UNIVERSITÀ DI PISA



Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Elettronica

Nuovo Ordinamento

Tesi di Laurea

Sviluppo di un modello avanzato di accumulatore litio polimero e utilizzo nella simulazione di una batteria per veicoli elettrici ed ibridi

Relatori:

Prof. Roberto Saletti Prof. Roberto Roncella Candidato:

AnnaChiara Antonacci

Anno Accademico 2009 - 2010

Indice

Introduzion	е		1
Capitolo 1:		Batterie litio polimero	2
	1.1	Storia dei veicoli elettrici	2
	1.2	Importanza delle batterie nei veicoli elettrici	4
	1.3	Battery Management System	6
	1.4	Cella Li-ion	8
	1.5	Cella polymer Li-ion	11
Capitolo 2:		Set-up sperimentale	13
	2.1	Progetto e assemblaggio termostato	13
	2.2	Controllo termostato	17
	2.3	Realizzazione doppio termostato	19
	2.4	Set-up di misura	22
	2.5	Implementazione controllo fuzzy	24
Capitolo 3:		Caratterizzazione del modello di cella	35
	3.1	Modello di cella LiPo adottato	35
	3.2	Procedura di misura	38
	3.3	Estrazione dei parametri per il modello di cella	40
	3.4	Osservazioni sul comportamento della tensione a vuoto della cella	47
	3.5	Osservazioni sulla capacità e resistenza di auto scarica delle celle	48
Capitolo 4:		Modello termico della cella LiPo ed implementazione in ambiente Simulink	51
	4.1	Modello termico accumulatore litio polimero	52

4.2	Determinazione parametri termici della cella	55
4.3	Realizzazione del modello in ambiente Simulink	61
4.4	Validazione del nuovo modello sulla cella campione	67
Capitolo 5:	Simulazioni di batteria e analisi dello sbilanciamento	71
5.1	Estensione del modello da singola cella a batteria	71
5.2	Analisi del problema dello sbilanciamento di una batteria	82
5.3	Effetti sullo sbilanciamento della batteria dovuti alla variazione della capacità delle celle	85
5.4	Effetti sullo sbilanciamento della batteria dovuti all'autoscarica delle celle	88
5.5	Problema del riequilibrio	90
5.6	Strategie di riequilibrio	92
Conclusioni		97
Bibliografia		99
Ringraziamenti		101

Introduzione

Uno strumento fondamentale per la gestione di una batteria da utilizzare su veicoli ibridi ed elettrici, capace di rispondere ad esigenze di efficienza, affidabilità, sicurezza e longevità, è costituito da un valido sistema di controllo elettronico che sia in grado di verificare il suo comportamento in ogni condizione. Il sistema di gestione dev'essere in grado di monitorare, in maniera continua, le caratteristiche più importanti di una batteria, ovvero tensione, stato di carica e temperatura, ed intervenire per evitare i rischi in cui si può incorrere se la batteria non lavora nei corretti range di tensione e temperatura riportati nei loro datasheet. E', quindi, importante, al fine della sua progettazione, disporre di un accurato modello della cella che si intende utilizzare per la realizzazione della batteria

Lo scopo del presente lavoro di tesi è stato quello di studiare ed implementare un modello avanzato di accumulatore litio polimero Kokam SLPB723870H a due costanti di tempo, in cui si è tenuto conto della dipendenza dei parametri dalla temperatura, i quali sono stati estratti grazie ad una serie di test effettuati sulla cella tramite la realizzazione di un opportuno set-up di misura. Particolare attenzione è stata posta, inoltre, allo studio e alla modellizzazione della generazione di calore della cella attraversata da corrente e nel suo scambio di calore con l'ambiente circostante.

Tale modello, implementato in ambiente Simulink, è stato utilizzato per la simulazione di una batteria composta da diverse celle disposte in serie. Attraverso simulazioni, in tempi relativamente brevi, è stato possibile osservare e studiare il comportamento del pacco andando ad analizzare gli effetti che le variazioni di resistenza di autoscarica e di capacità delle celle, hanno sullo sbilanciamento della stessa.

Capitolo 1

Batterie litio polimero

1.1 Storia dei veicoli elettrici

Nel momento storico attuale in cui a livello mondiale si avverte la forte esigenza di ridurre le emissioni di CO₂ nell'atmosfera, dovute al massiccio utilizzo di combustibili fossili, come il petrolio, e di ricercare, a causa della scarsità delle sue riserve, altre fonti energetiche che possano soddisfare le necessità di mobilità dell'uomo, assume notevole rilevanza lo studio dell'energia elettrica come forza propulsiva dei veicoli a motore.

L'analisi della loro storia lascia sbalorditi nell'osservare come essa affondi le proprie radici in un periodo sorprendentemente lontano e che i primi prototipi di veicoli elettrici furono addirittura progettati e costruiti già negli anni 1832-39.

Infatti, i primi ad inventare e progettare un veicolo a motore a propulsione elettrica (Battery Electrical Vehicle) furono l'imprenditore scozzese Robert Anderson, che nel 1832 costruì la prima carrozza elettrica, ed il professore Sibrandus Stratingh di Groningen, che, in Olanda, nel 1835 progettò una piccola auto elettrica, costruita poi, all'incirca nel 1939, dal suo assistente Christopher Becker. In seguito, con il miglioramento delle batterie elettriche, riferibile alle tecniche introdotte dai francesi Gaston Plante nel 1865 e Camille Faure nel 1881, si assistette al fiorire del mercato dei veicoli elettrici, soprattutto in Francia e Gran Bretagna.

Pertanto, alla fine del 1800, ancor prima dello sviluppo del potente e, tuttavia, fortemente inquinante motore a combustione interna (Daimler e Benz, 1887), le auto elettriche detenevano molti record di velocità (superamento della barriera di 100 km/h)¹ e di distanze percorse con una carica, tanto che, nei primi anni del XX^o secolo, i I mercato dei veicoli elettrici, prodotti dalle ditte Anthony Electric, Baker Electric, Detroit Electric ed altri, era nettamente più fiorente rispetto a quello delle auto a motore a scoppio.

Alla fine del primo decennio del 1900 il mercato delle automobili con motore a combustione interna aveva ormai superato di gran lunga quello delle auto elettriche e, nei decenni successivi, la frenetica corsa all'estrazione di petrolio e il conseguente abbassamento dei prezzi suscitò l'interesse quasi esclusivo dei produttori di auto verso la ricerca, sempre più competitiva, dei propulsori a combustione interna.

Da qualche decennio, a livello mondiale, si è imposta una particolare e stringente attenzione nei confronti dei cambiamenti climatici sostenuti dall'inquinamento atmosferico. Nonostante gli accordi internazionali (in particolare, il Protocollo di Kyõto, sottoscritto nel 1997 da più di 160 Paesi ed entrato in vigore nel 2005) finalizzati alla riduzione, entro il 2012, delle concentrazioni dei gas ad effetto serra, mediamente del 5%, e malgrado le sottili innovazioni prodotte nel campo delle auto a motore a scoppio, tese a limitare le emissioni di CO₂ nell'aria, numerose osservazioni indicano che l'attuale condizione diviene di giorno in giorno sempre più preoccupante. È comprensibile, quindi, come tutto ciò abbia potuto contribuire con forza a stimolare i tecnici e gli studiosi di tutto il mondo nel focalizzare la propria attenzione sull'energia elettrica come metodo propulsivo dei veicoli a motore e nel migliorare e perfezionare le tecniche di funzionamento dei veicoli elettrici. Gli stessi fattori che un tempo avevano sostenuto la prevalenza dei veicoli a motore a scoppio sui veicoli elettrici, alto costo delle batterie, lunghi tempi per la loro carica e la scarsa autonomia, rappresentano oggi, l'oggetto di studio della ricerca nel campo delle batterie e dell'elettronica di gestione e controllo ad esse dedicata, finalizzata alla realizzazione di una modalità di trasporto ecocompatibile ed ecosostenibile.

¹ La barriera di 100 Km/h fu infranta il 29 aprile del 1899 da <u>Camille Jenatzy</u> con il suo veicolo elettrico a forma di razzo "<u>La Jamais Contente</u>" che raggiunse la velocità massima di 105,88 km/h [18].

1.2 Importanza delle batterie nei veicoli elettrici

Per aumentare lo sviluppo dei veicoli elettrici ed ibridi è di fondamentale importanza prendere in considerazione le performance delle batterie. Il metodo per accrescerle presenta due aspetti principali [1]:

- la capacità energetica della batteria stessa, che dipende dal materiale della batteria e dai processi di costruzione,
- il sistema di gestione della batteria (Battery Manangement System -BMS).

In linea teorica, le batterie per i veicoli elettrici (EVs) ad elevate prestazioni dovrebbero essere in grado di raggiungere un buon compromesso tra "elevate prestazioni" e "alta affidabilità". Infatti, ad una batteria "*ideale*" per un EV vengono generalmente richieste caratteristiche [1] quali l'alta densità di energia e un'elevata potenza di uscita, un'alta efficienza di "charge-discharge" e quindi una certa longevità, un ampio range di utilizzo dalle basse alle alte temperature, minima "self-discharge", buone proprietà di carica, bassa resistenza interna. Inoltre anche l'assenza dell'effetto di memoria, una carica rapida, un alto grado di sicurezza, alta affidabilità, basso costo e buona riciclabilità, fanno della batteria un oggetto fortemente performante.

Storicamente, le batterie utilizzate per EV sono evolute attraverso 3 stadi successivi: a) batterie al piombo (Lead-acid battery), b) batterie al nichel (NiMH battery) e c) batterie al litio (Lithium battery) nel tentativo di promuovere la capacità energetica della batteria stessa.

Le Batterie al Litio ione (Li+) ed al Litio-Polimero (LiPo) soddisfano bene, certamente molto di più rispetto alle batterie al nichel ed al piombo, le caratteristiche sopra descritte grazie all'elevata tensione della cella (rapporto 3 : 1 rispetto alla tecnologia al nichel) ed alla superiore densità energetica (rapporto 2 : 1 rispetto al tecnologia al nichel). Altre interessanti proprietà che esse hanno sono il grado molto basso di "self-discharge" (rapporto 1 : 4 rispetto alla tecologia al nichel) e l'assenza dell'effetto di memoria [1]. Grazie

Capitolo 1: Batterie litio polimero

a tali caratteristiche, le batterie Li+ e LiPo sono oggi molto diffuse nel campo degli apparecchi portatili (notebool, palmari, etc.) ma la loro eccezionale capacità energetica e densità di potenza le rende impiegabili anche nel campo dei veicoli elettrici (EV) e dei veicoli ibrido-elettrici (HEV). Chiaramente, esistono anche alcuni fattori limitativi al loro impiego, che sono superabili con l'assunzione di alcune precauzioni che possano soddisfare le esigenze di sicurezza. Per prima cosa è necessario un monitoraggio continuo della tensione delle batterie dal momento che, a seguito di "overcharging" o "over-discharging" della cella o a seguito di variazioni della temperatura che vanno al di là del range operativo in carica (da 0 a 40°C) e scarica (da -20 a 60°C), si possono determinare dan ni permanenti per surriscaldamento e, perfino, esplosioni [2]. Per soddisfare tali esigenze di sicurezza, è necessario inserire nelle batterie appropriati circuiti di controllo e protezione.

Come hanno dimostrato le ricerche in questo campo [1,3], questi fattori possono essere controllati e compensati, e, quindi, i danni evitati, mediante l'applicazione di un BMS che sia in grado di ridurre i fenomeni di sbilanciamento delle celle e di assicurare che ognuna di esse operi nel proprio range di temperatura. Per raggiungere tale obiettivo è necessario che il BMS monitorizzi in continuo le tensioni, le temperature e la corrente di tutte le celle della batteria e valuti lo Stato di Carica (SOC) e lo Stato di Salute (SOH), con misurazioni in tempo reale.

1.3 Battery Management System

Perché un pacco batteria possa essere così performante da essere utilizzato per i veicoli elettrici, è necessario che la sua capacità energetica sia adeguata e che sia efficiente un BMS che esegua un monitoraggio continuo dello stato del pacco, gestisca la temperatura delle celle, sia in grado di eseguire un bilanciamento della carica fra di esse e svolga compiti di diagnostica. Tutto ciò potrebbe comportare indubbi vantaggi in termini di:

- 1. Longevità, impedendo "over-charge" e "over-discharge" e, quindi, danni permanenti;
- 2. Prestazioni, permettendo di utilizzare l'intera capacità energetica;
- 3. Affidabilità, mediante un assiduo controllo dello stato e della temperatura;
- Densità, evitando di sovradimensionare il sistema, con un conseguente risparmio in termini di ingombro e di costi;

Un **Battery Management System** (BMS) è un dispositivo elettronico che gestisce una batteria ricaricabile (dalla singola cella al pacco batteria), monitora il suo stato, esegue operazioni di bilanciamento ed equalizzazione, calcola e riporta dati.

Esso rappresenta uno dei punti chiave tecnologici per ampliare la capacità energetica della batteria. L'architettura di un BMS può sostanzialmente essere di due tipi:

- <u>centralizzata</u>, dove è presente un'unica unità di controllo (ECU) che esegue il monitoraggio completo del pacco, ed una unità dedicata al bilanciamento dello stesso
- <u>modulare</u>, in cui è presente un'unica unità centrale e diverse unità locali che comunicano tra loro mediante bus di comunicazione, quali il CAN-bus.

I BMS con architettura centralizzata sono più economici, meno espandibili e sono invasi da una moltitudine di cavi di connessione. I BMS modulari, invece, presentano vantaggi dal punto di vista dell'ingombro, avendo collegamenti più corti. Inoltre data la loro architettura, possono essere facilmente espandibili. Nell'ultimo decennio si è sviluppata la tendenza a sostituire l'architettura centralizzata con quella modulare. La fig. 1.1 mostra la struttura principale di un BMS modulare.



Fig. 1.1: Architettura modulare di un BMS [3].

Il sistema consiste nell'unità centrale che deve gestire le unità locali, sincronizzare le misure di tensione tra i vari moduli, memorizzare, processare e comunicare i vari dati, misurare la corrente del pacco batteria, determinare lo stato di carica delle celle, monitorare tutto il sistema anche quando il veicolo è spento, ed infine ha anche funzioni di sicurezza per quanto riguarda la gestione termica. Le diverse unità locali hanno invece il compito di misurare le tensioni delle singole celle, la loro temperatura e bilanciarle, infine comunicare con l'unità centrale.

1.4 Cella Li-ion

Una batteria elettrica è costituita da una o più celle elettrochimiche che convertono l'energia chimica immagazzinata in energia elettrica. Sin dall'invenzione della prima batteria nel 1794, ad opera di Alessandro Volta, le batterie sono diventate una comune sorgente di energia per molteplici applicazioni industriali.

Esistono due tipi di batterie: <u>le batterie primarie</u> (batterie usa e getta), che sono progettate per essere utilizzate fino a quando si esauriscono, e <u>le</u> <u>batterie secondarie</u> (batterie ricaricabili), che sono ideate per essere ricaricate ed utilizzate molteplici volte. La ricarica delle batterie avviene mediante l'applicazione di energia elettrica che inverte le reazioni chimiche che avvengono durante il loro utilizzo.

Una batteria consiste di una o più celle voltaiche connesse elettricamente in serie o in parallelo (o in configurazioni miste) tramite un elettrolita conduttivo che contiene anioni (ioni a carica elettrica negativa) e cationi (ioni a carica elettrica positiva). Strutturalmente (fig. 1.2), ogni cella è costituita da due mezze celle, di cui una include l'elettrolita e l'elettrodo negativo (anodo) verso cui migrano gli anioni, mentre l'altra è composta dall'elettrolita e dall'elettrodo positivo (catodo) verso cui migrano i cationi.



Fig. 1.2: Esempio pila Daniell.

____ Capitolo 1: Batterie litio polimero

In genere, le due mezze celle sono separate tra loro da una membrana microporosa immersa nell'elettrolita liquido per impedire cortocircuiti all'interno della cella. Durante la reazione redox che dà la carica alla batteria, si verifica una reazione di riduzione (aggiunta di elettroni) al catodo ed un'ossidazione (rimozione di elettroni) all'anodo. Ne deriva, pertanto, che la tensione e la capacità energetica della singola cella e, quindi, della batteria dipendono dalla qualità e dalle caratteristiche di conduzione dei materiali di cui sono composti l'anodo, il catodo e l'elettrolita. Chiaramente, per l'anodo devono essere privilegiati materiali che siano buoni conduttori e buoni agenti riduttori quali lo zinco ed il litio. Per il catodo, al contrario, dovendo soddisfare contemporaneamente esigenze di buona ossidazione e di stabilità nel mezzo interno, gli elementi da privilegiare sono gli ossidi metallici. Infine, come elettrolita generalmente si utilizzano le soluzioni acquose ma anche altri materiali (gel e materiali plastici) che, comunque, sono in grado di soddisfare, nello stesso tempo, esigenze di una buona conduttività e di buona capacità isolante elettrica, per evitare reazioni con gli elettrodi e, quindi, una cortocircuiti interni.

Le batterie a ioni di litio (Li+) sono dispositivi formati da celle che utilizzano composti di litio sia per l'anodo che per il catodo, tra i quali si stabilisce un flusso ionico continuo in una o l'altra direzione, a seconda che ci si trovi nella condizione di carica o scarica. In genere, il materiale che viene utilizzato per l'anodo è costituito da elementi a base di carbonio, accettori/donatori di significative quantità di Li+, come la grafite, mentre quello utilizzato per il catodo è costituito da elementi ossidati come il cobaltato di Litio (LiCoO₂) (il cobalto è un elemento raro ed estremamente pericoloso) o, come più recentemente utilizzato, il manganato di Litio (Li₂MnO₄). Entrambi gli elettrodi generalmente sono realizzati con una struttura a strati e connessi ad una linguetta in alluminio per il catodo ed in rame per l'anodo con cui si rende possibile il loro contatto esterno. All'interno della cella, gli elettrodi sono separati solitamente da un film microporoso in polyethilene o polypropylene immerso nel mezzo interno al fine di impedire cortocircuiti all'interno della cella.

Capitolo 1: Batterie litio polimero Come già segnalato in precedenza, i vantaggi di questo tipo di batterie ricaricabili sono indubbiamente identificabili nella loro alta capacità di accumulo energetico (tensione della singola cella nel range da 2.5 a 4.2 V, il triplo rispetto alle batterie al nichel) e negli elevati valori di energia specifica e densità di energia (fig. 1.3)







Peraltro, l'assenza del fenomeno di memoria, che nella pratica riduce fortemente la vita utile delle batterie tradizionali, permette di effettuare realmente i cicli di carica/scarica, indipendentemente dalle condizioni di carica in cui il ciclo viene iniziato. Di conseguenza, la longevità della batteria al Li+ ne subisce un effetto favorevole e questo anche dovuto al fatto che essa presenta una bassa self-discharge² rispetto a quella delle batterie tradizionali.

Gli svantaggi che le batterie Li+ presentano sono soprattutto identificabili nella loro sensibilità alle variazioni della temperatura, per cui

² I datasheet mostrano una decrescita dell'energia accumulata pari al 10% in 12 settimane alla temperatura di 20 °C, cioè circa lo 0.1% al giorno. Tale decrescita è funzione della temperatura e aumenta al 38% a 60 °C, cioè allo 0.45% al giorno.

Capitolo 1: Batterie litio polimero

valori termici che vanno al di là del range di carica (da 0 a 40°C) e al di là del range di scarica della cella (da -20 a 60°C) creano danni permanenti e pericoli per la sicurezza (fughe di gas infiammabili, esplosioni), e nel loro degrado irreversibile in caso di "overcharge" e "overdischarge"³. Ciò rende necessaria la realizzazione di circuiti elettronici di gestione della batteria e di protezione soprattutto nelle fasi di carica/scarica e dalle condizioni di temperatura anomale. Un ulteriore elemento di svantaggio è costituito dalla minore densità di potenza rispetto ad alcune batterie tradizionali, come dimostra la precedente figura.

1.5 Celle Polimer Li-ion

Le batterie polymer Lithium-ion o più comunemente batterie litio polimero (Li-poly) sono batterie ricaricabili. Normalmente le batterie sono composte di alcune celle secondarie identiche in parallelo per aumentare la capacità.

La principale differenza con le batterie Li-ion, consiste nel fatto che l'elettrolita non è costituito da un solvente organico ma da un composto solido polimerico come l'ossido di polietilene. I vantaggi del Li-poly sul Li-ion includono un costo potenzialmente più basso di lavorazione, l'adattabilità ad una ampia varietà di impacchettamento e la robustezza. In particolare, le dimensioni compatte della cella con uno spessore ridotto comportano una maggiore adattabilità a tutte quelle applicazioni che richiedono uno limitato ingombro. E questo per il fatto che, essendo l'elettrolita costituito non da una soluzione liquida ma da materiale plastico, non è necessario avere un package robusto ma è sufficiente, in pratica, un contenitore costituito da un foglio di alluminio che avvolge la cella. È necessario, tuttavia, che il contenitore assicuri comunque l'impermeabilità del sistema sia perché, al fine di accrescere la conduttività dell'elettrolita solido che, a temperatura ambiente, è più bassa di quella in soluzione, si utilizza, in genere, una soluzione acquosa o un gel che impregni il polimero, sia perché la cella può essere danneggiata dall'ingresso di umidità all'interno della struttura.

³ Nel caso la tensione della cella scenda al di sotto i 2 V.

Capitolo 1: Batterie litio polimero

Questo lavoro di tesi si è basato sullo studio, sulla caratterizzazione e sulla modellizzazione di una cella polymer Li-ion della Kokam, modello SLPB723870H, cella ultra high power da 1500mAh. La Kokam è uno dei maggiori produttori mondiali di celle e batterie Li-poly di ultima generazione, specialmente dedicate all'uso modellistico. La Kokam ha ampliato ultimamente la gamma dei pacchi batterie con scarica continua di 20C, ideali per modelli ed applicazioni in cui necessitano elevate prestazioni.

Il modello della Kokam a cui si fa riferimento ha le seguenti caratteristiche, riportate direttamente dal datasheet del modello della cella :

Typical Capacity ¹⁾		1.5 Ah
Nominal Voltage		3.7 V
Charge	Max. Current	3.0 A
Condition	Voltage	$4.2V \pm 0.03 V$
Discharge Condition	Continuous Current	30.0 A
	Peak Current	60.0 A
	Cut-off Voltage	2.7 V
Cycle Life		> 500 Cycles
Operating	Charge	0~40 °C
Temp.	Discharge	-20 ~ 60 °C
Dimension	Thickness (mm)	7.2 ± 0.2
	Width (mm)	37.5 ± 0.5
	Length (mm)	70.0 ± 0.5
e Weight (g)		37.0 ± 1.5

Fig. 1.5:Caratteristiche SLPB723870H [da www.kokam.com].



Fig. 1.6: Cella polymer Li-ion della Kokam.

Capitolo 2

Set-up sperimentale

Poiché scopo del presente lavoro di tesi è quello di implementare un modello elettrico di un accumulatore litio polimero, che ci permetta di simulare, successivamente, il comportamento di una batteria per veicoli ibridi ed elettrici, sarà necessario realizzare un set-up sperimentale che sia in grado di misurare tensione e corrente, e di fissare la temperatura sulla cella.

In questo capitolo verrà presentato il banco di test utilizzato per la caratterizzazione del modello.

2.1 Progetto e assemblaggio termostato

Per la caratterizzazione di un accurato modello di cella sarà necessaria una lunga e completa procedura di test sperimentali effettuati su una cella della Kokam SLPB723870H, utilizzata per la validazione del modello. Dato l'effetto determinante delle variazioni di temperatura sul comportamento della cella, diventa necessario disporre di un sistema capace di monitorare l'andamento della temperatura e di termostatare la cella ad un valore di temperatura desiderato. In tale maniera, poi, si potranno estrarre i parametri del modello a quel valore di T fissato.

Per questo motivo la cella è stata posizionata all'interno di una camera termostatata che è stata progettata per le esigenze di questo lavoro. La temperatura all'interno della camera è regolata da una cella Peltier che non è altro che una piccola pompa di calore, dall'aspetto di una piastra sottile, dove

una delle due superfici assorbe calore e l'altra lo emette¹. La Peltier Thermo-Electric Cooler (TEC) è costituita da diverse giunzioni disposte in serie, realizzate con materiali semiconduttori, uno drogato n e l'altro drogato p; in cui la direzione del flusso di calore dipende dal verso della corrente applicata ai capi della piastra. Per la scelta della cella Peltier da utilizzare è stato necessario stimare quanta potenza termica dovesse essere dissipata, considerando il peggior caso possibile, che prevede una scarica in continua di 20C. I conti effettuati [5], hanno portato alla scelta della cella ET-127-14-11-RS, avente dimensioni 40x40x3.8mm e capace di dissipare una potenza massima di 77.1W.

Il progetto del termostato prevede, inoltre, anche l'uso di un dissipatore per disperdere verso l'esterno il calore sottratto evitando che il lato caldo della cella Peltier si surriscaldi troppo. Il dimensionamento di questo componente ha portato alla scelta di un blocco dissipatore-ventola dell'inglese Thermo Electric Devices, il TDEX3132/100/FMF12G, [5]. Questo oggetto garantisce valori di temperatura, per le facce della Peltier, in accordo con il corretto funzionamento della cella.

Poiché la struttura del termostato è stata pensata come una struttura a "strati", dopo il dissipatore e la cella Peltier posizionata su di esso, è stato utilizzato un guscio di alluminio avvolgente la cella che dev'essere termostatata. L'alluminio permette una buona trasmissione del calore dalla cella al TEC, garantendo che questo avvenga nel modo più uniforme possibile, vista la sua elevata conducibilità termica. La parte inferiore del guscio è stata fissata direttamente al dissipatore con delle viti di nylon², dopo aver realizzato dei fori filettati sul dissipatore.

La realizzazione del termostato continua con la progettazione e la realizzazione di una scheda sensori, da posizionare sulla cella, una scheda di comunicazione, per interfacciare tutto il sistema con un PC sul quale poter

¹ Com'è noto, l'effetto Peltier, scoperto nel 1834, consiste nell'applicare una tensione ad una termocoppia e nell'osservare una differenza di temperatura tra le giunzioni.

² Sono state scelte le viti di nylon, in alternativa alle viti in metallo, sia per evitare la rottura della cella Peltier dovute ad una pressione eccessiva, sia per impedire la formazione di un ponte termico tra la cella Peltier e la cella Li-poly.

leggere le misure, ed una scheda di supporto alla cella, indispensabile per poter contattare la cella dall'esterno del guscio di alluminio e del termostato [5].

Il PCB della scheda sensori, realizzato come doppia faccia, per poter mettere i sensori direttamente a contatto con la cella, contiene tre sensori di temperatura TMP275 della Texas Intruments. Questi consentono misure nel range [-40°C +125°C] con una risoluzione di 0.0625° C. Oltre a questo integrato, è stato montato anche un convertitore analogico digitale, ADS1100, per la lettura della tensione della cella. Come riferimento dell'ADC è stato utilizzato un voltage reference, REF5045, che regola a 4.5V partendo, anche, da una tensione di alimentazione di 4.7V (il nostro sistema è alimentato a 5V), ed è caratterizzato da una buona accuratezza ed una elevata stabilità con la temperatura.

La scheda di interfaccia ha a disposizione un microcontrollore per interrogare i dispositivi sul bus I2C, impacchettare i dati e inviarli al PC tramite USB. Sul PCB è montato un micro della ATMEL, ATMEGA164P, connesso ad un dispositivo FTDI, FT232RL. Questo dispositivo invia i dati su USB e li riceve anche dal micro tramite la porta UART. I pin del micro dedicati al bus I2C, insieme ai pin per VCC e GND, sono resi disponibili tramite un connettore a 4 pin. L'alimentazione della scheda deriva direttamente dall'USB, 5V con un massimo di 500mA, e questa è la stessa alimentazione che viene passata anche alla scheda sensori. Il firmware caricato all'interno del micro (per la descrizione più dettaglia vedere [5]) ha il compito di scrivere nei registri di configurazione dei TMP e del convertitore ADS1100, e prelevare i dati da questi dispositivi, impacchettarli e, tramite USB, inviarli al PC, il quale verrà equipaggiato con un programma LabVIEW permettendo così la lettura dei dati. .

A conclusione, la scheda di supporto alla cella è così realizzata: le linguette della Li-poly sono saldate su due grossi pad di dimensione 17.5x17.5mm e da qui, attraverso piste di sezione opportuna [5], arrivano su altri due pad, forati al centro, dove vengono fissati i cavi che connettono la cella all'alimentatore e al carico elettronico con cui vengono eseguite le misure. La scheda è completata con un connettore a due pin per connettere i

terminali della cella alla scheda sensori, dove viene effettuata la misura di tensione. Al termine del progetto di costruzione del termostato, la scheda sensori viene fissata alla parte superiore del guscio di alluminio, e dopo aver effettuato correttamente tutti i collegamenti tra le varie schede, il termostato viene completato con un coperchio di materiale isolante, realizzato in polistirolo (fig. 2.1).



Fig. 2.1: Prima versione del termostato realizzato.

2.2 Controllo termostato

Prima di procedere alla descrizione del banco di misura e del procedimento per l'estrazione dei parametri della cella, occorre procedere all'esame del controllo da applicare al sistema per termostatare la cella ad una data e, il più possibile, precisa temperatura.

La cella Peltier, dovendo compiere lavoro per trasferire calore e creare una differenza di temperatura, deve assorbire una discreta quantità di corrente elettrica. Il problema principale è proprio controllare l'intensità della corrente a cui corrisponde la dovuta sottrazione di calore.

Per effettuare il controllo della cella Peltier, è utile rappresentare il modello termico del sistema appena realizzato.



Fig. 2.2: Modello termico.

Il modello include resistenze e capacità termiche relative alla cella (Cb e Rb), al guscio di alluminio (Cc e Rc) e, infine, al dissipatore e cella Peltier (Cd e Rd). La massa del circuito rappresenta la temperatura ambiente. L'unico ingresso al sistema considerato è il calore trasferito dalla Peltier, Qp. Il sistema da studiare ha una funzione di trasferimento del tipo Tb/Qp (2.1), dove Tb rappresenta la temperatura della cella.

$$H(s) = \frac{Kp*(1+T_z s)}{(1+T_{p1}s)(1+T_{p2}s)(1+T_{p3}s)}$$
(2.1)

Un primo controllo implementato per la Peltier è quello "a soglia". Dopo aver deciso le temperature alle quali termostatare la cella e, quindi, compiere le misure, è stata pilotata la Peltier con il sistema di correnti a soglia descritto in figura 2.3. Sicuramente una delle caratteristiche di questo sistema di pilotaggio è la semplicità dell'implementazione. Bisogna evidenziare, però, che un sistema di questo genere può andare a regime molto lentamente.



Fig. 2.3: Controllo a soglia implementato per la prima versione del termostato.

2.3 Realizzazione doppio termostato

Una caratterizzazione completa della cella Li-poly, utilizzata come campione nel seguente lavoro di tesi, è indispensabile al fine di estrarre tutti i parametri di interesse del modello che rappresenterà la base per la progettazione di un Battery Management System. Questa caratterizzazione prevede lo studio della singola cella in carica a C/2 e a C, alle temperature di 10° C, 25° C e 35° C, mentre, per quanto riguarda la s carica, la caratterizzazione che si è voluto effettuare, sempre in riferimento alle tre temperature di interesse, prevede correnti di scarica pari a C/2, C, 2C, 5C, 10° C e 20^{\circ}C.

Con la prima versione del termostato non è stato possibile caratterizzare completamente la cella in scarica per alte correnti perché una sola cella Peltier, con il controllo a soglia implementato, non aveva una potenza di raffreddamento sufficiente che potesse stabilizzare la temperatura ai valori desiderati. Questo era dovuto, sostanzialmente, al fatto di non aver preso adeguatamente in considerazione la quota di calore proveniente dall'ambiente esterno.

Avendo già a disposizione il progetto e il termostato realizzato, si è pensato di duplicare tutta la struttura, ottenendo così un raddoppio della potenza. Si è inoltre pensato all'implementazione di un nuovo controllo per la corrente, che scorre nel termostato, più performante e più efficiente nel regolare il sistema alle temperature desiderate.

Per la realizzazione del doppio termostato è stato necessario disporre di un'ulteriore cella Peltier Thermo Electric Cooler (ET-127-14-11-RS), di un ulteriore dissipatore, dello stesso tipo di quello utilizzato per la prima versione, e sono stati realizzati, inoltre, una seconda scheda sensori e di comunicazione.

La cella Li-poly, sulla quale dev'essere imposta una certa temperatura, è racchiusa da un guscio di alluminio che, a differenza di quello utilizzato nella prima versione del termostato, presenta su entrambe le facce i fori necessari per alloggiare i sensori di temperatura. In questa versione i sensori che verranno utilizzati saranno in tutto sei: due schede che contengono tre

sensori di temperatura ciascuna, e che serviranno per monitorare la temperatura di entrambe le facce della Li-poly. Il guscio di alluminio, costituito da due metà, è ottenuto da una lastra di alluminio lavorata con una fresatrice a controllo numerico. Dalla stessa lastra si ricavano anche due ulteriori gusci che servono per racchiudere quella parte della scheda sensori in cui non sono presenti i TMP (vedi figura 2.4). Nell'assemblare il nuovo termostato ogni TEC è stato bloccato tra il suo dissipatore e la metà del guscio di alluminio avente lo scasso per alloggiare la scheda. Dopo aver eseguito dei fori filettati sul dissipatore, come avveniva nella precedente versione del termostato, vengono fissate su di esso le metà dei gusci di alluminio. Lo scambio di calore, quindi, avviene per convezione forzata tra la Peltier e il suo dissipatore. Tutto l'involucro di alluminio è racchiuso in un case fatto di materiale isolante: neoprene e polystyrene per ridurre al massimo lo scambio di calore con l'esterno.

Ogni scheda sensori comunica con la propria scheda di interfaccia tramite il bus I^2C . La cella sottoposta a questi nuovi test è quella già equipaggiata della scheda di supporto per permettere il contatto dall'esterno. Le due metà di questo nuovo termostato vengono assemblate insieme, bloccando, così, la Li-poly al loro interno.



Fig. 2.4: Struttura nuovo termostato.

Affinché la Peltier lavori in modo tale da essere il più efficiente possibile, dev'essere sottoposta ad una pressione adeguata. Nel datasheet relativo al componente è specificata la pressione massima alla quale la cella può lavorare correttamente. In questa seconda versione è stato pensato un sistema di serraggio a molle per chiudere il termostato in maniera stabile. Sono stati realizzati altri blocchetti in alluminio, opportunamente forati per permettere il passaggio delle molle, le quali sono avvitate manualmente per ottenere una forza totale di circa 200N.



Fig. 2.5: Nuovo termostato.

2.4 Setup di misura

Il banco di test per eseguire le misure sulla cella campione, dalla quale estrarre poi i parametri da utilizzare nell'implementazione e caratterizzazione del modello, è rappresentato nella figura seguente:



Fig. 2.6 : Banco di misura.

Esso è costituito da un alimentatore della TTI, QL355TP, avente due uscite configurabili ed una fissa a 5V. Una delle due uscite configurabili è utilizzata per pilotare un doppio relè necessario all'inversione della corrente sul TEC, mentre l'altra uscita serve per controllare la corrente di carica della cella. Questo alimentatore, capace di erogare fino a 5A per tensioni inferiori a 15V, è gestito tramite un programma LabVIEW implementato su PC. Nell'utilizzo di questo strumento sono state utilizzate due accorgimenti: uno riguarda l'impiego del relè in serie all'ingresso, prima citato, comandato dalla porta ausiliaria dello strumento, utilizzato per impedire che la corrente di scarica proveniente dalla batteria si possa richiudere sugli ingressi dell'alimentatore quando questo è disattivato; l'altro consiste nell'utilizzo della

funzione *remote sense* che permette una corretta lettura della tensione di cella da parte dell'alimentatore, evitando di falsare la misura tenendo in considerazione la caduta dovuta ai cavi.

Un altro alimentatore, QPX1200L, sempre della TTI, è utilizzato per pilotare la corrente che scorre nel TEC, fino a 8A.

Nel banco di test è presente anche un carico elettronico della TTI, LD300, che viene utilizzato durante la scarica della cella, capace di assorbire fino a 300W alla temperatura di 40°C. Poiché lo strumento è fornito senza alcuna interfaccia digitale, è stato collegato ad esso un DAQ (data acquisition) della National Instruments, NI-USB6008DAQ. In questo modo il carico è facilmente controllabile da PC. Il DAQ ha, inoltre, la possibilità di impostare la corrente di scarica della cella, andando ad impostare le tensioni analogiche sulle porte control voltage presenti sul pannello dello strumento. Il carico funziona andando ad impostare una corrente costante. Il set up di misura prevede anche l'aggiunta di una sonda hall dell'Agilent, 1146A 100kHz/100A AC/DC. Questa ha il compito di leggere la somma algebrica delle correnti provenienti sia dall'alimentazione che dal carico elettronico, infatti avvolge uno dei due cavi imbullonati alla scheda di supporto della cella aventi proprio il compito di collegare la Li-poly agli strumenti di interesse. Anche la sonda non ha un'interfaccia digitale, per guesto motivo la sua uscita verrà letta dal DAQ.

Infine, un software sviluppato con LabVIEW2009 ha il compito di guidare il funzionamento di tutti gli strumenti acquisendo i dati ogni 250ms, tempo più che sufficiente viste le dinamiche del sistema che sono dell'ordine del secondo. Il programma LabVIEW esegue, inoltre, le strategie di carica e scarica della cella, nonché di controllo termico.

2.5 Implementazione controllo fuzzy

Com'è noto, un sistema dinamico, o semplicemente un sistema che evolve nel tempo liberamente, non è detto che abbia un comportamento soddisfacente dal punto della stabilità, dei tempi di risposta, del consumo energetico, della sovra elongazione, ecc. L'obiettivo di effettuare un controllo su un sistema fisico è quello di ottenere o avvicinarsi il più possibile ad un comportamento desiderato dello stesso. Quindi va determinata l'evoluzione delle variabili di ingresso, nonché sintetizzato il controllore per risolvere il problema del controllo. I tradizionali sistemi di controllo sono costituiti, generalmente, da un sistema di equazioni differenziali che mette in relazione le uscite con gli ingressi, soprattutto nell'ambito dei sistemi lineari. L'approccio basato su modelli matematici, avvolte, può risultare troppo difficile da identificare, può richiedere una complessità di calcolo eccessiva, specialmente quando si deve controllare un sistema non lineare e particolarmente complesso.

Nel nostro caso, il sistema sotto osservazione, da controllare, è dato dall'insieme della cella e del nuovo termostato, il cui modello termico complessivo è il seguente:



Fig. 2.7: Modello termico complessivo.

Il sistema in questione è particolarmente complesso, dal punto di vista del controllo termico, volendo regolare la temperatura della cella in maniera tale da analizzare il comportamento della stessa per temperature ben precise. E'necessario modificare il tipo di controllo utilizzato nella prima versione del termostato, in quanto esso è risultato poco adatto ad un sistema di questo genere. Poiché non si ha un comportamento simmetrico della cella Peltier tra riscaldamento e raffreddamento, e poiché non è nota con precisione, ovvero analiticamente, la relazione tra la corrente che scorre nella Peltier e il calore generato, un controllo di tipo PID, valido per i sistemi lineari, non può essere implementato. E' stato utilizzato un *controllo fuzzy*, ovvero un controllo basato su regole empiriche, particolarmente utile nel controllo di sistemi non lineari.

La teoria degli insiemi fuzzy, si basa sull'idea di generalizzare l'esperienza umana, applicata al controllo automatico di sistemi reali, utilizzando algoritmi linguistici al fine di formulare azioni di controllo. La caratteristica peculiare del controllo fuzzy è proprio quella di utilizzare tali algoritmi invece delle convenzionali descrizioni analitiche [6].

Il controllo fuzzy fu proposto da Lotfi A.Zadeh, dell'Università della California a Berkeley, nel 1965; la prima applicazione riguarda il controllo di un cementificio in Danimarca. Data la loro semplicità, l'affidabilità, il basso costo nella loro implementazione e le caratteristiche di precisione alquanto limitata, i sistemi fuzzy si sono affermati per applicazioni di massa quali il controllo di automobili, elettrodomestici, processi industriali, impianti civili. Alcuni esempi sono quelli della Canon che impiegano un controllo fuzzy per la regolazione automatica della messa a fuoco nelle videocamere, la Mitsubishi per il controllo automatico del condizionamento di grandi edifici, la Hitachi che ha realizzato un sistema fuzzy addirittura per il controllo automatico dei treni della metropolitana di Sendai, in Giappone, infine la Nissan che ha brevettato sistemi automatici basati sul controllo fuzzy per diverse applicazioni automobilistiche (trasmissione automatica, frenatura ABS).

Il controllo fuzzy si basa principalmente sulla regola *if* (situazione)-*then* (azione), la quale rappresenta un concetto abbastanza intuitivo. La struttura di un controllore fuzzy prevede un settore di *ingresso*, uno di *elaborazione*, in cui vengono implementate le regole di decisione *if* – *then*, e un settore di *uscita*, che ha il compito di assegnare un valore alla grandezza fisica necessaria all'azione di controllo. L'ingresso legge le grandezze da controllare tramite dei sensori e ne dà una descrizione di tipo qualitativo

utilizzando *l'interfaccia di fuzzificazione* che ha proprio il compito di convertire i valori numerici dei dati in ingresso in opportuni valori linguistici, ai quali corrispondono insiemi fuzzy. Al valore numerico misurato in ingresso, detta variabile *crisp*, si fa corrispondere un valore fuzzy tramite funzioni di appartenenza triangolari centrate intorno al valore misurato; in particolare si ha una suddivisione degli universi di ingresso in diversi insiemi fuzzy che individuano, poi, le etichette rappresentative delle variabili sia di ingresso che di uscita. E' molto importante il numero delle etichette con cui si divide l'universo delle variabili di ingresso, perché da esso dipende la sensibilità del controllo, nonché il numero massimo di regole ammissibili.

Di seguito viene riportato un esempio di suddivisione dello "spazio" d'ingresso in cinque zone. Utilizzando funzioni triangolari, si attribuiscono ai valori centrali delle variabili d'ingresso il massimo peso, mentre ai valori intermedi si assegna una percentuale di appartenenza alle cinque categorie suddette.



Fig. 2.8: Esempio di suddivisione dello spazio delle variabili d'ingresso [6].

E' importante che le zone di appartenenza siano sovrapposte in modo opportuno perché questo incide sull'efficacia del controllo, infatti saranno differenti i casi in cui prevarrà il grado di appartenenza dell'azione centrale o 26 di quelle laterali. Inoltre l'insieme fuzzy ha una frontiera che non è più una linea netta di demarcazione tra gli elementi che appartengono e quelli che non appartengono all'insieme, ma un'area in cui ad una variabile si associa un certo grado di appartenenza. Gli insiemi fuzzy sono detti anche "sfumati", ovvero senza brusche transizioni tra i diversi regimi.

Il settore di elaborazione, ovvero l'insieme delle regole fuzzy, non è altro che un modo per mettere in relazione una descrizione di una situazione in termini linguistici, con un'azione da svolgere, impiegando la regola empirica: if (situazione)- then (azione). Anche all'azione viene assegnato un diagramma di appartenenza del tutto analogo a quello d'ingresso. Le regole descrivono le relazioni esistenti tra le variabili linguistiche d'ingresso. Queste variabili sono costituite da diverse clausole che vengono combinate, tramite l'operatore and per ottenere il valore complessivo dell'antecedente, con le variabili linguistiche di uscita, i conseguenti. In definitiva, una volta ottenuto il valore dell'antecedente, occorre trasmetterlo al conseguente, quindi va associato un valore ad ogni regola che ne indichi l'importanza. Questo valore viene combinato con quello associato ai diversi antecedenti e il minimo tra i due verrà passato al conseguente. Possiamo dire che il peso del conseguente dipende da quanto una regola è adeguata a rappresentare una certa situazione. Poiché è possibile che diverse regole hanno lo stesso conseguente ma diverso antecedente, ai conseguenti (le azioni), sono inevitabilmente associati pesi diversi. Infine il settore di uscita, detto interfaccia di defuzzificazione, consente di passare da una descrizione qualitativa, in forma linguistica (fuzzy set), ad un valore ben preciso dell'azione (crisp value).

I metodi di defuzzificazione presenti in letteratura [6-7] sono molti, uno dei più usati è quello del centroide, per cui ad ogni *if* si fa corrispondere un'area da assegnare al *then*. Successivamente le aree si sovrappongono in modo da formare un'unica figura di area uniforme, data dalla somma delle due, e di quest'ultima si calcola il baricentro la cui ascissa determina il valore dell'azione da utilizzare.



Fig.2.9: Schema di un Controllore Fuzzy [6].

Dopo aver deciso di effettuare il controllo di temperatura del nostro sistema, composto da batteria e termostato, attraverso un controllo di tipo fuzzy, è stato possibile realizzarlo, utilizzando il toolbox *Fuzzy Logic* di Matlab, un software che utilizza un'interfaccia grafica e fornisce gli strumenti per la creazione e la modifica di sistemi di interferenza fuzzy.

L'obiettivo finale è quello di impostare dall'esterno la temperatura della cella e fare in modo che il sistema si stabilizzi il più possibile su quel preciso valore. Inoltre vorremmo avere la garanzia che il sistema, costituito da termostato e controllo della temperatura, sia in grado di mantenere la cella alla temperatura desiderata per tutto il tempo necessario. Gli ingressi del sistema di controllo sono $\Delta T = Tref - T$, dove Tref è la temperatura alla quale vogliamo termostatare la cella, e T è la temperatura misurata dai sensori posizionati sulle due facce della batteria (T in realtà è una Tmean, media delle temperature ottenute dai sei sensori), e il secondo ingresso è rappresentato dalla corrente che scorre nella cella (in carica e in scarica). L'uscita del sistema è invece la corrente che deve scorrere nelle due celle Peltier per raffreddare o riscaldare la cella.

Tref-T		izzy_Control (mamdani)	et
FIS Name:	Fuzzy_Control	FIS Type: mamd	lani
And method	min	Current Variable	
And method Or method	min max	Current Variable	
And method Or method Implication	min max	Current Variable	
And method Or method Implication Aggregation	min max min max	 Current ∀ariable Name Type Range 	

Fig. 2.10: Interfaccia del Fuzzy Logic Toolbox di Matlab utilizzato per la definizione e visualizzazione del controllo fuzzy del sistema.

Il range di valori accettabili relativo all'ingresso di temperatura va da - 10° a 10° , quello relativo all'ingresso di corren te va da 0A a 30A, mentre quello relativo all'uscita della *Ipeltier* va da -2.5A a 6A.

Sono stati scelti:

- per l'ingresso ΔT cinque etichette triangolari : "C max" centrata sul valore -10, "0" centrata sul valore zero, "F min" centrata sul valore 1.5, "Fmed" centrata su 3.75 ed infine "F max" centrata sul valore 10.
- per l'ingresso in corrente tre etichette triangolari: " I_{MIN} " centrata in zero, " I_{MED} " centrata in 10 e " I_{MAX} " centrata in 30.
- per le uscite le etichette identificate sono cinque, aventi nuovamente forme triangolare: "*scalda*" centrata sul valore -4, "*zero*" centrata in zero, "*F* min"centrata in 1.25, "*Fmed*" centrata in 3 e "*F* max" centrata in 6.



Fig. 2.11: Funzioni di appartenenza dell'ingresso $\Delta T = Tref - T$.



Fig. 2.12: Funzioni di appartenenza dell'ingresso Current.

Si ottengono in questo modo quindici regole (fig. 2.14). Il criterio con cui sono state scritte è quello per cui l'azione di controllo dev'essere tanto più intensa quanto più l'errore sulla temperatura è elevato, quindi siamo lontani dal valore desiderato, e quanto più il valore della corrente che scorre nella cella contribuisce ad un aumento, o diminuzione della temperatura della stessa, quindi questo influisce sulla temperatura finale alla quale vogliamo termostatare la cella.

1. If (Tref-T is Cmax) and (Curr	ent is lmin) then (lpelt is scalda) (1)
2. If (Tref-T is Cmax) and (Curr	ent is Imed) then (Ipelt is scalda) (1)
3. If (Tref-T is Cmax) and (Curr	ent is Imax) then (lpelt is scalda) (1)
4. If (Tref-T is 0) and (Current is	s Imin) then (Ipelt is 0) (1)
5. If (Tref-T is 0) and (Current is	s Imed) then (Ipelt is Fmin) (1)
6. If (Tref-T is Fmin) and (Curre	nt is Imin) then (Ipelt is Fmin) (1)
7. If (Tref-T is 0) and (Current is	s Imax) then (Ipelt is Fmed) (1)
8. If (Tref-T is Fmin) and (Curre	nt is Imed) then (Ipelt is Fmed) (1)
9. If (Tref-T is Fmed) and (Curre	ent is Imin) then (Ipelt is Fmed) (1)
10. If (Tref-T is Fmin) and (Curr	ent is Imax) then (Ipelt is Fmax) (1)
11. If (Tref-T is Fmed) and (Cur	rent is Imed) then (Ipelt is Fmax) (1)
12. If (Tref-T is Fmed) and (Cur	rent is Imax) then (Ipelt is Fmax) (1)
13. If (Tref-T is Fmax) and (Cur	rent is Imin) then (Ipelt is Fmax) (1)
14. If (Tref-T is Fmax) and (Cur	rent is Imed) then (Ipelt is Fmax) (1)
15. If (Tref-T is Fmax) and (Cur	rent is Imax) then (Ipelt is Fmax) (1)

Fig. 2.13: Base delle regole del Controllore Fuzzy.

Per esempio, descriviamo di seguito l'interpretazione di una di queste regole (regola numero 9) : "**Se** il ΔT appartiene alla zona $F \min \mathbf{e}$ la corrente nella cella è *Ialta*, **allora** la corrente nella Peltier apparterrà alla zona " $F \max$ "". Ovvero, se la differenza tra la temperatura di riferimento e quella misurata dai sensori è tale per cui richiederebbe un raffreddamento non molto elevato, ma la corrente che scorre nella cella, al contrario, provoca un aumento della temperatura della stessa, allora il raffreddamento che deve eseguire il termostato è elevato perché la corrente nella cella influisce sulla temperatura finale.

Infine riportiamo la superficie di controllo del regolatore fuzzy.



Fig. 2.14: Superficie controllo Fuzzy.

Un controllo di questo genere si applica con facilità e con risultati soddisfacenti a situazioni reali, come nel nostro caso, poiché non si basa su un modello analitico del controllore ma piuttosto sulla conoscenza che l'operatore ha del sistema sotto controllo.

Infine viene riportato un esempio di come agisce il controllore fuzzy e della defuzzificazione basata sulla tecnica del centroide (fig. 2.16) ; se il valore in ingresso ΔT appartiene a due zone (le prime due), e la corrente nella cella appartiene alla zona centrale, in uscita le zone di interesse alla corrente della Peltier sono due. Si nota come le due aree vengono sommate fino a formare una figura di area uniforme di cui si calcola il baricentro (linea rossa verticale), il valore dell'ascissa rappresenta la $I_{peltier} = -0.586 A$.



Fig. 2.15: Esempio controllo Fuzzy.
Una volta ultimato il controllo del termostato, e quindi il programma LabVIEW, sul quale è implementato, prima di iniziare i test necessari all'estrazione dei parametri relativi al modello di cella, sono state effettuate diverse prove per verificare il corretto funzionamento del controllo. Definendo manualmente, sul pannello frontale del programma LabVIEW, delle temperature di riferimento, si è osservato in che modo la temperatura del sistema seguisse quella impostata. Nel grafico che segue è riportato l'andamento della temperatura del termostato che ha un buon comportamento rispetto all'evoluzione a gradini della T_{ref} .



Fig. 2.16: Confronto tra la temperatura impostata esternamente e quella del termostato.

Capitolo 3

Caratterizzazione del modello di cella

3.1 Modello di cella LiPo adottato

Nell'ambito di uno studio di progettazione di un Battery Management System che sia in grado di monitorare un pacco batterie e di impedire che si abbia uno sbilanciamento di carica tra le celle, che possa comprometterne l'efficienza, è di fondamentale importanza basarsi su un adeguato modello di cella in grado di caratterizzare in maniera completa il comportamento di un accumulatore litio polimero. In letteratura [8] sono descritti diversi tipi di modelli per la cella:

- modelli elettrochimici: che pongono l'attenzione sui processi che coinvolgono gli elettroni e le reazioni di ossido-riduzioni;
- modelli matematici: che si caratterizzano per rappresentare un determinato oggetto nella maniera più fedele possibile da un punto di vista quantitativo e, per questo motivo, troppo astratti per le applicazioni di studio in questo lavoro;
- modelli elettrici: caratterizzati dall'uso di circuiti equivalenti per descrivere il comportamento di un determinato oggetto e sicuramente più intuitivi rispetto ai modelli sopra menzionati.

In letteratura [8,9], i modelli di cella finora descritti hanno analizzato solo le caratteristiche elettriche, mentre hanno del tutto ignorato la risposta termica. Prendere in considerazione l'influenza che la temperatura esercita sulla cella già nella fase iniziale di progettazione del modello, è fondamentale per permettere una valutazione più accurata del suo comportamento. L'importanza della dipendenza della cella Li-poly dalla temperatura, infatti, è stata ben evidenziata nei primi test di misura effettuati che eseguivano una serie di scariche sulla cella per diversi valori di corrente. In questi test si è verificato come la cella si scaldi in maniera differente quando è sottoposta a differenti profili di scarica, e modifichi il proprio comportamento rispetto a quello che ci si aspetterebbe con la cella termostata a 25°C.

Un modello elettrico è sicuramente più adatto a soddisfare le esigenze di progettazione e di gestione di questo studio, in quanto è in grado di predire in modo corretto la caratteristica I-V della cella ed il suo comportamento in condizioni di utilizzo.

Il modello elettrico proposto in fig 3.1, derivato da quello presentato in [8], si divide in due parti :



Fig. 3.1: Modello elettrico di cella proposto.

Il blocco di sinistra, composto da condensatore, resistore e generatore di corrente controllato in corrente, modella la capacità della cella, la sua autoscarica, nonché il SOC. Lo stato di carica assume l'espressione:

$$SOC[i(t), T, n_{cycle}, t] = SOC_{init} + \int_0^t f_1[T] * f_2[(n_{cycle})] * i(t)dt \quad (3.1)$$

dove $f_1[T]$ tiene conto della temperatura e $f_2[(n_{cycles})]$ invece dell'invecchiamento (quest'ultimo termine viene trascurato visto l'alto numero di cicli vita sopportabili dalle celle LiPo prima del degrado delle prestazioni). Per determinare lo stato di carica, si integra la corrente sulla $C_{capacity}$, esprimibile come:

$$C_{capacity} = 3600 * Capacity * f_1(T) * f_2(n_{cycle})$$
(3.2)

Capacity è la capacità della cella in Ahr. Impostando, inoltre, il valore di tensione iniziale sulla capacità si può definire lo stato di carica iniziale (impostando 1V per il 100% di SOC iniziale e 0V per lo 0%). In definitiva la tensione ai capi di $C_{capacity}$ modella il SOC della cella.

Il blocco a destra, invece, è caratterizzato dal generatore di tensione controllato in tensione, dall'impedenza interna della cella, e da due squadre RC che modellano le perdite dovute ai due tipi di polarizzazione della cella [8]. Il generatore di tensione ha la peculiarità di modellare la relazione non lineare presente tra il SOC e la tensione a vuoto della cella OCV (Open Circuit Voltage). La R_{series} modella la resistenza interna della cella, mentre le due squadre RC tengono conto del comportamento in transitorio. Le costanti di tempo associate al parallelo RC sono una dell'ordine dei secondi e l'altra dell'ordine dei minuti e questo dimostra un buon compromesso tra l'accuratezza e la complessità del modello, come riportato in [8]. La tensione misurata sui contatti della cella risulta essere nel dominio s

$$V_{cell} = Voc(SOC, T) - I_{cell} * Z_{tlong}(SOC, T) - I_{cell} * Z_{tshort}(SOC, T) +$$

$$-I_{cell} * R_{series}(SOC, T)$$
(3.3)

Dove Z_{tshort} e Z_{tlong} sono le impedenze legate ai paralleli RC.

3.2 Procedura di misura

La procedura di test per estrarre i parametri della cella in carica ed in scarica, deriva dal metodo presentato in [8], e consiste principalmente di tre fasi.

La fase iniziale prevede una carica ed una scarica completa con una corrente nominale di 1C alla temperatura di 25°C. Questa fase è importante per accertarsi che la modalità di misura, eseguita successivamente, possa partire da una condizione ben nota. Tra la carica e la scarica è stato previsto un intervallo di un ora per fare in modo che la cella si stabilizzi terminando tutti i suoi transitori.



Fig. 3.2: Fase iniziale.

Quella che può essere definita come seconda fase prevede un'altra ora di pausa prima di iniziare la procedura di misura vera e propria. Questa, identificata come la terza fase, prevede anch'essa un ciclo di carica e scarica 38 completo, ripetuto alle correnti ed alle temperature di interesse grazie al termostato progettato che rende possibile regolare l'effettiva temperatura della cella. Nella modalità di misura, i processi di carica e scarica vengono interrotti per 5 minuti quando si raggiunge l'1% del SOC e successivamente ogni 9% di SOC. Anche in questo caso, tra la fine della carica totale e l'inizio della scarica, è prevista un'ora di pausa. In figura 3.3 è riportato un esempio della procedura di misura, sopra descritta, in cui la cella viene caricata a 1C e, dopo un'ora di pausa, scaricata a 5C.



Fig. 3.3: Fase di misura: carica C, scarica 5C a 25°C.

3.3 Estrazione dei parametri per il modello di cella

Una volta terminato il test, si procede ad estrarre i parametri di interesse per la caratterizzazione del modello. I valori di questi parametri si ricavano dal comportamento in transitorio della cella durante i 5 minuti di pausa, osservando proprio l'evoluzione della V_{cell} . Naturalmente, i parametri vanno estratti dalle scariche a tutte le correnti e per tutte le temperature di interesse. Per esempio, analizziamo il comportamento della tensione durante un test di scarica a 5C eseguito a 25°C (fig. 3.4). Si nota la presenza di salti di tensione ogni qualvolta la corrente nella cella viene azzerata. Questi salti sono riconducibili alla caduta sulla R_{series} , che modella l'impedenza interna alla LiPo.



Fig. 3.4: Scarica 5C a 25℃.

Nei successivi 5 minuti di pausa si osserva un andamento di tipo esponenziale della tensione ai capi della cella, di tipo transitorio, dovuto agli effetti di polarizzazione schematizzati dalle due squadre RC nel modello.

Su quest'andamento viene eseguito un fitting con un'esponenziale a due costanti di tempo:

$$y = Ae^{\frac{-t}{\tau_1}} + Be^{\frac{-t}{\tau_2}} + y_0$$
(3.4)



Fig. 3.5: Fitting.

Si vede subito la corrispondenza che sussiste tra i parametri del modello (3.3) e i coefficienti dell'esponenziale:

$$A = I_{batt} * R_{t_long}$$
$$\tau_1 = C_{t_long} * R_{t_long}$$
$$B = I_{batt} * R_{t_short}$$
$$\tau_2 = C_{t_short} * R_{t_short}$$

Dove y_0 è il valore a cui tende la tensione sulla cella se lasciamo che si esaurisca completamente il transitorio. Praticamente rappresenta il valore della tensione a vuoto, l'OCV. Le pause di cinque minuti, tuttavia, non sono sufficienti a studiare con precisione l'esponenziale che tende al valore Voc perché, in pratica, questo valore non viene mai raggiunto. Pertanto, le pause che servirebbero, ogni 9% del SOC, dovrebbero essere molto più lunghe. Ovviamente, per rendere fattibile, in un tempo ragionevole, una caratterizzazione della cella Li-poly ci si deve accontentare di studiare il suo comportamento per breve periodi, cosicché i valori estratti per l'OCV, in carica e in scarica, non vengono a coincidere, andando a creare una fascia 41 di tensione OCV. Come valore da utilizzare nella prima implementazione del modello è stato scelto per semplicità la media tra i due valori.



Fig. 3.6: Andamento dell'OCV in funzione dello stato di carica a 25°C.

Il parametro R_{series} può essere determinato dalla caduta di tensione ΔV , corrispondente al salto iniziale, diviso la I_{batt} .

La caratterizzazione della batteria n.8 è avvenuta tramite la procedura di test ripetuta per diversi valori di corrente di scarica (C/2, C, 2C, 5C, 10C e 20C) e di carica (C/2 e C), termostatando la cella alle temperature di 10° , 25° e 35° .

Di seguito vengono riportati i grafici relativi ai parametri del modello estratti da tale procedura di test in cui, in uno stesso grafico, si può apprezzare l'andamento alle diverse temperature alle quali è stata termostatata la cella.



Fig. 3.7: Rseries per una scarica a 5C, a 10°C, 25°C e 35°C.



Fig. 3.8: Rt_long per una scarica a 5C, a 10℃, 25℃ e 35℃.



Fig. 3.9: Ct_long per una scarica a 5C, a 10°C, 25°C e 35°C.



Fig. 3.10: Rt_short per una scarica a 5C, a 10°C, 25°C e 35°C.



Fig. 3.11: Ct_short per una scarica a 5C, a 10°C, 25°C e 35°C.



Fig. 3.12: Grafico del processo di carica a 1C a 10° C, 25° C e 35° C in modalità misura (pause da 5 minuti anche per l'estrazione dei parametri a 10° C).

Dai risultati appena ottenuti si può notare un aumento delle componenti resistive con la diminuzione della temperatura. Inoltre, dai test effettuati si è assistito ad un aumento del tempo di carica a basse temperature. Confrontando, infatti, la fase di misura a 10°C con quella a 25°C, (fig. 3.12), è messo in evidenza come la cella si caricherà in un tempo maggiore quando è termostatata a basse temperatura, perché si ha un notevole rallentamento delle reazioni di ossido riduzione all'interno della cella.

Inoltre, continuando ad esaminare i dati a disposizione, si osserva come il processo di scarica, per basse temperature, sia più rapido rispetto agli altri due casi, ovvero, viene raggiunta più velocemente la soglia dei 3V, quindi il processo di misura si interrompe, per non recare danni permanenti alla batteria, ma della carica rimarrà immagazzinata all'interno della cella. Esaminando, infatti, la fig. 3.7, che riporta l'andamento della R_{series} , è evidente la mancanza di alcuni punti nel grafico. In particolare il tratto di colore blu, relativo alla temperatura di 10°C, non arriva a bassi valori di SOC, ma si interrompe intorno al 37%.

3.4 Osservazioni sul comportamento della tensione a vuoto della cella

Successivamente è stato analizzato il comportamento dell'OCV. Il suo andamento è stato ricavato utilizzando i valori a cui tendono gli esponenziali con cui si approssima la V_{cell} durante i 5 minuti di pausa. E' stata verificata con attenzione la reale dipendenza dell'OCV dalla temperatura, così come risulta essere dal processo di estrazione. Per fare ciò, è stata inserita la cella nel termostato ed è stato osservato l'andamento dell'OCV al variare della temperatura da -5°C a 40°C. Questo test è stato rip etuto per diversi valori di SOC, e il risultato che si è ottenuto è stato quello di una leggera variazione della tensione a vuoto della cella, in particolare si osserva una diminuzione della tensione con l'aumentare della temperatura (fig. 3.13).



Fig. 3.13: Andamento dell'OCV al variare della temperatura al 50% di SOC.

3.5 Osservazioni sulla capacità e resistenza di autoscarica delle celle.

Infine, importante è la caratterizzazione della $R_{self \ discharge}$ e della Capacità della cella. Questi due parametri permettono di differenziare le varie celle tra di loro.

Il valore della resistenza di autoscarica può dipendere da diversi fattori, come, per esempio, un difetto di fabbricazione di alcune celle. Nel lotto di 14 celle acquistate della Kokam per la realizzazione di questo studio, andando a misurare la tensione su ogni singola cella, sono state rilevate tre celle completamente scariche rispetto alle altre che presentavano uno stato di carica del 50%. Tutte le celle, allora, sono state portate al 100% di SOC e sono state osservate, durante un periodo di stoccaggio di circa tre mesi, variazioni di tensione significative per le celle che possiamo definire anomale. Per la determinazione della R_{self discharge}, si è quindi risaliti al valore di SOC corrispondente a quello di tensione dopo il periodo di stoccaggio, ottenendo la quantità di carica persa in Ahr. Questa quantità, divisa per il tempo di osservazione, ha dato come risultato la Iself discharge (dell'ordine dei μA per le celle sane e delle decine di μA per quelle anomale). Successivamente, dividendo l'OCV per la Iselfdischarge è stato ottenuto il valore di R_{self discharge}, che risulta essere dell'ordine di grandezza delle decine di $M\Omega$ per le celle sane e di qualche $M\Omega$ per quelle anomale.

Il fatto di poter individuare le celle anomale, che possano compromettere il funzionamento del pacco batteria utilizzato in veicoli elettrici ed ibridi, è molto importante perché il corretto funzionamento del pacco dipende da quello di ogni singola cella al suo interno, e, di conseguenza, se alcune celle si scaricano troppo rapidamente rispetto alle altre, c'è il rischio che il veicolo sia inutilizzabile.

Per la capacità di ogni singola cella si è effettuato un ciclo di carica e scarica, intervallato da un'ora di pausa, in cui si è misurata la quantità di carica trasferita alla cella [5]. I valori ottenuti hanno un valor medio di 1.3978 Ahr, ed una varianza molto bassa. In tabella 3.1 sono riportati i valori di capacità e di $R_{self\ discharge}$ trovati.

Dopo aver estratto i parametri del modello, si procede alla sua implementazione in ambiente di lavoro Simulink per effettuare la validazione del modello sopra presentato.

Cella	$R_{self\ discharge}(\Omega)$	Capacità (Ahr)
1	4.817E+005	1.418199
2	1.565E+007	1.371722
3	2.107E+007	1.404292
4	3.459E+007	1.372382
5	3.413E+007	1.383596
6	2.107E+007	1.393463
7	2.669E+007	1.397998
8	3.658E+006	1.413961
9	3.500E+007	1.396881
10	3.511E+007	1.408605
11	1.556E+006	1.411707
12	2.004E+007	1.387693
13	5.237E+007	1.418329
14 :	5.378E+007	1.389805

Tabella 3.1: Valori di auto scarica e di capacità delle celle.

Lo studio condotto fin ora ha evidenziato come la dipendenza delle prestazioni di una cella Li-poly dalla temperatura è un problema di fondamentale importanza che va preso in considerazione nel progetto di un efficiente e completo sistema di controllo di un pacco batterie per applicazioni automotive (BMS). Questo, sia per lo sviluppo di un sistema di controllo termico, allo scopo di mantenere il pacco all'interno del range di temperature in cui è garantito il corretto funzionamento, sia per tenere in considerazione il bilancio elettrico delle celle all'interno del pacco, poiché le prestazioni di una batteria dipendono da quelle dei singoli moduli. Se le celle nel pacco non sono alla stessa temperatura, ognuna di esse verrà caricata o scaricata in maniera differente e questo porterà, dopo un certo numero di cicli, ad uno sbilanciamento dei moduli e al peggioramento delle prestazioni del pacco.

Capitolo 4

Modello termico della cella LiPo ed implementazione in ambiente Simulink

Dopo aver modificato il set up di misura necessario per l'estrazione dei parametri del modello, con l'aggiunta di un nuovo termostato nel banco di misura per la caratterizzazione completa della cella al variare della temperatura (10°C, 25°C, 35°C), è stata replicata I a procedura di test descritta nel capito 3, per estrarre i parametri di interesse. Il passo successivo consiste nel determinare la modalità di scambio di calore della cella con il mondo esterno, e per fare ciò è necessario avere a disposizione un buon modello termico della stessa, implementare il modello della cella in modo tale da essere in grado di ottenere come risultato di una simulazione, la temperatura della cella passando, come ingressi al sistema, solamente la corrente che scorre nella cella, e quindi i differenti profili di carica e scarica, e la T_{amb} .

Infine si vuole attuare una estensione del modello della singola cella Lipoly ad un modello più complesso di batteria che contiene un determinato numero di celle disposte in serie.

Ricordando, infatti, lo scopo cui è rivolto il seguente lavoro di tesi, ovvero simulare il comportamento di un pacco batterie per applicazioni automotive, è di fondamentale importanza avere un accurato ed efficiente modello di batteria. Esso rappresenta un valido strumento di supporto alla progettazione di un Battery Management System essendo in grado, in ogni istante, di determinare le caratteristiche più importanti del pacco, ovvero la tensione totale, lo stato di carica e la temperatura della batteria, nonché il calore scambiato tra le singole celle e l'ambiente esterno.

4.1 Modello termico accumulatore litio polimero

Un efficace sistema di controllo termico, critico per ottimizzare la progettazione in scala di celle e batterie, parte con una previsione accurata delle condizioni termiche della cella e, in particolare, con un buon modello termico della stessa, che permette di poter simulare il profilo di temperatura della batteria in differenti condizioni operative.

Una previsione affidabile dei profili di temperatura delle singole celle richiede una valutazione quantitativa del tasso totale di calore generato e dissipato poiché esso porta ad un aumento di temperatura della cella stessa. Sono stati effettuati diversi studi a riguardo, che hanno portato alla realizzazione di modelli matematici per la descrizione del comportamento in temperatura di vari tipi di batterie (lead-acid, Li-poly, Ni-MH).

L'approccio più utilizzato in letteratura per risolvere il problema termico è quello che fa riferimento al modello ad Elementi Finiti (FEM), in cui l'equazione della trasmissione del calore, a tre dimensioni, è la seguente [10-11]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \dot{q}$$
(4.1)

dove ρ rappresenta la densità media $\binom{Kg}{m^3}$, C_p la capacità termica media, k_x, k_y, k_z, sono i coefficienti di conduttività termica nelle tre direzioni, \dot{q} invece è la quantità di calore generata per unità di volume.

In realtà, è possibile fare riferimento al modello matematico ad una sola dimensione semplificando la trattazione e riportandoci nella forma:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \dot{q}$$
(4.2)

L'equazione relativa alla generazione di calore, nell'ipotesi di calore generato uniformemente all'interno della cella, è la seguente [10-11]:

$$\dot{Q} = \frac{I}{Vol} \left[(V - Voc) + T \frac{dVoc}{dT} \right]$$
(4.3)

dove V è la tensione della batteria, Voc è la tensione a circuito aperto, T è la temperatura.

La generazione del calore, quindi, può essere espressa come la somma di due termini che indicano la produzione per effetto Joule (V-Voc) e la produzione di calore reversibile $T \frac{dVoc}{dT}$.

Nella nostra trattazione, in una prima analisi, quest'ultimo termine può essere trascurato, essendo minima la dipendenza dell'OCV dalla temperatura. La generazione del calore prodotto dalla cella è dovuta solamente al primo termine dell'equazione. Inoltre, considerando la temperatura sulla cella uniforme, la derivata seconda della temperatura lungo tutte le direzioni risulta essere uguale a zero, e questo semplifica notevolmente l'eq (4.2) e ci permette di risalire direttamente al valore della T della cella :

$$T = \int \frac{\dot{q}}{\rho c_p} dt \tag{4.4}$$

dove ρ e \dot{q} sono noti, e la capacità termica è calcolabile osservando sperimentalmente l'andamento della temperatura sulla cella isolata termicamente.

Negli articoli consultati [10-11-12], il modello termico della cella viene implementato assumendo costante il coefficiente di scambio termico sulla superficie esterna della batteria, risolvendo così l'equazione differenziale (4.2) e considerando opportune condizioni al contorno e condizioni iniziali [11]. Il modello è stato utilizzato in condizioni non stazionarie per simulare il profilo di temperatura durante la scarica e la carica di un pacco batterie [11], dove sono stati messi a confronto i risultati derivanti dall'utilizzo delle equazioni relative allo scambio di calore a 1-D e 2-D sotto diverse condizioni

53

di funzionamento.

L'equazione del bilancio di energia (4.2) può essere rappresentata utilizzando un circuito elettrico equivalente a parametri concentrati, dove resistenze e capacità sono utilizzate per rappresentare fenomeni di accumulo e trasferimento di calore, mentre il generatore di corrente modella il termine relativo alla generazione di calore \dot{Q} .

Un modello termico a parametri concentrati che può essere studiato e dal quale si può partire per la determinazione di un modello efficiente che approssimi il più possibile l'andamento della temperatura sulla cella, può derivare da quello presentato in [12], che fa riferimento ad un modello semplificato ad un polo, dove l'unica capacità in gioco è quella termica della batteria. La funzione di trasferimento, considerando come ingresso al sistema il calore generato dalla cella, e come uscita la temperatura *Tb*, è la seguente:

$$H(s) = \frac{T}{Q_p} = \frac{R_p}{1 + R_p C_p s}$$
(4.5)



Fig.4.1 : Modello scambio termico.

Può essere preso in considerazione anche il modello più complesso a due poli presentato in [13], che si basa su un modello matematico proposto da Zimmerman-Peterson.

4.2 Determinazione parametri termici della cella

Per determinare, quindi, la temperatura che raggiunge la Li-poly, utilizzando l'espressione sopra riportata (4.4), è necessario eseguire dei test per valutare la capacità termica della cella ed avere una misura del calore prodotto da quest'ultima.

La misura che dovrà essere eseguita sulla cella per estrarre i parametri di interesse, va effettuata inserendo quest'ultima in un contenitore di materiale isolante per evitare al massimo gli scambi di calore con l'esterno.

Quindi, quello che dovrà essere realizzato è un vero e proprio calorimetro che catturi e misuri il calore generato dalla cella.

La cella n. 8, non avvolta dal guscio di alluminio, poiché questo avrebbe falsato i risultati derivanti dall'estrazione dei parametri, dal momento che era necessario considerare anche la capacità e la resistenza introdotte dal termostato, è stata equipaggiata della scheda di supporto, per rendere la cella facilmente contattabile dall'esterno della camera termica. Sopra la cella è stata posizionata la scheda sensori, la stessa utilizzata per effettuare i test di misura per l'estrazione di tutti i parametri del modello, scheda che è fissata alla cella tramite delle fascette di nylon con l'aggiunta di uno strato di neoprene per evitare che le fascette danneggiassero i componenti saldati sulla scheda sensori. Il tutto viene posizionato all'interno di una scatola di polistirolo sulla quale sono stati effettuati dei fori per il passaggio dei cavi provenienti dagli strumenti di misura necessari per il contatto della cella e della scheda. Infine, la scatola è riempita con altro polistirolo e chiusa con un coperchio dello stesso materiale.

Sono state effettuate varie prove per diversi valori di corrente e diverse modalità di misura.

Un primo test prevedeva la carica a 1C e la scarica a 5C in continua, al termine della quale veniva determinato il ΔT da applicare nella formula per ricavare la capacità termica:

$$C_p = \frac{Q}{\Delta T} \tag{4.6}$$

55

Il test è stato ripetuto senza il coperchio di polistirolo (test libero) e si è notata una diminuzione della temperatura della cella all'interno dell'involucro. In figura 4.3 vengono riportati i grafici delle temperature ottenute dal test con il coperchio chiuso e dal test libero.



Fig.4.2 : Calorimetro e cella equipaggiata di scheda di supporto e scheda sensori.



Fig.4.3: Confronto dell'andamento della temperatura della cella nel calorimetro con il coperchio di polistirolo chiuso e aperto.

Basandoci su queste misure, per estrarre i parametri della funzione di trasferimento del modello termico della cella (4.5), è stato utilizzato "System Identification Tool" di Matlab, un software che permette lo studio e la caratterizzazione dei parametri di un sistema dinamico a partire dalla conoscenza dei dati misurati di ingresso e di uscita. Sono stati inseriti come ingressi al toolbox la Qp, prodotto della I_{batt} per il termine (V - Voc), la forma del sistema da studiare, e l'andamento della temperatura sulla cella ottenuto sperimentalmente. Questo tool di Matlab ha fornito quindi, i coefficienti del sistema con cui si approssima il comportamento di quello fisico sotto studio, dai quali si è risaliti al valore della resistenza e della capacità termica. Riportiamo un esempio di come funziona il tool di Matlab utilizzando i dati

relativi al test libero. Nella figura seguente, con u_1 è indicato l'input del sistema, cioè il calore scambiato dalla cella durante la scarica, e con y_1 l'uscita del sistema, ovvero l'andamento della temperatura, dopo aver definito la funzione del trasferimento (4.5).



Fig. 4.4: Segnali d'ingresso e di uscita del tool "System Identification".

Successivamente si esegue un fitting dell'uscita con i dati ottenuti dalla misura, in questo caso si ha un "Best fits" del 92.63 %.



Fig. 4.5: Fitting tra i dati sperimentali e l'andamento della temperatura ottenuto da "ident".

Nella finestra "process models" sono riportate le informazioni sulla forma del sistema e sui risultati ottenuti:

Model Transfer Function	ParameterKnown	Value	Initial Guess	Bounds
	ĸ	16.2251	Auto	[-Inf Inf]
к	Tp1 📃	709.4709	Auto	[0.001 inf]
(1 + Tp1 s)	Tp2	0	0	[0.001 inf]
	ТрЗ	0	0	[0.001 Infj
Poles	Tz	0	0	[-Inf Inf]
1 💌 All real 💌	Td 📄	0	0	[0 7.5]
Zero Delay	 Auto-selected From existing model: User-defined 		Value>Initial Guess	
Disturbance Model: None Focus: Simulation	Initial state: Covariance:	Auto Estimate		Options
Iteration 3 Fit: 0.142 Improvement 0 % Display Continue				
Name: P1	Estimate	Close		Help

Fig. 4.6: Finestra "Process Model" del tool di Matlab "System Identification Tool"

Dove K è il valore di R_p e T_{p1} è la costante di tempo dalla quale si ricava il valore di C_p . Ripetendo il procedimento, sopra descritto, anche con i dati ottenuti dal test con il calorimetro chiuso e dal test in cui la cella non è inserita in nessuna camera termica, è stato osservato come il valore della C_p è indipendente dalle condizioni in cui il test è stato eseguito, mentre la R_p assume un valore maggiore nel test con il coperchio del calorimetro chiuso. Questo è un risultato ragionevole in quanto la capacità termica della cella è una proprietà che dipende intrinsecamente da come questa è realizzata, nonché dalla sua massa, la resistenza termica, invece, rappresenta l'ostacolo che ha il calore nell'attraversare un mezzo. Essendo il polistirolo un buon isolante termico e trattenendo il calore, si ottiene un elevato valore della resistenza termica. La tabella 4.1 contiene i valori di R_p e C_p derivanti dai test effettuati nel calorimetro. Sono stati riportati, inoltre, anche i dati ottenuti dalla scarica a 5C, in continua, quando la cella non è inserita in nessuna camera termica, ma lasciata nell'ambiente esterno, per poter confrontare i risultati e verificare che il valore della capacità rimane

pressoché lo stesso nelle tre casi presi in considerazione.

Test	Rp (℃/W)	Cp (J/℃)
Test "outside"	14.7	45
Test "open"	16.5	45
Test "close"	33	44.8

Tabella 4.1: Valori dei parametri del modello termico in diverse modalità di test.

4.3 Realizzazione del modello in ambiente Simulink

L'implementazione del modello di singola cella è stata effettuata in ambiente Simulink, un software per la modellazione e simulazione di sistemi dinamici associato a Matlab. E' uno strumento che consente di creare diagrammi a blocchi grafici mettendo a disposizione moduli predefiniti ma lasciando la possibilità all'utente di crearne dei nuovi.

Il modello di singola cella, implementato in ambiente Simulink, e riportato in figura 4.7 deriva dal modello elettrico adottato nel presente lavoro di tesi (capitolo 3, fig. 3.1)

Tale modello non solo prende in considerazione la dipendenza della cella dalla temperatura, introducendo nei vari parametri quali $R_{t.s}$, $C_{t.s}$, $R_{t.l}$, $C_{t.l}$ ed R_{series} la dipendenza dalla temperatura, ma implementa anche il modo in cui la cella scambia calore con l'ambiente circostante, fattore necessario per comprendere come la cella Li-poly si scalda quando è attraversata da corrente. Il modello così implementato potrà essere di grande utilità anche quando esso sarà esteso a quello di batteria, permettendo così di osservare e capire il comportamento delle varie celle, disposte una accanto all'altra, come queste interagiscano tra di loro e con l'ambiente esterno. A tale scopo, analizziamo, di seguito, i blocchi più importanti del modello.



Fig. 4.7: Modello di cella.

• Blocco "SOC"

Il modello preleva dal workspace di Matlab i valori della Ibatt che scorre nella singola cella, il SOC iniziale, nonché la capacità e la resistenza di autoscarica, caratteristiche, queste ultime, tipiche della cella in questione. Questi dati fungono da ingressi al blocco "SOC" che si occupa della determinazione dello stato di carica in ogni istante* risolvendo la seguente espressione:

$$SOC = SOC_{init} + \frac{100}{c_{capacity}} \int -(i_{batt} + i_{self \ discharge}) dt$$
(4.7)

dove il valore di $C_{capacity}$, l'effettiva capacità della cella, è convertito in Farad; il valore 100, nell'espressione, sta ad indicare il fatto che lo stato di carica a cui siamo interessati è compreso tra 0 e 100, la *Iself discharge* è data dall'espressione:

$$I_{self\ discharge} = \frac{V_{SOC}}{R_{self\ discharge}}$$
(4.8)

e, infine, il cambio di segno alle correnti è dovuto alle convenzioni adottate nel modello, che prevedono una corrente di carica negativa ed una corrente di scarica positiva.



Fig. 4.8: Blocco SOC.

• Blocco "Temperature"

Dai dati ricavati da Matlab (tabella 4.1) è possibile implementare, nel modello, un blocco "Temperature" che sia in grado di determinare la temperatura che raggiunge la Li-poly attraversata da una corrente. Il blocco "Temperature" non fa altro che applicare la formula (4.4). La temperatura di interesse è quella relativa alla cella, e poiché ciò che otteniamo dal test effettuato nel calorimetro è $\Delta T = T_{cell} - T_{amb}$ il quale, a sua volta, è uguale a :

$$\Delta T = \frac{1}{c} \int Q_{cp} dt = \frac{1}{c} \int \left(Q - \frac{\Delta T}{R_p} \right) dt$$
(4.9)

Per ottenere la T_{cell} , va sommata la T_{amb} al ΔT .

Nella formula (4.9), la Q_{cp} , calore generato dalla cella, è calcolato come la corrente che scorre solo nella capacità termica C_p .



Fig. 4.9: Blocco "Temperature"

La temperatura in uscita dal blocco, sommata a quella ambiente, dà in definitiva il valore della temperatura della cella. Infine è stato inserito un comando *Term* che ha la funzione di indicare se la cella sta lavorando in condizioni di temperatura libera oppure se è controllata da un termostato.

• "Look-up table"

I valori dei parametri Ibatt, SOC e temperatura entrano successivamente nelle *look-up table* da cui si ricavano i valori della Rseries, Rt_s , Ct_s , Rt_l e Ct_l . Queste look-up table a tre dimensioni non sono altro che delle tabelle 11x7 contenenti i dati delle misure effettuate, impaginate secondo le temperature della cella, dalle quali è possibile ottenere i valori delle capacità e delle resistenze del nostro modello in funzione della Ibatt, del SOC e della temperatura. Un'altra look-up table calcola il valore dell'OCV, la tensione a vuoto della cella, inizialmente dipendente solo dallo stato di carica della Lipoly. Per meglio approssimare il comportamento reale dell'OCV, sono stati inseriti nella tabella cento valori, ricavati dagli undici punti di misura mediante un'interpolazione di tipo cubic spline. Infine, su tali valori Simulink ha eseguito un'ulteriore interpolazione per ricavare l'andamento corretto.

• Blocco "Vt_s" e "Vt_l"

Gli ultimi blocchi del modello non fanno altro che determinare le cadute sulle squadre RC che modellano i transitori relativi alla cella risolvendo l'equazione:

$$V(t) = \int \frac{i_c(t)}{c(t)} dt \tag{4.10}$$

dove ic(t) è la corrente che scorre sulla capacità ed è uguale a:

$$i_c(t) = i_{batt} - \frac{v(t)}{R(t)}$$
 (4.11)

L'ultimissima parte dello schema a blocchi confronta i valori di tensione

ottenuti tramite la misura con quelli ricavati dal modello, andando a calcolare l'errore assoluto e quello percentuale.



Fig. 4.10: Blocco Vt_s.

4.4 Validazione del nuovo modello sulla cella campione

Per effettuare una validazione del modello proposto, relativo alla cella campione SLPB723870H, sono stati messi a confronto i dati ottenuti dai test sperimentali, con i dati che si ricavano dalle simulazioni.

Il primo grafico che viene riportato è quello di una modalità di misura a 1C a 35℃, in cui sono riportate sia la carica che la scarica.



Fig. 4.11: Carica e scarica 1C con pause ogni 9% di SOC a 35°C.

Quello che si osserva, in generale, è un buon comportamento del modello nella simulazione del test in modalità di misura, per una certa corrente di scarica ad una data temperatura.

Altri grafici significativi per la validazione del modello possono essere i tre che seguono. Il primo mostra il comportamento del modello nel tempo durante una carica a corrente continua 1C e scarica a 5C. La cella in questo caso non è termostatata e si osserva come il modello segue molto bene l'andamento ottenuto dalle misure. Nel secondo e terzo grafico, invece, viene preso in considerazione un profilo di utilizzo in cui si alternano diverse correnti di carica e scarica a momenti di pausa. Nel grafico 4.14 la temperatura nel modello è tenuta fissa a 25°C, a di fferenza di quello 4.13, in

cui viene considerata la dipendenza dei parametri dalla temperatura. In questo modo è possibile far notare in che misura le variazioni di T effettivamente influiscono sul comportamento della singola cella. Il modello (fig.4.14) non riesce a seguire correttamente le variazioni della temperatura sulla cella. Si ha uno scostamento dall'andamento reale, già dopo circa 18 minuti di simulazione. In tabella 4.2 sono riportati gli errori commessi dal modello rispetto alle misure sperimentali. Aver reso il modello di cella più complesso, ma caratterizzato da un'accuratezza maggiore, ha portato ad una diminuzione dell'errore medio di 9 mV, e dell'errore percentuale, definito come:

$$Percent \ Error = 100(\frac{V_{model} - V_{test}}{V_{test}})$$
(4.12)

di 0.25%.

Questi risultati così soddisfacenti e consistenti con il reale comportamento di una cella Li-ploy, sono dovuti al fatto di aver considerato nel modello una delle variabili principali che influiscono sulle prestazioni di un accumulatore di energia, ovvero la temperatura. Lo studio in temperatura non è consistito solamente nella determinazione della dipendenza dei parametri da T, ma è stato studiato un modello termico della cella e come questa scambia calore.

Si riporta, infine, una tabella contente le differenze tra la tensione misurata e quella simulata, dei grafici sopra riportati.



Fig. 4.12: Carica continua a 1C e scarica continua a 5C in temperatura libera.



Fig.4.13: Ipotetico test di utilizzo con diverse correnti di carica e scarica.


Fig.4.14: Stesso test di utilizzo riportato in fig. 4.14 ma con cella termostata alla temperatura di 25°C.

Test	Max error (V)	RMS error (V)	RMS percent error (%)
Test curve	0.112	0.012	0.33
Constant	0.184	0.014	0.40
Step-wise	0.488	0.017	0.45
STep-wise (25℃)	0.520	0.026	0.70

Tabella 4.2: Errore massimo ed errore medio che commette il modello nella simulazione rispetto alle misure sperimentali.

Capitolo 5 Simulazioni di batteria e analisi dello sbilanciamento

5.1 Estensione del modello da singola cella a batteria

Poiché scopo di questo lavoro di tesi è quello di implementare un modello accurato ed efficiente di un pacco batteria con il quale equipaggiare un BMS per veicoli elettrici ed ibridi, il passo successivo alla realizzazione di un modello di cella che sia in grado, in tempo reale, di monitorare la tensione, lo stato di carica, la corrente e la temperatura di ogni singola cella, è stato estendere il modello a quello di una batteria formata da molteplici celle disposte in serie. Prendendo spunto dalle caratteristiche del modello presentato nei capitoli precedenti, è stato implementato un modello in grado di fornire la tensione, lo stato di carica della batteria e la temperatura, delle celle che la compongono, così da essere in grado di determinare e monitorare il comportamento del pacco in ogni momento. Grazie alle proprietà dell'ambiente di lavoro Simulink, l'estensione del modello è facilmente realizzabile utilizzando come blocco base il modello di cella, e considerando gli ingressi al sistema non più come singoli valori ma come vettori aventi dimensione pari al numero di celle in questione. Il modello dovrà essere in grado di simulare un determinato profilo di utilizzo del pacco batteria. Gli ingressi al sistema saranno costituiti da un vettore contenente la temperatura ambiente durante il test, ed una matrice contenente i dati sperimentali di corrente, tensione e temperatura della cella dalla quale il modello preleverà corrente e temperatura.

Per poter definire un modello di batteria costituita da "n" celle disposte in serie, è importante andare a considerare, per prima cosa, un modello termico di tutta la batteria, e capire in che modo ogni singola cella "vede" termicamente le altre celle del pacco e quanto calore esse si scambiano.

Il modello termico di ogni cella, proposto, può essere ripetuto un numero di volte pari al numero delle celle che costituiscono la batteria. Le celle sono collegate tra di loro attraverso una resistenza termica R_{tb} il cui valore determina proprio la velocità del processo con cui il calore generato spontaneamente si trasferisce dalle celle a temperatura più alta a quelle a temperatura più bassa.

Il calore generato dalla batteria, dal quale si ricava la temperatura della stessa, viene calcolato sommando al calore generato da ogni singola cella il calore generato da tutte le celle che si trovano alla sua destra e alla sua sinistra e che inevitabilmente influenzano la temperatura totale della cella presa in considerazione.

Per spiegare meglio la modalità di calcolo del calore, si può considerare una batteria formata da sole tre celle disposte in serie: cella "*i*", *i* – 1" e "*i* + 1" con le due resistenze termiche R_{tb1} ed R_{tb2} .



Fig. 5.1: Modello termico di una batteria composta da 3 celle.

Al calore generato dalla singola cella, Q_i , va sommato il calore generato dalla cella di destra e da quella di sinistra, calcolati come :

_Capitolo 5: Simulazioni di batteria e analisi dello sbilanciamento

$$Q_{i+1} = \frac{(T_{i+1} - T_i)}{R_{tb2}} \qquad \qquad Q_{i-1} = \frac{(T_{i-1} - T_i)}{R_{tb1}}$$
(5.1)

dove " T_i ", " T_{i+1} " e " T_{i-1} " sono le temperature relative alle tre celle dell'esempio. In definitiva il calore totale sarà dato dalla somma dei tre termini:

$$Q_{tot} = Q_i + Q_{i+1} + Q_{i-1} \tag{5.2}$$

Nel modello, questi tre termini rappresentano dei vettori aventi dimensione "n". Il blocco "Temperature" è così costituito :



Fig. 5.2: Blocco "Temperature" della batteria.

Per la determinazione del calore proveniente dalle celle del sistema si utilizza il Subsystem "*For Iteration*", che esegue ripetutamente il contenuto del sottosistema fino a che non viene raggiunto il limite impostato. Nel nostro caso, il ciclo è stato "parametrizzato" specificando "n" come limite al numero delle iterazioni. Il valore di "n" viene impostato dall'esterno in base al numero di celle che compongono il sistema.

• Blocco "Q from right cell"

Analizzando il blocco "Q from right cell" (per il blocco "Q from left cell" il ragionamento è del tutto analogo con l'apporto di qualche modifica se consideriamo che le celle in questione sono quelle a sinistra di quella presa in considerazione), il calore è calcolato come corrente che scorre nella resistenza termica R_{tb} che collega le varie celle.



Fig. 5.3: "Q from right cell".

Il primo check che si esegue è sull'indice del for, per "i" che va da 1 ad "n". Se l'indice è minore di "n" e, quindi, non si è all'ultima cella del pacco, viene eseguito l' "If Action Subsystem" che ha come ingresso l'indice "i" e la temperatura della cella (quella finale, già sommata alla T_{amb}). All'interno del sottosistema ci sono due "Multiport Switch" ad un ingresso (il vettore delle temperature T_{cell}) ed un segnale di controllo. Questo blocco si comporta da "selettore dell'indice" per cui la sua uscita è l'elemento del vettore che corrisponde al valore dell'ingresso di controllo. In uno dei due "Multiport Switch" l'ingresso di controllo. In uno dei due "Multiport Switch" l'ingresso di controllo è proprio l'indice il valore 1, per considerare la cella immediatamente adiacente alla sua destra. Il subsystem continua, poi, con l'applicazione della formula (5.1). In definitiva, per ogni "n", l'uscita di questo blocco non è altro che il calore generato dalle celle adiacenti.

Nel caso in cui l'indice del for arrivi al limite "n", viene eseguita l'ultima iterazione. Il subsystem legato a questo caso manda in uscita il valore zero, per indicare che è l'ultima cella della batteria. Ciò significa che non esistono altre celle alla sua destra che generano calore che possano influenzarne la temperatura.

Le uscite dei due blocchi "If Action Subsystem" entrano in uno swicth controllato da un segnale pari a "n-i". Lo swicth è così settato: in uscita si avrà il primo dei due ingressi quando il segnale di controllo è diverso da zero. Quando la condizione dello swicth non è più verificata, in uscita si avrà il secondo dei due ingressi, ovvero zero. Quindi, dopo "n" iterazioni si crea in uscita il vettore del calore.

Infine, il blocco "Assignment", che ha il compito di assegnare valori a determinati elementi di un segnale, ha nell'ingresso denominato con "U", i valori in uscita dallo swicth. Tali valori vengono posizionati in base al valore dell'ingresso denominato "Idx1", che scorre con l'indice del for. Infine, l'ingresso "Y0" serve solo per inizializzare il vettore che si sta creando; nel nostro caso, per semplicità, è stato inizializzato a zero.

Le uscite dei due blocchi "Q from left cell" e "Q from right cell", che sono quindi due vettori di dimensione pari al numero di celle, si vanno a sommare al calore Q_i , calcolato applicando la formula (4.3), dove anche I_{batt} e ΔT sono dei vettori della stessa dimensione. Il blocco "Temperature" continua con il calcolo della temperatura delle singole celle così come descritto nel precedente modello.

Poiché, a questo livello di implementazione, si lavora con una batteria, e non con le singole celle, i dati passati al modello non sono più singoli valori, ma vettori aventi distribuzioni particolari. Volendo modellare la batteria con le 14 celle della Kokam, SPLB723870H, acquistate per il presente lavoro di tesi, vanno inseriti, nel modello, i dati di R_{self discharge} e di capacità riportati in tabella 3.1. Se non si fosse interessati alla simulazione del pacco batterie a disposizione, ma si volesse simulare il comportamento di un pacco generico, basterebbe passare al simulatore la capacità e la resistenza di auto scarica sotto forma di distribuzioni, la cui forma è stata ricavata dallo studio delle 14 celle a disposizione. Per il settaggio del SOC iniziale, invece, si usa una distribuzione uniforme nell'intervallo [a b], dove questi due valori variano in base allo stato di carica della batteria. Le celle possono essere inizialmente scariche (in questo caso a e b assumono il valore 0), possono essere tutte cariche allo stesso modo (allora a e b assumono il valore 100), oppure essere a diversi valori di carica (in questo caso a e b assumono due valori diversi e le celle avranno un SOC iniziale distribuito uniformemente).

Altri dati passati al sistema sono la capacità e la resistenza termica, inseriti come costanti, così come il valore della resistenza tra le varie celle, la quale nel modello, per il momento, assume un valore settabile esternamente.

Nell'ultima parte dello schema a blocchi sono stati inseriti due controlli per impedire che la tensione di ogni singola cella potesse eccedere il range di valori all'interno del quale si ha il comportamento corretto. Perciò, dal vettore in uscita delle tensioni, viene eseguito un check sul valore più piccolo e su quello più grande, controllando che questi non scendano sotto i 3V e non salgano sopra i 4.2V ed evitando così peggioramenti delle prestazioni del pacco o addirittura l'esplosione di qualche cella.

Di seguito è riportato lo schema a blocchi del modello di batteria, anche nella versione più "compatta" che ingloba tutti i blocchi in un unico subsystem, in cui vengono messi in evidenzia solo gli ingressi e le uscite del sistema.



Fig.5.4: Battery model.



Fig. 5.5: Schema più compatto del Battery model.

Viene riportato un esempio di una simulazione di un ipotetico profilo di utilizzo avente le seguenti caratteristiche: numero di celle componenti il pacco 14, distribuzione gaussiana per la $R_{selfdischarge}$ e per la capacità delle varie celle. Le celle sono inizialmente cariche con una distribuzione uniforme tra il 90% e il 100% di SOC, il pacco batteria non termostatato.

I grafici a cui siamo interessati sono quelli relativi alla tensione, alla temperatura e allo stato di carica delle singole celle e alla tensione del pacco batteria. Già da una prima analisi dei risultati ottenuti dalla simulazione di un determinato profilo di utilizzo, emerge un aumento dello squilibrio del pacco alla fine della simulazione stessa, visibile sia dal grafico della V_{cells} che da quello del SOC. Infatti il ΔV iniziale è pari a 82 mV, mentre quello finale risulta essere 126 mV. Uno studio più dettagliato del problema dello sbilanciamento di un pacco batterie e delle strategie di riequilibrio da utilizzare, verrà esposto e spiegato nel paragrafo successivo.



Fig. 5.6: Tensione sulle singole celle.



Fig. 5.7:Temperatura sulle singole celle.



Fig. 5.8: Tensione del pacco batteria.



Fig. 5.9: Stato di carica delle singole celle.

5.2 Analisi del problema dello sbilanciamento di una batteria

Il modello di batteria, sopra descritto ed implementato in ambiente Simulink, è in grado di modellare diversi tipi di batterie, per veicoli ibridi ed elettrici, e simulare differenti situazioni di utilizzo. L'accuratezza, e l'efficacia del modello di batteria sono requisiti fondamentali per il corretto funzionamento del BMS con il quale saranno equipaggiati veicoli ibridi ed elettrici. Quindi le corrette performance di un sistema di gestione della batteria, sono strettamente connesse al grado di fedeltà che presenta il modello proposto con le batterie reali.

Un modello accurato di un pacco batteria è di grande utilità nello studio del comportamento della batteria stessa, e nella progettazione di un sistema di gestione adeguato alle applicazioni in cui essa verrà utilizzata. Questo, in virtù del fatto, di poter simulare e analizzare gli effetti, visibili solo in tempi lunghi, con tempi relativamente brevi di simulazione.

Il modello proposto in figura 5.4 e 5.5 è stato modificato per permettere di realizzare una serie di cicli continui di carica e scarica a 1C in cui l'inversione del verso della corrente si ha nel momento in cui la prima cella raggiunge i 4.2V in carica e i 3V in scarica. E' stato simulato il comportamento di una batteria reale, composta da 14 celle della Kokam, prevedendo inizialmente che queste siano allo 0% di SOC. Dopo 1000 cicli, la tensione della batteria,

delle singole celle e lo stato di carica, sono riportati nei grafici 5.10, 5.11, 5.12.



Fig.5.10: Andamento della tensione di un pacco batterie da 14 celle dopo 1000 cicli di carica/scarica.



Fig. 5.11: Andamento del SOC delle celle di un pacco batterie dopo 1000 cicli di carica/scarica.



Fig. 5.12: Andamento della tensione sulle celle di un pacco batterie da 14 celle dopo 1000 cicli di carica/scarica.

Questi comportamenti sono facilmente intuibili, se si considerano le inevitabili differenze, in caratteristiche chimiche ed elettriche, esistenti tra le varie celle. Queste portano ad un progressivo deterioramento delle prestazioni del pacco e al suo definitivo inutilizzo dopo un certo numero di cicli di funzionamento, dovuto alla forte diminuzione della dinamica tensione della batteria. Si passa, infatti, da una $\Delta V = Vbatt_{max} - Vbatt_{min} = 17V$, nei primi cicli di utilizzo, ad un $\Delta V = 12.94V$.

E' da sottolineare, però, che il comportamento della batteria su 1000 cicli è poco indicativo, in quanto nel comportamento reale acquisterebbero un peso notevole anche gli effetti di invecchiamento delle celle. Questi effetti sono stati trascurati nella realizzazione del modello utilizzato. Per questo motivo, proseguendo nella trattazione di questo capitolo, si farà riferimento a simulazioni caratterizzate da 200 cicli di carica/scarica, nei quali si presume siano ancora trascurabili gli effetti dell'invecchiamento.

Analizziamo singolarmente quali sono le cause che determinano uno squilibrio della batteria e in che modo possono essere ridotti i loro effetti indesiderati.

5.3 Effetti sullo sbilanciamento della batteria dovuti alla variazione della capacità delle celle

Considerando soltamente l'effetto dovuto al mismatch delle capacità delle celle, si effettua una simulazione di 200 cicli di carica/scarica, in cui alle $R_{self \ discharge}$ delle celle si impone un valore unico per tutte, scegliendo nel range di valori in cui le celle non sono definite anomale, un esempio potrebbe essere il valore 21.07 M Ω , e lasciando per le capacità la distribuzione ottenuta dai dati sperimentali

Num. cella	Capacità (Ahr)
1	1.418199
2	1.371722
3	1.404292
4	1.372382
5	1.383596
6	1.393463
7	1.397998
8	1.413961
9	1.396881
10	1.408605
11	1.411707
12	1.387693
13	1.418329
14	1.389805

Tabella 5.1 : Valori di capacità.

In questo caso, non si osserva una diminuzione della dinamica del pacco e quindi uno sbilanciamento dello stesso, bensì il formarsi di una fascia di valori di tensione all'interno della quale le celle si caricano e si scaricano. Nel momento in cui inizia la scarica le celle non sono allo stesso valore di tensione, e quindi di SOC, ma tendono a ricongiungersi in un unico punto quando si raggiungono i 3V.



Fig. 5.13: Andamento tensione sulla batteria con celle aventi stessa R_{selfdischarge} e diversa capacità.



Fig. 5.14: Zoom di un ciclo di carica/scarica di una batteria composta da celle aventi stessa $R_{selfdischarge}$ e diversa capacità.

In questa condizione è la cella avente capacità minima che influisce sul comportamento di tutta la batteria, perché è quella che raggiunge prima i 4.2V e determina il cambio di segno della corrente nella simulazione, quindi la cella si carica maggiormente rispetto alle altre. Per evitare questo fenomeno dovremmo essere in grado di implementare un sistema che trasferisca una certa quantità di carica dalla cella a capacità minima alla cella a capacità massima. Si avrebbe, in questo modo, un comportamento della

batteria dettato da una cella avente una sorta di capacità media tra quella massima e minima. Di fatto, questo fenomeno, nelle celle utilizzate nel presente lavoro di tesi, non è particolarmente rilevante, in quanto la varianza delle capacità è particolarmente bassa (tabella 5.1).



Fig. 5.15: Andamento di un ciclo di carica e scarica di una cella avente come valore di capacità Cmed

5.3 Effetti sullo sbilanciamento della batteria dovuti all'autoscarica delle celle

L'effetto prodotto dall'autoscarica delle varie celle sulle prestazioni della batteria è, invece, più significativo. La riduzione del range di tensione, all'interno del quale opera la batteria, è un aspetto importante per il corretto funzionamento della stessa perchè a lungo andare rende la batteria non più utilizzabile. E la causa è da ricercarsi nei valori anomali delle resistenze di autoscarica. Simulando il funzionamento di una batteria avente, questa volta, celle tutte alla stessa capacità, ma valori diversi per $R_{self discharge}$ (5.2), si ottiene una dinamica della batteria alla fine dei 200 cicli di 16.146V, dai 17V iniziali.

Num. cella	$R_{self discharge}$ (Ω)
1	4.817E+005
2	1.565E+007
3	2.107E+007
4	3.459E+007
5	3.413E+007
6	2.107E+007
7	2.669E+007
8	3.658E+006
9	3.500E+007
10	3.511E+007
11	1.556E+006
12	2.004E+007
13	5.237E+007
14	5.378E+007

Tabella 5.2 : Valori di resistenza di autoscarica.



Fig. 5.16: Andamento della tensione sull batteria con valori diversi di $R_{selfdischarge}$.



Fig. 5.17: Zoom dell'andamento della tensione sulle celle della batteria con valori diversi di $R_{selfdischarge}$.

Nella batteria modellata ci sono 3 celle con valori di $R_{self \, discharge}$ anomali, ovvero inferiori anche di un ordine di grandezza rispetto alle altre. Queste celle, con l'aumentare del tempo si discostano dalle altre, raggiungendo prima i 3V e avendo come effetto quello di una traslazione in basso della tensione della batteria (fig.5.17).

5.5 Problema del riequilibrio

Dalle simulazioni effettuate risulta indispensabile la funzione di riequilibrio, di equalizzazione dello stato di carica delle celle da parte del Battery Management System. Questo per evitare i rischi dovuti a sovraccarica e sovrascarica delle singole celle della batteria, quali l'esplosione delle stesse, ma anche per migliorare le performance ed la vita media della batteria. Infatti il riequilibrio mira, anche, ad estendere la durata media della batteria. Un tipo di bilanciamento che può essere effettuato sul pacco batterie, e che è stato implementato nel presente lavoro di tesi, è un **bilanciamento passivo.**

E'uno dei metodi di comune utilizzo e facili da implementare tramite simulatori, come nel caso di Simulik. Dopo aver deciso quando effettuare il bilanciamento del pacco, nel paragrafo successivo verranno presentate due strategie utilizzabili per determinare quando la batteria ha bisogno di essere riequilibrata. Il procedimento consiste nell'individuare la prima cella che raggiunge i 3V, e quindi la prima che si scarica, ed imporre una corrente di sbilanciamento su tutte le celle di 200 mA. La simulazione prosegue in queste condizioni finché non si raggiungono nuovamente i 3V, a questo punto sulla cella che si è scaricata per prima sarà imposta una corrente nulla, mentre sulle altre celle la corrente rimarrà 200 mA. Questo procedimento continuerà fin quando tutte le celle non saranno arrivate ai 3V, e quindi la corrente su di esse, verrà annullata una per volta (fig. 5.18).

Questo tipo di riequilibrio non fa altro che allineare le celle allo 0% di SOC, e da quel momento in poi riprendono i normali cicli di carica e scarica.

Di fatto avere una corrente di 200 mA su una cella avente ai sui capi 3V, equivale ad attaccare la stessa ad un carico di 15Ω . Il bilanciamento passivo prevede proprio l'utilizzo di un'insieme di resistenze alle quali connettere la cella per riequilibrare il pacco.

Due fattori vanno presi in considerazione quando si implementano strategie di riequilibro, per prima cosa l'energia persa ogni qual volta nel sistema viene eseguito il bilanciamento, ma anche la scelta della *I*_{balancing}.

Nel progetto di un BMS è necessario tener conto del costo, in termini energetici, che hanno le diverse strategie possibili. Inoltre bisogna

raggiungere un buon compromesso tra elevate $I_{balancing}$ e tempo necessario per eseguire il riequilibrio. Elevate correnti comportano un riequilibrio in tempi rapidi, ma una notevole quantità di potenza dissipata, con il conseguente aumento della temperatura della batteria, valori più bassi di correnti di bilanciamento hanno però lo svantaggio di richiedere tempi maggiori [14-15].

Nel modello in Simulink sono stati aggiunti ulteriori blocchi utili a completare la funzione di monitoraggio della batteria, al fine di analizzare i dati ottenuti e poter scegliere adeguate strategie di bilanciamento. Come, per esempio, un sub system dedicato al calcolo dell' *energy waste* del sistema risolvendo la seguente equazione:

Energy waste
$$=\frac{E_{in}-E_{out}}{3600} = \frac{1}{3600} \int (P_{in}-P_{out}) dt$$
 (5.3)

Dove le potenze di ingresso e di uscita sono calcolate come il prodotto della V_{cells} con la I_{batt} . L'efficienza del sistema, inoltre, è calcolata come E_{out}/E_{Ecc} .



Fig. 5.18: Zoom sul procedimento di riequilibrio di una batteria.

5.6 Strategie di riequilibrio

Il procedimento di riequilibrio passivo, appena descritto, può essere attuato nel momento in cui la dinamica della tensione sulla batteria scende sotto una certa soglia stabilita. Il BMS deve, quindi, monitorare la tensione massima e minima della batteria, rispettivamente dopo ogni ciclo di carica e scarica. Questo metodo di bilanciamento è sicuramente uno dei più intuitivi. Con questo criterio di scelta sono state simulate numerose situazioni in cui era necessario effettuare un bilanciamento del sistema, modellando le singole celle in modo che la batteria avesse diverse caratteristiche.

Esempi significativi sono stati ottenuti generando una batteria da 14 celle aventi lo stesso valore di capacità, 1.398 Ah, e di $R_{self \, discharge}$, 21.07 MΩ, ma inserendo nel pacco, una alla volta, celle con valori di autoscarica anomali, inferiori rispetto ai valori plausibili anche diversi ordini di grandezza (210.7 kΩ). Supponendo di voler mantenere la dinamica della batteria, $V_{batt_max} - V_{batt_min}$, (dove V_{batt_max} è prelevata in carica, e V_{batt_min} in scarica) superiore ai 16V, è stato osservato dopo quanti cicli veniva eseguito il bilanciamento nei diversi casi. Nel grafico seguente si può osservare come all'aumentare del numero di celle con autoscarica anomala, aumenta anche il tempo dopo il quale è necessario eseguire un riequilibrio del pacco. Questo sembrerebbe voler dire che avere una batteria costituita da più celle anomale è una caratteristica positiva per il suo funzionamento.



Fig. 5.19: Numero di cicli e tempo a cui avviene il bilanciamento al variare del numero di celle anomale nella batteria. Riequilibrio basato sulla tensione.

In realtà una situazione del genere non è affatto gradita. Nel modello di sistema implementato in Simulink, comprendente la batteria e diversi blocchi di controllo per effettuare il riequilibrio e per monitorare altre caratteristiche del pacco, è possibile anche calcolare quanta carica la batteria è in grado di erogare durante l'ultima scarica prima che venga effettuato il riequilibrio.

All'aumentare delle celle con $R_{self \, discharge}$ atipiche, diminuisce la carica che la batteria è in grado di erogare, quindi risulta evidente la perdita, in termini di Ah, che una situazione del genere comporta.



Fig. 5.20: Andamento della carica erogabile dalla batteria all'aumentare del numero di celle anomale nella batteria.

E'interessare osservare e fare un confronto tra la dinamica della batteria nel caso in cui è inserita una sola cella anomala e quella con 13 celle anomale.

Nel primo caso lo sbilanciamento si verifica in quanto l'unica cella con $R_{self \, discharge}$ pari a 210.70 k Ω si scarica prima delle altre, determinando così il cambio del verso della corrente, e lasciando le altre celle ad un livello di SOC maggiore. Diversamente, in un pacco avente la maggior parte di celle con un valore per $R_{self \, discharge}$ non corretto, la dinamica peggiora anche "in alto", vuol dire che solo la cella non anomala si carica completamente e raggiunge i 4.2V, le altre rimarranno ad un valore di SOC minore. A causa della diversa pendenza dell'andamento dell'OCV in funzione del SOC, l'effetto sullo sbilanciamento della batteria nel caso con 13 $R_{self \, discharge}$ anomale risulterà meno grave rispetto al primo caso.

Poiché i risultati che si ottengono dalla scelta di un riequilibrio basato sulla tensione, che porta a privilegiare una batteria con un numero elevato di celle anomale, sono fuorvianti, sorge la necessità di un ulteriore sistema per stabilire quando far partire il procedimento di riequilibrio. Un criterio migliore da prendere in considerazione è quello di riequilibrare il pacco in base alla carica che esso è in grado di fornire. Si può decidere, per esempio, di eseguire un riequilibrio quando la carica erogata dalla batteria risulta essere inferiore a 18.25 Ahr. In questo caso il check eseguito dal BMS sarà relativo alla carica erogata durante la scarica delle celle. Questa volta si osserva un numero di riequilibri praticamente sempre uguale (fig. 5.22), nonostante l'aumentare delle $R_{self discharge}$ atipiche all'interno del pacco, ed una dinamica ΔV , invece, che peggiora.



Fig. 5.21: Tensione sulla batteria con 13 celle anomale.



Fig. 5.22: Numero di cicli e tempo a cui avviene il bilanciamento al variare del

numero di celle anomale nella batteria. Riequilibrio basato sulla carica.

Quindi possiamo concludere affermando che il metodo del riequilibrio basato sulla carica erogata è un metodo più aderente a quanto accade nella realtà e che si basa sul monitoraggio di uno dei fattori più importanti caratteristici di un pacco batteria per applicazioni in veicoli ibridi ed elettrici. La tecnica basata sulla carica erogata comporta, però, una maggiore spesa in termini di hardware, avremmo bisogno sul BMS di un sistemi che conti la carica, cosa non proprio così banale, soprattutto durante un utilizzo caratterizzato da alte correnti e tenendo conto del fatto che il BMS deve avere un basso consumo.

Resta però da sottolineare come sia meglio identificare, già prima del montaggio del pacco, le celle che presentano delle anomalie, in maniera tale da ridurre al minimo l'operazione di riequilibrio.

Conclusioni

In questo lavoro di tesi, attraverso il miglioramento del set-up di misura per l'estrazione dei parametri del modello adottato, tenendo conto degli effetti che le variazioni di temperatura hanno sul comportamento della cella, è stato possibile realizzare un modello in grado di essere un valido strumento di supporto alla progettazione di un Battery Management System.

Per questo motivo è stata effettuata una caratterizzazione completa di una cella Li-poly Kokam SPLB723870H, che ha previsto lo studio della singola cella in carica e scarica, per diversi valori di corrente, alle temperature di 10°C, 25°C e 35°C. Il banco di test sviluppato per questo scopo ha previsto la realizzazione di un doppio termostato per la cella, e lo studio, con la conseguente implementazione, di un sistema di controllo di tutto il sistema di tipo fuzzy per la stabilizzazione della temperatura. In questo modo è stata verificata l'effettiva dipendenza della cella dalla temperatura.

Successivamente è stato anche studiato un modello termico della cella per determinare in che modo avvenga lo scambio di calore con l'ambiente esterno. Il modello sviluppato è stato utilizzato come base per la realizzazione di un modello di batteria, composta da 14 celle, ed ha permesso di effettuare diverse simulazioni, durante il suo uso tipico.

Inoltre, proprio dai risultati delle simulazioni, è stato possibile studiare gli effetti che le variazioni delle due caratteristiche proprie di un accumulatore litio polimero, ovvero la $R_{self \, discharge}$ e la capacità, hanno sullo sbilanciamento del pacco. L'attenzione è stata posta, soprattutto, sui valori anomali di $R_{self \, discharge}$, all'interno della batteria, che hanno come effetto quello di diminuire la dinamica della batteria stessa compromettendone il funzionamento.

Infine, sono state studiate alcune strategie per il riequilibrio passivo, mettendo in luce come l'utilizzo di tecniche basate sulla misura di tensione, anche se di semplice implementazione, portino a risultati errati riguardanti il livello di sbilanciamento della batteria, rispetto a tecniche che si basano, per esempio, sul monitoraggio della carica.

Bibliografia

- [1] A. Affanni, A. Bellini, G. Franceschini, P. Guglielmi, C. Tassoni, "Battery choice and Management for New-Generation Electric Vehicles", *IEEE Transactions on Industrial Tlectronics*, vol.52, No.5, pp.1343-1349, October 2005.
- [2] D. Linden, T.B. Reddy, *Handbook of batteries (3rd Edition),* McGraw-Hill, 2002
- [3] Li Siguang, Z. Chengning, "Study on Battery Management System and Lithium-ion Battery", *Computer and Automation Engineering, 2009 ICCAE '09. International conference on.* pp.218-222, 8-10 March 2009
- [4] S. Campanari, G. Manzolini, F.Garcia de la Iglesia, "Energy analysis of electric vehicles using batteries or fuel cell through well-to-wheel driving cycle simulations", *J. Power Sources*, vol.186, pp. 464-477, 2009.
- [5] Elaborato di tesi di Emanuele Leonardi, "Studio e caratterizzazione di celle litio polimero per applicazioni su veicoli ibridi ed elettrici", Università di Pisa, Febbraio 2010.
- [6] "PID and Fuzzy Logic Toolkit User Manual", *National Instruments,* June, 2009.
- [7] M. Dotoli, "Controllo Fuzzy di un Pendolo Inverso", *Dipartimento di Elettrotecnica ed elettronica, Politecnico di Bari.*
- [8] M.Chen, G. A. Rincon-Mora, "Accurate Electrical Battery Model *energy* Capable of Predicting Runtime and I-V performance", *IEEE Trans. on Energy Conversion,* vol. 21, No. 2, pp.504-511,Jun.2006.
- [9] S. Abu-Sharkh, D.Doerffel, "Rapid test and non.linear model Characterization of solid-state lithium-ion batteries", *J. Power Source*, Vol.130, pp.266-274, May 2004.

- [10] S. Al Hallaj, H. Maleki, J.S. Hong, J.R. Selman, "Thermal modeling and Design considerations of lithium-ion batteries", *J. Power Sources*, vol. 83, pp.1-8, October 1999.
- [11] M.S. Wu, Y.Y. Wang, C.C. Wan, "Thermal behavior of nickel/metal Hybride batteries during charge and discharge", *J. Power Sources,* Vol. 47, pp.202-210, 1998.
- [12] C. Forgez, D.V. Do, G. Friedrich, M. Morcrette, C. Delacourt, " ThermalModeling of a cylindrical *LiFePO*₄/graphite lithium-ion battety", *J.Power Sources*, vol.195, pp.2961-2968, May 2010.
- [13] A. Capel, "Mathematical model for the representation of the electrical behavior of a lithium cell", *Space Power, Proceedings of the Sixth European Conference,* Portugal, May 2002.
- [14] "Designing Multi-Cell Li-ion Battery Packs Using the ISL9208 Analog Front End, *Application note, Intersil,* July 17, 2007.
- [15] C.F. Chiasserini, R.R. Rao, "Energy Efficient Battery Management", *IEEE Journal on selected areas in communications,* vol. 19, No. 7, 2001

Siti internet:

www.kokam.com

www.wikipedia.org

www.intersil.com

www.autoelettrica.it

Ringraziamenti

Al termine di questo lavoro desidero ringraziare ed esprimere la mia riconoscenza nei confronti di tutte le persone che, in modi diversi, mi sono state vicine e hanno permesso e incoraggiato sia i miei studi che la realizzazione e stesura di questa tesi.

Il Prof. Roberto Saletti, per avermi accolto nel Suo laboratorio come tesista, mostrando sempre grande disponibilità e cordialità nell'aiutarmi durante questo percorso ogni volta che ne avevo bisogno.

Il Prof. Roncella per avermi fornito con chiarezza e competenza importanti suggerimenti per la composizione del lavoro di tesi.

Inoltre un ringraziamento va all'ing. Federico Baronti, per avermi offerto importantissimi spunti, soprattutto nella fase conclusiva del mio lavoro.

Desidero ringraziare in modo particolare il dott. Emanuele Leonardi per avermi guidato durante tutto lo svolgimento del lavoro in laboratorio attraverso i suoi preziosi consigli, è stato indispensabile per la realizzazione di questa tesi. Lo ringrazio, inoltre, per essermi stato sempre vicino e per avermi supportato in ogni momento.

Infine, vorrei ringraziare Gabriele Fantechi ed Andrea Lazzeri che con la loro presenza in laboratorio e la loro simpatia hanno condiviso con me questo periodo così impegnativo.