T_s,T),\Delta SOC_{CVCD}(V,T),\Delta SOC_{OCV}(V,T))$. Essi sono dovuti agli errori di modellamento e alle imprecisioni di corrente, tensione e temperatura introdotte dall'hardware di misurazione impiegato. Pertanto l'algoritmo definisce le bande di errore massimo istantaneo relative a ciascuna tecnica applicata, cioè: [SOC_{CCmin}, SOC_{CCmax}], [SOC_{CVCDmin}, SOC_{CVCDmax}], [SOC_{OCVmin}, SOC_{OCVmax}]). Una volta che le stime e gli errori di banda sono specificati, con lo scopo di raggiungere la stima finale più affidabile, il modulo di ponderazione del SOC (Weighting Module) pesa il contributo dei metodi di stima basati sul CC, CVCD e OCV. A seconda della loro larghezza di banda di errore il modulo di ponderazione dà maggiore priorità al più preciso, in ogni momento. I modelli di ciascuna strategia di stima sono discussi brevemente nei sottoparagrafi seguenti.

6.4.3 Modello CC (Constant Current)

Il modello CC consiste del già citato metodo Ampere-hour Counting [39]. Esso integra nel tempo la corrente di carica/scarica di una cella e la esprime in relazione alla sua capacità al fine di fornire la stima di SOC. Per quanto riguarda questa tecnica, la precisione della stima di misurazione di corrente e il periodo di campionamento utilizzato per l'integrazione della corrente stessa sono fattori che hanno un impatto diretto sull'accuratezza della stima finale.

6.4.4 Modello CVCD (Constant Voltage Charge Detector)

Il modello CVCD mette in relazione il valore CV (Constant Voltage) del processo di carica CC-CV (Constant Current-Constant Voltage) di una cella con il suo stato SOC finale [39]. Per ottenere questa mappatura CVCD(SOC), diversi processi di carica CC-CV con differenti valori di CV devono essere eseguiti a differenti temperature. Per esempio, le figure 6.9 e 6.10 mostrano alcuni dei risultati ottenuti dal processo di caratterizzazione della cella effettuato per la modellazione. Nel caso particolare della Fig.6.9, si osserva che, alla temperatura di 25°C per esempio, i processi di carica con valori di CV superiori a 3,4 V stanno a significare che il SOC finale di una cella di tipo C (cella per mezzi speciali come veicoli ferroviari) è maggiore del 98%. Al di sotto dei 3,4 V, al contrario, differenze di 50 mV diventano grandi differenze in termini di SOC. Chiaramente, il SOC della cella varia in maniera significativa con la temperatura. Più sono basse le temperature minori sono i valori di SOC in corrispondenza dello stesso valore.

6.4.5 Modello OVC(SOC)

Una misurazione della tensione ai capi della cella quando è all'equilibrio fornisce informazioni sul suo SOC. Per la maggior parte delle chimiche Li-Ion, questa relazione tra il SOC e l'OCV può essere considerata diretta ed è modellata da una funzione monotona [39]. Per le batterie al Ferro-Litio-Fosfato, relativamente alla stima di SOC, è necessario un sistema di misurazione della tensione a elevata precisione, e un modello OCV accurato per poter considerare la forma piatta delle curve e i pronunciati fenomeni di isteresi che esse presentano. I fattori che principalmente influiscono sulla variabilità del OCV delle celle LiFePO4 e che dunque possono determinare errori nella stima, sono i fenomeni di isteresi (fig.6.9 e fig.6.10) e le variazioni di temperatura (fig.6.11).



Fig.6.9 Cicli di isteresi maggiore e minore per cella di tipo B [39]



Fig.6.10 Cicli di isteresi maggiore e minore per cella di tipo C [39]

Le figure 6.9 e 6.10 raffigurano i cicli maggiori e minori di OCV per le celle di tipo B e C, rispettivamente. I primi anelli si formano quando una cella completamente carica viene successivamente scaricata completamente, e viceversa. I secondi, invece, si formano quando vengono applicati alla cella cicli parziali di carica e scarica consecutivi. Per quanto riguarda la temperatura, invece, l'OCV mostra una grande variabilità come mostrato in fig.6.11:



Fig.6.11 Cicli maggiori di OCV per cella di tipo A per differenti temperature [39].*6.4.6 Stima del SOC a livello del modulo-batteria*

Basate sul metodo di stima ECC SOC per la singola cella, sono realizzate in parallelo tre differenti stime del SOC per raggiungere quella del modulo-batteria:

1) SOC_{MIN} con la tensione di cella più bassa.

2) SOC_{MAX} con la tensione di cella più alta.

3) SOC_{AVG} con la tensione media di tutte le celle nel modulo-batteria.

Come risultato di queste tre stime, il range di SOC in cui il pacco batteria opera può essere calcolato. Di conseguenza le formule 2) e la 1) precedentemente menzionate forniscono informazioni sulla vicinanza del sistema alla fine degli stati di carica e scarica, mentre la espressione 3) rappresenta lo stato medio del modulo-batteria. La fig.6.12 mostra l'algoritmo di stima di SOC a livello del modulo-batteria precedentemente descritto:



Fig.6.12 Algoritmo di stima di SOC a livello del modulo-batteria [39].

7 CONCLUSIONI

La tesi proposta ha lo scopo di definire i concetti generali del Battery Management System per le batterie agli Ioni di litio, le sue funzioni e caratteristiche e obiettivi principali. Sono stati descritti le variabili di stato delle batterie ovvero il SOC (State of Charge), il SOH (State of Health) e anche i principali metodi di stima della carica come il Coulomb Counting. È stato descritto in dettaglio il BMS dal punto di vista hardware e alcune sue funzionalità software. Sono state proposte le 33 principali tipologie BMS per applicazioni Automotive attuamente disponibili sul mercato, alcune delle quali costituiscono dei prototipi in fase di attuale progettazione e sperimentazione allo scopo di apportare migliorie al sistema di gestione delle batterie e diminuire i costi di gestione e consumo, aumentare le densità di energia e potenza e del pacco batteria e ridurre ulteriormente l'impatto ambientale che questi veicoli determinano.

Sono stati elencati in dettaglio i metodi di bilanciamento passivo e attivo, con le relative configurazioni circuitali. Poi sono stati descritti degli algoritmi di equalizzazione dello stato di carica (SOC) per le celle Li-Ion e un algoritmo di bilanciamento per le celle LiFePo4 (celle al Litio-Ferro-Fosfato) ed è stato illustratoo un approccio di gestione termica delle batterie di alimentazione per EV (Electric Vehicles), PHEV (Plug-in Electric Vehicles) e FCEV (Fuel Cell Electric Vehicles) ovvero i veicoli elettrici alimentati con pile a combustibile. Per questi ultimi sono state elencate le principali tipologie di Fuel Cell più diffuse tra le quali le PEMFC (Proton Exchange Material Fuel Cell) ovvero le celle a combustibile a scambio protonico note anche come celle a combustibile a polimeri solidi. Nonostante il sempre più diffuso impiego del BMS nelle applicazioni automotive, nell'elettronica di consumo portatile (cellulari, tablet, notebook), in applicazioni militari ed aerospaziali, biomediche e nel settore dell'intelligenza artificale (AI), l'incertezza delle prestazioni di una batteria rappresenta una sfida attuale per l'ottimizzazione della gestione ottimale dell'energia e potenza. Pertanto l'uso di opportuni software, come Matlab o Simulink è uno dei potenziali metodi di ottimizzazione del BMS con la potenza generata dal sistema di accumulo di energia ibrida delle batterie agli Ioni di Litio. Le attività principali dei sistemi di gestione della batteria (BMS), comprendono la garanzia della sicurezza e dell'affidabilità mediante una stima e una gestione accurati dello stato, l'estensione finale della vita utile (EoL) riducendo al minimo l'invecchiamento, il rilevamento e l'allarme dei guasti, la memorizzazione delle informazioni e il collegamento in rete tra i moduli batteria. Per le future generazioni di veicoli elettrici, sono necessarie ulteriori funzioni di controllo per ottimizzare i modelli di carica/scarica per prolungare la vita della batteria, ridurre i costi della batteria stessa e garantire contemporaneamente la massima fruibilità.

Per quanto riguarda la sicurezza, livelli di affidabilità più elevati (specialmente nel settore automobilistico, ma anche in applicazioni come l'aviazione) e requisiti aggiuntivi per il

BMS come il controllo di ricariche veloci richiedono nuovi algoritmi e metodi di misurazione. La spettroscopia di impedenza multifrequenza, le onde ultrasoniche o il riflesso delle onde ottiche ed elettriche causate da deviazioni di temperatura o altri fattori di stress sono un'opzione per le generazioni future di BMS.

8 Bibliografia

- [1] S. Javier Muñoz Alvarez, «Analysis of the state of the art on BMS» *EVERLASTING* (*Electric Vehicle Enhanced Range, Lifetime And Safety Through INGenious battery management*), Febbraio 2017.
- [2] A. Energy, «Ashwoods Energy Battery Management Systems» 20 Ottobre 2016.
- [3] AVL, «Battery Management System (BMS) Development avl.com» 10 2 2017.
- [4] R. Ratz, «BMS System Benchmark and Standardization» *Ricardo Inc.*, Marzo 2015.
- [5] Elite Power Solutions, «Elite Power Solutions energy Management Systems» 12 12 2016.
- [6] E. P. Solution, «Elite Power Solutions energy Management Systems» 12 12 2016.
- [7] Elithion, «Elithion Lithiumate» 24 11 2016.
- [8] EVPST, «High performance EV BMS with CAN bus& SOC_EV BMS» 23 12 2016.
- [9] R. Ratz, «BMS System Benchmark and Standardization» *Ricardo Inc.*, Marzo 2015.
- [10] I. +. M. ACTIA, «I + ME ACTIA Battery Management Systems» 23 12 2016.
- [11] JTT Electronics Ltd., «Battery Management Systems» 2017 Gennaio 2017.
- [12] L. Innovative, «Battery Management System, Electric Vehicle, Lifepo4, lithium ion» 23 Dicembre 2016.
- [13] L. Balance, «Lithium Balance LiBAL s-BMS» 24 11 2016.
- [14] M. Micro, «Manzanita Micro BMS» 09 01 2017.
- [15] N. Solutions, «Wireless Battery Management System for smart grid and electric vehicle applications» Navitas Solutions-Products & Technologies, 2016.
- [16] I. Ewert Energy Systems, «Downloads & Resources \textbar Orion Li-Ion Battery Management System» 15 12 2016.
- [17] M. a. A. Inc., «BMW i3 Teardown and Benchmarking Study: Reports Summary and Pricing Detail» *Munro & Associates Inc.*.
- [18] R. Systems, «Reap Systems Li-Ion Battery Management System (BMS)» 14 01 2017.
- [19] Sensor-Technik Wiedemann GmbH, «mBMS battery management» 24 11 2016.

- [20] Hackaday.io, «Model S BMS hacking» 10 02 2017.
- [21] T. P. Limited, «Tritium » IQ Battery Management System» 24 12 2016.
- [22] Valence, «Battery Management Systems BMS | For Grid And Off Grid Storage» 24 11 2016.
- [23] V.iBMS, «Ventec iBMS 8-18S packs in series» 20 01 2017.
- [2] ALTERA, «Battery Management System Reerence Design» 10 02 2017.
- [25] Fraunhofer Institute for Integrated Systems and Device Technology IISB, «fox BMS» 14 01 2017.
- [26] LION Smart GmbH, «The smart way to test your batteries» 14 02 2017.
- [27] John Chatzakis, «Designing a New Generalized Battery Management System» *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS* vol. 50, 05 10 2003.
- [28] I. W. Commons, 8 03 2016. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:InnoTeg.png.
- [29] G. L. Amoroso, Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettronica: "Realizzazione di algoritmo per la stima dello stato di carica di batterie al litio con identificazione online dei parametri". Università degli studi di Pisa, Anno Accademico 2014/2015.
- [30] Zachary Bosire Omariba, «Review on Health Management System for Lithium-Ion Batteries of Electric Vehicles» *Electronics*, 15 05 2018.
- [31] S. W. Zhonghao Rao, «A review of power battery thermal energy management» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 09 2011.
- [32] Tianze Wanga, «Performance of plug-in hybrid electric vehicle under low temperature condition and economy analysis of battery pre-heating» *Journal of Power Sources*, 05 09 2018.
- [33] Mohamed Daowd, «A Review of Passive and Active Battery Balancing based on MATLAB/Simulink» International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.), vol. XX, n. X, 09 2011.
- [34] Maurice Caspar, «Comparison of Active Battery Balancing Systems» 2014.
- [35] Mohammad Abdul Hannan, «Lithium-Ion Battery Charge Equalization Algorithm for Electric Vehicle Applications» *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, vol. 53, n. 3, 06 2017.
- [36] Yujie Wang, «A novel active equalization method for lithium-ion batteries in electric vehicles» Applied Energy, 25 02 2015.
- [37] Shouzhen Zhang, «SOC estimation optimization method based on parameter modifiedparticle Kalman Filter algorithm» *Clustier Computing*, 13 02 2018.
- [38] Changhao Piao, «Lithium-Ion Battery Cell-Balancing Algorithm for Battery Management System Based on Real-Time Outlier Detection» *Mathematical Problems in Engineering*, 10 2015.
- [39] M. Garmendia, «Proposal and Validation of a SOC Estimation Algorithm of LiFePO4 Battery Packs for Traction Applications,» Barcelona, Spain, 2013.