



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



Dipartimento di Ingegneria Industriale
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dell'Energia Elettrica

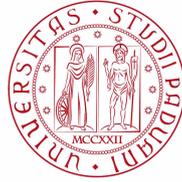
TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA DELL'ENERGIA ELETTRICA

**Modello Simulink di un Sistema di
Accumulo al Litio: influenza dei materiali attivi
sulle prestazioni e analisi della risposta del sistema a
rapidi transitori della tensione di rete**

RELATORE: Prof. Roberto Turri

LAUREANDO: Alekos Signorato

ANNO ACCADEMICO 2015-2016



Università degli Studi di Padova

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dell'Energia Elettrica

TESI DI LAUREA

**Modello Simulink di un Sistema di Accumulo al Litio: influenza
dei materiali attivi sulle prestazioni e analisi della risposta del
sistema a rapidi transitori della tensione di rete**

Candidato:
Alekos Signorato
Matricola 1081895

Relatore:
Ch.mo Roberto Turri

Anno Accademico 2015-2016



Ai miei genitori

Sommario

L'evoluzione tecnica degli accumulatori elettrochimici in atto negli ultimi decenni ha notevolmente incrementato l'importanza e l'impatto di questa tecnologia nel panorama energetico internazionale. La grande versatilità e la compattezza sono gli elementi chiave che hanno permesso la diffusione di questi dispositivi in numerosi segmenti di mercato, che spaziano dalle applicazioni elettroniche portatili, alla mobilità veicolare fino allo svolgimento di servizi all'interno della rete elettrica nazionale. Tuttavia, la particolare complessità dei fenomeni interni, unita all'esigenza di avere una chiara evidenza del suo comportamento, ha portato allo sviluppo di una notevole varietà di modelli equivalenti. In questo testo è stato realizzato un modello elettrico equivalente ibrido del secondo ordine in ambiente Simulink®, dotato di un BMS semplificato, in grado di simulare il comportamento di tre importanti configurazioni chimiche relative alla famiglia Litio, ovvero: NMC, LFP e LiPo.

Attraverso una serie di test implementati nel modello, che spaziano da semplici cicli di caratterizzazione a simulazioni di reali richieste di potenza relativi alla mobilità veicolare e a servizi ancillari di rete, le tre composizioni chimiche sono state confrontate in modo da evidenziarne le peculiarità e le differenze, giustificando quindi le relative propensioni di utilizzo.

Infine il modello, a cui è stato aggiunto un inverter di interfaccia, è stato sottoposto a test di LVRT e OVRT, in accordo con le normative vigenti CEI 0-16 e CEI 0-21. L'analisi svolta, seppur sotto numerose ipotesi semplificative, ha evidenziato come l'andamento della tensione di batteria sia particolarmente insensibile ai fenomeni transitori di rete.

I risultati ottenuti sostengono come la configurazione chimica dei materiali attivi interni risulti essere un elemento chiave della fase di progettazione, in quanto in grado di indirizzare le prestazioni delle batterie secondo le esigenze di utilizzo. Viceversa, nel contesto relativo alla verifica dell'insensibilità dei sistemi di accumulo ai rapidi transitori della tensione di rete, i risultati conseguiti, di natura preliminare, rimandano alla possibilità di semplificare la modellizzazione della batteria mediante un semplice generatore di tensione.

Abstract

The technical development of electrochemical batteries which has taken place in the last decades has greatly increased the importance and the impact of this technology in the international energy scene. Versatility and compactness are the key elements that enabled the spread of these devices in many market segments, ranging from portable electronic applications, to electric vehicles and provision of services to the transmission and distribution electric grid. The particularly high complexity of internal phenomena, together with the need to have a clear understanding of their dynamics, has led to the development and proposal of a considerable variety of equivalent models available in the literature.

As a further contribution, in this thesis work, a second order hybrid electric equivalent model in Simulink® environment has been developed, equipped with a simplified BMS able to simulate the behavior of three major chemical configurations relative to the Lithium family, namely: NMC, LFP and LiPo.

Through a series of tests implemented in the model, ranging from simple characterization cycles to simulation of real power requests related to vehicle mobility and network ancillary services, the three chemical compositions were compared in order to highlight the peculiarities and the differences, thus justifying their propensities of use.

Finally, the model, completed with an interface inverter, has been tested for LVRT and OVRT capability, in accordance with CEI 0-16 and CEI 0-21 grid connection standards. The analysis carried out, albeit under a number of simplifying assumptions, demonstrated that the battery voltage dynamics is almost insensitive to network transients.

The results obtained support the fact that the chemical configuration of the active internal materials is a key element in the design phase, since it highly affects the performance of batteries according to usage needs. Conversely, as regards the assessment of energy storage system susceptibility to rapid voltage transients, these preliminary results indicate the possibility to simplify the modelling of the battery through a simple voltage generator.

Indice

1	Introduzione	1
1.1	Aspetti generali	1
1.2	Classificazione e servizi dei sistemi di accumulo	2
1.2.1	Servizi di Potenza	3
1.2.2	Servizi di Energia	4
1.3	Panoramica delle tecnologie di accumulo	4
2	L'accumulo elettrochimico	9
2.1	Configurazioni e definizioni caratterizzanti	9
2.2	Principio di funzionamento	12
2.3	Confronto tra tecnologie	13
2.3.1	Batterie Pb-A	13
2.3.2	Batterie NaS	14
2.3.3	Batterie Zebra NaNiCl_2	15
2.3.4	Batterie a flusso VRB	15
2.3.5	Batterie NiCd e NiMH	16
2.3.6	Batterie Zinco/aria	16
2.3.7	Batterie Li	17
2.4	Installazioni nel mondo	17
3	Stato dell'arte dell'accumulo elettrochimico al Litio	19
3.1	Struttura base e principio di funzionamento	20
3.2	Litio-ione	22
3.2.1	Elettrodo negativo	23
3.2.2	Elettrolita liquido	23
3.2.3	Separatore	23
3.2.4	Elettrodo positivo	24
3.3	Litio-ione polimero	24
3.4	Litio metallico	24
3.5	Liquidi ionici	25
3.6	Ricerca e sviluppo	25
3.6.1	Miglioramenti in termini di energia specifica	25
3.6.2	Miglioramenti in termini di potenza	26
3.6.3	Miglioramenti in termini di sicurezza ed affidabilità	26
4	Battery Management System	27
4.1	Aspetti generali	27
4.2	Architettura e layer di funzionamento	28
4.3	Bilanciamento celle	29
4.4	Gestione dei processi di carica-scarica	31
4.5	Stimatori	31
4.5.1	State Of Charge	31
4.5.2	State Of Health	32
4.5.3	State Of Life	32

4.6	Criticità e sviluppi futuri	33
5	Modellistica	35
5.1	Modelli elettrochimici	36
5.1.1	Single-Particle Model (SPM)	37
5.1.2	Ohmic porous-electrode model	37
5.1.3	Pseudo-Two-Dimensional Model (P2D)	37
5.2	Modelli analitici	37
5.2.1	Peukert's law	38
5.2.2	Rakhmatov and Vrudhula	38
5.2.3	Kinetic Battery Model (KBM)	39
5.3	Modelli stocastici	40
5.3.1	Modello stocastico base	40
5.3.2	Modello stocastico esteso	40
5.3.3	Modello stocastico su base KBM	41
5.4	Modelli circuitali	42
5.4.1	Modello R_{INT}	42
5.4.2	Modello dinamico	42
5.4.3	Modello RC	43
5.4.4	Modello Thevenin	44
5.4.5	Modello PNGV generalizzato	44
5.4.6	Modello DP (Double Polarization)	45
5.4.7	Modello ibrido	45
6	Modello sviluppato	47
6.1	Premessa	47
6.2	Modello elettrico equivalente	48
6.3	Modello termico	52
6.4	Stimatore SOC	53
6.5	BMS	55
6.5.1	Funzionalità non implementate	56
6.5.2	Funzionalità implementate	56
6.6	Cicli di simulazione	58
6.7	Visualizzazione I/O	60
6.8	Verifica del modello	62
7	Comparazione delle famiglie Litio implementate	63
7.1	Prove caratteristiche	64
7.2	Analisi dei diversi comportamenti in campo veicolare	66
7.2.1	Senza BMS	67
7.2.2	Con BMS	67
7.2.3	Considerazioni	68
7.3	Analisi dei diversi comportamenti per applicazioni di rete	69
7.4	Time Shift	69
7.4.1	Senza BMS	70
7.4.2	Con BMS	70
7.5	Power balancing	71
7.5.1	Senza BMS	72
7.5.2	Con BMS	72
7.5.3	Considerazioni	73
7.6	Considerazioni finali	74

8	Analisi della risposta del sistema a rapidi transitori della tensione di rete	77
8.1	Premesse	77
8.2	Normative vigenti	77
8.2.1	CEI 0-21	78
8.2.2	CEI 0-16	80
8.3	Analisi del comportamento del sistema in LVRT	85
8.3.1	Analisi risultati conseguiti	88
8.3.1.1	Prova LVRT	88
8.3.1.2	Prova OVRT	91
8.3.2	Proposta di modellizzazione equivalente	94
8.3.3	Considerazioni finali	95
9	Conclusioni	97
	Bibliografia	109
	Appendici	111
.1	Main script	111
.2	Script secondari	134
.3	Modellobatteria	142
.4	prova_inverter	148

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Aspetti generali

L'esponenziale sviluppo tecnologico in atto da qualche decennio a questa parte in ambito elettronico e delle telecomunicazioni sta avendo un notevole effetto sul sistema elettrico, tant'è che il vecchio paradigma di rete elettrica monodirezionale e centralizzata già ad oggi sembra totalmente superato.

Benchè, da un punto di vista pratico, la rete elettrica non presenti sostanziali differenze, dal punto di vista teorico e sperimentale in tutto il mondo è in atto una corsa al fine di trovare il miglior bilanciamento tra le nuove tecnologie, in quanto la nuova rete che verrà si baserà su un layer fisico molto simile a quello attuale dotato, però, di "intelligenza" propria.

Infatti la differenza sostanziale riguarderà la capacità di gestire al meglio le dinamiche di generazione e consumo dell'energia elettrica al fine di garantire una maggiore qualità e affidabilità del servizio.

A tale scopo l'introduzione di un sistema di accumulo "intelligente" consente di ottenere numerosi vantaggi sia lato utente sia lato distributore. Un primo pratico ed attuale esempio riguarda la gestione della produzione intermittente tipica delle fonti rinnovabili. In particolare è possibile, innanzitutto, gestire in MPPT l'impianto, consentendo inoltre una distribuzione dell'energia che asseconi le necessità dell'utente (senza dimenticare i possibili riscontri economici dati dal Conto Energia), ma anche ridurre drasticamente l'intermittenza (e tutti i relativi effetti) vista dalla rete, ottenendo quindi un profilo di generazione più regolare e maggiormente gestibile. A tutto questo si aggiunge la possibilità di funzionamenti in isola per gli utenti stessi o per sezioni di rete particolarmente deboli (vedasi, ad esempio, alcune sezioni di rete del Sud Italia in cui è presente una massiccia penetrazione di impianti fotovoltaici ed eolici).

La forte penetrazione di nuove tecnologie "intelligenti" è sostanzialmente dovuta alla presenza di convertitori elettronici di potenza in grado di adeguare le diverse grandezze elettriche dei sistemi interfacciati rispettando le relative esigenze di funzionamento. Tuttavia, i disturbi introdotti, in aggiunta a quelli normalmente presenti ed intrinseci al funzionamento del sistema, risultano essere particolarmente gravi per un sistema a cui è richiesto un incremento di versatilità seguito da una maggiore qualità del servizio.

A seguito di tutto ciò sta nascendo, in parallelo al tradizionale mercato dell'energia elettrica, il Mercato per il Servizio di Dispacciamento (MSD), in cui il gestore di rete "chiede" agli utenti attivi un aiuto nella gestione (migliorando la qualità del servizio) in cambio di un corrispettivo in denaro. I sistemi di accumulo (SdA), grazie alla loro elasticità di gestione e funzionamento, risultano particolarmente adatti a svolgere questo particolare servizio garantendo, nel contempo, una qualità pari, se non superiore, a quella attuale.

In questa introduzione si è sempre sottointeso che i sistemi di accumulo rappresentino una risorsa di natura stazionaria, ovvero che non siano in grado di spostare il proprio punto di azione all'interno della rete elettrica. Questa ipotesi è veritiera fintantochè non si presta attenzione ai possibili risvolti di una massiccia diffusione del trasporto veicolare di natura elettrica. Seguendo questa prospettiva, ben espressa dalla visione d'insieme Vehicle To Grid (V2G), risultano evidenti sia le potenzialità sia le complessità relative alla gestione di un numero elevato di sistemi di accumulo (di natura puramente elettrochimica) in grado di prestare servizio in modalità, tempistiche e locazioni differenti nell'arco dell'intera giornata.

Quanto detto fino ad ora può essere brevemente riassunto evidenziando i vantaggi portati dall' avere una gestione efficiente e razionale dei flussi di potenza:

- Migliore gestione della produzione e dei carichi;
- Migliore PQ;
- Maggiore affidabilità;
- Riduzione dei consumi energetici;
- Maggiore flessibilità di rete riducendo inoltre gli interventi per il potenziamento;
- Migliore gestione della generazione distribuita non programmabile.

Tra tutte le tecnologie in fase di studio, i sistemi di accumulo elettrochimico svolgono indubbiamente un ruolo primario per il raggiungimento dei requisiti di sistema precedentemente discussi, come confermato dalla figura 1.1¹, che sottolinea l'importante crescita del settore.

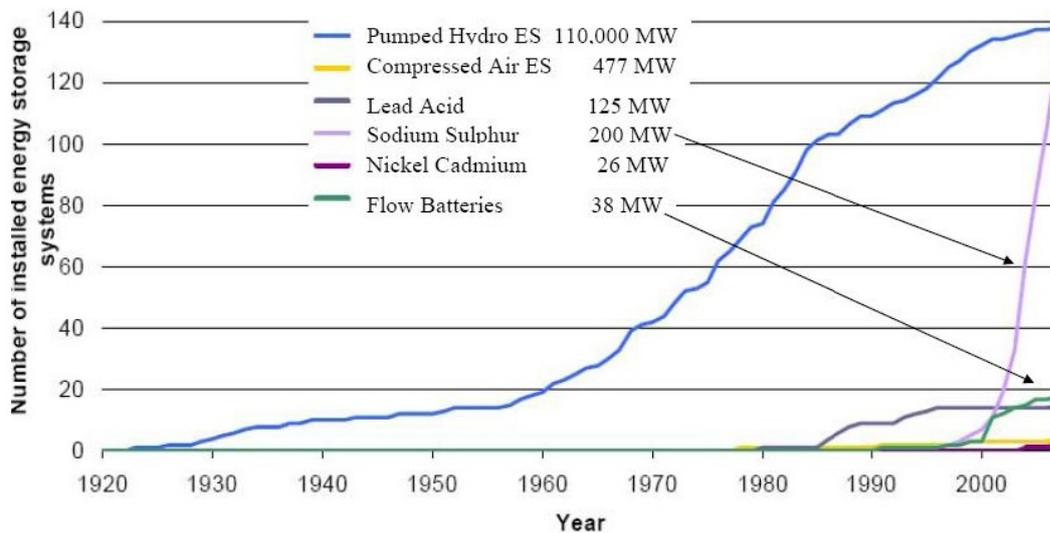


Figura 1.1: Andamento del numero di impianti di storage

Questa rapida ascesa dell'accumulo elettrochimico porta con se una serie di questioni tecniche e normative che, per certi versi, ricalcano i problemi riscontrati durante il boom della generazione elettrica rinnovabile. Affinchè questa tecnologia permetta una migliore qualità ed affidabilità del servizio elettrico, è indispensabile avere una buona conoscenza relativa al comportamento sia del singolo dispositivo sia del sistema nel quale esso è compreso (solitamente è presente almeno un inverter di interfaccia con la rete), in modo da redarre una regolamentazione che chiarifichi le modalità di funzionamento e, nel contempo, permetta di massimizzare le peculiarità della tecnologia sia in favore degli utenti, sia in favore delle figure responsabili dell'espletamento dei servizi di rete.

Fino ad ora è stata trattata una visione generalista dei sistemi di accumulo e del loro impatto nella rete elettrica, tuttavia ora risulta indispensabile fornire degli elementi che aiutino a classificarne le prestazioni, per poi identificare la tecnologia adatta fra le numerose famiglie presenti ad oggi, in modo da fornire lo schema logico, seppur semplificato, di quanto accade in un processo di progettazione.

1.2 Classificazione e servizi dei sistemi di accumulo

Le principali caratteristiche di un sistema di accumulo si dividono tra le capacità operative e le proprietà proprie di accumulo, che sono: densità di energia e potenza, autoscarica, tempi di carica/scarica e relativa efficienza, costo e sicurezza di utilizzo, vita utile [1].

¹Dati fino al 2007, fonte Fraunhofer Institute

L'insieme di tali caratteristiche risulta determinante nel definire il settore di applicazione di ogni tecnologia di accumulo, tuttavia una prima superficiale suddivisione può essere fatta semplicemente prendendo in considerazione la taglia del sistema.

Tabella 1.1: Classificazione in base alla taglia

Settore	Taglia	Applicazione
Domestico	0.5-10 kW	Ottimizzazione dell'auto-produzione, alimentazione anche in caso di distacco da rete.
Commercio e piccola industria	5-500 kW	Integrazione dell'auto-produzione, peak-shaving, possibile semplice commercio dell'energia.
Commercio e industria	0.5-5 MW	Pianificazione delle tariffe, UPS, co-generazione o autoproduzione in loco.
Utility	0.5-5 MW	Differimenti dell'ampliamento degli asset di distribuzione.
Grande taglia	5-50 MW	Commercio dell'energia, commercio dei servizi ausiliari.

Nella tabella 1.1 viene evidenziata la molteplicità di servizi che un sistema di accumulo può fornire ai diversi livelli di potenza, confermando quando sostenuto in precedenza.

Tuttavia risulta estremamente utile ricavare una classificazione a partire dai servizi di rete richiesti, in modo tale da seguire una logica progettuale atta ad identificare il sistema di accumulo idoneo alla specifica applicazione. Le due grandi famiglie così ottenute riguardano i "Servizi di Potenza" ed i "Servizi di Energia", i quali, a loro volta, si suddividono in quattro sotto-sezioni: Security, Power Quality, Mercato ed Accesso.

1.2.1 Servizi di Potenza

Ciò che viene richiesto in questo servizio è una elevata e rapida risposta (da frazioni di secondo a qualche decina di secondi) del sistema di accumulo alle richieste di rete, scambiando quindi elevate potenze ma relativamente basse quantità di energia.

Di seguito vengono analizzati brevemente i diversi servizi fruibili:

- **Security:**

1. *Peak Shaving*: erogando potenza durante i picchi di richiesta da parte dei carichi è possibile mantenere una maggiore regolarità di produzione da parte delle centrali tradizionali;
2. *UPS*: in caso di interruzioni dell'alimentazione consente di alimentare i carichi sensibili;
3. *Isola*: nei funzionamenti in isola di "porzioni" di rete, un'adeguata gestione dell'accumulo consente di ottenere l'equilibrio tra produzione e carichi garantendo la stabilità in termini di frequenza;
4. *Rampa*: va a sopperire all'incapacità delle centrali termoelettriche di far fronte a ripide variazioni di carico;
5. *Black start*: consentono di avviare i servizi ausiliari delle centrali di produzione in caso di assenza di rete.

- **Power Quality:**

1. Mediante UPS o sistemi booster è possibile ridurre le interruzioni di breve durata a seguito di energizzazioni o guasti;
2. Regolazione della frequenza in sistemi isolati tipicamente dotati di ridotta energia regolante;
3. Possibilità di contrastare le distorsioni introdotte dai convertitori elettronici mediante il filtraggio attivo;

4. Sostentamento della tensione durante avviamenti di carichi in punti particolarmente deboli della rete;
 5. Riduzione del flicker.
- **Mercato** (con particolare attenzione all'emergente mercato dei servizi ancillari):
 1. Possibilità di erogazione di una riserva di energia in caso di necessità (con prestazioni migliori dell'attuale "riserva rotante");
 2. Erogando potenza è possibile evitare il distacco programmato di carico sostituendo momentaneamente la sorgente di energia;
 - **Accesso**: attraverso la fornitura in loco da parte dei sistemi di accumulo si ottiene anche uno sfruttamento inferiore delle linee, consentendo quindi la connessione di ulteriori utenti o, viceversa, di non richiedere il rinforzo della rete.

1.2.2 Servizi di Energia

In questo caso ai sistemi di accumulo è richiesta una spiccata capacità nel fornire potenza per lunghi periodi (molte ore), quindi è indispensabile avere una elevata capacità di immagazzinamento a scapito di tempi di risposta relativamente lunghi.

Anche in questo caso si vuole proporre un veloce visione dei servizi erogabili:

- **Security**:
 1. Capacità di livellamento del carico in ampi intervalli temporali caricandosi nei momenti di sovrapproduzione e scaricandosi durante le ore di punta;
 2. Sostentamento del minimo tecnico quando il carico notturno scende sotto questo limite (valley filling);
- **Power Quality**: consente di sopperire a lunghe interruzioni di alimentazione;
- **Mercato**: la flessibilità introdotta dai sistemi di accumulo permette di ottenere dei vantaggi sia per la domanda sia per l'offerta (time shift);
- **Accesso**: in linee particolarmente deboli o momentaneamente sovraccaricate l'intervento energetico dell'accumulo consente di evitare i costi per il rinforzo delle linee.

1.3 Panoramica delle tecnologie di accumulo

I sistemi di accumulo sono un insieme di componenti che, cooperando tra loro in modo razionale, consentono di immagazzinare e rilasciare, quando richiesto, energia di natura elettrica.

Questa semplice definizione evidenzia come possano esistere numerose famiglie di accumulo in base alle modalità chimico-fisiche di stoccaggio dell'energia. Infatti, benchè tale tecnologia sia scesa alla ribalta solo ultimamente, le prime applicazioni in rete sono particolarmente datate in quanto basate sullo stoccaggio di energia potenziale o meccanica. Oggi sono presenti tecnologie di immagazzinamento di energia sotto forma elettrochimica, elettrostatica ed elettromagnetica, le quali hanno reso più facile l'installazione e la diffusione (anche presso i piccoli utenti) dei sistemi di accumulo mediante una riduzione degli ingombri e del relativo impatto ambientale-visivo.

Di seguito si riportano le principali tecnologie di accumulo in uso [2]:

- **PHES** (Pumped Hydro Energy Storage): si basa sullo spostamento di una massa d'acqua tra un serbatoio a monte ed uno a valle, immagazzinando energia nei momenti di sovrapproduzione (fase di pompaggio) ed erogandola nei momenti di necessità (fase di turbinaggio);
- **CAES** (Compressed Air Energy Storage): si basa su un ciclo termodinamico in cui l'aria viene compressa e stoccata in un serbatoio (naturale o artificiale), per poi produrre energia elettrica mediante la decompressione;

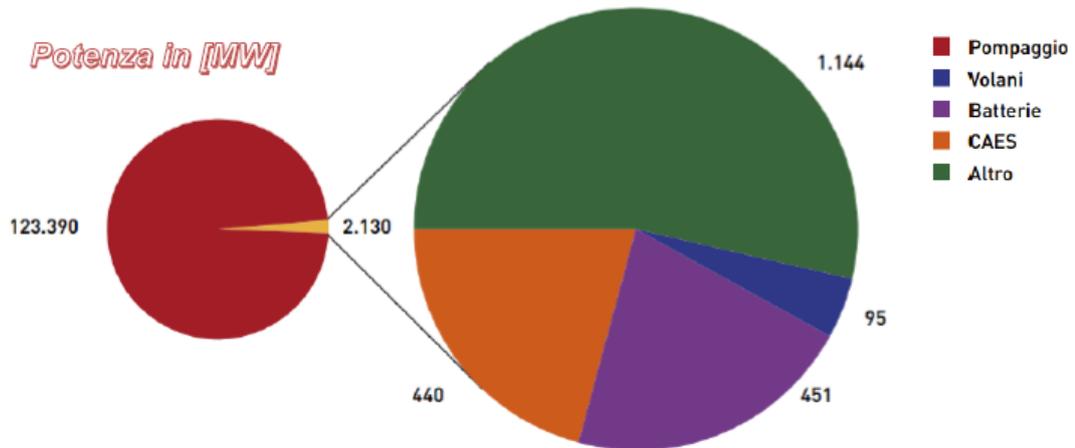


Figura 1.2: Capacità di accumulo installata nel mondo

- **Batterie convenzionali:**

- *Piombo*: rappresentano la tecnologia elettrochimica più diffusa (90% del volume totale) in quanto è la prima ad essere stata sviluppata. Ora si utilizzano le “Piombo avanzato” che presentano un incremento prestazionale e di sicurezza;
- *Nichel/Cadmio*: presentano un incremento prestazionale rispetto la famiglia al Piombo, tuttavia non sono particolarmente diffuse.

- **Batterie ad alta temperatura** (ai sali): particolarmente diffuse in Giappone e USA per applicazioni di rete. Le NaS e le NaNiCl₂ (quest’ultima prodotta da FIAMM) necessitano di una temperatura di lavoro pari a 300 °C. Presentano ampie possibilità di sviluppo;
- **Flow redox battery**: la famiglia più importante è la VRB (Vanadium Redox Battery). Si basano sul trasferimento di ioni di idrogeno (come le FC) tra due elettroliti. Possono essere dimensionate sia in termini di potenza sia in termini di energia, tuttavia sono particolarmente ingombranti;
- **Batterie al litio**: si suddividono in svariate famiglie in base alla natura dell’elettrolita e degli elettrodi. Presentano spiccate caratteristiche di funzionamento a scapito di un costo leggermente superiore alle altre tecnologie elettrochimiche;
- **Idrogeno**: durante la fase di immagazzinamento di energia viene prodotto idrogeno attraverso l’elettrolisi dell’acqua. L’idrogeno viene successivamente stoccato sotto forma di gas compresso, liquido o attraverso adsorbimento in solidi;
- **Capacitori**: questa tecnologia sta decisamente virando verso i supercondensatori (o supercapacitori), i quali mediante particolari tecniche di produzione permettono di ottenere configurazioni chimico-fisiche che garantiscono elevate capacità di accumulo elettrostatico;
- **Flywheels**: si tratta di un particolare corpo meccanico posto in rotazione (a velocità estremamente elevate) e sostenuto da un sistema di sospensione di tipo elettromagnetico.
- **SMES** (Superconducting Magnetic Energy Storage): l’energia viene immagazzinata nel campo magnetico prodotto da correnti di elevato valore circolanti in bobine superconduttrici (in modo da “annullare” le perdite per effetto Joule). Questo comportamento lo si può ottenere portando particolari materiali a temperature estremamente basse (LTSC) o estremamente alte (HTSC).

La figura 1.2² conferma come le tecnologie più datate siano, ad oggi, le più utilizzate nelle applicazioni di rete. Infatti il PHEs copre oltre il 98% su una capacità totale installata di circa 125 GW, contro i circa

²Fonte [3]

450 MW di impianti di natura elettrochimica, il cui 70% è da adibirsi alla tecnologia ad alta temperatura. Ovviamente ogni tecnologia presenta delle peculiarità tali da renderla particolarmente adatta a svolgere alcuni fra i servizi citati in precedenza. Tutto questo viene riassunto in 1.3, dove si può notare come gli impianti PHES e CAES siano caratterizzati da elevate capacità di immagazzinamento a cui corrisponde un elevato tempo di intervento. Per questo motivo queste due famiglie sono usate per adempiere ai Servizi di Energia.

Accumulo	Potenza	Durata della scarica	Efficienza (%)	Vita utile, anni	Total Capital Cost (USD/kW)
CAES (100–300 MW, Underground)	15–400 MW	2–24 h	54 (Eff _{NG} =1) 76(Eff _{NG} =0.54) 88(Eff _{NG} =0.39)	35	600–750
Pompaggio acqua	250 MW >1 GW	12 h	87	30	2700–3300 Upgrade:300
Li lone	5 MW	15 min a diverse h	90 (CC)	15	4000–5000
Piombo acido	3–20 MW	10 min a diverse h	75–80 (CC) 70–75 (CA)	4– 8	1740–2580
Sodio Zolfo, NaS	35 MW	8 h	80–85 (CC)	15	1850–2150
VRB Flow Cell	4 MW	4–8 h	75–80 (CC) 63–68 (CA)	10	7000–8200
ZnBr Flow Cell	40–100 kW, 2 MW	2–4 h	75–80 (CC) 60–70 (CA)	20	5100–5600
Volani ad alta potenza	750– 1650 kW	15 sec a 15 min	93	20	3695–4313
ZEBRA	<10 MW	Fino a 8 h	80–85 (CC)	Oltre 1500 cicli	1500–2000
Fe/Cr Flow Battery	<10 MW	2–4 h	50–65	20	200–2500
Zn/Air	20 kW– 10 MW	3–4 h	40–60	Alcune centinaia di cicli	3000–5000
SMES	1–3 MW	1–3 sec	90	>30,000 cicli	380–490
SMES di grande taglia	100 MW– 200 MW	100 sec (MWh) 0.5–1h (100MWh) 5–10 hr (GWh)	90	>30,000 ciclic	700–2000
Supercondensatori	10 MW	Fino a 30 sec	90	>500,000 cicli	1500–2500

NG = gas naturale; CC = corrente continua; CA = corrente alternata

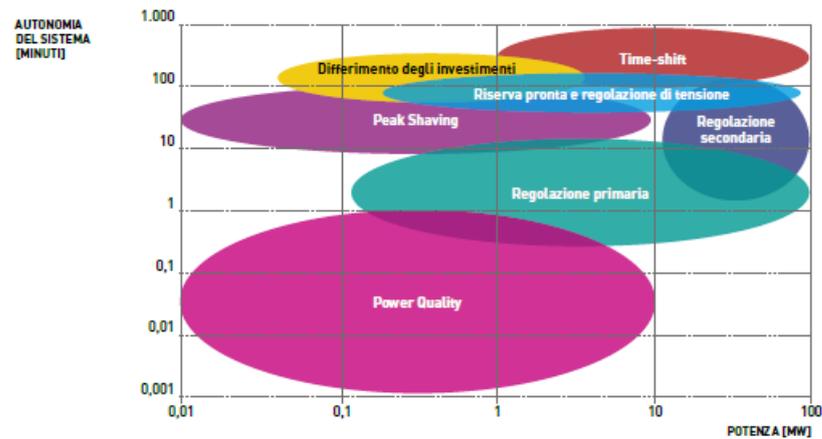
Figura 1.3: Confronto delle caratteristiche tecniche tra le diverse tecnologie

In termini di tempo di scarica, all'estremo delle due famiglie precedenti si hanno i volani e i supercondensatori, che svolgono le loro funzioni nell'ordine dei secondi fino alle decine di minuti, espletando quindi Servizi di Potenza.

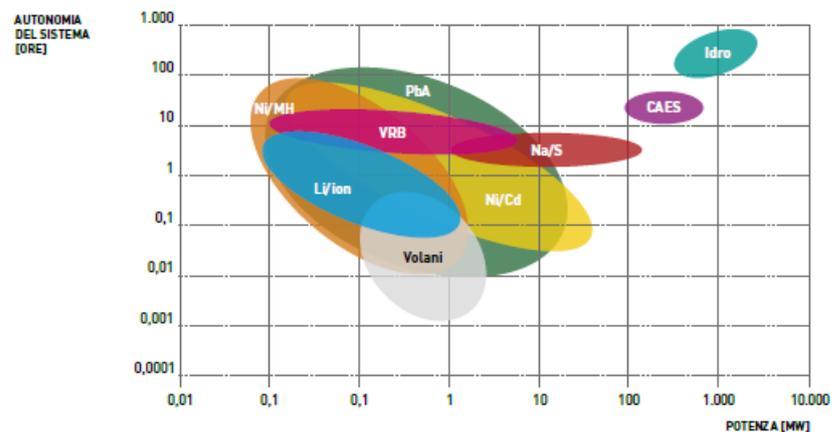
La grande famiglia delle tecnologie elettrochimiche rappresenta invece il “collante” tra le due tipologie di servizi richiesti, fornendo elevate potenze (in particolare le Li-ione) o erogando energia per svariate ore (vedasi le batterie ad alta temperatura).

Questa visione d'insieme rende l'idea che il parco delle tecnologie presenti sia in grado di sopperire a tutte le richieste di rete, tuttavia è indispensabile ricordare che gli impianti attualmente in uso nella rete elettrica si limitano ai sistemi ad elevata energia ed alle batterie. Questo rende ancora più evidente l'importanza dei sistemi elettrochimici, in quanto in grado di svolgere servizi sia di energia sia di potenza in modo capillare su tutta la rete grazie alla facilità di installazione.

Un utile riassunto di quanto appena detto lo si può vedere nei diagrammi in figura 1.4(a) e 1.4(b), le quali essendo rappresentate in piani cartesiani simili (varia solo la scala delle ordinate) permettono sia un'analisi individuale dei servizi e delle varie tecnologie sia un matching incrociato tra ciò che i servizi richiedono e ciò che gli impianti di accumulo offrono.



(a) Applicazione sistemi di accumulo in funzione di P ed autonomia



(b) Confronto tra le diverse tecnologie in funzione di P ed autonomia

Figura 1.4: Analisi dei servizi erogabili e confronto delle tecnologie di accumulo in termini di potenza/tempo di scarica

La figura 1.5 schematizza e riassume in modo semplice e chiaro come la scelta dell'impianto di accumulo sia figlia della tipologia di servizio che si vuole introdurre in rete. Anche in questo caso è possibile notare come, mediamente, i sistemi di accumulo elettrochimico riescano ad erogare un elevato range di servizi, a differenza delle tecnologie di potenza e di energia³.

Infine è indispensabile dare un'indicazione delle prospettive future di sviluppo delle tecnologie fino ad ora citate. La figura 1.6 associa una freccia orizzontale per ogni tecnologia, indicando con la punta di sinistra lo stato attuale e con la punta di destra il livello di sviluppo atteso al 2030.

Si può notare come la maggior parte degli sforzi siano in direzione dell'accumulo elettrochimico, con particolare attenzione alle famiglie Li-ion, NaS, NaNiCl₂ e PbA. Viene evidenziato anche un discreto interesse per il CAES e i volani. L'unica tecnologia già matura, come detto in precedenza, è il pompaggio idroelettrico il cui sviluppo iniziale risale a molte decadi fa.

³per regolazione terziaria si intende l'immissione di potenza al fine di riportare al valore iniziale i margini di riserva di regolazione secondaria

APPLICAZIONE	Idro	CAES	Na/S	Na/NiCl ₂	Li/ion	Ni/Cd	Ni/MH	Pb/acido	Redox	Volani	SC
Time-shift	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Integrazione rinnovabili (Profilo prevedibile)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Differimento investimenti rete	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Regolazione primaria	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Regolazione secondaria	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Regolazione terziaria (Riserva pronta)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Riaccensione sistema elettrico	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Supporto di tensione	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Qualità del servizio (power quality)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

● Sistema adatto all'applicazione
 ● Sistema meno adatto degli altri all'applicazione
 ● Sistema non adatto all'applicazione

Figura 1.5: Compatibilità servizi-tecnologie di accumulo

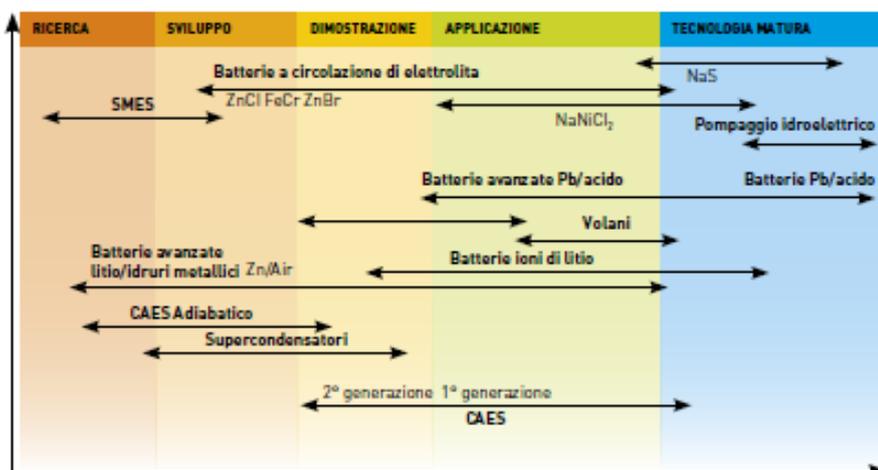


Figura 1.6: Prospettive di sviluppo

Capitolo 2

L'accumulo elettrochimico

Contrariamente a quanto si pensa le prime applicazioni di accumulo elettrochimico risalgono alla metà/fine dell'Ottocento in quanto, in quel periodo storico e tecnologico, prendevano forma e vigore le prime auto elettriche. Tuttavia, a causa della limitata autonomia delle batterie al Piombo, alla metà del 20° secolo i veicoli a combustione interna si imposero ponendo fine alla produzione dei veicoli elettrici (resisterono solo nella movimentazione in ambienti chiusi in cui era indispensabile l'assenza dei gas di scarico), determinando un brusco rallentamento nel settore della ricerca elettrochimica.

Poi, negli anni 80 e 90, la crescita esponenziale dell'elettronica permise di ottenere una migliore gestione delle batterie, infatti vennero commercializzate diverse vetture ad alimentazione elettrica. Tuttavia, a causa dell'irrisolto problema dell'autonomia, le batterie trovarono la loro perfetta collocazione nell'ambito dei dispositivi elettronici portatili, questo grazie alla compattezza e alla minor energia richiesta da questi dispositivi. Inoltre in quegli anni, oltre alla tecnologia al Piombo, videro la luce altre tipologie di accumulatori come le NiCd, le NiMH ma soprattutto la tecnologia a Litio [4].

In questo capitolo verrà proposta una veloce analisi dei principi chimico-fisici caratteristici dei sistemi di accumulo elettrochimico, per poi scendere nel dettaglio delle famiglie tecnologiche più importanti. Infine, nel capitolo successivo verrà fatta un'analisi approfondita dell'accumulo elettrochimico al Litio, ovvero l'oggetto di studio di questo documento.

2.1 Configurazioni e definizioni caratterizzanti

Quando si parla di batterie, bisogna innanzitutto fare una prima importante distinzione tra: batterie primarie e batterie secondarie. Quest'ultime si distinguono dalle prime poiché possono essere ricaricate invertendo il processo che interviene durante la scarica. Per ovvi motivi solo questa tipologia verrà presa in considerazione in seguito.

Un'ulteriore precisazione doverosa riguarda l'unità elementare, luogo delle reazioni chimiche indispensabili al fine di svolgere la funzione di generatore stazionario di forza elettromotrice, ovvero la cella. Quindi, quando si parla di batteria, si intende la disposizione di insieme di un prestabilito numero di celle. Tale disposizione dipende dalle caratteristiche elettriche richieste alla batteria, in particolare si può indicare con "stringa" la messa in serie di un determinato numero di celle in modo da poter raggiungere il livello di tensione desiderato, e con "modulo" il parallelo di più stringhe per poter definire la quantità di energia immagazzinabile.

L'implementazione di queste tecnologie richiede, per una serie di motivazioni che verranno esposte in seguito in questo capitolo, l'utilizzo di un'unità intelligente (BMS-*Battery Management System*) in grado di gestire al meglio la batteria ottimizzando le prestazioni e salvaguardandone lo "stato di salute". Tutto questo viene compreso nella terminologia corrente di sistema di accumulo elettrochimico.

Prima di scendere nel dettaglio dei principi di funzionamento è indispensabile elencare una serie di definizioni al fine di identificare univocamente la terminologia, che verrà usata in seguito, ed il relativo significato [4]:

- *Tensione massima* V_M : tensione raggiunta a seguito di una carica completa (per questioni di sicurezza non si supera mai tale valore);

- *Tensione iniziale di scarica*: tensione di batteria a seguito di un breve processo di scarica (solitamente 10% della capacità massima), a partire da uno stato di carica massima;
- *Tensione di Cut Off* V_{CO} : tensione minima consentita per evitare la riduzione di vita e/o delle performance di batteria. Questo valore si basa su un riscontro tecnico-economico ed è espresso dalla ditta costruttrice;
- *Tensione di funzionamento*: tensione ai morsetti durante la circolazione di corrente (influenzata dalla riduzione di fem) al variare dello stato di carica e della resistenza interna;
- *Tensione nominale* V_N : è una grandezza convenzionale pari al valore medio assunto dalla tensione durante il processo di scarica;
- *Capacità* C : carica rilasciata dalla batteria durante un processo di scarica secondo determinate condizioni. Si misura in [Ah];
- *Capacità teorica (o assoluta)* C_T : carica rilasciata a partire da uno stato di carica completo fino al totale esaurimento dei reagenti;
- *Capacità effettiva (o relativa)* C_E : carica rilasciata a partire da uno stato di carica completo fino al raggiungimento della V_{CO} :

$$C_E = \int_0^{t^{CO}} i(t) dt \quad (2.1)$$

Nella pratica questa è la capacità utilizzata;

- *Capacità nominale* C_N : carica rilasciata per un tempo standard T_d . Questo parametro è correlato alla tipologia di batteria e il valore viene fornito dal costruttore, o in modo diretto, fornendo la corrente standard di scarica (C-rate) come $\frac{C_N}{T_d}$, o mediante una costante moltiplicativa nella forma $k \cdot C_N$;
- *Stato di scarica SOD*: carica rilasciata durante un processo di scarica parziale secondo la seguente equazione:

$$SOD(t) = \int_0^t i(t) dt \quad (2.2)$$

- *Stato di carica SOC*: capacità rimanente dopo una scarica parziale a partire da una condizione di carica totale.

$$SOC(t) = C - \int_0^t i(t) dt \quad (2.3)$$

Ovviamente istante per istante la somma del SOC e del SOD deve essere pari a C .

Solitamente la capacità utilizzata è quella effettiva, tuttavia può essere usata anche quella teorica;

- *Profondità o grado di scarica DOD*: è la percentuale di carica rilasciata rispetto la capacità in condizioni di piena carica.

$$DOD(t) = \frac{SOD(t)}{C} \cdot 100 \quad (2.4)$$

La scarica viene definita profonda quando assume il valore 100% con $C = C_E$, mentre quando $C = C_T$ essa assume il valore 80%;

- *Profondità o grado di carica DOC*: è la frazione percentuale di carica rimasta dopo un processo parziale di scarica a partire da uno stato di carica completa.

$$DOC(t) = \frac{SOC(t)}{C} \cdot 100 \quad (2.5)$$

- *Energia teorica* E_T : convenzionalmente è pari a $E_T = V_N \cdot C_T$;

- *Energia effettiva* E_E : definita come

$$E_E = \int_0^{t_{CO}} (v_i) dt \quad (2.6)$$

dove a $t = 0$ la batteria è completamente carica.

Convenzionalmente si utilizza anche la seguente formula $E_E = V_E \cdot C_E$. Per ottenere l'energia nominale basta sostituire i valori effettivi a quelli nominali.

Per quanto riguarda la potenza, essa viene normalmente espressa dal prodotto della tensione nominale e il C-rate.

Solitamente quando si parla delle caratteristiche di una batteria, l'energia e la potenza vengono espresse in termini specifici (per unità di massa) e di densità (per unità di volume).

Le unità di misura dell'energia e della potenza sono rispettivamente [Wh] e [W];

- *Rendimento Coulombiano*: viene definito come il rapporto tra la carica rilasciata in scarica e quella assorbita durante il precedente processo di carica:

$$\eta_a = \frac{\int_0^{t_d} i_d dt}{\int_0^{t_c} i_c dt} = \frac{Q_d}{Q_c} \quad (2.7)$$

Tale rendimento solitamente è compreso tra 0.95 e 1; decrementa all'aumentare della rapidità del processo di carica;

- *Rendimento energetico*: espresso come il rapporto tra l'energia erogata in scarica e l'energia immagazzinata durante la carica:

$$\eta_e = \frac{\int_0^{t_d} i_d v_d dt}{\int_0^{t_c} i_c v_c dt} = \frac{W_d}{W_c} \quad (2.8)$$

- *Life time*: è l'arco temporale oltre la quale la batteria non riesce a garantire delle prestazioni accettabili, divenendo così inutilizzabile. Questo parametro dipende da molti fattori come: temperatura, sovraccariche, elevate correnti di carica/scarica ed elevate profondità di scarica. Solitamente si raggiunge questo stato quando è presente una riduzione della capacità rispetto al valore iniziale compresa tra il 60% e l'80%;
- *Calendar time*: è il Life time della batteria comprendente sia i periodi di attività che di inattività;
- *Shelf time*: periodo di inattività della batteria;
- *Cycle life*: è il Life time definito in numero di cicli di carica/scarica. Tali cicli fanno riferimento a definite condizioni di carica/scarica, per questo motivo il Cycle life è un parametro valido solo per applicazioni in cui il funzionamento, oltre a sottostare ai parametri previsti di carica/scarica, è il medesimo per tutta la vita della batteria;
- *Temperatura di funzionamento*: le performance della batteria sono, generalmente, molto influenzate dalla temperatura. Questo perché a bassi valori l'elettrolita (in forma acquosa) può ghiacciare mentre per elevati valori possono avvenire reazioni indesiderate responsabili di formazione di gas, corrosione e passivazione degli elettrodi. Solitamente il range di temperatura per un corretto funzionamento va dai -20°C ai 60°C ;
- *Resistenza interna*: rappresenta, in via elettrica, una serie di fenomeni che ostacolano la normale circolazione delle cariche elettriche. Essa è influenzata dalla temperatura ed assume valori estremamente alti se la batteria è completamente carica o scarica;
- *Effetto memoria*: presente solamente nella famiglia NiMH. A seguito di ripetute scariche parziali la batteria non è più in grado di fornire la quantità di carica che ci si aspetta, questo a causa di variazioni della composizione chimico-fisica degli elettrodi;

- *Autoscarica*: è un processo spontaneo che si verifica quando la batteria non è collegata ad un circuito esterno. In questa condizione avvengono le tipiche reazioni redox della carica/scarica a causa della non idealità degli elementi costituenti. Questo comporta una riduzione della capacità effettiva che viene espressa in [% di capacità persa per mese];
- *State Of Health SOH*: è un parametro, non valutato in modo univoco, che stima le condizioni della batteria rispetto ai valori dichiarati dal costruttore. Alcuni parametri solitamente usati sono: capacità, resistenza interna, tensione, numero di cicli di carica/scarica. Questo parametro viene usato per definire la capacità o meno della batteria di fornire le prestazioni richieste per l'applicazione specifica di riferimento. Per questo motivo, una volta stabiliti i parametri chiave di quell'applicazione, il valore stimato viene confrontato con un valore di riferimento e, nel caso risulti essere inferiore, la batteria non potrà più essere usata in quel contesto;
- *State Of Life SOL*: questo parametro stima il tempo rimanente nel quale la batteria è in grado di fornire le prestazioni richieste. Ha caratteristiche simili al precedente sia perchè non è definibile in modo univoco sia perchè si riferisce alla stessa analisi solamente espressa in termini temporali.

2.2 Principio di funzionamento

Il comportamento elettrochimico di una batteria è il risultato di una serie di innumerevoli fattori i quali rendono estremamente complicato il lavoro di descrizione e modellizzazione dell'oggetto. Tuttavia, per poter arrivare a quel risultato, è fondamentale capire le dinamiche dei processi che stanno alla base del funzionamento di ogni accumulatore elettrochimico.

Ogni singola cella è sede di una reazione chimica definita ossidoriduzione, la quale è responsabile della circolazione di un flusso di elettroni una volta che l'accumulatore è stato collegato ad un circuito esterno. Durante questa reazione una specie chimica (riducente) si ossida cedendo elettroni mentre l'altra specie presente (ossidante) si riduce acquistando gli elettroni messi in circolo (nel circuito esterno) dal riducente. Questo avviene in fase di scarica mentre, se si applica un campo elettrico esterno caricando la cella, si ottiene un'inversione delle reazioni di ossidoriduzione.

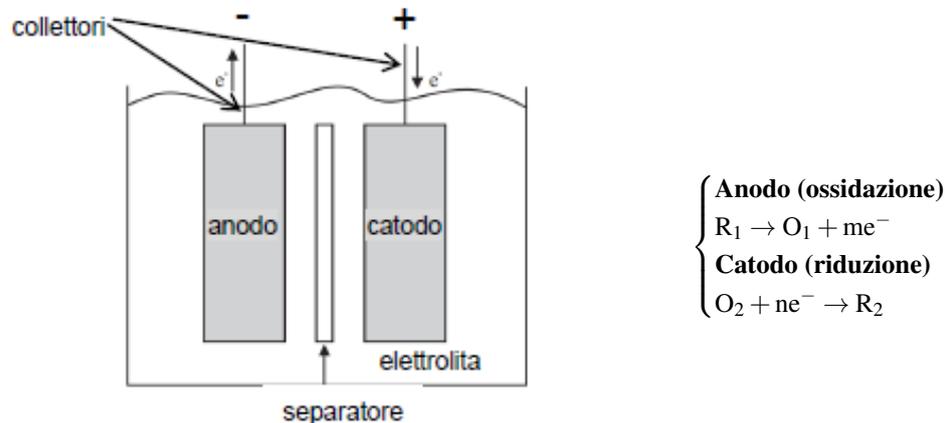


Figura 2.1: Cella generica

La figura 2.1 rappresenta in modo schematico la composizione di una cella, i cui elementi principali sono [5]:

- **Elettrodo positivo (catodo)**: è solitamente costituito da un materiale solido in forma ossidata. Subisce il processo di riduzione durante la scarica. Viene addizionato con materiali che aumentano la porosità favorendo la conducibilità elettronica;
- **Elettrodo negativo (anodo)**: è un metallo (o una lega metallica) che subisce un processo di ossidazione durante la scarica. Anche in questo caso possono essere presenti degli additivi;

- **Elettrolita:** è un mezzo che permette la conduzione ionica (ma non quella elettronica che determinerebbe l'autoscarica) tra gli elettrodi. In base alla famiglia della cella può essere liquido, gel o solido;
- **Separatore:** separa fisicamente gli elettrodi in quanto presentano polarità opposta. Deve essere permeabile agli ioni. Inoltre in alcuni casi può essere usato come contenitore dell'elettrolita;
- **Collettori di corrente:** semplicemente garantiscono il trasporto degli elettroni senza interagire con alcun elemento di cella.

Quanto descritto rappresenta il principio chimico alla base del funzionamento dell'accumulo elettrochimico, tuttavia è importante sottolineare come le non idealità dei materiali e la loro disposizione influenzino negativamente il processo di carica/scarica. Inoltre ogni famiglia di batterie presenta delle peculiarità tipiche dei materiali usati e della loro interazione chimico-fisica, infatti il carattere ossidante/riducente di una sostanza non può essere definita in modo assoluto in quanto strettamente correlata al partner della reazione.

2.3 Confronto tra tecnologie

Se all'inizio degli anni 90 le famiglie di accumulo elettrochimico presenti nel mercato erano limitate a Pb, NiCd, NiMH e, in quantità minore ma con prospettive importanti, la Li, ad oggi si possono contare un numero elevato di tecnologie che, in alcuni casi, differiscono in modo sostanziale sia in termini di materiali sia in termini di prestazioni.

I vantaggi tecnici e l'ampio range di applicazione di questi oggetti sono la causa dei grandi sforzi che hanno portato ad una tale dispersione scientifica. Il punto focale di ogni ricerca riguarda inevitabilmente il perfezionamento del lavoro di interazione svolto da tutti gli elementi della cella, e questo lo si ottiene sperimentando continuamente nuovi materiali o modificando la struttura chimico-fisica delle famiglie "date".

Al fine di poter comprendere i vantaggi e svantaggi della tecnologia Litio, è indispensabile esporre le principali caratteristiche delle famiglie "concorrenti", le quali sono riportate, in modo sintetico, in figura [2.2](#).

2.3.1 Batterie Pb-A

L'elettrodo negativo è solitamente realizzato in Piombo mentre l'elettrodo positivo è costituito da Piombo a cui viene inserito Calcio (per aumentare la durezza) e depositato del materiale attivo (PbO_2 o $PbSO_4$) in modo da aumentare la capacità di immagazzinamento elettrochimica. L'elettrolita è una soluzione acquosa di acido solforico.

Presenta delle caratteristiche elettriche non particolarmente "spinte" come una bassa tensione a vuoto, corrente di carica/scarica limitate e forte dipendenza dalla temperatura. Inoltre sono presenti due fenomeni particolarmente limitanti per le prestazioni della batteria come il "colpo di frusta" (forte riduzione della tensione ad inizio scarica) ed il "gassing" (formazione di Idrogeno ed Ossigeno per elettrolisi in fase di sovraccarica). In particolare quest'ultimo comporta il continuo rabbocco di acqua per mantenere la stechiometria indispensabile a far avvenire le reazioni.

Per questo motivo si è passati alla tecnologia **VRLA** (Valve Regulated Lead Acid), in cui la batteria viene racchiusa in un contenitore dotato di valvole che permettono la fuoriuscita di gas in pressione eventualmente presente. In questo caso l'elettrolita, per l'aggiunta di un sale, risulta assumere una consistenza gelatinosa (*Pb-gel*), oppure si utilizza un separatore spugnoso in grado di contenere l'elettrolita (*AGM - Adsorbed Glass Microfiber*).

Le PbA sono particolarmente robuste ed economiche, mentre la soluzione VRLA riduce i problemi riguardanti la sicurezza ma aumenta la sua sensibilità a particolari condizioni di funzionamento, e per questo motivo presenta una durata di vita inferiore (10 anni rispetto ai 30 della vecchia tecnologia).

TECNOLOGIA	VANTAGGI	SVANTAGGI	R&D
Piombo	Economica Tecnologicamente matura Materiale abbondante e riciclabile	Vita attesa breve Bassa potenza ed energia specifica Produzione di idrogeno Prestazioni fortemente dipendenti dal regime di lavoro e dalla temperatura Rendimento energetico basso Difficoltà di misurare lo stato di carica (State of Charge, SOC)	Nuovi drogaggi che permettono un miglioramento delle prestazioni
Nichel/cadmio	Buone prestazioni a basse e alte temperature Tecnologicamente matura Sicurezza elevata	Tossicità del cadmio Autoscarica elevata Produzione di idrogeno Rendimento energetico basso. In calo per la presenza del cadmio, continuerà ad essere utilizzata in applicazioni specifiche Effetto memoria	
Nichel/metal-idruri	Potenza ed energia specifica elevate Sicurezza elevata	Costo elevato Autoscarica elevata Rendimento energetico basso Effetto memoria Difficoltà di misurare il SOC	Riduzione dei costi Aumento della vita attesa
Sodio/zolfo	Potenza ed energia specifica elevate Rendimento energetico elevato Prestazioni indipendenti dalla temperatura Vita attesa lunga Abbondanza di materie prime poco costose	Perdite energetiche per riscaldamento Necessità di un BMS per gestire la batteria in sicurezza, con aumento dei costi	Riduzione dei costi Riduzione della temperatura di lavoro attraverso nuovi separatori ceramici Sicurezza
Sodio/cloruro di nichel	Energia specifica elevata Rendimento energetico elevato Prestazioni indipendenti dalla temperatura	Perdite per riscaldamento Potenza specifica bassa	Riduzione dei costi Aumento della potenza specifica riducendo la resistenza interna Riduzione della temperatura di lavoro attraverso nuovi separatori ceramici Sicurezza
Litio/ioni	Alta energia e potenza specifica Rendimento energetico molto elevato Vita attesa lunga Minima manutenzione	Necessità di un BMS per gestire la batteria in sicurezza, con aumento dei costi La maggior parte delle tipologie non possono essere caricate a bassa temperatura	Materiali elettrolitici ed elettroliti meno costosi e più sicuri
VRB	Vita attesa lunghissima Disaccoppiamento della potenza ed energia Scaricabile fino a tensione nulla	Onerosa manutenzione del circuito idraulico Rendimento energetico basso per la presenza di organi attivi Sensibile alla temperatura Energia specifica bassa	Nuove coppie Redox con maggiore energia specifica Riduzione dei costi Miglioramento della gestione

Figura 2.2: Comparazione tra le principali tecnologie di accumulo

2.3.2 Batterie NaS

Le celle presentano una particolare conformazione cilindrica allungata racchiusa da un recipiente metallico inerte e resa ermetica, per problemi di infiammabilità e corrosione del Sodio, da un coperchio in Alluminio.

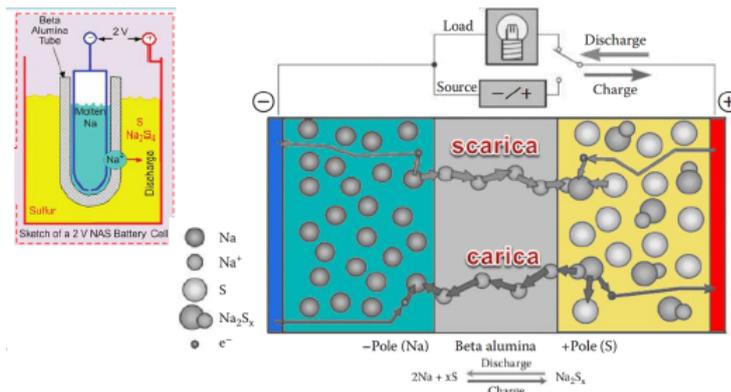


Figura 2.3: Cella elementare NaS

La figura 2.3 mostra come i componenti fondamentali delle reazioni redox siano il Sodio liquido (elettrodo negativo) e l'elettrolita ceramico in beta-allumina, il quale, per poter essere in forma liquida e consentire lo scambio ionico, deve essere mantenuto ad una temperatura pari a 300 °C. Questo viene ottenuto grazie al calore ceduto durante le fasi di scarica, mentre durante la carica, essendo la reazione endotermica, si riesce a mantenere la temperatura necessaria mediante le perdite per effetto Joule e per la particolare distribuzione delle celle.

I vantaggi riguardano l'elevato potenziale di riduzione e al basso peso atomico del Sodio, i quali garan-

tiscono elevate tensioni ai morsetti ed una elevata energia specifica. Viceversa il problema principale riguarda la sicurezza contro il rischio di incendio, per questo motivo si sono introdotte ulteriori barriere fisiche di contenimento, oltre a migliorare le prestazioni del BMS.

2.3.3 Batterie Zebra NaNiCl_2

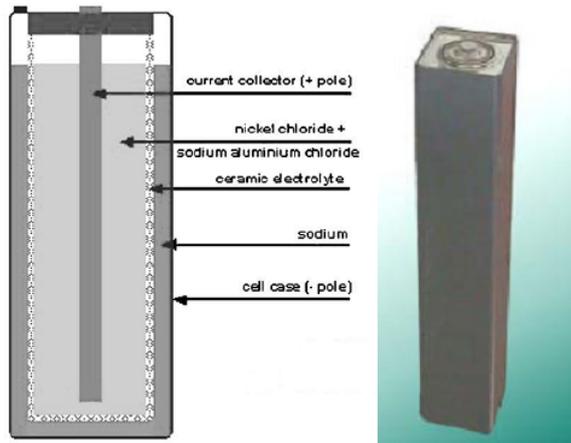


Figura 2.4: Cella elementare NaNiCl_2

Le componenti in gioco risultano essere molto simili alla tecnologia precedente (questo perchè si basano sul medesimo principio), infatti l'elettrodo negativo è costituito da Sodio mentre quello positivo è formato da Cloruro di Nichel (vedasi figura 2.4). L'elettrolita è in beta-allumina e NaAlCl_4 (per contrastare l'alta reattività del Sodio), riducendo l'energia specifica ma aumentandone la potenza. Presentano un'elevata resistenza a sovrascariche e sovraccariche, tuttavia la durata di vita è compresa tra i 10 e 15 anni.

2.3.4 Batterie a flusso VRB

La Vanadium Redox Battery si basa sull'interazione di due elettroliti costituiti da una soluzione di Vanadio in acido solforico, i quali vengono continuamente pompati all'interno della cella in quanto contenuti in due serbatoi esterni (vedasi figura 2.5). Gli ioni metallici contenuti nella soluzione cambiano valenza durante i vari processi consentendo lo sviluppo di reazioni redox, mentre il separatore consente il solo passaggio degli ioni di Idrogeno (con un funzionamento simile a quanto avviene nelle celle a combustibile).

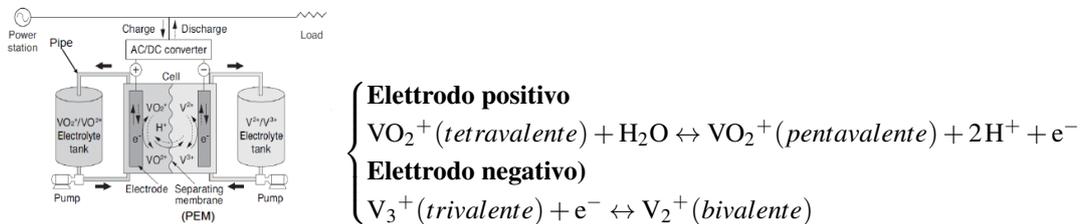


Figura 2.5: Configurazione VRB

Le principali caratteristiche di questa tecnologia sono:

- Possibilità di scariche fino al 100% senza danneggiare i materiali;
- Materiali ecocompatibili, disponibili in natura e non infiammabili;
- Lunga durata di vita per assenza di depositi delle reazioni ed alterazione degli elettrodi;

- Possibilità di bloccare le pompe durante lo stand-by riducendo i consumi;
- Tensione di cella bassa, tuttavia è possibile inserire “stack” di celle utilizzando i medesimi serbatoi;
- Nessun intervento di sostituzione/integrazione dell’elettrolita in quanto ritorna al medesimo stato alla fine di ogni ciclo;
- Ingombri importanti;
- Totale disaccoppiamento tra la progettazione di potenza (mediante portata delle pompe e superficie della membrana) e di energia (capienza dei serbatoi);
- Lunga vita (oltre i 10000 cicli di carica/scarica);
- Efficienza più limitata a causa delle perdite associate alle pompe e alle correnti di circolazione interne all’elettrolita;
- Tecnologia non pienamente matura.

2.3.5 Batterie NiCd e NiMH

Per quanto riguarda la prima famiglia, l’elettrodo positivo è costituito da ossido di Nichel idrato ($\text{NiO}(\text{OH})$) mentre quello negativo da Cadmio, il tutto immerso in un elettrolita in soluzione acquosa di tipo alcalino contenente idrossido di Potassio, Sodio o Litio. Esistono due principali modalità costruttive, una in cui gli elettrodi sono contenuti all’interno di una tasca in foglia di acciaio fittamente forata per consentire la penetrazione dell’elettrolita (configurazione a “tasca”), e una seconda con elettrodi “sinterizzati” che consente di ottenere una maggiore energia specifica, elevate potenze e una riduzione della resistenza interna.

I pregi riguardano l’elevato valore assunto dall’energia specifica, la scarsa influenza della temperatura e del regime di scarica nei confronti dell’energia erogabile, oltre alla possibilità di scaricare a fondo la batteria senza creare particolari problemi.

Tuttavia, a causa dei problemi ambientali legati al Cadmio e al costo abbastanza elevato, è in atto un declino di questa tecnologia, che comunque risulta estremamente diffusa in quanto nel passato ha rappresentato una valida alternativa alla tecnologia al Piombo.

Le batterie Nichel/Idruri metallici nascono in risposta al problema ambientale creato dal Cadmio, infatti l’elettrodo positivo è il medesimo (come anche l’elettrolita) mentre quello negativo è costituito da leghe metalliche capaci di assorbire e accumulare l’Idrogeno sotto forma di idruri.

Sebbene presentino un’energia specifica maggiore delle NiCd, l’elevata autoscarica (circa 20% al mese, contro le poche unità percentuali di tutte le altre tecnologie), la forte dipendenza delle prestazioni dalla temperatura e l’effetto memoria hanno pesantemente limitato la diffusione di questa tecnologia, che ha trovato spazio prevalentemente nel mercato delle applicazioni elettroniche portatili.

2.3.6 Batterie Zinco/aria

La peculiarità di questa tecnologia (ben visibile in figura 2.6) è quella di impiegare l’Ossigeno atmosferico come elettrodo che riceve elettroni e lo Zinco come elettrodo che cede elettroni, mentre l’elettrolita può essere in forma liquida o una membrana polimerica solida saturata con idrossido di Potassio (KOH). La modalità di funzionamento la rende una tecnologia a combustibile (come le VRB), in cui lo Zinco è il combustibile e l’aria il comburente, anche se ovviamente non avviene alcuna combustione vera e propria (il fatto di non poter incendiarsi è uno dei fattori positivi di questa tecnologia).

Inoltre, essendo uno dei due elettrodi allo stato gassoso, si riescono ad ottenere elevate energie specifiche, tuttavia, a causa della forte dipendenza delle prestazioni della batteria dalla pressione atmosferica, oltre alla necessità di sostituire periodicamente gli elettrodi per la ricarica, questa tecnologia non ha trovato ampia diffusione nel mercato [6].

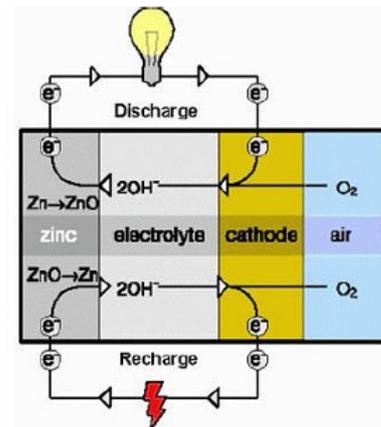


Figura 2.6: Cella elementare Zinco-aria

2.3.7 Batterie Li

Questa tecnologia, essendo l'oggetto di questo documento, verrà trattata in modo specifico nel capitolo 3. Tuttavia, per motivi di completezza ed omogeneità del testo, si preferisce fornire alcune informazioni introduttive in modo da poter effettuare il confronto con le altre famiglie.

Innanzitutto il Litio è il metallo con il minor peso atomico che, associato ad un potenziale elettrodo standard assoluto estremamente elevato (-3.04 V), consente di ottenere facilmente elevati valori di tensione ed elevate capacità di immagazzinamento per unità di volume e massa.

Esistono tre categorie di accumulatori al Litio: ad elettrolita liquido, ad elettrolita solido polimerico, ed infine le celle Litio metallo polimeri. La prima categoria è indubbiamente la più diffusa ed è utilizzata per applicazioni di piccola taglia, la seconda categoria invece, grazie alla maggiore sicurezza introdotta (maggior contenimento della forte reattività del Litio a contatto con l'acqua), trovano spazio nel mercato dei veicoli elettrici e delle applicazioni in rete. La terza categoria non trova particolari sbocchi in quanto presenta problemi di sicurezza ad oggi elevati.

In generale l'elettrodo negativo è costituito da carbonio (grafite), mentre l'elettrodo positivo è costituito da un ossido litiato di un metallo di transizione, in modo da favorire l'inserimento degli ioni di Litio (scambiati durante le redox). L'elettrolita è costituito da sali di Litio disciolti in solventi organici, a cui vengono aggiunte particolari sostanze nel caso della forma polimerica solida.

Le caratteristiche, tuttavia, dipendono fortemente dal materiale usato per l'elettrodo positivo, anche se, in generale, si può affermare che questa tecnologia presenti elevate capacità di immagazzinamento e buone caratteristiche elettriche (in termini di capacità di carica/scarica, resistenza interna e tensione ai morsetti), a scapito di un elevato costo di produzione (soprattutto a causa del Litio).

2.4 Installazioni nel mondo

Come già evidenziato in figura 1.2 del capitolo introduttivo, la potenza installata nell'ambito dell'accumulo elettrochimico in tutto il mondo è pari a 450 MW su 125 GW, con la seguente distribuzione tra le varie tecnologie:

- Le **batterie Sodio/Zolfo** rappresentano il 70% della potenza installata (316 MW), distribuita in 221 impianti in tutto il mondo. Ben 160 MW sono installati a Tokyo, il cui impianto principale da 34 MW ha lo scopo di regolarizzare la produzione del parco eolico associato (da 51 MW), controllando il profilo di potenza in base al mercato elettrico.

L'impianto di maggiore potenza è invece installato ad Abu Dabhi (50 MW), mentre l'impianto americano con sede in West Virginia, benchè sia di "piccola" taglia (1.2 MW), risulta particolarmente interessante in quanto aveva il compito di ridurre la potenza transiente nel trasformatore della sottostazione immediatamente a monte dell'installazione (in modo da ritardare la costruzione del potenziamento), mentre oggi svolge la funzione di peak shaving;

- Le **batterie Litio-ioni** rappresentano la principale alternativa alla tecnologia ai sali con una potenza installata di 45 MW, di cui circa 20 MW sono adibiti allo svolgimento di funzioni ancillari, come l'impianto in Cile da 16 MW;
- Le **batterie Nichel/Cadmio**, con una potenza installata di 27 MW, svolgono funzioni di potenza come la riserva rapida, la compensazione di potenza reattiva, la regolazione di frequenza e il livellamento dei carichi;
- Le **batterie al Piombo acido**, con una potenza installata di 35 MW, svolgono prevalentemente funzioni di continuità di servizio. Una recente installazione di 15 MW svolge la funzione di supporto di un parco eolico nelle Hawaii;
- Le **batterie a flusso** sono scarsamente diffuse nonostante le prestazioni offerte. La potenza installata è di 9 MW, dei quali 4 MW appartenenti all'impianto principale installato ad Hokkaido (Giappone) in accoppiamento ad un parco eolico;
- Le **batterie Sodio/cloruri metallici** presentano un unico impianto di riferimento, ad Almisano (Vicenza), da 230 kW accoppiato ad un sistema fotovoltaico il quale viene fatto lavorare in MPPT.

Capitolo 3

Stato dell'arte dell'accumulo elettrochimico al Litio

La prima batteria al Litio, di tipo primario e quindi non ricaricabile, fece la sua comparsa agli inizi degli anni 70, tuttavia per poter giocare un ruolo importante all'interno dei mercati vennero eseguite numerose ricerche e sperimentazioni al fine di poterne consentire la ricarica. Solo nel 1991, dopo numerosi insuccessi causati dall'instabilità del Litio, venne commercializzata la prima batteria agli ioni di Litio. Ora sono presenti numerose varianti tecnologiche che si distinguono principalmente per i materiali attivi utilizzati, anche se il principio di funzionamento rimane il medesimo.

Ciò che rende particolarmente interessante questa tipologia di accumulo è il Litio e le sue caratteristiche chimico-fisiche, le quali consentono di ottenere elevata densità di potenza e di energia, limitata auto-scarica, correnti di carica/scarica particolarmente elevate, possibilità di funzionamento per molti cicli e capacità di funzionare in un range di temperatura elevato [7].

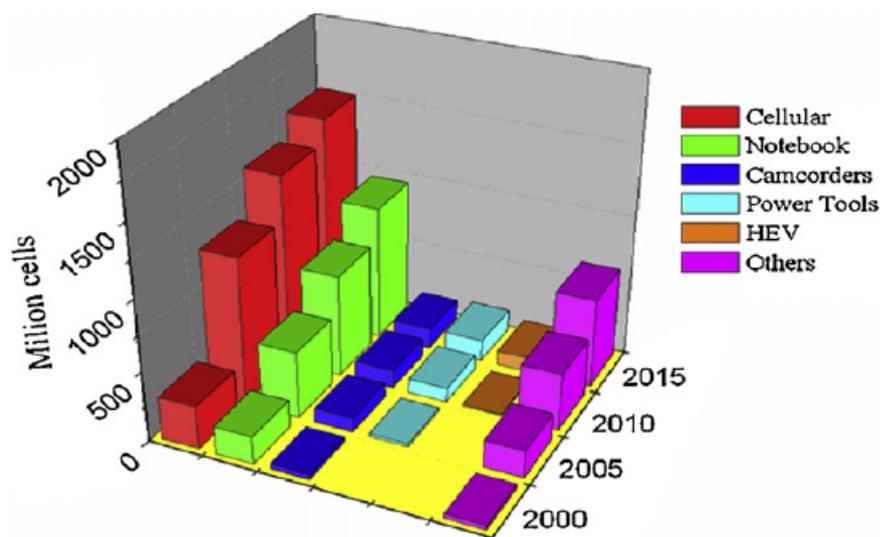


Figura 3.1: Evoluzione delle vendite accumulatori al Litio nei vari segmenti di mercato

Per questa serie di motivi la tecnologia Litio si sta imponendo nel mercato mondiale sia in termini di potenza installata negli ultimi anni a questa parte, sia in termini di asset di mercato "conquistati". La figura 3.1 mostra entrambi gli aspetti precedentemente menzionati, sottolineando come questa tecnologia, mediante una specifica progettazione, si presti a lavorare per applicazioni portatili sia a bassa energia (telefonata e dei notebook) sia ad elevata energia (HEV), senza trascurare applicazioni di potenza ed energia di natura stazionaria.

3.1 Struttura base e principio di funzionamento

Come per ogni altro accumulatore elettrochimico, le batterie agli ioni di Litio sono costituite da numerose stringhe collegate in parallelo in modo da poter raggiungere il valore di tensione e di capacità desiderato. Ogni stringa è costituita da una serie di celle elementari, che rappresentano la sede del processo di conversione dell'energia chimica in elettrica. Gli elementi in gioco sono gli elettrodi, dove il catodo è costituito da un ossido litato di un metallo di transizione, mentre l'anodo è tipicamente grafite. L'elettrolita, costituito da un sale disciolto in un solvente organico, consente il passaggio dei soli ioni di Litio (da cui deriva il nome del sistema di accumulo).

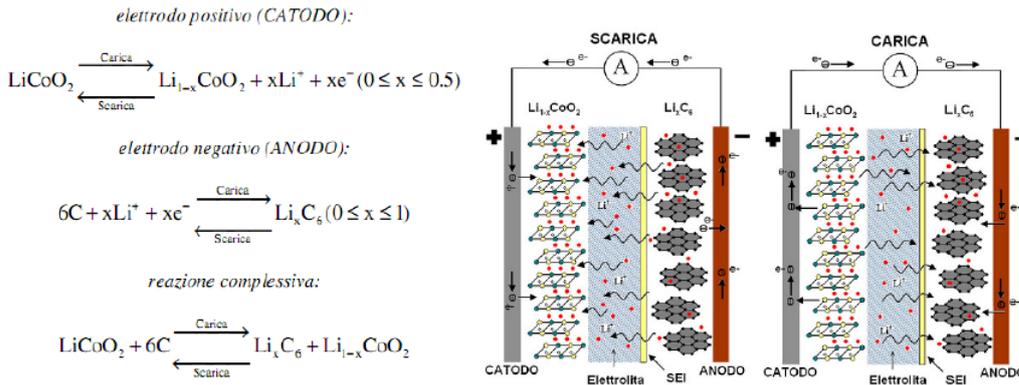


Figura 3.2: Processo di carica/scarica

Il processo di ossidoriduzione presenta alcune peculiarità dovute agli elementi utilizzati e alle relative caratteristiche. Durante il processo di carica, gli ioni di Litio vengono estratti dal catodo per essere trasferiti all'anodo mediante l'elettrolita, nel contempo gli elettroni migrano dal catodo all'anodo mediante il circuito elettrico esterno. L'inverso avviene per il processo di scarica, come ben evidenziato dalla figura 3.2, in cui sono presenti le reazioni chimiche (relative ad catodo in LiCoO_2 , la cui logica però è del tutto generale) che occorrono nei due elettrodi per entrambi i processi [8].

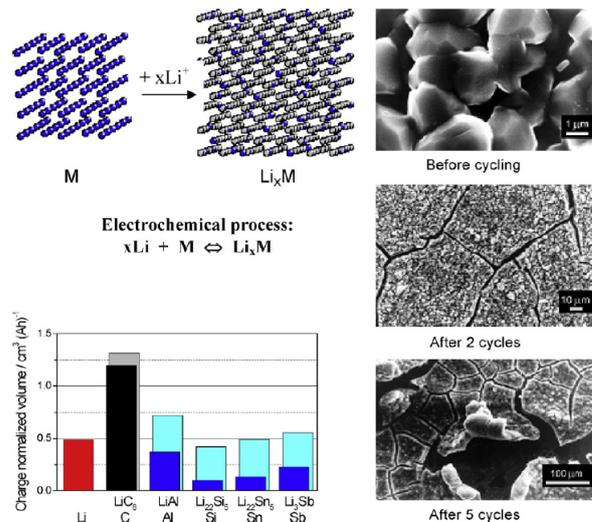


Figura 3.3: Variazione volumetrica del catodo. In alto a sinistra lo schema concettuale, mentre la colonna di destra mostra la dilatazione all'aumentare dei cicli. Infine si ha la variazione % di volume per diverse composizioni del materiale catodico.

Ciò che determina particolari benefici in termini di vita utile della batteria è la modalità di inserimento degli ioni negli elettrodi, che differisce in modo sostanziale dalle altre tecnologie elettrochimiche.

Il fenomeno citato viene denominato “intercalazione” ed è dovuto alle peculiarità microscopiche degli elementi costituenti gli elettrodi, che consentono il rilascio e l’acquisizione degli ioni di Litio da parte del reticolo cristallino senza che i due materiali attivi subiscano un processo continuo di disgregazione e ricostituzione chimico-fisica.

Tuttavia sono presenti degli “sforzi” meccanici dovuti alla variazione volumetrica che vanno ad influenzare le prestazioni dinamiche della batteria. In figura 3.3 si può vedere a livello microscopico gli effetti fisici dei cambiamenti di volume, con l’aggiunta di alcuni dati relativi alla variazione percentuale misurata per diverse leghe.

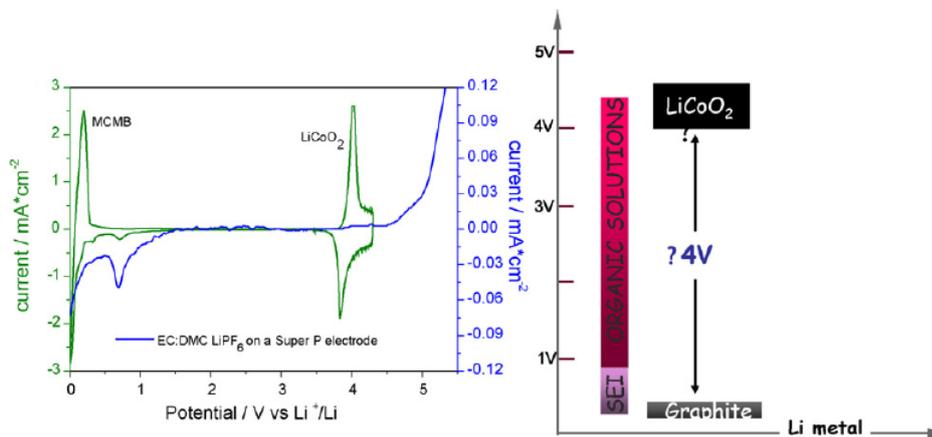


Figura 3.4: Visualizzazione del potenziale assunto dagli elettrodi durante i processi redox

Un altro fenomeno che occorre durante i processi di ossidoriduzione è rappresentato in figura 3.4, dove si può notare come il potenziale assunto dall’anodo rispetto al Litio è di circa 0.5 V mentre il catodo (in questo caso LiCoO₂, ma la considerazione vale anche per le altre composizioni) assume un potenziale relativo pari a 4 V. Il problema nasce in quanto l’elettrolita lavora in stabilità in un range compreso tra 0.8 V e 4 V, quindi, mentre il catodo lavora ai margini, l’anodo opera ad un valore esterno alla stabilità. Benchè il processo di carica/scarica avvenga in condizioni di stabilità cinetica, nei primi cicli di lavoro della cella, quando l’anodo è carico, avvengono dei processi di decomposizione dell’elettrolita all’interfaccia con l’elettrodo che provocano la perdita irreversibile di ioni di Litio ma, soprattutto, la formazione di diversi strati protettivi (costituiti dai prodotti della reazione) che ricoprono l’anodo [9].

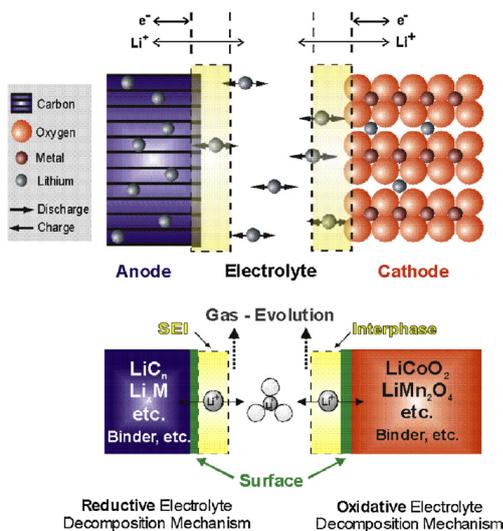


Figura 3.5: Formazione strato passivante SEI

Si distinguono due tipologie di strati protettivi:

- Il **SEI** (Solid-Electrolyte Interfase), che si forma nelle zone superficiali dell'anodo ed è permeabile al passaggio degli ioni di Litio, motivo per cui esso garantisce una protezione alla corrosione ed impedisce agli ioni intercalati di reagire con l'elettrolita. A lungo andare, tuttavia, aumentano le impurità (anioni e cationi) che lo strato lascia passare (non è un separatore vero e proprio) determinando un aumento dell'autoscarica, la corrosione dell'anodo e la decomposizione dell'elettrolita. Quest'ultimo evento comporta un ispessimento del SEI con conseguente aumento della resistenza interna;
- il **non-SEI** che si forma nelle zone in cui non avviene l'intercalazione e che comunque garantisce una funzione protettiva per l'elettrodo.

Quanto appena descritto non accade al catodo in quando lavora in un regime compreso nei limiti di stabilità, tuttavia a seguito di eventi inaspettati, come una sovraccarica accidentale, è possibile che si verifichi lo stesso fenomeno di decomposizione in quanto il catodo non è rivestito dal SEI.

Questi processi di decomposizione, seppur brevi, danno luogo al consumo di materiale attivo e alla produzione di piccole quantità di gas come mostrato in figura 3.5, la cui conseguenza è la perdita irreversibile di capacità fin dai primi istanti di vita.

Dopo aver descritto i fenomeni chimico-fisici che avvengono all'interno di ogni singola cella, è indispensabile distinguere le diverse tipologie di batterie al Litio per poter effettuare un'analisi più approfondita delle relative caratteristiche. La varietà di materiali attivi usati e la loro disposizione fisica ha permesso di sviluppare le seguenti distinzioni:

- *Litio-ione*
- *Litio-ione polimero*
- *Litio metallico*

3.2 Litio-ione

Tra le tre categorie sono indubbiamente le più diffuse nel mondo, principalmente perchè sono le prime ad essere state sviluppate. Rispetto alle altre famiglie di accumulo elettrochimico presentano i seguenti vantaggi:

- tensione di cella elevata (da 3 a 4.2 V);
- elevata densità di energia (fino a 530 Wh l^{-1});
- elevata energia specifica (fino a 230 Wh kg^{-1});
- elevata potenza specifica (fino a 500 W kg^{-1} per 20 s);
- numero di cicli elevato;
- autoscarica ridotta;
- non presenta effetto memoria;
- nessuna manutenzione (sono sigillate);
- permettono scariche e cariche profonde;
- spessori sottili;
- efficienza energetica maggiore del 90%.

Mentre i svantaggi sono:

- necessitano di un BMS per evitare modalità di funzionamento pericolose come sovraccariche e sovrascariche;

- tempi di ricarica lunghi;
- controllo del bilanciamento nel caso in cui siano collegate in serie più di 3 batterie;
- invecchiamento crescente con il tempo di stoccaggio, la temperatura e lo stato di carica;
- preparazione condotta in ambiente controllato;
- temperatura di utilizzo compresa tra i -20 e 40 °C, occasionalmente può superare i 55 °C.

3.2.1 Elettrodo negativo

Solitamente costituito da Grafite (il più economico) o carbone coke, raramente è possibile trovarlo sotto forma di leghe metalliche al Litio. Indipendentemente dal materiale, deve essere in grado di intercalare gli ioni di Litio al suo interno, sopportando quindi variazioni volumetriche continue (anche del 10-15%) durante il funzionamento, con le conseguenze descritte precedentemente. Proprio per compensare la perdita di capacità iniziale, si dota l'elettrodo di materiale in "eccesso".

Tra le leghe usate la migliore è il titanato di Litio ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$), il quale vanta una elevata ciclabilità, stabilità termica e accelerati tempi di ricarica a scapito di una ridotta capacità e tensione. Viene ricordato per la sua struttura a spinello.

3.2.2 Elettrolita liquido

L'elettrolita è costituito da un sale di Litio disciolto (lo stato liquido consente di penetrare nei pori degli elettrodi e sopperire alla non elevata conducibilità di questi) in più solventi organici i quali, a parità di condizioni e di configurazione di cella, vengono utilizzati a coppie (uno con elevata costante dielettrica e l'altro con modesta viscosità) per massimizzare la conducibilità. I solventi più usati appartengono ad una delle tre famiglie seguenti: carbonati alchilici, gli esteri e gli eteri, i quali sono polari e stabili in tutto l'intervallo di tensione e corrente usate. I principali sono:

- LiPF_6 è il più usato, a patto che precedentemente venga trattato in ambiente estremamente controllato;
- LiBF_4 usato per applicazioni ad "alta" temperatura;
- $\text{LiN}(\text{SO}_2\text{CF}_3)_2$ adatto alle basse temperature ma corrosivo;
- LiCF_3SO_3 abbastanza usato ma corrosivo;
- $\text{LiN}(\text{SO}_2\text{CF}_2\text{CF}_3)_2$ stabile fino ai 4 V ma corrosivo.

Infine, per "controllare" la formazione e la struttura dei diversi strati all'interfaccia con l'elettrodo, si interviene aggiungendo additivi che rendono omogenea l'interfase garantendo un'ottimale conducibilità ionica ed elasticità meccanica. I più usati sono l'Etilen Carbonato (EC) per la grafite e il Propilen Carbonato (PC) con il carbone.

3.2.3 Separatore

Il separatore, come si può intuire, deve essere in grado di separare elettricamente i due elettrodi (evitando cortocircuiti), resistere ai solventi ed essere stabile alle temperature di esercizio. Benchè queste membrane di Polietilene siano estremamente sottili (dai 10 ai 30 μm), presentano una elevata resistenza meccanica.

3.2.4 Elettrodo positivo

L'elettrodo positivo, ad oggi, rappresenta il maggior ostacolo tecnico per incrementare le prestazioni di questa tecnologia a causa della sua ridotta capacità. Esso deve essere immerso nell'elettrolita liquido per poter favorire l'intercalazione degli ioni nella parte interna del materiale (altrimenti si fermerebbero ai grani superficiali), ma deve anche comprendere piccole percentuali di carbone in modo da favorire la conduzione elettronica. Generalmente un elettrodo è costituito da un 5% di carbone, un altro 5% da leganti, un solvente (che verrà fatto evaporare) che funge da miscelatore dei composti, ed infine da polveri fini di materiale attivo litato.

Materiale catodico	Tensione	Cap. Spec. Teorica	Cap. vol. Teorica	N° Cicli	Densità Energia	En. Spec.
	V	Ah/kg	Ah/l		Wh/l	Wh/kg
LiMnO ₂	3.0					
LiMn ₂ O ₄	3.6	148	634		270	120
LiCoO ₂	3.7	137	706	1000	220-350	90-140
LiNiO ₂	3.6	192	919			
LiFePO ₄	3.5	170		1000		
V ₂ O ₅	3.0			100		

Figura 3.6: Materiali catodici usati e loro caratteristiche

In figura 3.6 vengono evidenziati i diversi materiali e le rispettive caratteristiche elettriche, tuttavia si desidera estenderne la descrizione:

- **LiCoO₂** è il materiale più usato grazie alla sua stabilità, tuttavia non presenta una capacità elevata. Il Cobalto è un materiale tossico particolarmente usato in ambiente aeronautico e non è abbondantemente presente in natura. Con questo materiale sono possibili cicli tra i 4.2 e i 3 V;
- **LiNiO₂** per problemi di stabilità strutturale vengono aggiunti dei stabilizzatori, formando composti conosciuti come NCA e NMC. Presenta un potenziale (si può ciclare fino a 4.4 V) ed una capacità maggiore del precedente;
- **LiMn₂O₄** fornisce maggiore potenza grazie ad una veloce inserzione degli ioni nella struttura a spinello, inoltre il Manganese è poco costoso e non tossico. Tuttavia deve essere "supportato" da additivi che ne evitino la dissolvenza allungandone la ciclabilità;
- **LiFePO₄** sopporta bene numerosi cicli e il funzionamento ad alte temperature. I materiali sono poco costosi e non tossici ma hanno un tensione di lavoro inferiore (3.5 V).

3.3 Litio-ione polimero

Questa categoria di batterie al Litio può essere ulteriormente suddivisa in altre due sottocategorie, di cui una praticamente inutilizzata in quanto differisce dalla precedente solo per avere un elettrolita gelificato che non risolve i problemi esposti, mentre la seconda, mediante un particolare elettrolita polimerico, garantisce una sicurezza intrinseca molto elevata a scapito di una minore conducibilità. In questo caso l'elettrolita viene laminato formando sottili strati (30 – 50 μm) facilmente sagomabili.

Il materiale anodico è sempre grafite mentre quello catodico è LiFePO₄, in quanto presenta un potenziale relativo (3.4 V) inferiore al valore limite di stabilità dell'elettrolita, costituito da Polietilene Ossido (PEO) e sali come LiCF₃SO₃.

3.4 Litio metallico

Questa categoria trova spazio, ormai da decenni, nel mercato delle batterie primarie, mentre per quelle secondarie non raggiunge requisiti di ciclabilità e sicurezza all'altezza delle altre tecnologie.

Essa è contraddistinta da un anodo costituito da Litio metallico, che presenta un ottimo potenziale standard, basso peso atomico e un'elevata capacità teorica. Il principale problema è dato dalla forte reattività del materiale attivo che, ossidandosi con l'elettrolita, comporta la formazione di uno strato passivante SEI disomogeneo, caratterizzato da dendriti (protuberanze che assumono il ruolo di cammini

preferenziali per gli ioni) che possono provocare cortocircuiti interni.

Come prima soluzione è stato proposto l'utilizzo di un elettrolita polimerico solido il quale, però, a seguito delle variazioni volumetriche degli elettrodi, perdere il contatto fisico con gli stessi. Viceversa, una recente soluzione proposta a livello di laboratorio (da verificare in termini di ciclabilità e costi) prevede di ricoprire l'anodo con un conduttore ceramico di ioni di Litio formando uno strato protettivo.

3.5 Liquidi ionici

In questa sezione si desidera dare visione ad una particolare ricerca in corso nel campo degli elettroliti. In particolare si sta studiando la possibilità di sostituire i solventi organici, "responsabili" dei problemi inerenti alla sicurezza (sono infiammabili, volatili, esplosivi e non possono essere dispersi nell'ambiente) con dei liquidi ionici in grado di dissolvere i sali di Litio.

Questi liquidi ionici sono costituiti da cationi organici e anioni inorganici/organici, e sono caratterizzati da proprietà estremamente interessanti, quali:

- tensione di vapore pressochè nulla;
- non sono infiammabili;
- presentano una elevata conducibilità ionica;
- in alcuni casi idrofobicità.

Tali liquidi possono essere suddivisi in due categorie in base al loro punto di fusione, che viene determinato dalla struttura e dalla disposizione degli ioni costituenti, oltre che dalla lunghezza delle catene molecolari. I liquidi con punto di fusione inferiore alla temperatura ambiente, che si definiscono **RTIL** (Room Temperature Ionic Liquids), sono quelli potenzialmente utili per applicazioni storage, mentre i liquidi ionici ad alta temperatura (temperatura di fusione intorno ai 100 °C), che presentano proprietà simili ai precedenti, non sono consoni ad applicazioni nei SdA per problematiche inerenti la loro diversa gestione [1].

3.6 Ricerca e sviluppo

Per quanto già oggi l'accumulo elettrochimico su base Litio offra prestazioni più che competitive rispetto alla maggior parte delle altre tecnologie elettrochimiche, con una elasticità di progettazione tale da renderla interessante in svariati campi di applicazione, restano da risolvere principalmente i limiti riguardanti la sicurezza, la ciclabilità, il costo e il range di temperatura di funzionamento. Tutto questo non può prescindere da un contemporaneo incremento prestazionale generale. Inevitabilmente il focus di tutte le ricerche riguarderà la chimica e la fisica dei materiali costituenti le parti attive della cella, ovvero il catodo, l'anodo e l'elettrolita.

Per una migliore comprensione si preferisce suddividere i miglioramenti in via di studio in base ai relativi effetti sulle prestazioni della cella, concentrandosi sugli aspetti di energia, potenza e sicurezza.

3.6.1 Miglioramenti in termini di energia specifica

Fino ad oggi gli interventi eseguiti in questo ambito riguardano il solo utilizzo di un case più leggero oppure un'ottimizzazione della progettazione di cella. Tuttavia, per poter ottenere un sostanziale avanzamento è necessario sperimentare nuovi materiali.

In sostituzione alla grafite come materiale anodico, si sta indagando su leghe come il Litio-Silicio (Li-Si) e il Litio-Stagno (Li-Sn), che presentano delle capacità specifiche pari a, rispettivamente, 4000 mA h g⁻¹ e 990 mA h g⁻¹, contro i 370 mA h g⁻¹ della grafite.

Entrambi i materiali in questione non sopportano gli stress introdotti dalle variazioni volumetriche tipiche delle ossidoriduzioni, per questo motivo si sta sviluppando una particolare nanostruttura dell'elettrodo in grado di sopportare i cambiamenti di volume garantendo una lunga vita al materiale attivo.

Un altro materiale in fase di studio avanzato si basa su degli ossidi di Titanio, che però dispongono di una ridotta capacità di immagazzinamento a fronte di una maggior solidità strutturale.

Da un punto di vista catodico, viceversa, l'attenzione è posta su materiali della famiglia olivine, ed, in particolare, sul Litio ferro fosfato LiFePO_4 (LFP) per le seguenti ragioni:

- capacità specifica relativamente alta (170 mA h g^{-1});
- potenziale di lavoro relativo piatto attorno ai 3.5 V;
- costo non eccessivo;
- elevata sicurezza intrinseca dovuta al forte legame covalente P–O che non determina il rilascio di Ossigeno in casi particolari.

In contrasto a questo si ha che tale materiale presenta una resistenza interna elevata, motivo per cui deve essere sottoposto ad un processo di rivestimento con carbone.

3.6.2 Miglioramenti in termini di potenza

Generalmente, per ottenere un miglioramento della velocità di inserzione degli ioni nel catodo, si agisce inserendo omogeneamente del carbone nella struttura interna del materiale attivo, migliorando la conduttività elettronica. Inoltre si devono aggiungere dei leganti in modo che il carbone non si “sfaldi” durante il funzionamento della batteria.

Dal punto di vista della ricerca in atto invece, la soluzione sembra essere l'utilizzo di particolari procedure che consentono di ottenere morfologie (nanofibre e nanotubi) in grado di trasportare ed indirizzare molto più velocemente gli ioni, incrementando il C-rate.

Infine il rivestimento dell'elettrodo con carbone aumenta la capacità cinetica di intercalazione degli ioni, che però si contrappone all'incremento del rapporto superficie-volume che determina una riduzione della densità di corrente (e quindi di potenza) a parità di valore nominale, oltre ad una depressione della capacità di immagazzinamento (a causa dell'ampia superficie) che porta la cella ad incrementare la reattività a livelli non accettabili.

3.6.3 Miglioramenti in termini di sicurezza ed affidabilità

La sicurezza rappresenta indubbiamente l'aspetto più pressante in termini di soluzioni innovative, motivo per cui sono presenti diversi studi. Ciò che tuttavia risulta inevitabile, indipendentemente dalla direzione presa, riguarda la correlazione di natura inversa tra la sicurezza e l'energia immagazzinabile, ovvero all'aumentare di una l'altra diminuisce e viceversa.

Una possibile strategia parallela riguarda l'utilizzo di una combinazione di elettrodi tali da lavorare nel campo di stabilità dell'elettrolita, concentrando quindi gli sforzi non solo sugli elettrodi ma anche sull'utilizzo di un elettrolita più stabile e sicuro.

La conclusione più ovvia porta inevitabilmente, visto che un elettrolita solido garantisce maggiore sicurezza tanto quanto riduce le prestazioni, all'utilizzo di un elettrolita ibrido solido-liquido in cui l'elettrolita standard venga “ingabbiato” in una matrice polimerica producendo una membrana di tipo gelificato. A causa della presenza di una componente liquida tuttavia, è impossibile annullare i rischi di funzionamento [9].

Infine, la soluzione più promettente si riferisce all'utilizzo dei liquidi ionici, di cui già discusso in 3.5.

Capitolo 4

Battery Management System

4.1 Aspetti generali

Indipendentemente dall'applicazione e dalle potenze in gioco, è logico pensare ad un accurato utilizzo dei SdA in modo da prolungarne la vita utile senza inficiare nelle performance richieste dal servizio. Tale ragionamento, benchè sia di norma applicato in ogni processo di progettazione, svolge un ruolo primario nel contesto dell'accumulo elettrochimico per le seguenti ragioni:

- la capacità di fornire servizi in modo così capillare e differenziato rende le batterie uno strumento particolarmente prezioso, a cui va associata la possibilità di “mobilità” dell'energia che la rende, ad oggi, una tecnologia insostituibile. Proprio per queste ragioni è indispensabile che, una volta chiamata in causa, fornisca il servizio richiesto (nei limiti progettuali del contesto) poichè solitamente non presenta dei sistemi di back up che vadano a sopperire ad una sua mancanza. Sotto questi termini è evidente come la sua gestione ottimale sia indispensabile;
- i fenomeni chimico-fisici responsabili del funzionamento e delle sue peculiarità rappresentano, tuttavia, anche il suo punto debole. Le modalità con le quali i processi avvengono, oltre ad essere difficilmente descrivibili analiticamente, determinano le performance e la vita della batteria. Per questo motivo le richieste del sistema in cui l'accumulo è implementato devono essere controllate e gestite;
- la sicurezza del dispositivo, oltre a consentire una maggior durata dello stesso, rappresenta indiscutibilmente una priorità per assicurare l'incolumità ambientale e degli utenti;
- infine, in particolare per le applicazioni ad alta potenza/energia, i costi particolarmente elevati non consentono la sostituzione del dispositivo in intervalli di tempo brevi, motivo per cui una gestione ottimizzata è richiesta. Questo comporta benefici sia per l'investitore sia per la qualità del servizio reso.

L'implementazione e la logica richiesta dal BMS è funzione del servizio che verrà svolto dal SdA. Per applicazioni portatili, come smartphone, tablet e notebook, la gestione richiesta non è particolarmente stringente in quanto le condizioni di funzionamento sono meno stressanti che in altri settori di utilizzo. In questi casi le batterie sono costituite da un numero esiguo di celle, le quali possono non essere controllate singolarmente in quanto difficilmente si possono verificare pesanti squilibri. Le condizioni di funzionamento sono facilmente prevedibili, mentre i bassi costi consentono anche di prevedere una sostituzione della stessa. Tuttavia la sicurezza deve essere garantita, ed, in questo caso, la particolare miniaturizzazione e la difficile ventilazione del dispositivo possono creare problemi.

Viceversa, in applicazioni di potenza ed energia come EV, UPS e servizi di rete, le condizioni di utilizzo non sono facilmente prevedibili e le richieste elettriche comportano importanti stress chimico-fisici e termici. Proprio per le pressanti condizioni di utilizzo si rende necessaria l'implementazione di una logica che ottimizzi contemporaneamente le richieste di rete e che rispetti i vincoli per la salvaguardia del dispositivo. A tutto questo si aggiungono i costi particolarmente elevati e i problemi di sicurezza, motivo per cui è richiesto un monitoraggio continuo cella per cella.

Quindi, ciò che viene richiesto ad un BMS è di assicurare un ottimo uso dell'energia contenuta nella batteria durante lo svolgimento del servizio richiesto, minimizzando i rischi relativi al danneggiamento della stessa e dei dispositivi correlati [10]. Tutto questo viene ottenuto implementando le seguenti funzioni:

- acquisizione dati;
- protezione;
- capacità di determinare e predire lo stato della batteria;
- abilità di controllare i processi di carica e scarica;
- bilanciamento delle celle;
- gestione termica;
- comunicazioni all'utente dello stato della batteria mediante interfaccia;
- comunicazioni tra tutti i componenti interni della batteria;
- allungamento della vita della batteria.

4.2 Architettura e layer di funzionamento

Da un punto di vista hardware le funzionalità possono essere implementate secondo due strutture differenti:

- sistema centralizzato;
- sistema distribuito;

La configurazione centralizzata trova solitamente collocazione nei dispositivi portatili, in quanto il suo punto di forza è dato dalla compattezza assicurata dal contenere tutte le sue componenti nello stesso circuito. Questo comporta una semplificazione hardware e minori costi, a scapito della capacità di gestire batterie costituite da numerosi moduli.

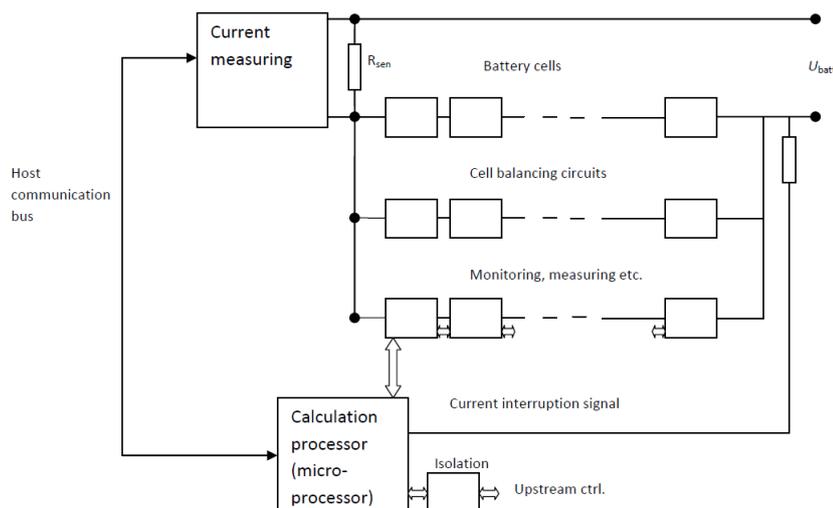


Figura 4.1: Implementazione BMS distribuito per la gestione di più celle

Infatti, per applicazioni più esigenti, in cui le prestazioni e i costi crescono, viene implementata una struttura distribuita nella quale i diversi componenti, sparsi all'interno del SdA, svolgono una funzione specifica, comunicando poi, secondo per secondo, i dati rilevati e i calcoli effettuati. Questo consente

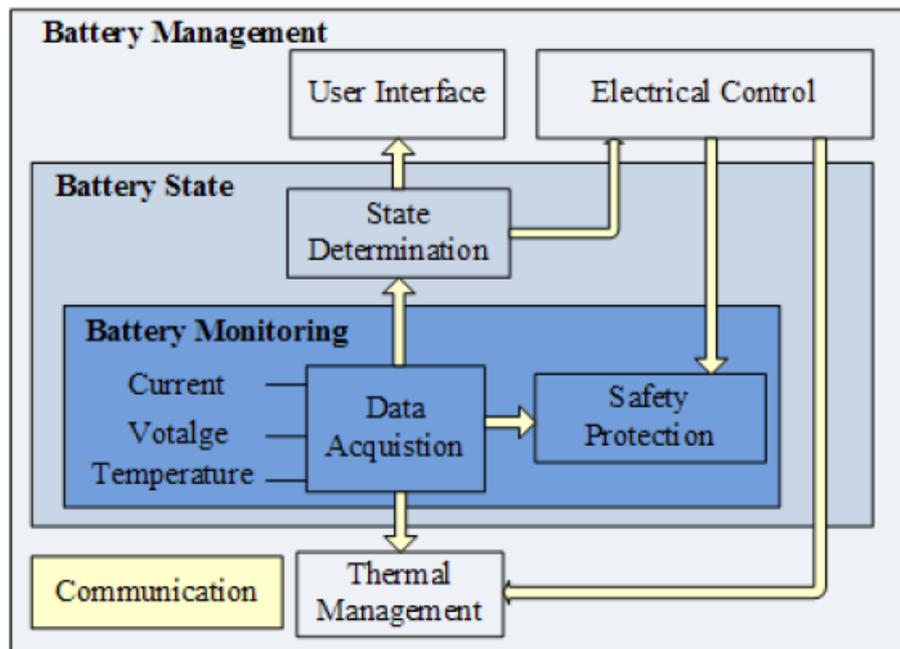


Figura 4.2: Schema della logica interna BMS

un controllo specifico per ogni grandezza fisica in gioco e per ogni componente elementare. Per questo viene utilizzata nelle applicazioni di potenza ed energia, secondo lo schema di figura 4.1. Tutte le modalità citate si basano comunque su una modalità di funzionamento generale standard, come evidenziato dalla figura 4.2. Come si può notare il sistema di comunicazione consente lo scambio dati in tempo reale tra i diversi layer, partendo dal sistema di acquisizione dati mediante una vasta sensoristica. Questi dati vengono immediatamente confrontati con i limiti delle grandezze elettriche consentite al fine di proteggere la batteria, per poi essere inviati nel settore che determina lo stato generale del dispositivo. Tutto questo è regolato da un layer superiore che rappresenta l'intelligenza vera e propria del sistema.

4.3 Bilanciamento celle

Il sistema di bilanciamento delle celle rappresenta un'importante funzione in tutte quelle batterie costituite da più moduli che, a loro volta, sono composti dalla combinazione serie-parallelo di un elevato numero di celle.

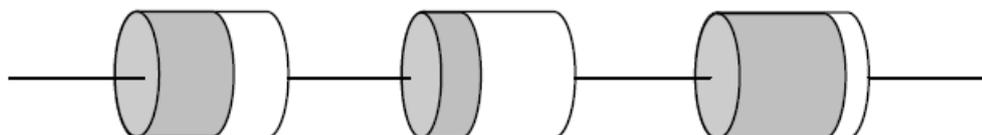


Figura 4.3: Esempio di carica disomogenea tra celle

Ciò che viene richiesto al BMS è la capacità di trasferire carica dalle celle a tensione maggiore verso le celle che, per svariate ragioni, presentano ai loro capi una tensione minore. Le principali cause di questo squilibrio sono da ricondurre all'aspetto puramente costruttivo delle celle, le quali assumono caratteristiche elettriche comprese nella tolleranza prevista di costruzione. Un altro fattore determinante è la temperatura assunta dalle celle, in quanto questa va a variarne l'impedenza interna provocando la

circolazione di correnti squilibrate tra i diversi rami in parallelo, provocando una possibile deriva del meccanismo. Infine, la circolazione di correnti di modulo diverso comporta una variazione disomogenea del SOC tra le celle, come mostrato in figura 4.3.

Come conseguenza di questi fenomeni si ha un'usura differente tra le parti interne della batteria, causando, a lungo andare, il deperimento delle prestazioni e la riduzione della vita utile oltre che una ridotta capacità di svolgere il servizio per il quale la batteria è stata installata.

Per questo motivo sono stati sviluppati i seguenti sistemi di bilanciamento:

- *Passivo*: questo sistema di bilanciamento prevede che ogni cella sia dotata di un resistore posto in parallelo che va a bypassare la cella nel momento in cui quest'ultima presenti uno stato di carica diverso dalle celle poste in serie. L'esempio in figura 4.4 riporta una situazione di forte sbilanciamento dell'ultima cella della serie, la quale viene bypassata interrompendone la carica e permettendo alle altre celle della serie di raggiungere il medesimo SOC. La presenza dei resistori (di ugual valore) consente inoltre di distribuire la tensione fra i diversi elementi anche quando una o più celle vengono escluse, evitando possibili sovratensioni e sovracorrenti alle celle attive.

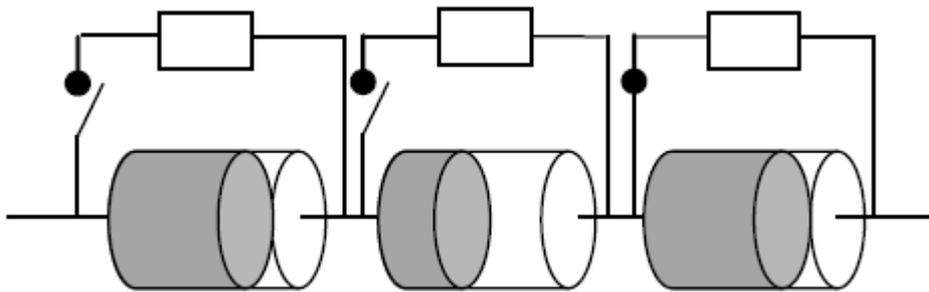


Figura 4.4: Esempio di bilanciamento passivo

I punti di forza di questo sistema sono la facilità di implementazione e i costi contenuti che lo rendono largamente utilizzato dove non sono richieste performance o standard particolarmente elevati. Questo perchè, basando il suo funzionamento su elementi resistivi, presenta l'effetto indesiderato di incrementare la temperatura delle zone limitrofe a causa della produzione di calore (talvolta si rende indispensabile l'utilizzo di un sistema di raffreddamento). Per questo motivo viene utilizzato solo in fase di carica, in modo da tenere elevato il rendimento della batteria dove principalmente richiesto, ovvero in fase di scarica;

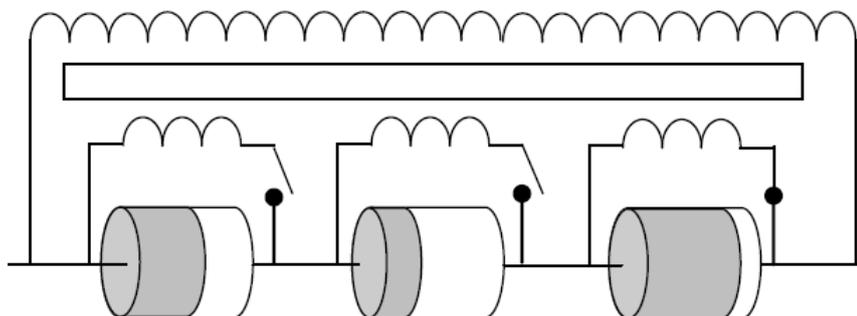


Figura 4.5: Esempio di bilanciamento attivo

- *Attivo*: la figura 4.5 mostra come questo sistema di bilanciamento sia costituito da un microcontrollore che monitora e gestisce il convertitore elettronico (ad esempio un convertitore flyback)

associato ad ogni cella. In questo modo è possibile, istante per istante, bilanciare la carica delle diverse celle in modo da renderla omogenea. Questo evita la prematura scarica delle celle in squilibrio, assicurando una maggior durata della batteria in fase di scarica.

Il controllo attivo consente il bilanciamento sia nelle fasi di scarica sia in quelle di carica, garantendo quindi performance migliori, a scapito di un costo di implementazione superiore del bilanciamento passivo. Tuttavia, per garantire alti standard, è indispensabile attuare una logica di controllo degli switch dei convertitori in modo tale da minimizzarne le perdite in fase di commutazione.

Da una comparazione tra i due sistemi di bilanciamento si è riscontrato che, il bilanciamento attivo, assicura una riduzione delle perdite compresa tra lo 0.84 % e il 2.3 % rispetto il bilanciamento passivo. Da un punto di vista tecnico i vantaggi del sistema attivo su quello passivo sono evidenti, tuttavia sarà il tipo di servizio richiesto (e la disponibilità economica) a determinare l'implementazione dell'uno o dell'altro [11].

4.4 Gestione dei processi di carica-scarica

I cicli di scarica e carica del SdA presentano numerose criticità a cui prestare attenzione. Innanzitutto ogni famiglia di batterie (e quindi anche le Lito) presentano peculiarità specifiche in base agli elementi attivi presenti e ai criteri progettuali secondo i quali è stata prodotta. Per questo motivo è indispensabile conoscere le diverse attitudini allo stress in termini di correnti massime continuative ed impulsive di carica-scarica, di tensioni limite e di range di lavoro relativo al SOC.

Il superamento delle condizioni limite di lavoro determina un rapido decremento delle prestazioni della batteria, oltre ad una "aspettativa" di vita inferiore anche a causa di possibili problemi di sicurezza. Tutto questo non può essere ammesso indipendentemente dal tipo di servizio fornito, motivo per cui, anche se a diversi livelli, viene sempre implementata una logica rivolta alla corretta gestione dell'accumulo durante il suo funzionamento.

Il BMS, inoltre, deve gestire anche le modalità di carica e di "sospensione" della batteria in base alle condizioni presenti nella rete in cui il dispositivo è presente. In particolare, il ciclo di carica completo prevede una prima fase a corrente costante (CC), seguita da una parte finale particolarmente lunga a tensione costante (CV). Questo permette la corretta e completa carica, tuttavia nel caso in cui la seconda parte non possa essere eseguita, è preferibile evitare di forzare la carica dell'accumulatore in quanto provocherebbe un danneggiamento nella struttura chimico-fisica interna.

Infine, durante i periodi di inattività, il dispositivo viene mantenuto attivo mediante una carica definita di "mantenimento", la quale evita fenomeni di autoscarica (seppur limitati per la tecnologia in discussione) e mantiene il dispositivo pronto all'uso.

4.5 Stimatori

L'anello debole dei BMS è costituito dai stimatori, i quali rappresentano una preziosa fonte di conoscenza della batteria, secondo la quale stabilire le modalità di gestione della stessa per consentire un'adeguata risposta del SdA al servizio richiesto. In particolare, lo stato di carica, lo stato di salute e lo stato di vita presentano un'elevata difficoltà di "misurazione", nel senso che non sono grandezze direttamente misurabili ed universalmente definite, ma necessitano di algoritmi di stima basati su diverse misurazioni interne e tarati su riferimenti peculiari dell'applicazione.

Per questo motivo verrà proposta una breve analisi degli algoritmi solitamente utilizzati per la stima di questi parametri.

4.5.1 State Of Charge

Lo stato di carica indica la carica rimasta disponibile nella batteria, fornendo quindi un'indicazione vitale durante il funzionamento. I fenomeni che influenzano la stima di questo parametro sono particolarmente vasti, in quanto spaziano dalle variazioni chimiche degli elementi attivati, all'invecchiamento dei materiali e dalle condizioni di carico e funzionamento.

Infatti è certo che la carica massima erogabile dalla batteria sia costante indipendentemente dalla corrente richiesta dal carico, tuttavia è vero che per ottenere tale carica è necessario eseguire la parte finale della scarica a tensione costante, cosa che raramente può essere effettuata durante il funzionamento. Questo comporta che la carica trasferibile durante il servizio vari in base alle condizioni di lavoro, tuttavia il comportamento che descrive questo fenomeno è altamente non lineare.

Questo rende evidente come sia estremamente difficile implementare una logica che determini in modo definito lo stato di carica, motivo per cui, negli anni, sono stati sviluppati diversi algoritmi. Di seguito si riportano i principali:

- *Coulomb counting*: è l'algoritmo più semplice impiegato e calcola la capacità della batteria integrando la corrente circolante. La carica calcolata viene poi confrontata con un riferimento fisso che è dato dalla massima capacità estraibile dalla batteria. Tale dato, benché sia effettivamente costante, non tiene conto del rendimento coulombiano e del capacity fading, che quindi devono essere appositamente implementati per raggiungere una buona accuratezza. Inoltre, la stima di un parametro mediante integrazione comporta ad una serie di errori comuni, come la deriva e la perdita del riferimento, motivo per cui deve essere ricalibrato (solitamente mediante misura della tensione a vuoto quando possibile) e deve essere presente un meccanismo di riduzione degli errori di misura. Il tutto deve essere fatto in real time;
- *Kalman Filter (KF)*: è un algoritmo che viene frequentemente usato nell'ambito dei veicoli elettrici ibridi. In particolare, la versione estesa (EKF), consente di trattare questo fenomeno fintantoché l'espansione in serie di Taylor è in grado di rappresentare il sistema non lineare (a differenza dell'algoritmo tradizionale che è valido per fenomeni lineari). Questo sistema non è in grado di effettuare una buona stima di processi altamente non lineari;
- *Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)*: i parametri dell'impedenza interna della batteria vengono introdotti in una rete neurale in grado di stimare lo stato di carica. Questo algoritmo è caratterizzato da alti costi, ingombri rilevanti e particolare sensibilità alle misurazioni;
- *Support Vector Machine (SVM)*: questa logica utilizza sia un metodo di classificazione sia di regressione trasformando il problema da non lineare in poche dimensioni a lineare in molte dimensioni. La peculiarità è data dall'assenza del circuito modellizzante la batteria (mentre è necessario in tutti i precedenti), a scapito di diversi problemi di settaggio dei parametri [12].

4.5.2 State Of Health

La definizione generalmente adottata dello stato di salute riguarda le condizioni di salute (fisiche) della batteria e della sua capacità di fornire specifiche prestazioni che vengono comparate con quelle di una batteria nuova. Come si può notare, tale definizione non fornisce elementi di riferimento o di paragone assoluti, motivo per cui solitamente questo parametro viene "tarato" su misura applicazione per applicazione.

In via del tutto generale viene fissato come parametro indicativo della perdita di salute, che determina l'incapacità del SdA di continuare a fornire il servizio richiesto, la riduzione della capacità all' 80 % del valore iniziale. Ovviamente tale indicazione è abbastanza superficiale, motivo per cui sono stati sviluppati algoritmi in grado di ottenere una stima del SOH mediante dei parametri di riferimento, come il capacity fade ed il power fade. Questi due termini aumentano il loro valore in corrispondenza di un incremento dell'impedenza interna della batteria, che fornisce quindi una indicazione del decadimento della salute fisica del dispositivo [12].

4.5.3 State Of Life

Lo stato di vita (SOL) è conosciuto anche sotto il nome di vita rimasta utile (RUL). Questo parametro permette di effettuare delle procedure di prevenzione e manutenzione della batteria in modo da allungare il servizio della stessa. Come nel caso precedente, non esistono riferimenti assoluti che ne consentano una facile implementazione. Per questo motivo sono stati sviluppati diversi algoritmi che ricavano una stima del SOL mediante l'andamento di alcuni parametri interni della batteria [12].

4.6 Criticità e sviluppi futuri

Da un punto di vista tecnico i sistemi di gestione delle batteria sono particolarmente recenti e hanno trovato nella improvvisa “ascesa” delle auto elettriche (in particolare quelle ibride, ma non solo) una fonte di richiesta e spinta in termini economici e di ricerca. Per questo motivo si stanno effettuando numerosi test prova in modo da verificare la bontà di quanto sviluppato a livello teorico, e di rendere il tutto commercializzabile.

Infatti la sfida è data dalla capacità di implementare algoritmi più complessi ed accurati, già ora presenti a livello sperimentale, in grado di supportare gli stress caratteristici di un funzionamento in un ambiente reale e non controllato come quello dei laboratori di ricerca.

La debolezza degli algoritmi non è l’unica sfida in atto, in quanto la diffusione dell’accumulo elettrochimico per i servizi di rete ha imposto una maggior accuratezza e capacità di gestione dei dispositivi, in quanto la complessità del SdA e la necessità di assicurare prestazioni ottimizzate rappresentano un nuovo sviluppo nel settore.

Un nuovo filone di ricerca, nel campo delle auto elettriche con possibile interesse per i servizi di rete, è il Prognostics and Health Management (PHM). L’algoritmo rappresenta una strategia costituita da particolari tecnologie e metodologie basate sulla raccolta dati in real-time (tra cui SOC, SOH e SOL), consentendo quindi al sistema di prendere le migliori decisioni riguardanti la gestione della batteria ed il controllo di possibili criticità specifiche risultanti dall’elaborazione dei dati.

Per quanto riguarda l’impossibilità di “verificare” le reazioni interne e le variazioni di carico, si sta pensando di combinare una tecnologia di regressione con un modello state-space. L’utilizzo di un approccio con regressione consente di utilizzare i dati estrapolati durante i test in laboratorio per creare una curva di deperimento della specifica batteria, per poi essere confrontata istante per istante con i dati ottenuti in real time e creare una predizione dello stato complessivo del sistema [12].

Questo è solo un esempio particolarmente semplice ma efficace e facilmente implementabile, esistono tuttavia algoritmi più complessi in fase di studio, che, una volta resi implementabili, assicureranno prestazioni particolarmente elevate, dando ulteriore spinta all’utilizzo dei sistemi di accumulo nelle applicazioni ad alta potenza ed energia.

Capitolo 5

Modellistica

La continua ricerca di nuove soluzioni atte ad incrementare le prestazioni dello storage va di pari passo con lo sviluppo di una modellistica che sia in grado di simularne le dinamiche interne, in modo da fornire una “previsione” dello stato fisico e delle grandezze elettriche caratteristiche al variare delle condizioni di lavoro. L'utilità che può avere un modello equivalente è determinante per una serie di ragioni:

- consente di verificare il comportamento di una batteria durante una simulazione del servizio che le sarà richiesto poi nella pratica. Questo permette di determinare, innanzitutto, se la tipologia di accumulo scelta è la migliore, inoltre evidenzia le possibili problematiche nate dall'interazione di due o più sistemi. Infine, benchè possa essere trascurato, consente di effettuare dei test di verifica delle prestazioni senza dover spostare lo storage (che in molti casi è particolarmente ingombrante);
- i modelli estremamente precisi (ovvero, come vedremo, quelli elettrochimici), forniscono un supporto notevole nella fase di ricerca ed ottimizzazione dei materiali e delle configurazioni geometriche;
- la stima dello stato fisico e delle grandezze elettriche caratteristiche, non solo istante per istante ma anche come previsione di possibili cicli di lavoro, è determinante nell'effettuare una corretta gestione della batteria mediante il BMS, che sfruttando tali dati consente di ottimizzare le prestazioni e, al contempo, garantire modalità di funzionamento che ne preservino l'integrità.

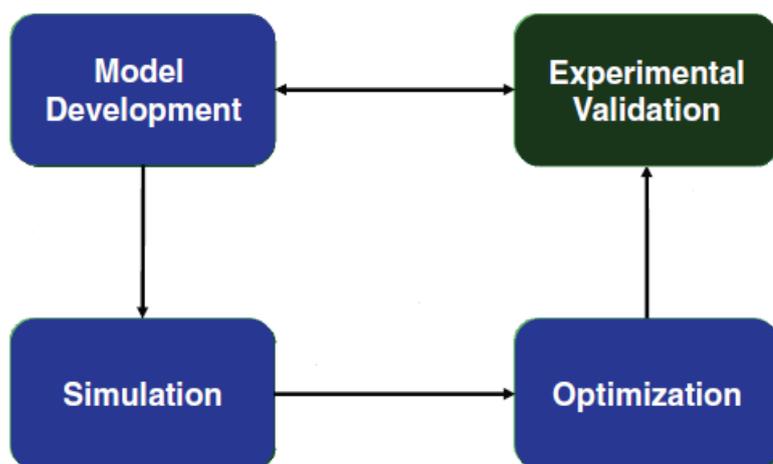


Figura 5.1: Schema logico generalmente adottato per la creazione di un modello che supporti lo sviluppo tecnologico della batteria

Una volta evidenziata l'importanza nello sviluppo di un modello equivalente, è necessario sottolineare come tale processo segua una serie di passaggi logici al fine di ottimizzare il risultato conseguito, evitando che il modello sviluppato risulti impossibile da implementare e contemporaneamente fornendo indicazioni utili per lo studio della batteria stessa. Di seguito si fornisce un'estensione dei passaggi descritti in figura 5.1, i quali risultano essere necessari al fine di garantire il mutuo supporto tra il modello e lo sviluppo tecnologico della batteria:

- identificazione dei parametri essenziali coinvolti nella cinetica del processo;
- modellizzazione del capacity fading;
- identificazione di possibili processi sconosciuti;
- incremento della vita cambiando le condizioni operative;
- incremento della vita cambiando le proprietà dei materiali attivi;
- incremento della densità di energia modificando i parametri progettuali;
- utilizzo di un elettrolita che migliori le performance;
- elaborazione di un estimatore di stato;
- realizzazione di un modello predittivo di controllo che comprenda la stima in real time del SOC e SOH;
- miglioramento dei protocolli di simulazione per ottimizzare il tempo di simulazione.

In letteratura sono presenti numerosi modelli che si sono sviluppati nel corso degli ultimi decenni, in quanto, come detto in precedenza, possono essere creati per scopi ampiamente diversi tra loro. Esistono infatti modelli interamente basati sulla descrizione dei fenomeni chimico-fisici caratteristici dei processi di carica/scarica, i quali risultano estremamente precisi ma presentano tempi di calcolo elevati e necessitano di una conoscenza particolarizzata della struttura interna e dei materiali usati. Viceversa, esistono modelli facilmente implementabili a partire da scarse informazioni iniziali che però forniscono dati poco precisi.

In generale si può dire che, ad oggi, è impossibile ottenere una modellizzazione accurata senza introdurre difficoltà computazionali, come è impossibile il viceversa. Per questo motivo è indispensabile conoscere al meglio i pro e i contro dei principali modelli, in modo da poter utilizzare il più funzionale in base all'utilizzo previsto [13].

Benchè i modelli siano estremamente numerosi e vari, essi possono essere catalogati nelle seguenti quattro categorie:

- *Modelli elettrochimici;*
- *Modelli analitici;*
- *Modelli stocastici;*
- *Modelli circuitali.*

5.1 Modelli elettrochimici

Questa tipologia di modello si pone l'obiettivo di incorporare la cinetica elettrochimica ed i fenomeni di trasporto interni alla cella in modo da ottenere una previsione accurata del comportamento della batteria. Di seguito vengono riportati i principali modelli in ordine crescente di complessità.

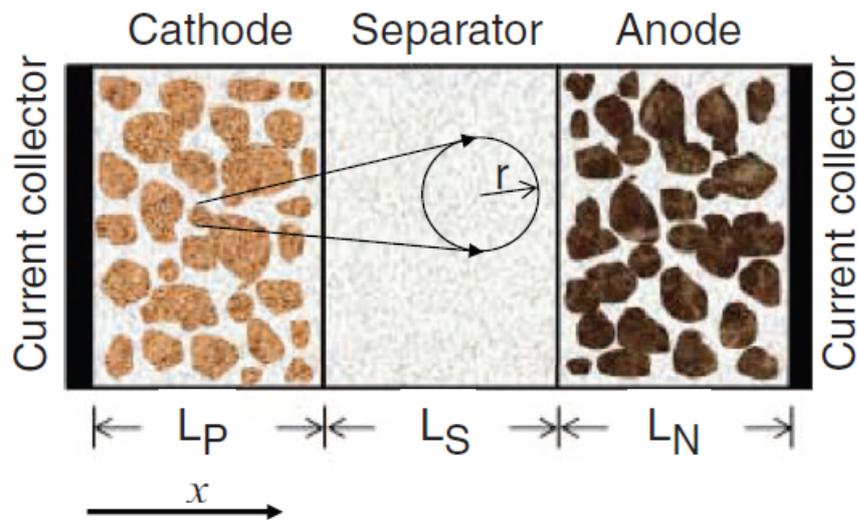


Figura 5.2: Rappresentazione di una cella in un modello P2D

5.1.1 Single-Particle Model (SPM)

Rappresenta un modello che descrive, in via semplificata, i fenomeni di diffusione ed intercalazione riferiti ad una singola particella, considerando il catodo e l'anodo come una semplice espansione della particella in questione fino al raggiungimento della medesima superficie esterna. In questo modo vengono trascurati gli effetti del potenziale e della concentrazione tra le particelle interne agli elettrodi. Per queste considerazioni il modello viene simulato velocemente, ma solo sotto strette condizioni, come ridotte correnti di scarica ed elettrodi di piccolo spessore.

5.1.2 Ohmic porous-electrode model

In questo caso l'evoluzione comporta la presa in considerazione del potenziale sia degli elettrodi sia dell'elettrolita, trascurando però la variazione spaziale della concentrazione. Inoltre il modello permette una rappresentazione lineare, di tafel ed esponenziale della cinetica delle particelle, con l'aggiunta di alcuni particolari fenomeni come la dipendenza della conducibilità dalla porosità degli elettrodi.

5.1.3 Pseudo-Two-Dimensional Model (P2D)

Questo modello risulta essere un'espansione del precedente considerando, in aggiunta, la diffusione in tutti gli elementi attivi della cella e la cinetica descritta da Butler-Volmer. Come riportato in figura 5.2, il modello descrive il comportamento interno degli elettrodi, dell'elettrolita, del separatore e dei collettori di corrente basandosi sulla teoria a soluzione concentrata.

Si possono ottenere stime della concentrazione e del potenziale dell'elettrolita, degli elettrodi e del separatore con simulazioni che vanno dai pochi secondi ai diversi minuti.

Può essere utilizzato come riferimento per ulteriori sviluppi diretti all'ottenimento di una migliore rappresentazione dei fenomeni interni [13].

5.2 Modelli analitici

Questa tipologia punta a modellizzare con poche equazioni il funzionamento di una cella, privilegiando quindi la velocità di elaborazione a scapito di una minore correlazione fisica con l'oggetto in esame. Anche in questo caso verranno analizzate le principali varianti.

5.2.1 Peukert's law

Il modo più semplice per predire la vita di una batteria è utilizzare la legge di Peukert, la quale lega, in modo non lineare, il tempo di vita (L) e la corrente di scarica (I) secondo:

$$L = \frac{a}{I^b} \quad (5.1)$$

dove a (di valore prossimo alla capacità) e b (poco maggiore di uno) sono due costanti che si ottengono in via sperimentale.

Questa legge è valida solo per regimi di scarica a rate costante, il quale rappresenta un importante limite per questo modello. Per questo motivo la legge è stata estesa per simulare processi di scarica non costanti semplicemente considerando la scarica come la sommatoria di una serie di processi (individuabili) a corrente costante, ottenendo la seguente relazione:

$$L = \frac{a}{\left[\frac{\sum_{k=1}^n I_k (t_k - t_{k-1})}{L} \right]^b} \quad (5.2)$$

Da questa equazione si può notare che il denominatore non è altro che il valore medio della corrente nell'intervallo (costituito da una serie di sottointervalli k) $t = L$, inoltre non è possibile isolare L in quanto compreso nel termine n -esimo della sommatoria.

Entrambe le versioni non tengono conto del recovery effect.

E' possibile avere una facile stima dell'errore commesso confrontando i risultati ottenuti da questo modello con i risultati offerti dal programma di simulazione Dualfoil, il quale viene considerato un modello di riferimento (in assenza di dati sperimentali), visto che attua una modellizzazione estremamente profonda e complessa della cella (richiede numerosi parametri fisici interni). Nel caso di carico costante l'errore medio è pari al 14% (con un massimo del 43%), mentre con carico variabile l'errore di stima sale ancora. Bisogna inoltre evidenziare che l'approssimazione peggiora anche all'aumentare del rate di scarica, motivo per cui si utilizza solo per bassi valori di corrente richiesta.

5.2.2 Rakhmatov and Vrudhula

Si basa sulla descrizione analitica del processo di diffusione monodimensionale dei materiali attivi, ben descritta dalla legge di Fick. Se a tale legge, si aggiungono determinate condizioni al contorno usando la legge di Faraday, si ottiene la soluzione analitica mediante la trasformata di Laplace, la quale fornisce la seguente relazione che lega a , b ed L :

$$a = \int_0^L \frac{i(t)}{\sqrt{L-t}} d\tau + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^L \frac{i(t)}{\sqrt{L-t}} e^{\left(-\frac{b^2 m^2}{L-t}\right)} d\tau \quad (5.3)$$

dove $a = FAC^* \sqrt{\pi D} \rho(L) v$, $b = \frac{w}{\sqrt{D}}$, C^* è la concentrazione a $t = 0$ e $\rho(L) = 1 - \frac{C(0,L)}{C^*}$.

Considerando un processo di scarica a rate fissato e diverse altre approssimazioni, è possibile semplificare l'equazione (5.3) ottenendo la seguente espressione:

$$a = 2I\sqrt{L} \left(1 + 2 \sum_{m=1}^{10} \left(e^{\left(-\frac{b^2 m^2}{L}\right)} - \frac{\pi e^{\left(-\frac{b^2 m^2}{L}\right)}}{\pi - 1 + \sqrt{1 + \pi \frac{L}{b^2 m^2}}} \right) \right) \quad (5.4)$$

in cui a e b devono essere conosciuti (mediante dati sperimentali) per effettuare la stima.

A seguito del confronto con i dati di simulazione ottenuti con Dualfoil, questo modello presenta un errore medio pari al 3% (con un massimo pari al 6%) con rate fisso, mentre a carico variabile l'errore medio scende all' 1% (con un massimo del 2.7%).

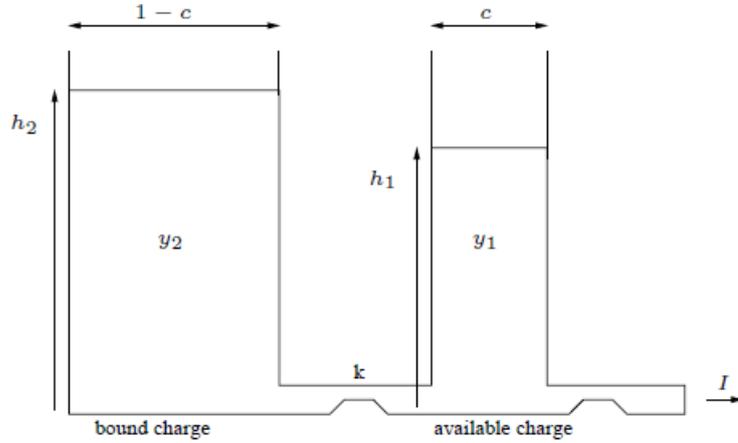


Figura 5.3: Principio di funzionamento del modello KBM

5.2.3 Kinetic Battery Model (KBM)

Questo modello si basa sulla cinetica chimica delle reazioni di ossidoriduzione e risulta essere particolarmente intuitivo. Infatti il modello, rappresentato in figura 5.3, prevede la presenza di un serbatoio adibito all'erogazione delle cariche durante il funzionamento (*available-charge well*) e di un serbatoio che invece può solamente fornire le cariche all'altro serbatoio (*bound charge*), simulando quindi il recovery effect.

L'idea di base è estremamente semplice, infatti durante il funzionamento solo il primo serbatoio si scarica, quando poi tale processo viene interrotto l'altro serbatoio provvederà alla ricarica del primo mediante una corrente di scarica che è funzione della differenza di carica contenuta nei due serbatoi (e di un parametro k).

La coppia di equazioni differenziali (5.5), indica la variazione di carica dei due serbatoi, in cui si evidenzia come il flusso tra i due serbatoi avvenga fintantochè è presente una differenza di carica contenuta. Esse vengono poi risolte usando la trasformata di Laplace.

$$\begin{cases} \frac{dy_1}{dt} = -I + k(h_2 - h_1) \\ \frac{dy_2}{dt} = -k(h_2 - h_1) \end{cases} \quad (5.5)$$

con $y_1(0) = cC$ e $y_2(0) = (1-c)C$, $h_1 = \frac{y_1}{c}$ e $h_2 = \frac{y_2}{(1-c)}$, dove C è la capacità totale della batteria.

Questo modello stima anche l'andamento della tensione ai capi della cella mediante un semplice generatore di tensione seguito dalla resistenza interna:

$$V = E - R_0 I \quad (5.6)$$

Il generatore di tensione, a sua volta, tiene conto della tensione fornita quando la cella è totalmente carica, a cui si aggiunge un secondo ed un terzo termine, i quali modellano, rispettivamente, la variazione lineare iniziale e la variazione della tensione durante la scarica:

$$E = E_0 + AX + \frac{CX}{D-X} \quad (5.7)$$

dove X è la carica rimossa normalizzata.

Il modello, nella sua totalità, può essere usato solo per SdA che presentano un andamento della tensione in fase di scarica piatto (come le batterie al Piombo), quindi non è usufruibile per le batterie al Litio. La sola parte relativa alla modellizzazione del processo di scarica dei serbatoi è, invece, una descrizione generale del funzionamento elettrochimico di ogni accumulatore, quindi può essere usata per qualsiasi tecnologia [14].

5.3 Modelli stocastici

Anche in questo caso la rappresentazione dei processi di carica/scarica e del recovery effect rimane particolarmente astratta, in quanto viene definita da una catena discreta di Markov dotata di $N + 1$ stati di carica, in cui N rappresenta la massima carica disponibile. Ogni unità di carica corrisponde alla quantità di energia necessaria per trasmettere il pacchetto dati, essendo questo modello sviluppato in ambito tlc.

5.3.1 Modello stocastico base

In questa versione elementare in ogni step temporale un'unità di carica ha la probabilità $a_1 = q$ di essere consumata o, conseguentemente, una probabilità $a_0 = 1 - q$ di essere recuperata. La batteria è scarica quando $N = 0$ oppure quando sono state scaricate T unità, con $T > N$.

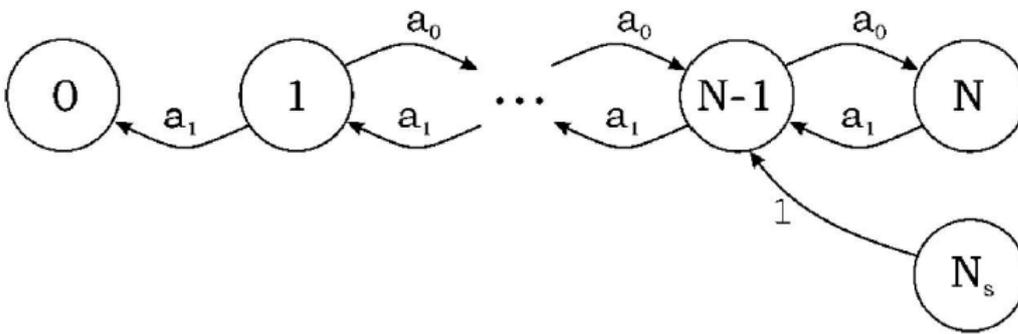


Figura 5.4: Modello stocastico base

La peculiarità del modello rappresentato in figura 5.4 è quella di consentire un facile calcolo dell'energia scambiata mediante il conteggio dei pacchetti trasmessi m_p , tuttavia la sua semplicità non permette di descrivere i processi reali, in quanto il tasso di recupero non è costante e la corrente di scarica è tempo variante.

5.3.2 Modello stocastico esteso

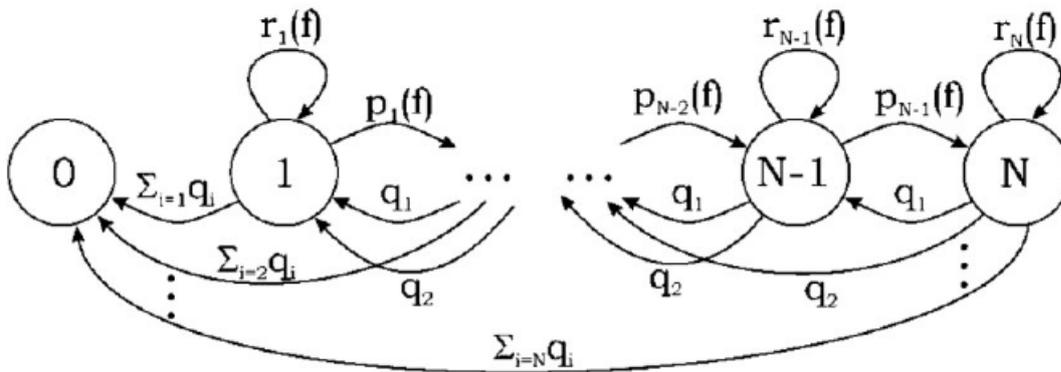


Figura 5.5: Modello stocastico esteso

Ciò che è stato introdotto al modello base è la dipendenza del recovery effect dallo stato di carica della batteria (più la carica presente è ridotta inferiore è la probabilità di recupero) e dal numero di fase f che è una funzione del numero di unità di carica già consumate. All'aumentare di f diminuisce la probabilità di recupero.

Ulteriori migliorie riguardano la possibilità di consumare più unità nel medesimo step temporale, simulando così la scarica ad alto rate, come anche la probabilità nulla di scarica, ovvero che non avvenga nè carica nè scarica.

Il modello, le cui fasi sono rappresentate in figura 5.5, può simulare diversi profili di carico andando ad impostare opportunamente le probabilità contenute in una transizione, fornendo una buona risposta in termini di simulazione del recovery effect, tralasciando però la durata residua di carico. Per questo motivo è particolarmente indicato per processi impulsivi.

5.3.3 Modello stocastico su base KBM

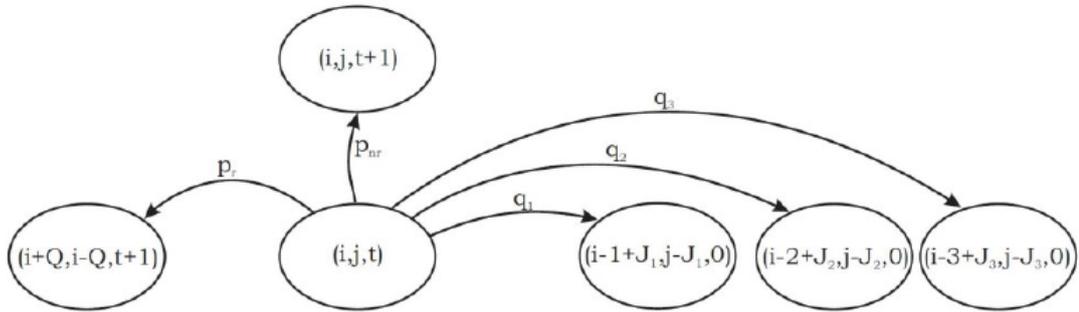


Figura 5.6: Modello stocastico sviluppato a partire dal modello KBM

In questo caso si utilizza il modello KBM come base, per poi introdurre delle modifiche che vadano a migliorarne le performance. Una prima miglioria è il parametro b introdotto nelle equazioni differenziali precedentemente espote, il quale rappresenta la dipendenza dalla carica residua della velocità del recovery effect (equazione (5.8)). Un'ulteriore modifica riguarda la possibilità di non avere alcun processo di carica/scarica nei tempi morti.

$$\begin{cases} \frac{dy_1}{dt} = -I + kb(h_2 - h_1) \\ \frac{dy_2}{dt} = -kb(h_2 - h_1) \end{cases} \quad (5.8)$$

Il comportamento delle batterie viene sempre descritto mediante il processo di Markov discreto, in cui gli stati della catena sono espressi da tre parametri: i che rappresenta la carica disponibile del serbatoio, j che parametrizza la carica interna e il tempo t .

$$(i, j, t) \rightarrow \begin{cases} (i + Q, j - Q, t + 1) \\ (i, j, t + 1) \\ (i - I + J, j - J, 0) \end{cases} \quad (5.9)$$

Le prime due equazioni in (5.9) si riferiscono agli step temporali a corrente nulla in cui si ha probabilità p_r di recuperare Q unità di carica e probabilità p_{nr} di recupero nullo (entrambe le probabilità dipendono dalla durata del tempo morto).

La terza equazione descrive il processo di carica costituito da due attività contemporanee, una riguarda la probabilità q_i che I unità di carica vengano assorbite dal serbatoio di carica disponibile, mentre l'altra descrive le J unità di carica che si trasferiscono dal serbatoio di carica interna a quello della carica disponibile.

Lo schema generale di figura 5.6 mostra quanto detto fino ad ora, tuttavia è importante sottolineare come questo modello non sia in grado di simulare completamente un profilo reale di utilizzo, senza dimenticare la mancanza di informazioni sulla tensione [8].

5.4 Modelli circuitali

Questa tipologia di modelli si affidano ad una rappresentazione elettrica dei comportamenti della batteria, mediante dei componenti ideali interconnessi in modo tale da formare un circuito equivalente. Si interpongono tra l'elevata accuratezza e pensantezza di elaborazione dei modelli elettrochimici (usati principalmente come supporto allo sviluppo della batteria stessa) e i modelli analitici che sono particolarmente semplici e facili da implementare, tuttavia applicabili solo sotto vincoli limitanti.

L'utilizzo di un modello rappresentato da un circuito elettrico determina una diretta e facile implementazione dei SdA all'interno dei simulatori di rete ad oggi usati, garantendo quindi un immediato riscontro delle problematiche originate dall'interazione dei sistemi in gioco.

5.4.1 Modello R_{INT}

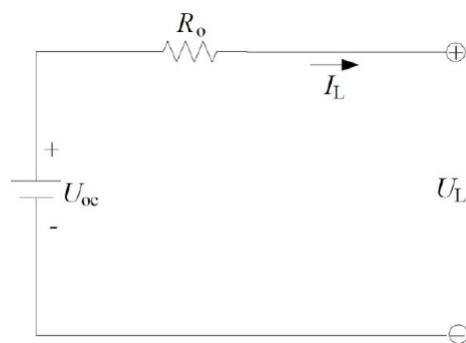


Figura 5.7: Modello R_{INT}

Questo semplice modello è costituito da un generatore ideale di tensione, che rappresenta la tensione a vuoto della cella, a cui viene connesso in serie una resistenza, come si può vedere in figura 5.7. L'equazione che ne descrive il comportamento è la seguente:

$$U_L = U_{OC} - R_0 I_L \quad (5.10)$$

Affinchè la modellizzazione non sia troppo grezza, è necessario che i parametri dell'equazione presentino una dipendenza dal SOC, dal SOH e dalla temperatura.

5.4.2 Modello dinamico

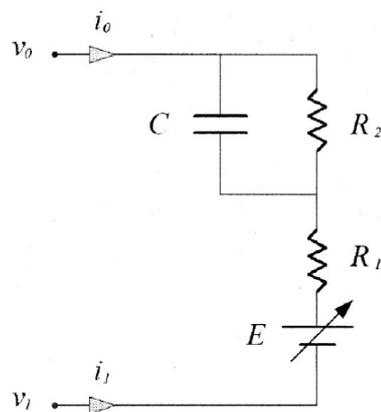


Figura 5.8: Modello dinamico

Il modello rappresentato in figura 5.8 presenta tutti parametri costanti ad eccezione del generatore di tensione, il quale ha il compito di rappresentare il comportamento non lineare della batteria, in funzione del SOC e della temperatura.

La determinazione della tensione imposta dal generatore di tensione segue i seguenti passi:

- Si prende come riferimento l'andamento della tensione di cella (in funzione della capacità scaricata) ottenuta con una scarica continua a rate costante (di solito si preferisce usare la corrente nominale);
- Si identifica la dipendenza del SOD dalla corrente mediante un parametro $\alpha(i)$, che rappresenta il rapporto tra la capacità scaricabile alla corrente di riferimento e la capacità scaricabile ad una generica corrente. Il tutto alla temperatura di riferimento presente al primo passo;
- La dipendenza del SOD dalla temperatura viene introdotta mediante il parametro $\beta(T)$ definito come il rapporto tra la capacità scaricabile alla temperatura di riferimento e la capacità scaricabile ad una temperatura generica;
- Si introduce il termine $\Delta E(t)$ per considerare la variazione del potenziale di equilibrio con la temperatura.

I valori di $\alpha(i)$, $\beta(T)$ e $\Delta E(T)$ vengono ricavati mediante interpolazione all'interno della look up table in caso di processi di carica/scarica generici.

Di seguito si riportano le equazioni descrittive del comportamento elettrico (le prime quattro) e termico (l'ultima) del sistema.

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{[i(t),T(t),t]} = v_{[i(t),T(t),t]} - R_{int}i(t) \\ v_{[i(t),T(t),t]} = \sum_{k=0}^n c_k SOD_{[i(t),T(t),t]}^k + \Delta E(t) \\ SOD_{[i(t),T(t),t]} = \frac{1}{Q_r} \int_0^t \alpha_{i(t)} \beta_{T(t)} i(t) dt \\ i(t) = \frac{1}{R_2} [v(t) - E_{[i(t),T(t),t]} - R_1 i(t)] + C \frac{d}{dt} [v(t) - E_{[i(t),T(t),t]} - R_1 i(t)] \\ mc_p \frac{dT(t)}{dt} = i(t)^2 R_1 + \frac{1}{R_2} [v(t) - E_{[i(t),T(t),t]} - R_1 i(t)]^2 - h_c A [T(t) - T_a] \end{array} \right. \quad (5.11)$$

In conclusione il modello risulta essere semplice, tuttavia simula con buona precisione (grazie anche all'introduzione della dipendenza dei parametri da T) tutti quei processi caratterizzati da temperature medio-alte e correnti contenute. Al di fuori di questi regimi gli errori sui parametri considerati costanti inficiano gravemente sul risultato.

5.4.3 Modello RC

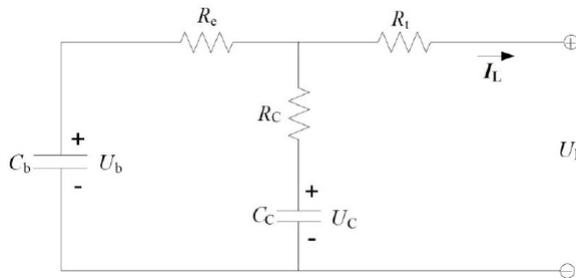


Figura 5.9: Modello RC

Gli elementi che costituiscono il circuito equivalente in figura 5.9 sono il condensatore C_c , che caratterizza gli effetti superficiali della batteria, il condensatore C_b che modella la carica immagazzinabile,

mentre le resistenze R_e , R_t e R_c simulano rispettivamente le perdite associate alla sezione finale, ai terminali e al condensatore. Si nota che, grazie alla presenza dei due condensatori, è possibile simulare il recovery effect.

Tale modello viene descritto dalle seguenti equazioni:

$$\begin{pmatrix} \vec{U}_b \\ \vec{U}_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{-1}{C_b(R_e+R_c)} & \frac{1}{C_b(R_e+R_c)} \\ \frac{1}{C_b(R_e+R_c)} & \frac{-1}{C_b(R_e+R_c)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_b \\ U_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{-R_c}{C_c(R_e+R_c)} \\ \frac{-R_c}{C_c(R_e+R_c)} \end{pmatrix} (I_L) \quad (5.12)$$

$$(U_L) = \begin{pmatrix} \frac{R_c}{(R_e+R_c)} & \frac{1}{C_b(R_e+R_c)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_b \\ U_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -R_t & \frac{-R_e R_c}{(R_e+R_c)} \end{pmatrix} (I_L) \quad (5.13)$$

5.4.4 Modello Thevenin

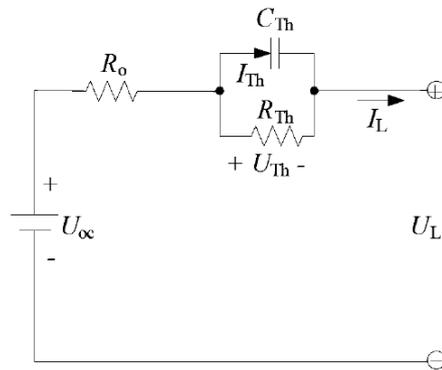


Figura 5.10: Modello Thevenin

Come si può vedere dalla figura 5.10, questo modello è un'evoluzione del modello R_{INT} , infatti si aggiunge solamente un gruppo RC parallelo in serie ad R_0 , il quale è in grado di simulare il recovery effect mediante un transitorio esponenziale di primo ordine. Viene definito anche “modello del primo ordine”.

Le equazioni fondamentali danno vita al seguente sistema:

$$\begin{cases} \vec{U}_{th} = -\frac{U_{th}}{R_{th}C_{th}} + \frac{I_L}{C_{th}} \\ U_L = U_{OC} - U_{th} - I_L R_0 \end{cases} \quad (5.14)$$

5.4.5 Modello PNGV generalizzato

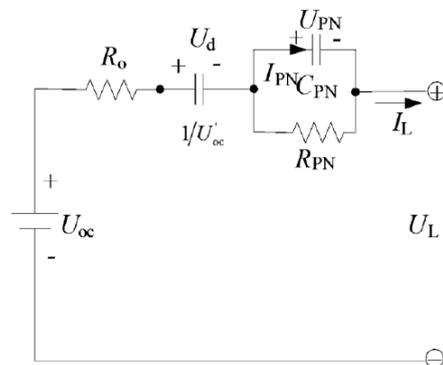


Figura 5.11: Modello PNGV

Il modello in figura 5.11 rappresenta invece un'evoluzione del precedente aggiungendo un condensatore in serie agli elementi già presenti. Lo scopo di quel condensatore è quello di determinare la variazione della tensione a vuoto durante il periodo di carica.

Le equazioni costitutive sono le seguenti:

$$\begin{cases} \vec{U}_d = U'_{OC} I_L \\ \vec{U}_{PN} = -\frac{U_{pN}}{R_{pN} C_{pN}} + \frac{I_L}{C_{pN}} \\ U_L = U_{OC} - U_t h - I_L R_0 \end{cases} \quad (5.15)$$

5.4.6 Modello DP (Double Polarization)

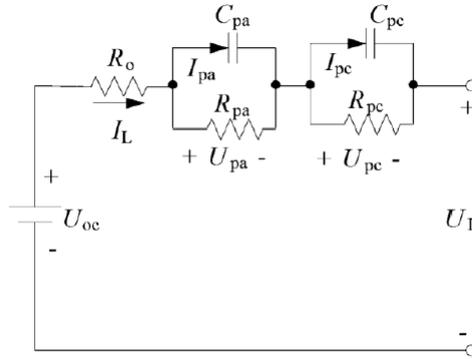


Figura 5.12: Modello DP

Il modello rappresentato in figura 5.12 è un'evoluzione del modello Thevenin, in quanto aggiunge un secondo gruppo RC parallelo per modellizzare i fenomeni di concentrazione (mentre il primo è associato alla polarizzazione elettrochimica). Per questo motivo viene chiamato anche “modello del secondo ordine”.

Le equazioni costitutive sono:

$$\begin{cases} \vec{U}_{pa} = -\frac{U_{pa}}{R_{pa} C_{pa}} + \frac{I_L}{C_{pa}} \\ \vec{U}_{pc} = -\frac{U_{pc}}{R_{pc} C_{pc}} + \frac{I_L}{C_{pc}} \\ U_L = U_{OC} - U_{pa} - I_L R_0 \end{cases} \quad (5.16)$$

5.4.7 Modello ibrido

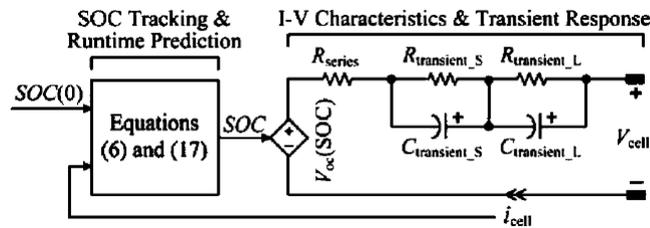


Figura 5.13: Modello ibrido

Il modello di figura 5.13 si definisce ibrido in quanto unisce il modello DP, per simulare il comportamento dinamico della batteria, al modello KBM, che ha il compito di stimare il corretto valore del SOC in modo da poter scegliere l'adeguato valore di tensione a vuoto.

Le relazioni costitutive relative al SOC sono:

$$SOC(t) = \frac{C_{available}(t)}{C_{max}} = SOC_0 - \frac{1}{C_{max}} \left[\int_0^t i_{cell}(t) dt + C_{unavailable}(t) \right] \quad (5.17)$$

$$C_{unavailable}(t) = \begin{cases} C_{unavailable}(t_0)e^{-k'(t-t_0)} + (1-c)\frac{I}{c}\frac{1-e^{-k'(t-t_0)}}{k'} & \text{con } t_0 < t < t_d \\ C_{unavailable}(t_d)e^{-k'(t-t_d)} & \text{con } t_d < t < t_r \end{cases} \quad (5.18)$$

Capitolo 6

Modello sviluppato

6.1 Premessa

La parte teorica di questo lavoro riguarda la creazione di un modello Simulink® di una batteria al Litio utilizzando le informazioni tecniche presenti in rete. Questa scelta comporta inevitabili compromessi relativi all'accuratezza del modello, in quanto in letteratura sono presenti numerosi modelli "proposti", tuttavia ciò che eleva qualitativamente la simulazione è la conoscenza approfondita e sperimentale dell'oggetto in fase di studio.

A tal proposito si evidenzia come, a causa dell'elevata importanza e complessità dell'argomento, le aziende produttrici rilascino un numero minimo di informazioni in modo da garantire un adeguato utilizzo della batteria, tuttavia questo non è sufficiente nel caso in cui si voglia riprodurre il comportamento. La stessa analisi può essere fatta per tutte quelle aziende che, per svariati motivi, hanno svolto degli studi approfonditi per comprenderne al meglio il comportamento (e magari anche per riprodurlo).

La tipologia di accumulo elettrochimico scelta è la famiglia Litio, in quanto, come già evidenziato nei capitoli precedenti, rappresenta, sia in termini prestazionali sia in termini di potenzialità, la miglior tecnologia presente ad oggi sul mercato.

Tra le sue caratteristiche è presente la capacità di ricoprire molti segmenti di mercato grazie alle numerose varianti fisico-chimiche sviluppate, per questo motivo il modello si baserà su tre famiglie diverse in modo tale da ricoprire molte delle applicazioni comuni, ponendo però maggiormente l'attenzione sui servizi ad alta potenza ed energia tipiche delle installazioni in rete e dei veicoli elettrici.

L'idea è quella di consentire una buona analisi del comportamento del modello scelto mediante l'esecuzione di diversi stress test implementati in modo da verificare l'idoneità della tecnologia per quel specifico servizio, oppure di effettuare una comparazione tra le diverse famiglie a parità di test effettuato.

Il vantaggio dell'utilizzo di questo modello è quello di avere un riscontro immediato del comportamento del SdA in risposta ad una serie di test (personalizzabili) relativi al servizio che si desidera effettuare, dotando così l'utente delle informazioni necessarie per eseguire una precisa analisi preliminare a cui far seguire delle scelte progettuali figlie dei dati raccolti.

Per quanto riguarda la tipologia di modello implementato, a seguito di un'analisi delle diverse rappresentazioni equivalenti presenti in letteratura, si è deciso di sviluppare un modello circuitale elettrico ibrido del secondo ordine. Tale scelta nasce come compromesso tra le esigenze di accuratezza e di velocità di simulazione, in modo da garantire praticità di utilizzo accompagnata da una buona performance. Nel complesso, quindi, il modello è costituito da un'interfaccia GUI (realizzata in ambiente Matlab®), la quale consente la raccolta dati e la gestione del modello vero è proprio, salvando e visualizzando i dati ottenuti a fine simulazione. L'anima è rappresentata dai modelli Simulink (vedasi appendici .3 e .4) e dai file .m (vedasi appendici .1 e .2) ed Excel adibiti all'implementazione della simulazione vera e propria e al caricamento dei dati principali che, a causa delle disomogeneità tipiche di questa tecnologia, sono suddivisi in tre famiglie (*LFP*, *LiPo*, *NMC*) che sintetizzano le seguenti propensioni:

- applicazioni di *potenza*;
- applicazioni *energia*;

- applicazioni di *potenza/energia*.

E' importante sottolineare la diversa origine e accuratezza dei dati utilizzati, in quanto la prima famiglia (NMC) simulata si basa direttamente sui valori sperimentali ottenuti da RSE, mentre per le altre due famiglie (LFP e LiPo) i dati sono stati ricavati mediante gli andamenti grafici forniti dai diversi documenti di riferimento (rispettivamente [15] e [16]), i quali, comunque, derivano a loro volta da prove sperimentali.

Per questo motivo la modellizzazione NMC risulta essere più accurata e consente il confronto tra i dati forniti dal modello con quelli sperimentali relativi ad alcune semplici prove di caratterizzazione, mentre per le altre due famiglie non sono presenti dati relativi a cicli di lavoro e quindi non è possibile quantificare l'errore di stima del modello. I dati relativi alla tecnologia LFP e LiPo sono stati estratti mediante il programma Engauge, il quale è in grado di "riconoscere" la curva di riferimento e di fornire alcuni punti della stessa dopo aver fissato i riferimenti necessari alla definizione del piano cartesiano di appartenenza.

Come si può vedere in 5.13¹, il modello è costituito, nella parte destra, da un circuito elettrico equivalente del secondo ordine in grado di riprodurre il comportamento elettrico dell'accumulatore, mentre il settore di sinistra è adibito alla stima del SOC (State Of Charge), il tutto in contemporanea con i cicli di simulazione previsti nel modello.

Ciò che rende questo modello "ibrido" è lo stimatore di carica di tipo *Coulomb counting algorithm*, il quale, come supporto, utilizza una logica chimico-analitica come il *Kinetic Battery Model* (KiBaM). Questa scelta consente di ottenere con miglior precisione la stima dello stato di carica e del suo comportamento non lineare, senza tuttavia appesantire eccessivamente gli oneri computazionali e di simulazione.

Infine, a causa della forte dipendenza delle prestazioni della batteria dalla temperatura, si è deciso di aggiungere un ulteriore blocco in grado di simulare la variazione termica interna al SdA durante il funzionamento.

I quattro blocchi costituenti il modello Simulink verranno analizzati separatamente, in modo da fornire indicazioni specifiche sulla logica di funzionamento e le conoscenze scientifiche/tecnologiche utilizzate.

6.2 Modello elettrico equivalente

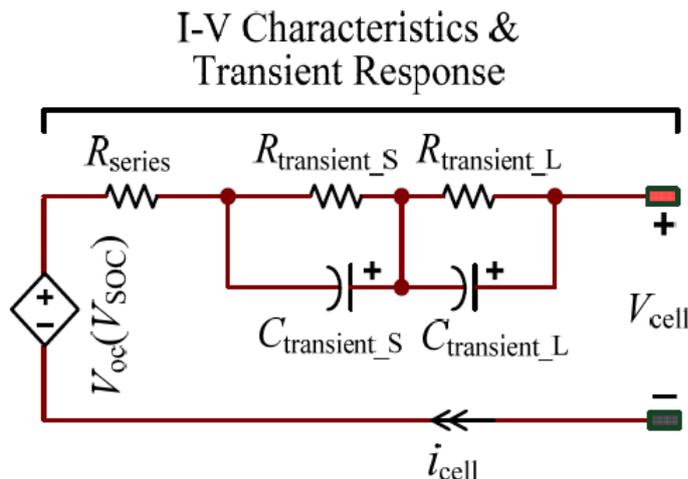
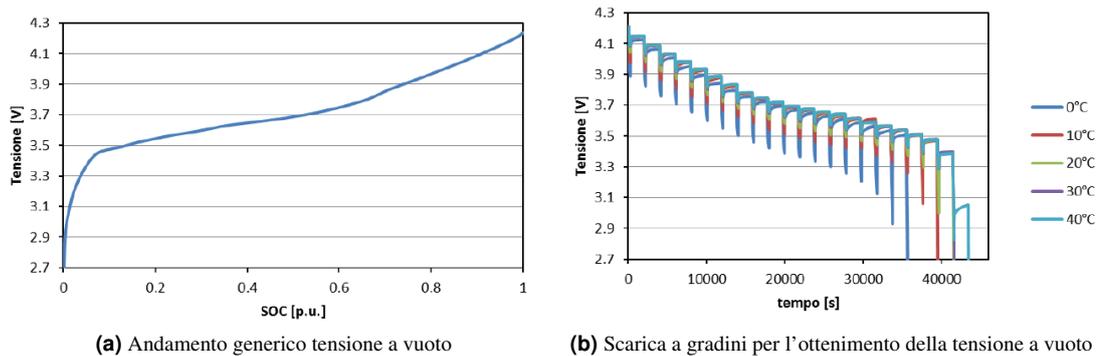


Figura 6.1: Circuito elettrico del secondo ordine

I parametri del circuito in 6.1 vanno a rappresentare i diversi fenomeni caratteristici della tecnologia di accumulo al Litio, secondo quanto riportato di seguito [8]:

¹[17]

- **Tensione a vuoto V_{OC}** : la tensione a vuoto della batteria, rappresentata da un generatore di tensione, viene ottenuta sperimentalmente mediante una serie di scariche parziali successive a cui vengono interposti dei periodi di “riposo” che permettono di misurare l’effettiva tensione a vuoto per diversi valori di SOC (vedasi 6.2(b)). Il periodo di inattività compreso tra due scariche risulta essere indispensabile per ottenere una corretta stima del parametro in quanto non è presente la caduta di tensione interna (corrente circolante nulla) ed inoltre consente lo svolgimento del recovery-effect.


Figura 6.2: Tensione a vuoto

Tale parametro presenta una forte dipendenza non lineare dallo stato di carica, mentre è stato dimostrato come l’influenza della temperatura interna sia trascurabile². La figura 6.2(a) evidenzia la forte non linearità del parametro per valori di SOC particolarmente bassi, mentre, d’altro canto, è possibile notare come il rimanente tratto sia quasi lineare senza però avere un andamento “piatto” che consenta di avere ai morsetti una tensione praticamente costante per buona parte del funzionamento. Generalmente, ma soprattutto per applicazione ad alta potenza/energia dotate di BMS, l’accumulatore viene fatto lavorare in un range di funzionamento che non preveda uno stato di carica estremo (sia in termini superiori che inferiori), in modo da evitare l’innesco di fenomeni particolarmente “usuranti” responsabili quindi di precoci decadimenti di prestazioni ed andamenti non lineari (e quindi difficilmente gestibili) della tensione. Infine, per alcune famiglie è possibile notare una lieve differenza tra l’andamento della V_{OC} in scarica rispetto alla fase di carica, tuttavia non è stato implementato in questo modello in quanto del tutto trascurabile;

- **Resistenza serie R_{series}** : simula l’istantanea caduta di tensione nel passaggio dal funzionamento a vuoto a quello a carico. Anche questo parametro viene stimato in via sperimentale verificando la caduta di tensione ai primi istanti di applicazione di un gradino di corrente (vedasi l’esempio 6.3). Presenta una dipendenza, di tipo non lineare, sia nei confronti del SOC sia della temperatura;
- **Parallelo $R_{transient_S} - C_{transient_S}$** : consente di simulare la risposta della batteria a seguito di fenomeni transitori di breve durata (grazie alla polarizzazione elettrochimica responsabile del trasferimento di carica [18]). La stima sperimentale evidenzia la non linearità di questi parametri al variare di SOC e T;
- **Parallelo $R_{transient_L} - C_{transient_L}$** : modella la risposta del SdA a seguito di fenomeni transitori di lunga durata (grazie al processo di diffusione responsabile del trasporto di massa [18]). Oltre ad avere i medesimi parametri di influenza, i due paralleli vengono stimati mediante l’approssimazione dell’andamento esponenziale caratteristico della seconda parte della curva di tensione (come si può vedere in 6.3).

I parametri resistivi precedenti possono essere associati ai seguenti fenomeni:

- resistenza ionica dovuta alla non perfetta conducibilità ionica dei materiali costituenti l’anodo, il catodo e l’elettrolita;

²Secondo i dati forniti da RSE. Inoltre la prova viene eseguita a temperatura esterna fissa.

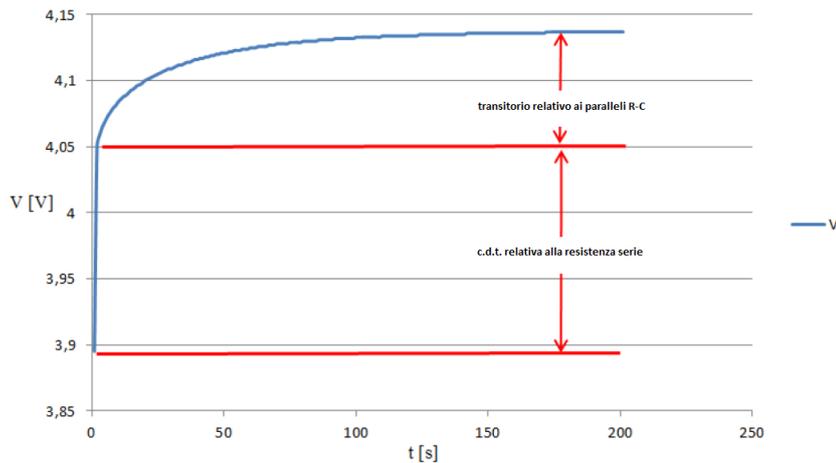


Figura 6.3: Risposta batteria ad un gradino di corrente

- resistenza elettrica dovuta alla non perfetta conducibilità elettrica dei materiali costituenti l'anodo, il catodo, i collettori di corrente e collegamenti associati. Nel caso in cui siano presenti (normalmente lo sono), anche gli additivi negli elettrodi contribuiscono all'opposizione della circolazione degli elettroni;
- resistenza d'interfaccia tra:
 - elettrolita ed elettrodi;
 - particelle degli elettrodi ed additivi;
 - elettrodi e collettori di corrente;
 - additivi conduttivi (se presenti) e collettori di corrente.

Dovuta alle seguenti cause:

- discontinuità geometrica e materiale;
- interfaccia SEI e anodo.

Per i parametri di natura capacitiva i fenomeni responsabili sono i seguenti:

- capacità relativa all'interfaccia tra SEI e anodo;
- capacità associate alle interfacce tra elettrodi ed elettrolita;
- capacità associate agli spazi presenti tra le diverse strutture cristalline (noti come bordi di grano).

Tutti i parametri sono riferiti ad un valore di *SOC* assoluto, ovvero la capacità scaricata viene confrontata con il valore massimo di carica erogabile dalla batteria. Questo viene fatto per dare un riferimento fisso in quanto è vero che la carica erogata varia in base alle condizioni di scarica, ma è altrettanto vero che, al variare della temperatura e del rate di scarica, se si effettua una scarica completa (ciclo CC-CV) si ottiene sempre il medesimo valore di carica erogabile³.

I dati utilizzati all'interno di ogni famiglia derivano da estrapolazioni o test effettuati in modalità di funzionamento e tempi diversi, per cui non è possibile associare una quantità omogenea di valori al variare del *SOC*⁴. Per questo motivo, anziché caricare i dati di ogni parametro su un'unica Look up table 2D (tranne per la tensione a vuoto in cui basta una Look up table 1D), si è preferito inserire una prima Look up table 1D che ricavi il valore del parametro in funzione del *SOC* per ogni temperatura

³Secondo prove sperimentali RSE

⁴In particolare al diminuire della temperatura si riduce la capacità di scarica (relativa alla modalità CC usata) e quindi il *SOC* assoluto non assume il medesimo range di valori che si ottiene in prove a temperature superiori

disponibile, per poi ottenere un valore pesato definito mediante una Dynamic Look up table che tenga conto dell'effettivo valore di temperatura assunto dal SdA.

Questo permette di sfruttare al meglio i dati a disposizione ed ottenere una maggior precisione di simulazione.

L'interpolazione nelle due Look up table è di natura lineare, mentre, a causa di una scarsa conoscenza del comportamento dei parametri in funzione della temperatura, si è deciso di mantenere i parametri coincidenti ai valori estremi in caso di temperature superiori o inferiori ai valori a disposizione. Questa scelta è inoltre avvalorata dal fatto che è spesso presente un sistema di ventilazione tale da mantenere la temperatura interna compresa tra i 0 °C e i 40 °C. Infatti i dati NMC sono riferiti a 0, 10, 20, 30, 40 °C, i dati LFP a 5, 15, 25, 35, 45 °C e i dati LiP a 5, 25, 40 °C.

Le equazioni caratterizzanti il circuito sono le seguenti:

$$\begin{cases} V_{cell} = V_{OC} - R_{series}i_{cell} - V_{transient_S} - V_{transient_L} \\ \frac{dV_{transient_S}}{dt} = -\frac{V_{transient_S}}{R_{transient_S}C_{transient_S}} + \frac{i_{cell}}{C_{transient_S}} \\ \frac{dV_{transient_L}}{dt} = -\frac{V_{transient_L}}{R_{transient_L}C_{transient_L}} + \frac{i_{cell}}{C_{transient_L}} \end{cases} \quad (6.1)$$

I dati utilizzati si riferiscono a prove sperimentali effettuate su singole celle, tuttavia un SdA è costituito da numerose stringhe (serie di celle indispensabili per ottenere il valore di tensione desiderato), a sua volta poste in parallelo per determinare la capacità necessaria.

Per questo motivo, per poter analizzare batterie di capacità e tensione desiderata, si è implementata una logica che compara i valori desiderati con i rispettivi valori nominali di cella, determinando il numero in serie ed in parallelo delle celle. A questo punto i parametri resistivi e capacitivi sono facilmente modificabili, mentre, per quanto riguarda il generatore di tensione (V_{OC}), si è applicata una semplice scalatura dei valori in base al numero delle celle in serie.

Tuttavia gli andamenti al variare del SOC e di T non sono stati alterati come se la messa in serie ed in parallelo fosse ideale. Questa ipotesi è resa possibile dal fatto che le batterie al Litio, a causa della loro sensibilità, sono sempre "accompagnate" da un BMS (Battery Management System), il quale, tra le altre cose, è in grado di gestire al meglio ogni singola cella evitando regimi di lavoro pericolosi o malfunzionamenti interni dovuti a squilibri delle grandezze caratteristiche di cella (questo in caso di BMS di tipo attivo).

A queste problematiche si deve aggiungere la non perfetta omogeneità delle celle prodotte, benchè solitamente appartenenti allo stesso lotto produttivo, che è intrinseca e dipende dai limiti tecnologici attuali. D'altro canto l'efficienza del ciclo tecnologico di produzione è comunque elevata, a cui va affiancata una discreta produzione in letteratura volta ad evidenziare come il BMS renda il comportamento reale del pacco batteria simile a quello ideale.

Queste considerazioni non sono valide per quanto riguarda l'andamento della temperatura all'interno dell'accumulatore e i relativi effetti, in quanto, ad oggi, non sono state effettuate abbastanza prove tali da poter descrivere correttamente il fenomeno e le relative conseguenze. Tuttavia si è deciso di implementare uno stimatore della temperatura interna particolarmente semplice a causa della grande importanza del parametro nel funzionamento del SdA [8].

A seguito di alcune verifiche sul modello si è riscontrata una limitazione della potenza massima simulabile dovuta alla difficoltà del solver interno di seguire con accuratezza ampie ed improvvise variazioni delle grandezze caratteristiche. In particolare questo fenomeno è stato riscontrato all'inizializzazione del modello in quanto, passando da un valore di potenza iniziale nullo ad un valore elevato (decine di kW), l'algoritmo di risoluzione, non seguendo perfettamente lo sviluppo, riscontra una variazione a gradino troppo elevata.

A seguito di diverse indagini si sono individuate due possibili matrici responsabili del problema: la prima individua nella struttura base della logica di calcolo il fattore limitante (benchè il modello sia stato sviluppato in modo da poter simulare sistemi di accumulo di qualsiasi potenza), mentre la seconda causa riconduce a limiti di capacità di calcolo in condizioni altamente non lineari da parte del software.

Non è stato possibile eseguire ulteriori analisi di approfondimento in quanto lo studio richiesto sarebbe stato particolarmente approfondito e avrebbe spostato il focus di questa tesi su altri aspetti, tuttavia il sistema implementato è in grado di emulare batterie (o moduli) per un valore di potenza prossimo alla

decina di kW. Questo consente comunque di continuare lo sviluppo delle analisi prefissate.

6.3 Modello termico

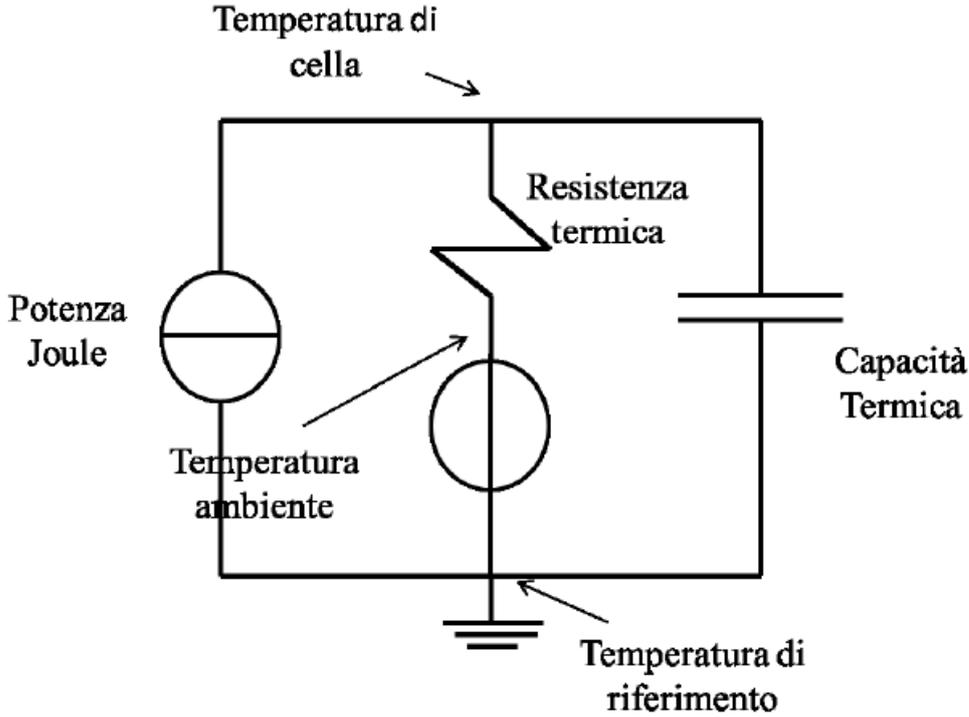


Figura 6.4: Modello termico

Il modello implementato è quello di figura 6.4, nel quale la potenza persa per effetto Joule all'interno della batteria è rappresentata da un generatore di corrente, mentre la capacità e la resistenza termica sono rappresentati, rispettivamente, da un condensatore e da una resistenza elettrica.

Le differenze di temperatura corrispondono alle relative differenze di potenziale del circuito, in cui è possibile notare come la capacità termica sia direttamente connessa al potenziale nullo (0 °C), mentre la resistenza è connessa al generatore di tensione che rappresenta la temperatura dell'ambiente di lavoro della batteria (fissata a 20 °C). Questo è stato fatto poichè, nel caso in cui avvenga una variazione a gradino della temperatura esterna, il valore interno non si porti immediatamente al riferimento considerato, ma segua un transitorio come accade nella realtà.

Il sistema preso in considerazione simula correttamente quanto desiderato anche a fronte di errori di inizializzazione della temperatura di cella.

Le equazioni relative al modello e alla potenza dissipata per effetto Joule sono le seguenti [8]:

$$\begin{cases} \frac{\partial T_{cella}}{\partial t} = \frac{P_{joule}}{C_{th}} - \frac{(T_{cella} - T_{amb})}{R_{th} C_{th}} \\ P_{joule} = R_{transient_S}(SOC, T) \left(i_{cella} - C_{transient_S}(SOC, T) \frac{\partial v_{transient_S}}{\partial t} \right)^2 + \\ + R_{transient_L}(SOC, T) \left(i_{cella} - C_{transient_L}(SOC, T) \frac{\partial v_{transient_L}}{\partial t} \right)^2 + R_{series}(SOC, T) i_{cella}^2 \end{cases} \quad (6.2)$$

Per ottenere i parametri R_{th} e C_{th} , presenti nella prima delle due equazioni, è indispensabile eseguire una prova nella quale viene osservata la modalità con la quale la batteria cede il calore all'esterno. A

questo punto è possibile definire la C_{th} come il prodotto tra il calore specifico del materiale costituente l'accumulatore e la sua massa, mentre la R_{th} tiene conto dei fenomeni di conduzione e convezione tra batteria e ambiente esterno (l'irraggiamento viene trascurato visto il contributo marginale introdotto dalle "basse" temperature di lavoro).

In questo caso, per mancanza di dati e per conoscenze interne ad RSE, i dati utilizzati nel modello si riferiscono ad una approssimazione esponenziale della variazione della temperatura interna ottenuta in via sperimentale ($C_{th} = 1700 \text{JK}^{-1}$ e $R_{th} = 0.37 \text{KW}^{-1}$).

La prova di riferimento è stata effettuata ad una sola temperatura in quanto è possibile ipotizzare che, nel limitato range di funzionamento previsto nelle applicazioni standard del SdA, tali parametri non varino particolarmente.

Viceversa si può generalmente affermare che esista una certa dipendenza dal materiale di cella, dalla sua geometria e dal sistema di raffreddamento (se presente), motivo per cui non è particolarmente corretto utilizzare i medesimi valori anche per le rimanenti due famiglie. Tuttavia, vista la forte dipendenza dei parametri caratteristici della batteria dalla temperatura e la semplicità del modello termico implementato, si è preferito mantenere la medesima logica di funzionamento. Questa "forzatura" consente comunque una maggior adesione al comportamento reale del SdA in quanto è impensabile che, durante il proprio funzionamento, non avvenga alcuna variazione di temperatura interna.

Durante il funzionamento del modello in condizioni particolarmente gravose e continuative, lo stimatore raggiunge temperature estremamente elevate. Questo è dovuto principalmente al fatto che tale modello non implementa alcun sistema di ventilazione che favorisca lo smaltimento del calore (sicuramente presente in applicazioni ad alta potenza/energia), quindi la dispersione viene simulata solamente grazie alla temperatura esterna costante, che rappresenta quindi un pozzo termico ideale.

Tuttavia, ai fini del calcolo dei parametri interni del SdA, la temperatura presa in considerazione al superamento del range di lavoro coincide con i limiti esterni.

6.4 Stimatore SOC

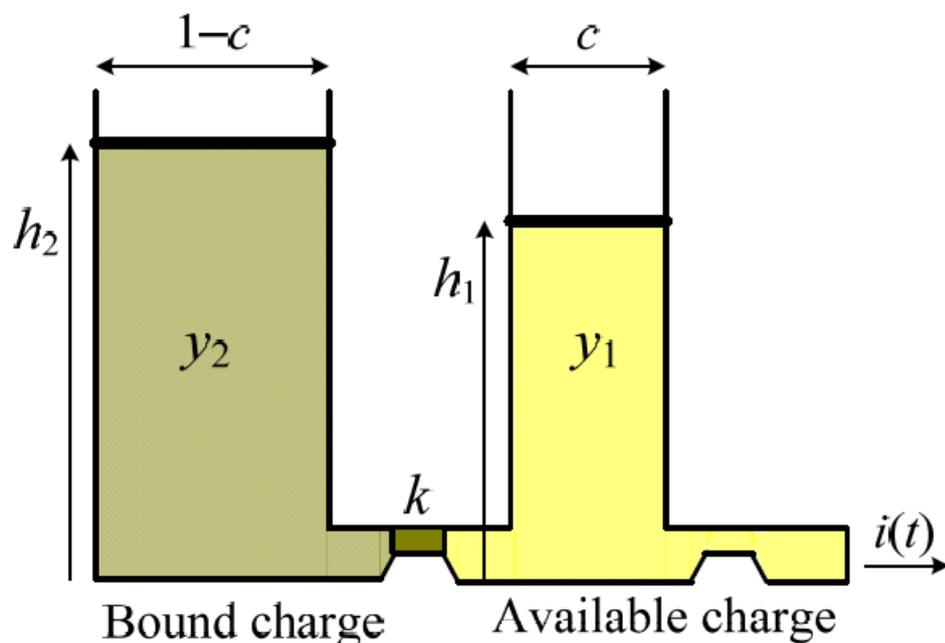


Figura 6.5: Stimatore SOC KiBaM

Lo stimatore di carica KiBaM (Kinetic Battery Model) esprime i processi chimici interni alla batteria mediante un trasferimento cinetico delle cariche in gioco.

Come si può vedere in figura 6.5, sono presenti due serbatoi nei quali viene distribuita la carica massima

erogabile dall'accumulatore. Il serbatoio di destra, definito "available charge well", è direttamente responsabile del trasferimento delle cariche tra il SdA e la rete esterna, valente quindi sia in fase di scarica sia in fase di carica.

Viceversa, il serbatoio di sinistra, definito "bound charge well", scambia cariche solo con l'available charge well. Il flusso di tali cariche dipende dalla differenza di altezza delle cariche presenti nei due serbatoi h_1 e h_2 (dove h_1 rappresenta il SOC della batteria), oltre che da una valvola k che ne regola il passaggio.

La carica viene distribuita tra i due serbatoi mediante il parametro c ($0 < c < 1$), che, come k , verrà definito in seguito.

Le equazioni che descrivono il flusso delle cariche in entrambi i serbatoi, sono le seguenti:

$$\begin{cases} \frac{dy_1(t)}{dt} = -i(t) + k[h_2(t) - h_1(t)] \\ \frac{dy_2(t)}{dt} = -k[h_2(t) - h_1(t)] \end{cases} \quad (6.3)$$

dove y_1 e y_2 sono la carica totale dei due serbatoi, mentre $h_1 = \frac{y_1}{c}$ e $h_2 = \frac{y_2}{(1-c)}$.

Le condizioni iniziali sono: $y_{1,0} = y_1(t_0) = cC$, $y_{2,0} = y_2(t_0) = (1-c)C$, con $y_0 = y_{1,0} + y_{2,0}$.

Come si può intuire dalle equazioni descrittive, la variazione della carica del secondo serbatoio dipende dal valore assunto dalla corrente di scarica/carica e dalla differenza di altezza del contenuto dei due serbatoi. Questi due fattori vanno a rappresentare due importanti effetti tipici degli accumulatori di tipo elettrochimico, ovvero, rispettivamente, il *rate-effect* ed il *recovery-effect*.

All'aumentare del rate di scarica/carica il flusso di carica interessato risulta essere inferiore a causa della ridotta capacità di estrazione fisica delle cariche negli elettrodi. Tale effetto viene riprodotto dalla prima equazione, in quanto la veloce riduzione di h_1 verso la completa scarica non consente il totale apporto di cariche dal serbatoio di supporto.

Il recovery-effect si riferisce ad un fenomeno di spostamento di cariche naturale (per il raggiungimento dell'equilibrio chimico tra gli elementi attivi interni) che si verifica quando, durante una fase di scarica o carica, il processo viene temporaneamente interrotto. Se si osserva entrambe le equazioni precedenti, si vede come a corrente nulla ci sia un flusso di cariche naturale che va a terminare una volta raggiunta la condizione di equilibrio $h_1 = h_2$ (se persiste la condizione di corrente nulla), determinando quindi un incremento della carica presente nell'available charge well.

Il sistema KiBaM consente quindi di modellizzare i flussi delle cariche durante i processi di scarica/carica, rendendo disponibili le stime di carica che vengono utilizzate dal *Coulomb counting algorithm* per determinare le diverse componenti dello stato di carica, come espresso dalle seguenti equazioni:

$$\begin{cases} SOC(t) = \frac{C_{available}(t)}{C_{max}} = SOC_{initial} - \frac{[\int i_{cell}(t)dt + C_{unavailable}(t)]}{C_{max}} \\ \text{dove} \\ C_{available}(t) = C_{initial} - \int i_{cell}(t)dt - C_{unavailable}(t) \end{cases} \quad (6.4)$$

La $C_{unavailable}$ è la carica disponibile che non è stata trasferita dal bound charge well all'available charge well. Essa viene definita dalla differenza dell'altezza dei due serbatoi secondo la seguente espressione: $C_{unavailable} = (1-c)(h_2 - h_1)$. All'aumentare del rate di scarica/carica la capacità indisponibile aumenta, viceversa, se si introducono periodi di "riposo", tale valore diminuisce.

Tuttavia, per tarare il sistema in modo da emulare il comportamento dell'accumulatore è indispensabile effettuare delle prove sperimentali. Una prima prova consiste nello scaricare l'accumulatore mediante una corrente estremamente piccola, ottenendo così il valore della capacità massima erogabile, ovvero y_0 . Viceversa, scaricando la batteria mediante una corrente elevata si ottiene la carica iniziale relativa all'available charge well $y_{1,0}$. A questo punto è facile ricavare la carica iniziale presente nel bound charge well $y_{2,0} = y_0 - y_{1,0}$, e definire il capacity ratio $c = \frac{y_{1,0}}{y_0}$ [17].

Per quanto riguarda k , è indispensabile equiparare il valore della capacità indisponibile (ottenuta in via sperimentale mediante una scarica a rate costante a partire da uno stato di carica completo e con $C_{unavailable}(t_0)$ pari a zero fino al raggiungimento della tensione di cut-off) con la seguente espressione semplificata:

$$C_{unavailable} = C_{unavailable}(t_0)e^{-k'(t-t_0)} + (1-c)\frac{I}{c}\frac{1-e^{-k'(t-t_0)}}{k'} \quad (6.5)$$

In tale espressione l'unica incognita risulta essere k' , da cui si può ricavare il valore desiderato k mediante l'equazione $k' = \frac{k}{c(1-c)}$ ⁵.

E' importante sottolineare che, a causa della difficoltà nel reperire i dati, il sistema sviluppato presenta un valore di k tarato sperimentalmente e, soprattutto, relativo al C-rate della cella in questione, motivo per cui è consigliato non variare tale valore al fine di garantire la corretta stima del SOC. Inoltre, proprio a causa della natura "sperimentale" del settaggio, è stato introdotto un ulteriore parametro f che, moltiplicato a k , permette di stimare correttamente il SOC anche quando la corrente circolante non è quella nominale.

Quanto descritto fino ad ora rappresenta uno stimatore dello stato di carica particolarmente accurato, senza tuttavia richiedere conoscenze approfondite della batteria o incrementare la difficoltà computazionale, adatto a descrivere i fenomeni chimico-fisici caratteristici di una batteria al Piombo.

Per questo motivo, il sistema di equazioni 6.3 viene modificato in modo da rappresentare il fenomeno della diffusione delle cariche negli stati solidi, che assume un ruolo di maggior importanza nelle batterie al Litio rispetto a quelle al Piombo. Questa correzione caratterizza il movimento "guidato" (che va a sommarsi al movimento casuale della diffusione standard) intrapreso dalle particelle quando viene applicata una forza esterna. La modifica risulta essere semplicistica, tuttavia consente di ottenere una buona approssimazione del fenomeno [19]:

$$\begin{cases} \frac{dy_1(t)}{dt} = -i(t) + k \left[(1-p)(h_2(t) - h_1(t)) - \frac{p}{c} \left(\frac{y_{1,0}}{c} - \frac{y_2(t)}{1-c} \right) \right] \\ \frac{dy_2(t)}{dt} = -k \left[(1-p)(h_2(t) - h_1(t)) - \frac{p}{c} \left(\frac{y_{1,0}}{c} - \frac{y_2(t)}{1-c} \right) \right] \end{cases} \quad (6.6)$$

dove, p , variabile tra 0 e 1, è la frazione di corrente che viene rimossa dall'available charge well e viene trasferita al bound charge well.

Il modello è stato dunque tarato su un fattore di perdita p pari a 0.1, che corrisponde ad una riduzione del 10% della carica erogata.

6.5 BMS

Le prestazioni delle batterie al Litio sono fortemente influenzate dalle condizioni di lavoro, motivo per cui è indispensabile implementare una logica di controllo e gestione che preservi il sistema di accumulo e che ne garantisca una durata di vita accettabile.

Tale necessità risulta indispensabile per applicazioni ad alta potenza ed energia dove le condizioni operative possono essere particolarmente severe e nocive per il SdA, tuttavia anche per applicazioni più semplicistiche come i dispositivi portatili sono presenti logiche di controllo e gestione semplificate.

E' noto che il funzionamento in stati di carica particolarmente elevati o bassi (solitamente i limiti sono rispettivamente 0.8 e 0.2), la circolazione di correnti elevate e il superamento dei limiti di tensione comportino stress particolarmente gravosi nei materiali attivi, determinando una variazione chimico-fisica dei componenti che, a sua volta, provoca una riduzione delle prestazioni e della vita della batteria. Lo stesso si può dire per la temperatura interna, mentre per evitare possibili eventi distruttivi e/o pericolosi e fornire performance adeguate è indispensabile gestire ogni singola cella in modo da mantenere i valori caratteristici omogenei all'interno del modulo.

In generale gli obiettivi di un BMS possono essere così sintetizzati [11]:

- Ottimizzazione del funzionamento della batteria in funzione del servizio richiesto;
- Controllo del SOC al fine di prolungare il funzionamento operativo;
- Prolungamento della vita della batteria monitorando, ad esempio, lo stato di salute;

⁵L'equazione 6.5 e l'espressione di k' sono frutto di una serie di passaggi matematici descritti in [17]

- Garantire l'incolumità del dispositivo e degli utenti;
- Controllo dei parametri fondamentali di ogni cella;
- Analisi dei possibili problemi interni.

Tutte queste attività vengono svolte in real time attraverso un canale di comunicazione interno che garantisce lo scambio di dati e rilevazioni, per poi comunicare all'utente le informazioni principali.

6.5.1 Funzionalità non implementate

In questo modello non si è implementato un BMS particolarmente intelligente, sia per la complessità intrinseca del sistema sia perchè non inerente con lo scopo di questo lavoro. In particolare le funzionalità non implementate si riferiscono al primo, al terzo e all'ultimo punto dell'elenco esposto in precedenza. L'applicazione per la quale un sistema di accumulo viene progettato svolge un ruolo fondamentale anche nella logica implementata nel BMS, in quanto è evidente come le necessità di controllo e gestione di un dispositivo portatile risultino estremamente differenti rispetto ad un sistema UPS, allo svolgimento di servizi di rete o per applicazioni nei veicoli elettrici.

In questi ultimi casi l'SdA è necessariamente accoppiato ad un convertitore elettronico di potenza che crea un "disaccoppiamento" tra la sorgente e la rete. In applicazioni di delicata importanza è estremamente importante che il convertitore, nella sua componente "affacciata" alla batteria, sia in grado di massimizzarne le prestazioni. Questo consente sia una maggior durata di vita, che nelle applicazioni in questione è molto importante visti gli investimenti richiesti, sia di fornire un servizio il più funzionale possibile.

Quanto esplicitato fino ad ora fa capire come implementare questa funzionalità sia estremamente complesso e specifico, andando in contrasto con la capacità del modello di simulare famiglie Litio e test estremamente vari e differenti tra loro. Inoltre, per ottenere una maggior aderenza con la realtà, risulterebbe indispensabile implementare anche il modello del convertitore elettronico accoppiato.

Il terzo punto è in parte collegato al primo in quanto lo stato di salute di una batteria è ovviamente legato anche alle modalità di funzionamento della stessa. Oltre a questo lo stato di salute è fortemente legato all'invecchiamento della batteria e al relativo decadimento delle prestazioni. Anche in questo caso, il lavoro svolto non è incentrato nell'analisi delle prestazioni a lungo termine dell'accumulo elettrochimico, motivo per cui non è stata implementata questa logica nel BMS. In aggiunta a questo, la stima dello stato di salute non è univocamente definita ma dipende fortemente dall'applicazione specifica del SdA, che, come in precedenza, va a cozzare con la funzionalità del modello.

L'ultima voce dell'elenco è strettamente correlata alle rilevazioni e alle stime interne della batteria, le quali consentono di controllarne e monitorarne i parametri, garantendo immediato avviso in caso di malfunzionamenti e l'avviamento di procedure di sicurezza in caso di pericoli effettivi sia per il dispositivo sia per gli utenti e l'ambiente circostante. L'implementazione di tale logica non è nè inerente nè applicabile nel contesto di riferimento in quanto si riferisce ad applicazioni reali.

6.5.2 Funzionalità implementate

Durante lo sviluppo del modello sono state fatte delle scelte e delle ipotesi tali da garantire una buona adesione alle condizioni reali di una batteria, senza tuttavia incrementare eccessivamente le difficoltà computazionali.

Una prima importante ipotesi fatta riguarda la messa in serie/parallelo delle singole celle, in modo da poter ricreare il modello vero e proprio di una batteria o di un suo modulo. Questa ipotesi è verosimile solamente nel caso in cui sia presente un sistema di bilanciamento attivo su ogni cella, garantendo omogeneità di tensione e stato di carica. La capacità di equilibrare i diversi elementi rappresenta una delle più importanti attività del BMS, in quanto consente di trattare ogni cella singolarmente risolvendo le seguenti criticità:

- nella messa in serie, le celle sono attraversate dalla medesima corrente, tuttavia se una o più celle della stringa risultano essere più cariche delle altre, esse saranno soggette ad una sovraccarica e ad una sovratensione che può provocarne il danneggiamento. Oppure, in caso di più stringhe in

parallelo tra loro, la tensione deve essere la medesima, quindi in caso siano presenti celle più scariche, e quindi con una minor tensione ai loro capi, le altre celle della stringa dovranno sopportare una tensione maggiore del previsto. In generale, è importante che tutte le celle siano controllate e gestite in modo da equilibrare tra loro le grandezze elettriche complessive della batteria.

A lungo andare, queste continue sollecitazioni possono provocare il decadimento delle celle compromettendo il funzionamento della batteria ben prima del tempo stimato di vita. Per questo motivo ogni elemento, oltre ad essere costantemente controllato, può essere bypassato garantendo sia la continuità di servizio della batteria sia l'incolumità della cella;

- nella messa in parallelo, essendo la tensione equivalente, è possibile che, a causa di diversi stati di carica o temperatura di cella diverse, la resistenza elettrica tra i paralleli sia diversa comportando quindi la circolazione di correnti di diverso valore. Questo, a lungo andare, può provocare una disomogenea "usura" delle stringhe, portando ad una precoce decadenza delle prestazioni del dispositivo. Anche in questo caso la logica di controllo consente inoltre l'esclusione di intere stringhe in caso di necessità.

In relazione a quanto appena descritto è importante sottolineare come la produzione stessa delle celle, malgrado l'elevata tecnologia e precisione raggiunta e l'appartenenza allo stesso lotto produttivo, non presentino delle caratteristiche elettriche perfettamente uguali, introducendo, inevitabilmente, piccoli squilibri che a lungo andare, se non controllati, possono provocare un veloce decadimento.

Anche dal punto di vista della dissipazione termica sono state fatte diverse ipotesi semplificative, giustificate, in questo caso, dalla attuale scarsa descrizione del fenomeno. In particolare, ipotizzando che la temperatura all'interno della batteria sia omogenea, si va ad "implementare" una logica di controllo e gestione della temperatura all'interno del dispositivo, consentendo, come per le altre grandezze, una salvaguardia delle condizioni chimico-fisiche di ogni singola cella.

Il BMS effettivamente implementato si focalizza principalmente sul garantire delle condizioni di lavoro idonee al corretto funzionamento e alla conservazione dell'integrità della batteria. In particolare, per ogni famiglia Litio, sono stati imposti dei valori limite in termini di tensione e corrente fungendo da dispositivo di protezione. Inoltre, una volta scelta la modalità di simulazione con BMS, viene richiesto di inserire i valori limite di SOC entro la quale si desidera che la batteria lavori.

Il raggiungimento di uno stato di carica completamente vuoto o completamente pieno risulta particolarmente gravoso per i materiali attivi interni, in quanto l'estrazione delle cariche rimaste a fine scarica come l'inserimento delle ultime cariche a fine carica richiedono tempistiche e modalità particolari affinché tali processi non inficino le prestazioni dei materiali attivi. Nella maggior parte dei servizi questo non è possibile, motivo per cui si preferisce ridurre il campo di funzionamento a scapito di una maggior durata di vita.

Tale scelta è stata presa per soddisfare due esigenze:

- non tutte le applicazioni necessitano di un controllo dello stato di carica. In particolare le applicazioni portatili, essendo sottoposte a stress minori ed essendo particolarmente limitate in termini di costi ed energia, subiscono una scarica/carica totale;
- tutti quei servizi che invece necessitano di un controllo, possono funzionare correttamente in range diversi tra loro, in base alla tecnologia Litio e alle prestazioni richieste.

Ogni qual volta che le condizioni di simulazione non rispetteranno i limiti di salvaguardia imposti, avverrà un'interruzione della simulazione (seguita dall'apertura di una finestra di warning) simulando così il "distacco" del dispositivo dalla rete.

I limiti implementati sono i seguenti:

- *NMC*:
 - Corrente di carica continuativa massima pari a $3C_n$;
 - Corrente di scarica continuativa massima pari a $5C_n$;
 - Corrente di scarica di picco massima fino a $10C_n$ per 15sec .
- *LFP* [20]:

- Corrente di carica continuativa massima pari a $4.5C_n$;
 - Corrente di scarica continuativa massima pari a $33C_n$;
 - Corrente di scarica di picco massima fino a $57C_n$ per 10sec .
- *LiPo* [21]:
 - Corrente di carica continuativa massima pari a $0.5C_n$;
 - Corrente di scarica continuativa massima pari a $3C_n$;
 - Corrente di scarica di picco massima fino a $5C_n$ per 15sec .

Il BMS implementato, quindi, svolge principalmente una funzione di protezione della batteria evitando il funzionamento in cicli di lavoro dannosi e preservandone l'integrità, a favore di una maggior sicurezza del dispositivo e dell'utente.

Attraverso le varie ipotesi effettuate e l'implementazione di una semplice logica BMS, sono stati attuati le voci rimanenti dell'indice precedentemente esposto.

6.6 Cicli di simulazione

Al fine di poter analizzare il comportamento della batteria simulata dal modello si sono implementati diversi cicli di funzionamento. Essi rappresentano normali o particolari cicli di lavoro a cui un sistema di accumulo può essere sottoposto, oppure semplicemente si limitano a testare e verificare le peculiarità del SdA in esame.

Visti gli innumerevoli servizi che un accumulatore elettrochimico può fruire è impossibile creare dei cicli di test che soddisfino tutte le esigenze, tuttavia sia lo script Matlab di supporto sia il modello Simulink presentano una struttura adatta all'inserimento di ulteriori test di analisi.

I cicli implementati sono i seguenti:

1. *Scarica o carica a rate costante*: consente di scegliere la corrente di scarica o carica (valore negativo di corrente) e se si desidera imporre, oltre al limite del *SOC* presente di default, un limite in funzione della tensione;
2. *Scarica o carica pulsata*: il tempo di simulazione viene suddiviso in periodi di uguale durata nella quale, alternativamente, si ha il valore di corrente desiderato e corrente nulla. Si può scegliere se imporre limiti in funzione della tensione o dello stato di carica;
3. *Ciclo completo limitato in SOC*: una volta scelta la corrente desiderata viene svolto automaticamente un ciclo di scarica/carica completo (i limiti del *SOC* sono 0 in fase di scarica e 1 in fase di carica);
4. *Corrente a gradini*: ogni 500 sec di simulazione viene imposta una variazione a gradino della corrente, con quest'ultima che può assumere valori positivi, negativi e nulli. Anche in questo caso non sono presenti limiti di tensione o *SOC* per permettere l'analisi della risposta della batteria;
5. *Test di sollecitazione dinamica per veicolo elettrico ibrido*: si tratta di un ciclo di prova a set-up di potenza variabili a gradino (vedasi 6.6). L'obiettivo è quello di determinare il comportamento della batteria simulando, ciclo dopo ciclo, una tipica condizione di lavoro per un veicolo elettrico ibrido. Può essere scelta sia una modalità di simulazione senza alcun vincolo sia una modalità in cui sono presenti entrambi i vincoli standard;
6. *Time shift*: si tratta di una condizione di lavoro tipica per un accumulatore connesso alla rete con funzione di Time Shift. E' costituito da set-up di potenza variabili a gradino garantendo comunque il mantenimento della carica alla fine di ogni ciclo (vedasi 6.7). Sono presenti le medesime modalità di simulazione del test precedente;
7. *Power balancing*: questa simulazione mira ad evidenziare il comportamento del SdA in accoppiamento a fonti rinnovabili adibite a svolgere una funzione di power balancing (vedasi 6.8). Le modalità di simulazione rimangono le medesime dei precedenti test.

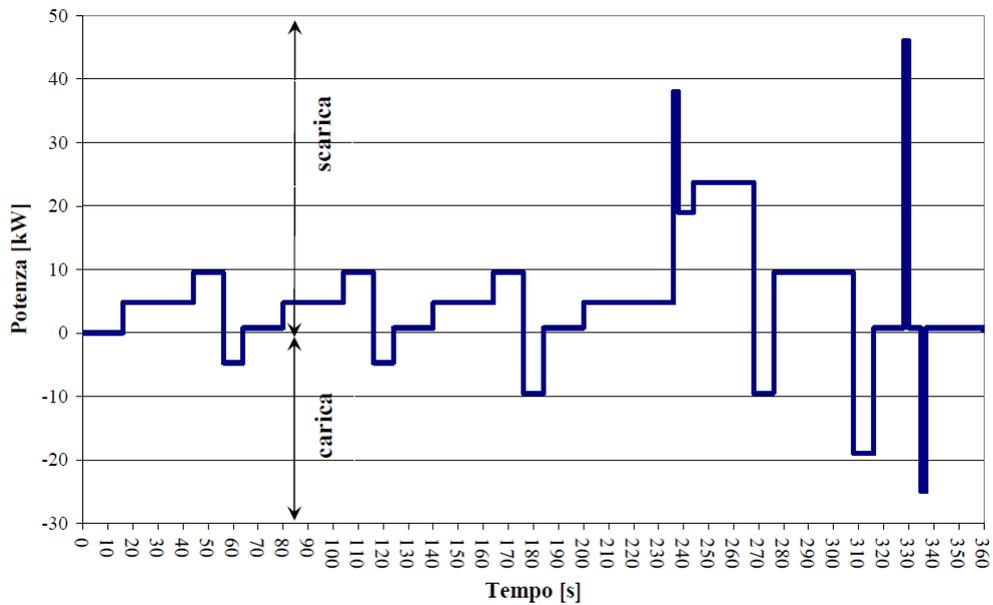


Figura 6.6: Sollecitazione dinamica per veicolo elettrico ibrido

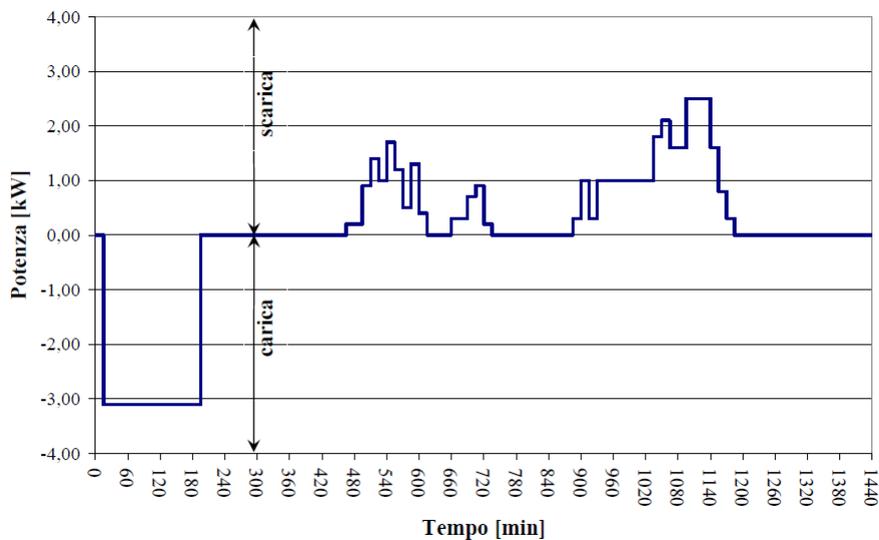


Figura 6.7: Simulazione servizio di Time Shift

8. **LVRT/OVRT**: questa simulazione si contraddistingue dalle precedenti per una serie di motivi. Innanzitutto, una volta selezionato il test, verrà aperto un modello Simulink dedicato al solo svolgimento dei test di verifica della capacità di un sistema di generazione di sostenere improvvise variazioni di tensione della rete elettrica (secondo CEI 0-16 e CEI 0-21). Il modello utilizzato, oltre a non presentare i numerosi cicli di simulazione, comprende una serie di elementi circuitali ideali in modo da costituire un tipico sistema di generazione in c.c. In questa simulazione è sempre implementato il BMS, a seguito dell'inserimento dei relativi parametri viene richiesto di scegliere la verifica desiderata tra LVRT e OVRT. A questo punto inizia la simulazione in cui la rete elettrica implementata richiede un set di potenza, il quale viene soddisfatto passando attraverso l'inverter di interfaccia, il DC bus, il convertitore DC/DC per arrivare all'accumulo elettrochimico, il quale si vede richiedere un potenza costante pari al prodotto tra i valori nominali di tensione e corrente dello storage. All'istante 0.075 s (caso peggiore), viene introdotto il disturbo

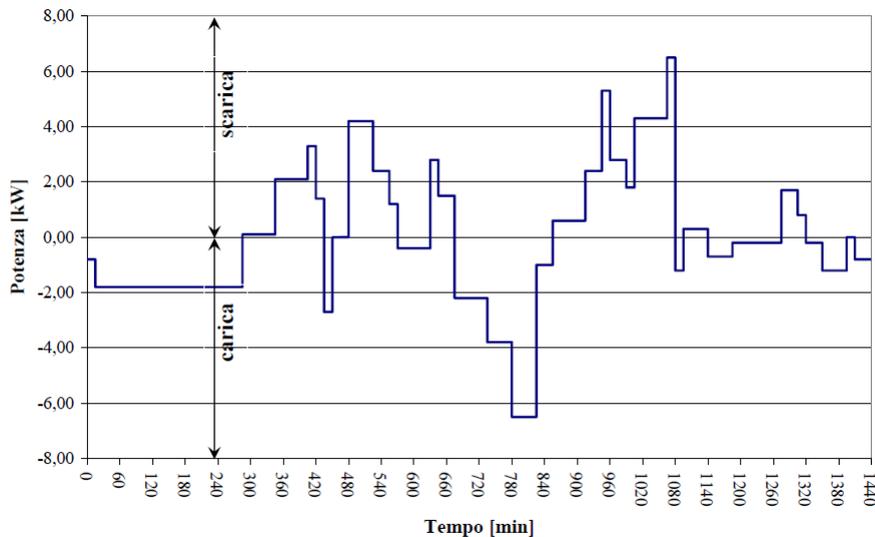


Figura 6.8: Simulazione servizio di Power Balancing

selezionato per la durata prevista da normativa, per poi riportarsi ai valori precedenti e terminare la simulazione dopo 0.5 s. A questo punto, per una maggior comprensione del fenomeno occorso, si aprono due finestre contenenti, rispettivamente, gli andamenti di tensione e corrente di rete e la potenza apparente scambiata con la rete e fase associata.

In tutti i cicli viene richiesta la capacità iniziale desiderata, mentre il tempo di simulazione è fissato a 10000 sec per le prime tre prove. La prova successiva è costituita dalla serie di gradini $2In; In; -2In; In; 0$ per default e termina in 2500 sec, tuttavia tali parametri sono facilmente modificabili agendo sul vettore `value4` e `time4`.

I cicli 5,6,7, fanno riferimento a quanto esplicitato in [22], in cui le tempistiche di simulazione sono state cambiate da minuti a secondi solo per comodità di simulazione. Per riportare ai valori originali basta moltiplicare per 60 il vettore `time#`.

Nel caso in cui si scelga di implementare il BMS è necessario prestare attenzione al valore di corrente e di capacità iniziale desiderata. Per la scelta del primo parametro è importante ricordare come, il superamento delle condizioni limite visualizzate nel pannello di simulazione (vedasi capitolo successivo) comporti l'interruzione del processo. Ulteriore attenzione necessita l'inserimento della capacità iniziale (esclusa per il test numero 3), in quanto è possibile inserire un valore che determini un *SOC* esterno al range di funzionamento stabilito. La logica implementata consente questa opzione senza che venga interrotta la simulazione a patto che, in caso di *SOC* iniziale maggiore del limite massimo la corrente circolante determini la scarica (quindi valore positivo) e il viceversa nel caso di *SOC* minore del limite inferiore. In particolare è bene prestare attenzione a quei test in cui non si ha un controllo della corrente circolante ⁶.

Questa scelta è stata fatta, con esclusione del terzo test, per non limitare la modalità BMS al mero ciclaggio continuo all'interno dei limiti, in quanto è una condizione difficilmente verificata all'atto pratico.

6.7 Visualizzazione I/O

Il sistema di interfaccia GUI, raffigurato in figura 6.9, è costituito da una serie di pannelli adibiti alla scelta delle modalità di simulazione desiderate, per poi visualizzare, a scelta, gli andamenti delle principali grandezze caratteristiche tipiche di un SdA una volta conclusa la prova desiderata. Inoltre, per consentire una approfondimento e/o un confronto tra diverse prove o tra diverse famiglie di batterie, i

⁶Test 4,5,6,7

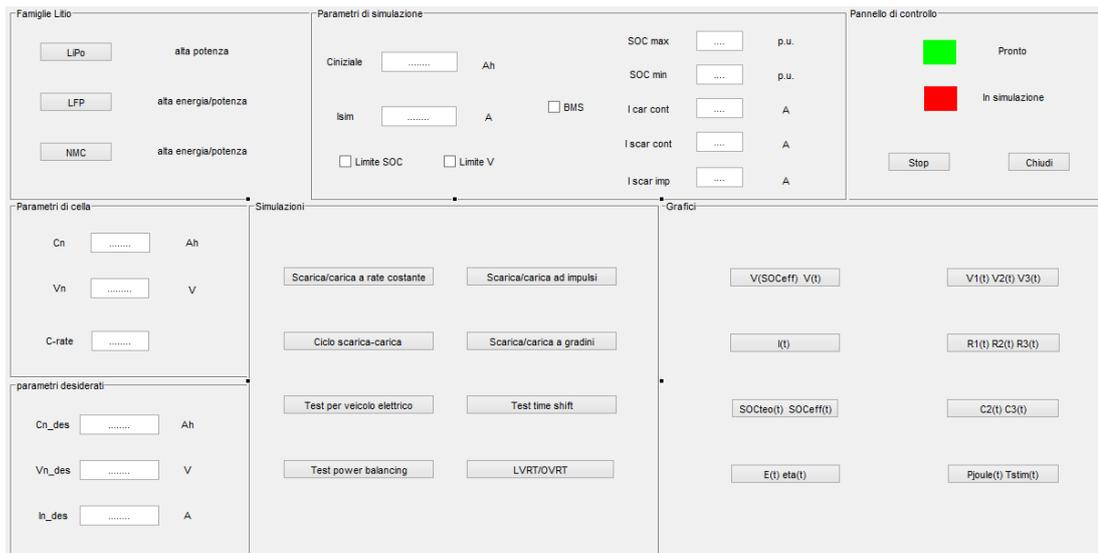


Figura 6.9: Interfaccia GUI

dati di fine simulazione verranno salvati automaticamente in file esterni.

Di seguito viene riportata la logica con la quale l'utente può interfacciarsi con il modello:

1. una volta avviata l'interfaccia dal Command Window di Matlab è possibile selezionare la famiglia desiderata;
2. a questo punto nel pannello immediatamente sottostante al precedente verranno visualizzati i valori nominali caratteristici di cella;
3. ora si aprirà automaticamente una finestra dove è possibile inserire i valori caratteristici della cella/batteria che si vuole simulare. Tali valori verranno poi visualizzati nell'ultimo pannello a sinistra;
4. una volta stabilito l'oggetto da esaminare si sceglie il test di simulazione desiderato, inserendo i valori richiesti nella finestra che comparirà una volta selezionata la prova. Inoltre verrà chiesta la modalità con la quale si desidera effettuare il test, ovvero se sarà presente o meno il BMS. In quest'ultimo caso viene chiesto di inserire, in aggiunta alle normali richieste, i valori limite di SOC desiderati;
5. terminata la simulazione è possibile visualizzare diversi plot delle grandezze caratteristiche semplicemente premendo sul relativo pulsante;
6. durante il processo, sia la famiglia Litio sia il test selezionato saranno evidenziati, tuttavia una volta terminata la simulazione sarà possibile scegliere nuovamente famiglia, ciclo e valori della batteria oggetto della simulazione.

Per avere un totale controllo visivo e pratico sul modello Simulink è stato introdotto il "Pannello di controllo" il quale consente di:

- bloccare la simulazione in atto mediante il pulsante "Stop" portando il sistema in un stato di attesa per ulteriori test;
- chiudere l'interfaccia e il modello (o i modelli) Simulink mediante il pulsante "Chiudi";
- avere un immediato riscontro se il modello è in attesa di simulare (luce verde) o se è in atto un test (luce rossa).

6.8 Verifica del modello

Come detto in precedenza i dati a disposizione per valutare la bontà del modello sviluppato sono limitati, per cui si riporta una comparazione riguardante una semplice scarica a rate (nominale) e temperatura (20 °C) costante relativa alla prima famiglia Litio implementata.

I due andamenti in figura 6.10 evidenziano come il modello rappresenti fedelmente il comportamento della cella fino ad un valore del *SOC* assoluto pari a 0,1. Infatti in questo caso l'errore percentuale risulta essere sempre inferiore all' 1%, in particolare i valori massimi e minimi ricavati sono pari, rispettivamente, allo 0,85% e allo 0,03%.

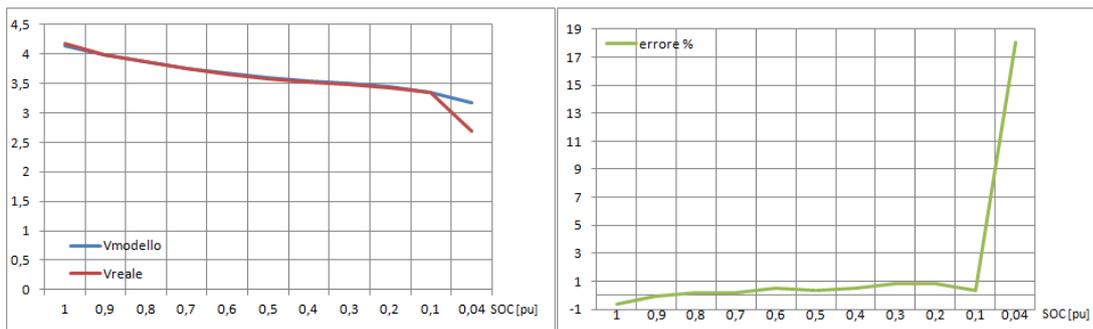


Figura 6.10: Confronto tensione modello con andamento sperimentale

Il brusco incremento dell'errore di stima del modello in condizione di scarica pressochè completa della cella è determinato dalla scarsa quantità di dati a disposizione presenti ⁷.

Questa limitazione non va ad incidere negativamente sull'affidabilità del modello in quanto, per motivi di sicurezza e di ottimizzazione tecnico-economica, i SdA solitamente lavorano in un intervallo limitato di *SOC* che è ben distante dai valori raggiunti nel test.

Si desidera comunque sottolineare come il modello, seppur in un test non particolarmente provante, sia in grado di simulare il comportamento non lineare tipicamente presente per valori particolarmente elevati del *SOC*.

Tuttavia, a causa delle limitate possibilità di confronto e verifica, non è possibile trarre delle considerazioni finali definitive.

⁷Effettuare delle prove in tali condizioni è gravoso per la cella

Capitolo 7

Comparazione delle famiglie Litio implementate

In questo capitolo verranno eseguiti diversi test in modo da poter effettuare una comparazione tra le risposte fornite dalle tre famiglie Litio implementate. Questa desamina risulta indispensabile in quanto non si prevedono futuri punti di svolta riguardanti i processi elettrochimici tipici degli accumulatori in questione, ma sarà l'utilizzo di nuove composizioni chimiche, in grado di integrarsi ed interagire in maniera ottimale, a determinare gli avanzamenti tecnologici e prestazionali per la categoria.

In particolare le tipologie Litio modellate sono le seguenti:

- La famiglia *NMC* è caratterizzata da un catodo costituito da Nichel, Manganese e Cobalto. Attraverso uno specifico bilanciamento dei due componenti principali, ovvero Ni e Mn, è possibile indirizzare le prestazioni dell'accumulo verso applicazioni di potenza o di energia in modo mutuamente esclusivo. Infatti il primo materiale attivo consente di ottenere un'alta energia specifica a scapito di una minore stabilità, mentre il secondo, riducendo l'energia specifica, consente di diminuire la resistenza interna, permettendo quindi la circolazione di correnti elevate [23]. Il modello implementato, viste le elevate correnti di scarica e carica consentite, è progettato per servizi di potenza (in particolare per veicoli elettrici);
- La famiglia *LFP* è caratterizzata da un catodo a base di ferro-fosfato, il quale determina una ridotta resistenza interna ed una maggior stabilità della tensione e della temperatura interna. Per queste ragioni questa tecnologia viene utilizzata in applicazioni di potenza, mentre presenta alcuni deficit in termini di energia specifica [23]. In questo caso, le correnti sopportate risultano essere di gran lunga superiori alla famiglia precedente;
- Infine si è modellata una generica famiglia *Li-Polimero*, la quale presenta le stesse disponibilità, in termini di materiali catodici, della famiglia Li-ione (infatti le LiPo sono una sottofamiglia). L'unica differenza è data dalla presenza di un materiale polimerico nell'elettrolita, il quale assume uno stato fisico simile al gel, garantendo quindi una maggiore sicurezza (no componenti liquide da controllare) e la possibilità di modellare la geometria della cella secondo le esigenze richieste. Sia per questa ragione, sia per i costi particolarmente alti, questa famiglia viene utilizzata principalmente nelle applicazioni elettroniche portatili, tuttavia le sue caratteristiche la rendono particolarmente adatta ad applicazioni ad alta energia, in quanto l'elettrolita risulta essere più sensibile alle alte correnti [24]. Infatti il rate di carica/scarica è particolarmente limitato rispetto le tipologie precedenti.

In accordo con le prove implementate nel modello, sono stati effettuati dei test generici e specifici, in modo da caratterizzare le peculiarità delle famiglie e di verificare la propensione (o la non propensione) a particolari cicli di lavoro. Inoltre, tutti i test sono stati eseguiti sia in presenza sia in assenza del BMS, in quanto la sua presenza, indispensabile nelle applicazioni reali, può influenzare pesantemente la risposta del sistema a sollecitazioni esterne.

Per quanto riguarda le caratteristiche elettriche delle batterie simulate, si è scelto di virare su due strade che costituiscono i due moduli utilizzati, uno per applicazioni di mobilità elettrica, e l'altro per

l'esecuzione di servizi di rete. Nel primo caso si è preso come riferimento un modulo utilizzato in un'applicazione veicolare reale, caratterizzata da una tensione e capacità nominale pari a 50 V e 100 Ah [25]. Viceversa, per l'applicazione di rete, ci si è riferiti ad un modulo usato da *Mitsubishi Heavy Industries*¹, caratterizzato da una tensione ed una capacità nominale rispettivamente di 15.6 V e 105 Ah. Ovviamente, nelle reali applicazioni, i rispettivi moduli verranno connessi in serie e/o parallelo al fine di raggiungere i requisiti elettrici richiesti, tuttavia, viste le ipotesi implementative del modello, l'analisi di un singolo modulo consente comunque di effettuare la comparazione delle diverse famiglie Litio. Ora verrà fatta un'analisi delle tre famiglie mediante dei test generici effettuati senza l'ausilio del BMS, in quanto si desidera solamente verificarne le peculiarità. Nelle sezioni successive, invece, verranno mostrati ed analizzati i test specifici eseguiti nei due casi in fase di studio.

7.1 Prove caratteristiche

Le prove di caratterizzazione eseguite fanno riferimento al modulo relativo alle applicazioni veicolari, mentre i test eseguiti sono i seguenti:

- scarica ad impulsi di corrente pari a 100 A, riportata nelle figure 7.1 e 7.2;
- ciclo completo di scarica/carica a 100 A, evidenziato dalle figure 7.3 e 7.4;
- le figure 7.5 e 7.6 riportano le grandezze caratteristiche dell'accumulatore a seguito dell'applicazione di una serie di gradini di corrente.

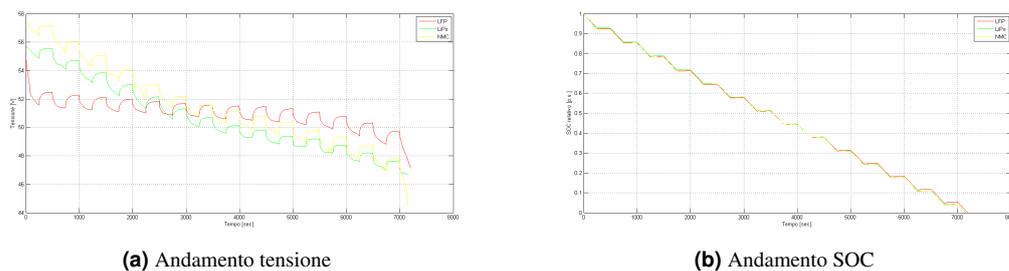


Figura 7.1: Andamenti relativi al test2

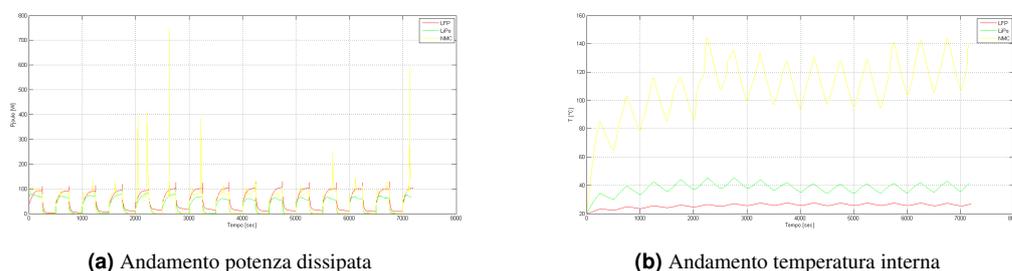


Figura 7.2: Andamenti relativi al test2

Ciò che si può notare riguarda, innanzitutto, come i valori di tensione iniziale e finale (a parità di SOC) siano differenti, in particolare il range di variazione delle famiglie *LiPo* e *NMC* (rispettivamente 18% e 26%), rispetto al valore nominale, sia più marcato rispetto la famiglia *LFP* (circa 16.4%²). Infatti, quest'ultima, denota una maggiore stabilità della tensione al variare del SOC. Un altro dettaglio, facilmente visibile in questa figura, riguarda la maggiore influenza del rate-effect e del recovery-effect per

¹[26]

²rispetto al valore nominale

le tipologie ad elettrolita liquido, dimostrato dal maggior “incremento” di tensione presente durante i periodi di riposo. Per quanto riguarda lo stato di carica, non si nota reali differenze.

Altre informazioni possono essere estrapolate dalla figura 7.2(b), la quale evidenzia, ricordando le ipotesi secondo le quali il modello termico è stato sviluppato³, come la famiglia NMC raggiunga temperature interne superiori. I fattori che influenzano gli andamenti di figura 7.2(a) sono diversi, e spaziano dal valore dell’impedenza interna della singola cella alla configurazione e al numero di celle necessarie per ottenere i parametri elettrici richiesti dal modulo.

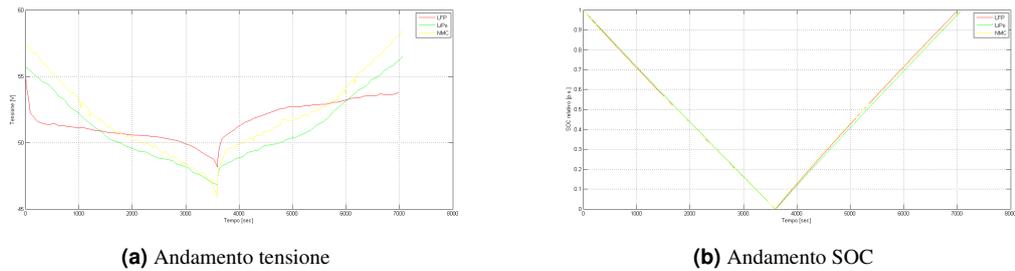


Figura 7.3: Andamenti relativi al test3

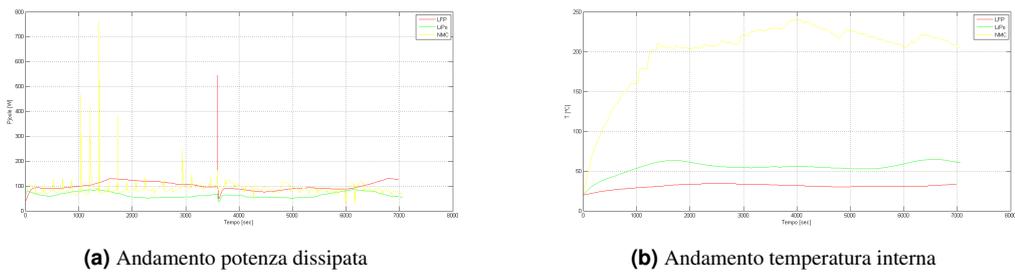


Figura 7.4: Andamenti relativi al test3

A conferma di quanto detto in precedenza, le figure 7.3 e 7.4 evidenziano una maggior stabilità della tensione e della temperatura interna della famiglia LFP rispetto alle due concorrenti.

Le figure 7.5 e 7.6 riportano gli andamenti delle varie grandezze a seguito dell’applicazione di svariati gradini di corrente. Le considerazioni che possono essere fatte rimangono le medesime dei casi precedenti.

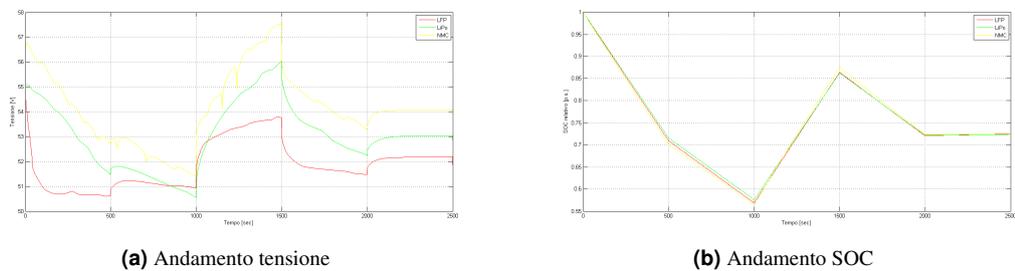


Figura 7.5: Andamenti relativi al test4

Da questa prima analisi generica vengono a confermarsi le caratteristiche tipiche della chimica catodica descritte ad inizio capitolo. Inoltre, benchè le ragioni che si “nascondono” dietro agli andamenti della

³Per questo motivo è necessario utilizzare questi dati in modo indicativo

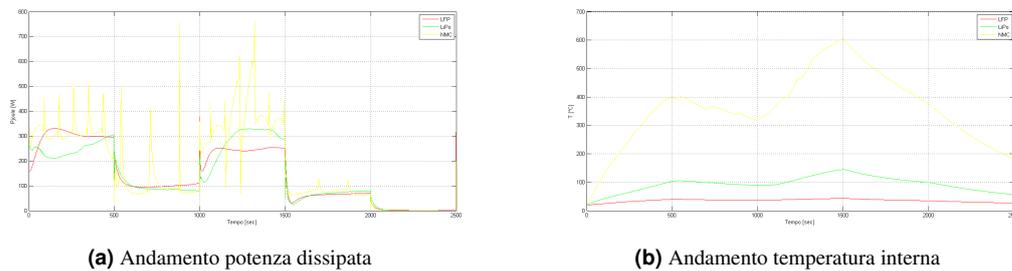


Figura 7.6: Andamenti relativi al test4

potenza dissipata e della temperatura interna siano molteplici e soggette alle ipotesi di costruzione del modello, si rileva una prima analogia tra il numero delle celle poste in parallelo e la temperatura interna del modulo. Infatti, ricordando che le capacità nominali delle singole celle sono, rispettivamente, 43 Ah per la famiglia *NMC*, 2.1 Ah per *LFP* e 12 Ah per la rimanente, si nota che la seconda tipologia necessita di un maggior numero di stringhe in parallelo per poter ottenere la capacità nominale prefissata (100 Ah), seguita dalla famiglia ai polimeri ed infine dalla *NMC*. Questo comporta una riduzione della resistenza interna ed un incremento degli elementi capacitivi, i quali possono spiegare la ridotta escursione termica delle tipologie precedentemente citate.

Un ulteriore elemento di discussione riguarda gli andamenti particolarmente frammentati della tipologia *NMC*, la quale può essere in parte motivata da quanto appena detto, ma soprattutto dalla maggior “densità” di valori disponibili per la simulazione dei parametri interni della cella⁴.

7.2 Analisi dei diversi comportamenti in campo veicolare

In questa sezione verranno esaminate le risposte delle tre famiglie durante l’esecuzione di un test di sollecitazione per veicoli elettrici ibridi, nel quale viene imposto un set di potenza variabile nel tempo.

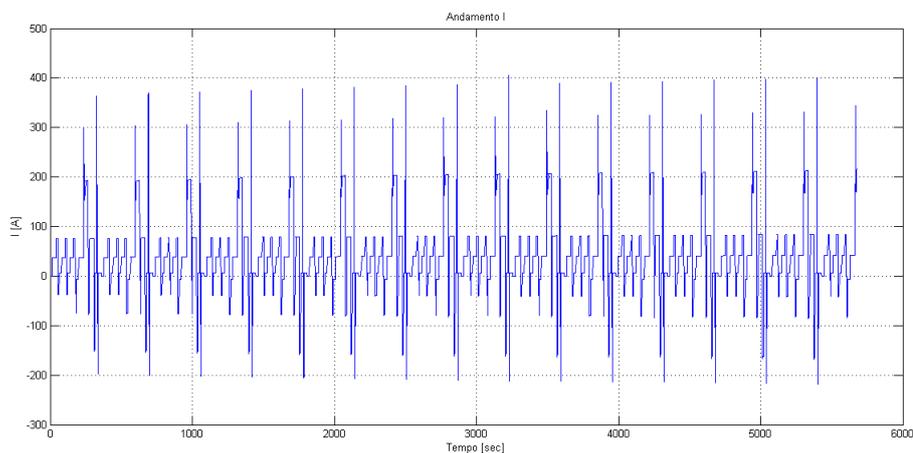


Figura 7.7: Andamento corrente richiesta

La figura 7.7 riporta l’andamento delle correnti sollecitanti lo storage, ricordando però, che tali valori dipendono dalla tensione presente ai morsetti. Per questo motivo i tre diversi moduli saranno soggetti a valori di corrente leggermente diversi anche se la simulazione che devono sostenere rimane la medesima. Al fine di comprendere al meglio le risposte dei diversi moduli, si riportano gli andamenti delle diverse grandezze con e senza logica di controllo.

⁴Si ricordi che questi dati provengono direttamente da test RSE

7.2.1 Senza BMS

Le figure 7.8 e 7.9 visualizzano gli andamenti delle grandezze principali in una simulazione totalmente priva di vincoli, per questo motivo non posso essere considerati dei veri test da cui trarre utili indicazioni sulla predisposizione o meno ad applicazioni veicolari.

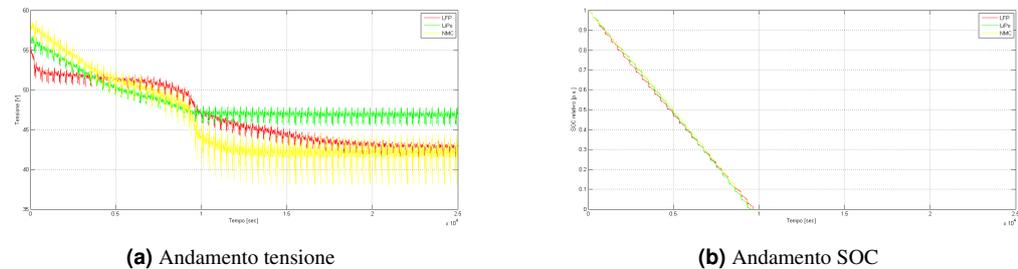


Figura 7.8: Andamenti relativi al test5

Lasciando piena libertà di simulazione, si può notare come tutte e tre le famiglie raggiungano la scarica completa dopo 10000 s. La parte interessante risulta essere quindi quella antecedente, in cui si possono notare i diversi andamenti delle tensioni medie. In particolare si nota la maggiore “stabilità” della tensione relativa alla famiglia LFP.

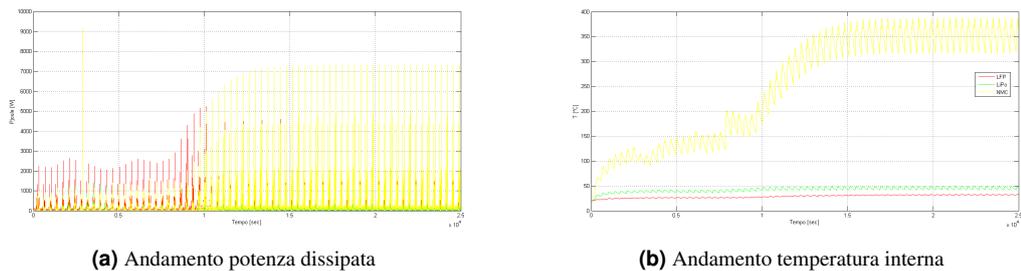


Figura 7.9: Andamenti relativi al test5

7.2.2 Con BMS

In questa simulazione, invece, sarà presente la logica di protezione del modulo, simulando in modo nettamente più realistico le reali condizioni di utilizzo. Infatti, ciò che risulta dalle figure 7.10 e 7.11, può fornire importanti indicazioni su quale tecnologia aderisca meglio ad una possibile applicazione veicolare. Ovviamente queste analisi risultano estremamente superficiali rispetto a ciò che viene effettuato nel mondo reale, tuttavia possono essere tratte considerazioni importanti.

Il test è stato eseguito considerando il range di lavoro spesso utilizzato in queste applicazioni per consentire un ridotto decadimento delle prestazioni a lungo termine. Infatti i limiti dello stato di carica sono stati fissati tra 0.8 (valore di partenza) e 0.2. Nel caso di superamento di tali limiti, o dei valori di corrente limite, il test verrà interrotto simulando il distacco dalla rete del dispositivo.

L'andamento delle tensioni e dello stato di carica forniscono importanti indicazioni, in particolare si vede come la tecnologia a polimeri interrompa la sua simulazione benchè il SOC sia compreso nei limiti. Questo è dovuto al fatto che viene richiesta una corrente di carica del modulo superiore ai limiti consentiti dalla tipologia, provocandone il distacco prima che il ciclo si concluda.

Una seconda considerazione, già rilevata in precedenza, riguarda l'andamento medio della tensione della famiglia LFP che risulta essere particolarmente stabile.

Anche le due figure relative alla potenza dissipata ed alla temperatura interna forniscono elementi di analisi, in particolare si nota come, giustamente, quando vengono richiesti elevati valori di corrente, si hanno picchi di potenza persa, mentre la temperatura interna, dovendo rispondere mediante transistori

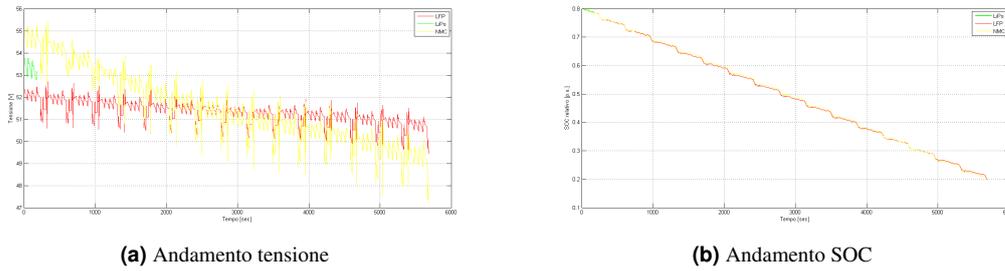


Figura 7.10: Andamenti relativi al test5 con BMS

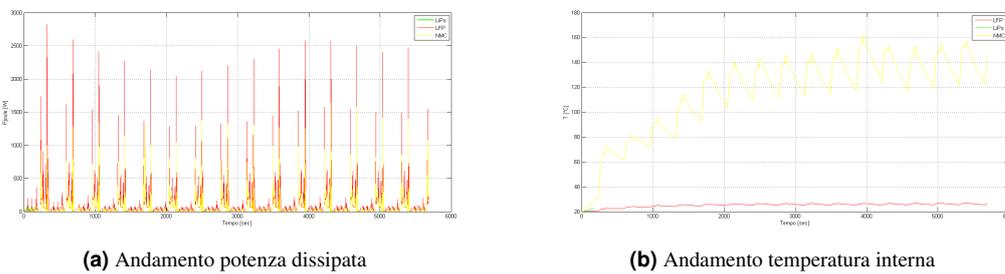


Figura 7.11: Andamenti relativi al test5 con BMS

termici, non presenta veri e propri picchi di temperatura ma un andamento ondulatorio. Questo non è totalmente valido per la famiglia *NMC*, la quale conferma una maggiore sensibilità ai gradini di corrente.

7.2.3 Considerazioni

I risultati ottenuti non sono particolarmente sorprendenti in quanto, viste le considerazioni fatte, vanno a confermare la propensione ad applicazioni di energia per la famiglia *LiPo*, la quale non permette la circolazione di correnti particolarmente elevate, motivo per cui, in una applicazione di potenza come quella della mobilità elettrica, non risulta essere idonea.

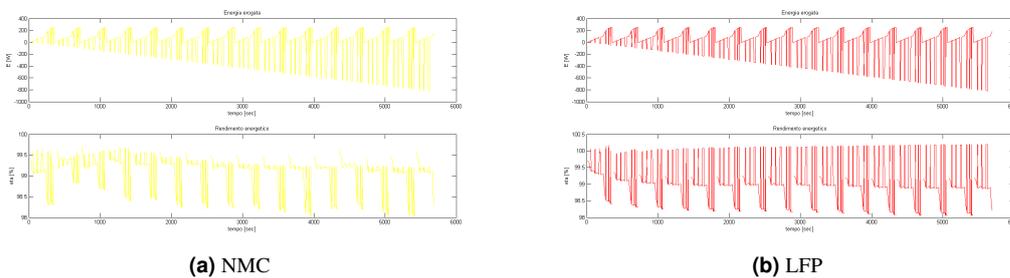


Figura 7.12: Andamenti dell'energia erogata e del rendimento nel test5 con BMS

Tra le due chimiche rimaste, ha la meglio la famiglia *LFP* grazie alla maggiore stabilità elettrica e termica, la quale facilita la gestione e l'ottimizzazione della stessa. Tuttavia, in un caso reale, è indispensabile effettuare una desamina approfondita riguardante la distribuzione della temperatura interna ed il controllo attivo delle condizioni elettriche di ogni singola cella, in quanto, come detto in precedenza, la tipologia che risulta essere più idonea necessita di un elevato numero di celle rispetto le due concorrenti.

7.3 Analisi dei diversi comportamenti per applicazioni di rete

In questa sezione i tre moduli verranno sottoposti a due diversi cicli di lavoro tipici dei servizi di rete richiesti da un accumulo di tipo elettrochimico. Le analisi fatte, come in precedenza, si divideranno in base alla presenza o meno della logica di protezione del modulo.

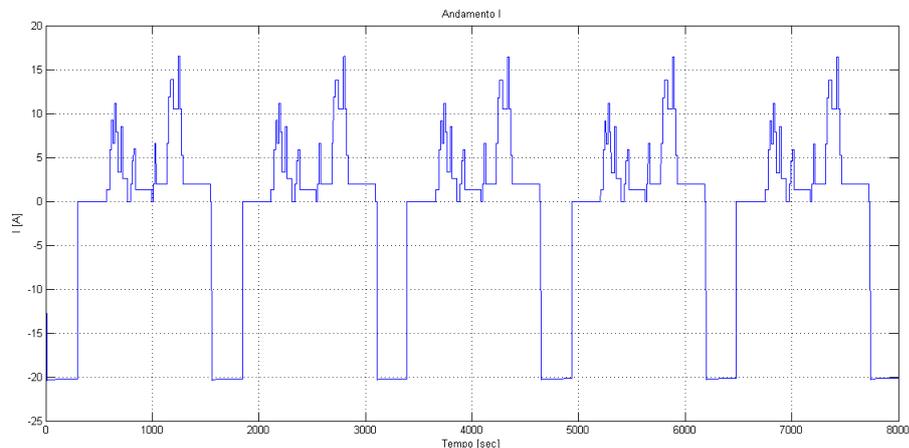


Figura 7.13: Andamento correnti test6

La figura 7.13 riporta le richieste di corrente di un ciclo di Time Shift, tuttavia è importante ricordare come il ciclo si basi su un set di potenza, il quale, oltre a venire scalato in base alla potenza del modello in fase di simulazione, determina il valore della corrente conseguente secondo la tensione presente ai morsetti del dispositivo. Per questo motivo l'andamento riportato rappresenta anche l'andamento dei gradini di potenza richiesti.

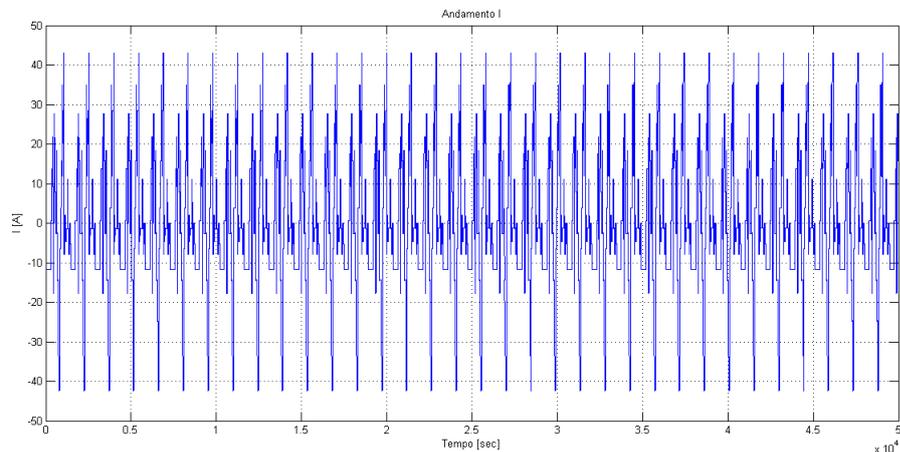


Figura 7.14: Andamento correnti test7

Le stesse considerazioni possono essere fatte per l'andamento di corrente riportato in figura 7.14, anche se in questo caso il ciclo simula il servizio di Power Balancing.

7.4 Time Shift

Questo servizio consente di fornire una maggiore costanza di utilizzo delle centrali elettriche tradizionali (le quali soffrono variazioni di carico) semplicemente accumulando l'energia in eccesso per poi fornirla

nei momenti di maggiore richiesta. Così facendo si evitano condizioni di lavoro non particolarmente performanti (che necessitano di tempistiche di attuazione non banali) delle centrali tradizionali, ma anche non si richiede l'intervento di centrali di media-piccola taglia per sopperire ai picchi di energia richiesta. Benchè queste centrali siano tecnicamente progettate per questo tipo di funzionalità, i costi risultano essere particolarmente elevati, senza considerare le difficoltà di gestione e comunicazione tra tutte le parti in gioco. Per questo motivo lo storage risulta essere un'interessante opzione tecnico-economica.

7.4.1 Senza BMS

Le considerazioni relative alle figure 7.15 e 7.16 riflettono le caratteristiche già precedentemente esposte, con la particolarità che questo tipo di servizio non può essere fornito a partire da una carica completa dello storage, altrimenti, visto l'andamento dello stato di carica, il servizio non potrebbe essere svolto al pieno delle potenzialità poiché il SdA verrebbe scollegato dalla rete una volta raggiunta la carica massima.

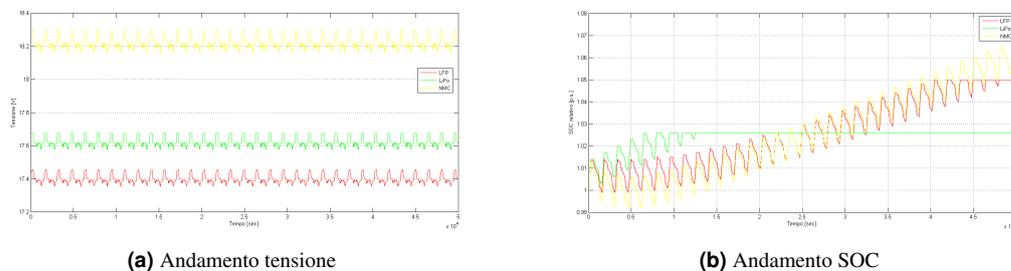


Figura 7.15: Andamenti relativi al test6

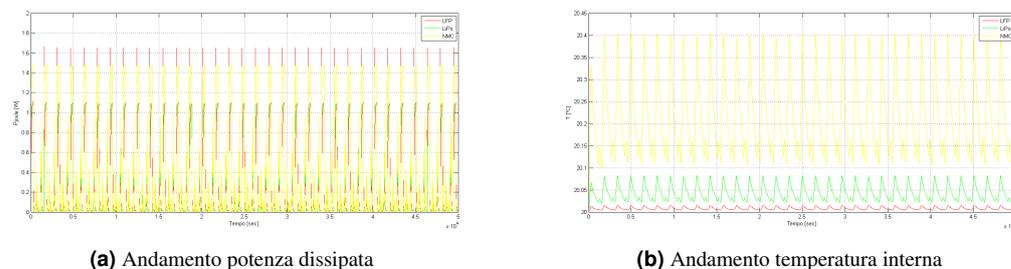


Figura 7.16: Andamenti relativi al test6

7.4.2 Con BMS

Visto l'andamento della potenza richiesta nei primi istanti, per poter eseguire il test ed evitarne la prematura interruzione, si è preferito partire da uno stato di carica pari a 0.76 anzichè 0.8, come mostrato dalla figura 7.17(b).

A differenza del test veicolare, gli andamenti di tensione e SOC relativo di figura 7.17 evidenziano come le tre tecnologie permettano il normale svolgimento del servizio richiesto. L'unica differenza riguarda il valore di tensione medio sulla quale ogni famiglia si assesta, tuttavia tale differenza, oltre ad essere ininfluenza, conferma come la variazione della tensione della famiglia NMC al variare del SOC sia marcata rispetto alle altre tipologie. Questo può essere verificato semplicemente notando che, a fronte di una tensione nominale del modulo pari a 15.6 V, la tensione media al 76 % della carica sia superiore ai 17 V e che all'aumentare del SOC, essa si allontani maggiormente dal valore nominale.

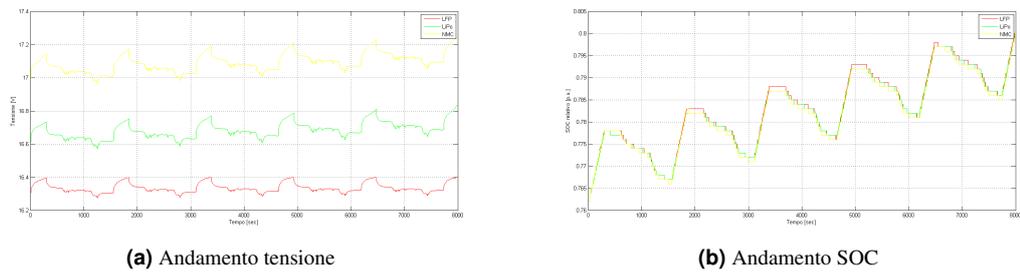


Figura 7.17: Andamenti relativi al test6 con BMS

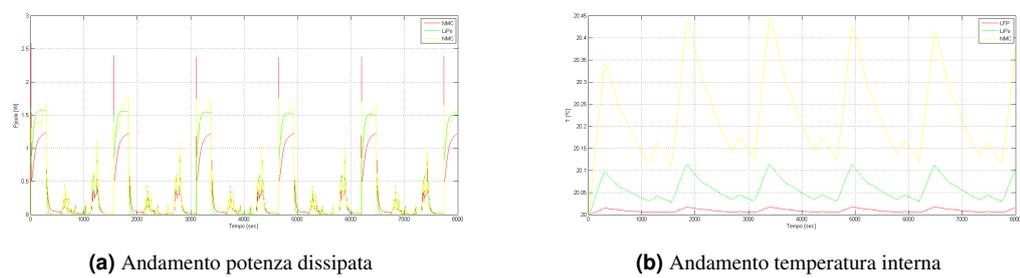


Figura 7.18: Andamenti relativi al test6 con BMS

Per quanto riguarda i picchi di potenza dispersa e l'andamento della temperatura interna di figura 7.18, si nota un miglior utilizzo dell'energia da parte della famiglia *LiPo*, la quale determina i vantaggi precedentemente descritti.

7.5 Power balancing

Il Power Balancing è un altro servizio che può essere reso dall'accumulo elettrochimico. A differenza del Time Shift, che, per certi versi, può essere assimilato ad un servizio di energia in quanto va a sostituire temporaneamente delle vere e proprie centrali di produzione, il Power Balancing può essere considerato un servizio di rete, in quanto cerca di garantire la stabilità della frequenza di rete bilanciando la potenza richiesta dalla rete con quella generata.

Per questo motivo il Power Balancing tende ad assumere le caratteristiche di un servizio di potenza, infatti l'andamento della corrente di figura 7.14 risulta essere particolarmente stressante in termini di potenza richiesta.

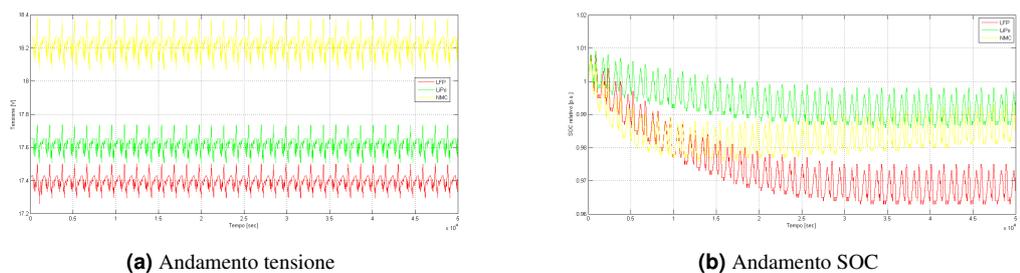


Figura 7.19: Andamenti relativi al test7

7.5.1 Senza BMS

Le figure 7.19 e 7.20 mostrano l'andamento delle grandezze caratteristiche a seguito di un'evoluzione libera. Le considerazioni che possono essere fatte rispecchiano quanto oramai detto per le altre prove.

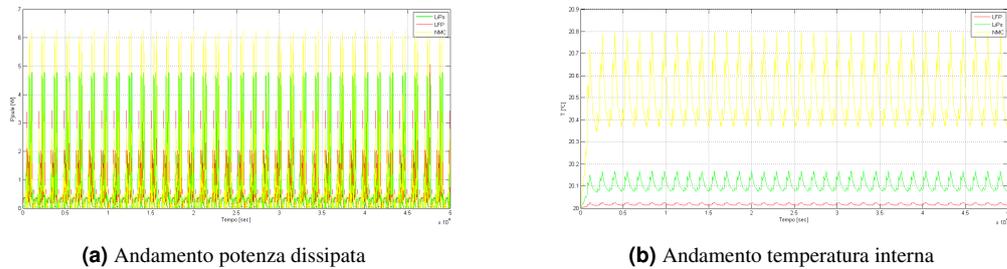


Figura 7.20: Andamenti relativi al test7

7.5.2 Con BMS

Introducendo la logica del BMS, si rileva che, benchè il Power Balancing si presti ad essere considerato un servizio di potenza, i picchi di corrente richiesti non superano il limite prefissato per la tecnologia meno indicata per questo tipo di applicazione, ovvero la *LiPo* (vedasi figura 7.21)

Un aspetto particolare evidenziato in figura 7.22 riguarda la correlazione tra l'andamento della temperatura interna e della potenza persa per effetto Joule. La prima annotazione riguarda il fatto che la temperatura media rimane praticamente costante durante i diversi cicli di lavoro, inoltre non si discosta molto dal valore di partenza impostato (20 °C). L'aspetto particolare riguarda invece la tecnologia *LFP*, la quale presenta i maggiori picchi di potenza dispersa, mentre l'andamento della temperatura interna risulta essere molto attenuato rispetto alle altre due famiglie.

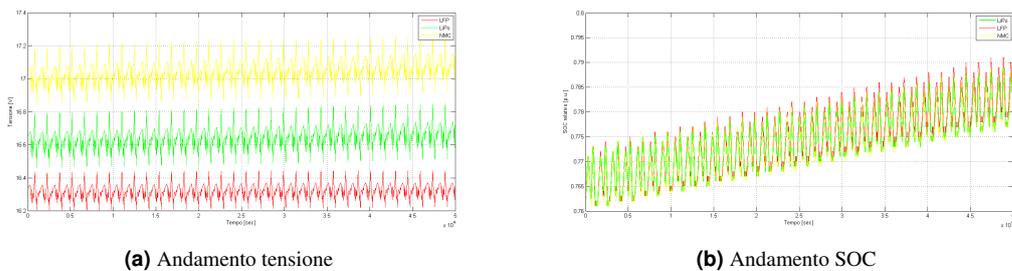


Figura 7.21: Andamenti relativi al test7 con BMS

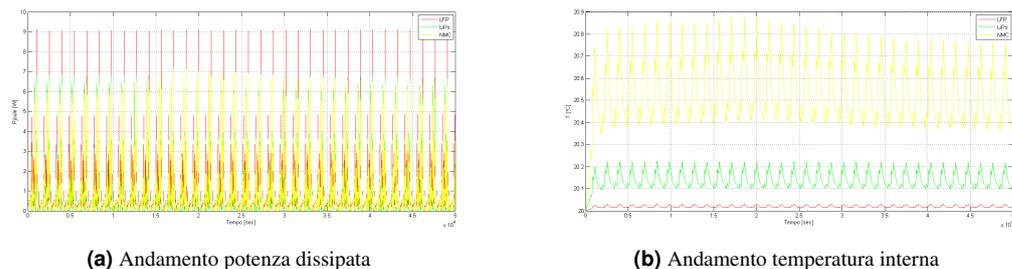
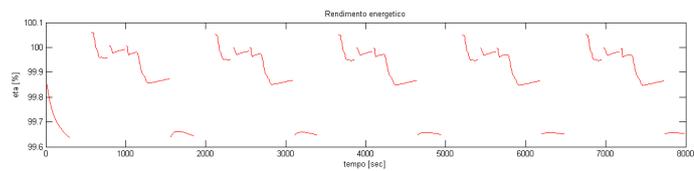
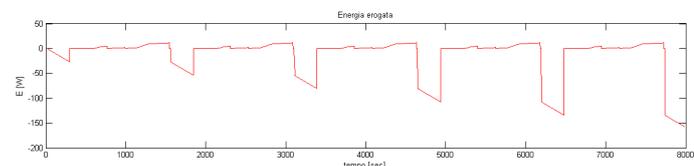


Figura 7.22: Andamenti relativi al test7 con BMS

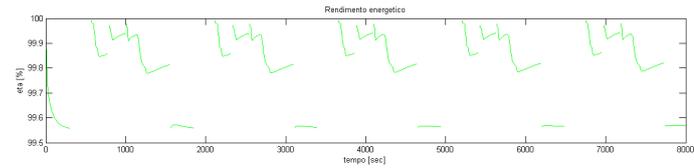
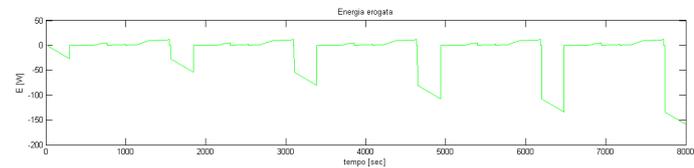
La potenza dissipata dipende da tre parametri fondamentali: la corrente circolante, la temperatura interna e i valori degli elementi circuitali interni. Mentre i valori assunti dalle prime due voci sono praticamente comuni a tutte e tre le famiglie, gli andamenti dell'impedenza interna equivalente possono essere estremamente diversi, sia per motivi di rappresentazione delle diverse chimiche, sia perchè il modulo in esame è costituito da una configurazione serie/parallelo tipica per ogni tecnologia esaminata.

7.5.3 Considerazioni

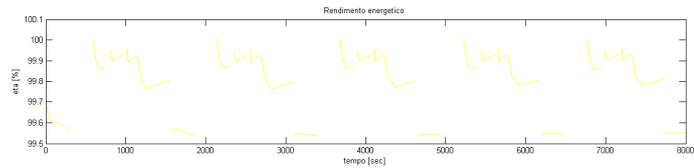
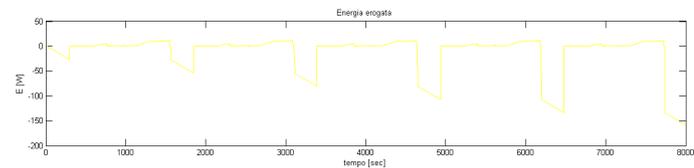
Gli andamenti di figura 7.23 evidenziano l'energia erogata ed il rendimento energetico di ogni famiglia simulata relativi al test6. Il primo parametro conferma che il ciclo comporta una carica parziale del dispositivo, come confermato anche dall'andamento dello stato di carica. Per quanto riguarda il rendimento, esso assume valori particolarmente alti confermando la bontà dell'accumulo elettrochimico.



(a) LFP



(b) LiPo

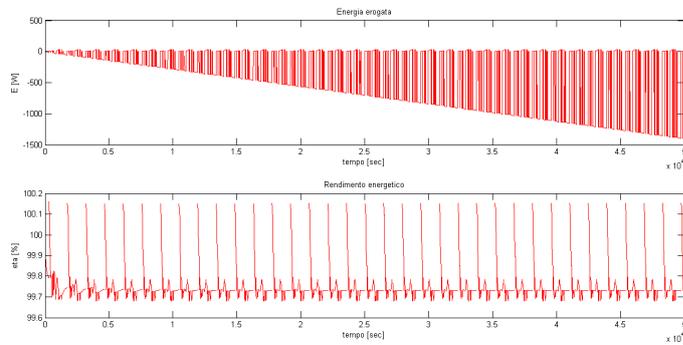


(c) NMC

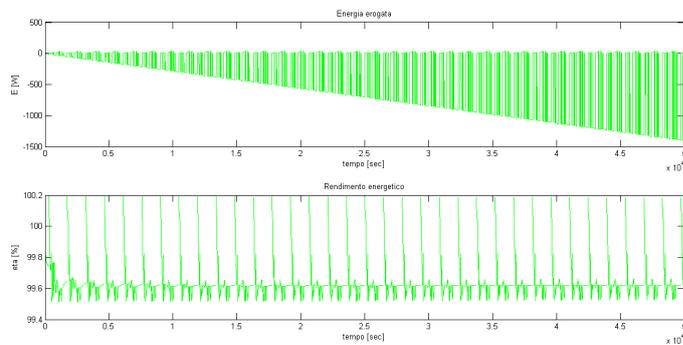
Figura 7.23: Andamenti dell'energia erogata e del rendimento nel test6 con BMS

Le figure riportano andamenti superiori al 100 %, ovviamente questo non è possibile ed è dovuto alla variazione tra una situazione di assorbimento di energia ad uno di erogazione.

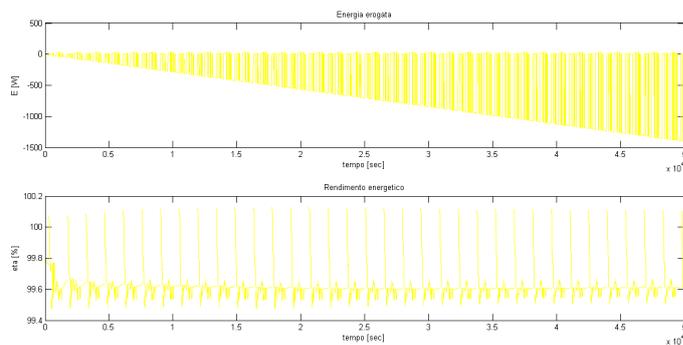
Per quanto riguarda il test7, le indicazioni sono simili al caso precedente, confermando come la famiglia *LFP* presenti un rendimento maggiore, seppur di qualche decimo di percento.



(a) LFP



(b) LiPo



(c) NMC

Figura 7.24: Andamenti dell'energia erogata e del rendimento nel test7 con BMS

7.6 Considerazioni finali

Nei capitoli precedenti sono stati svolti diversi test al fine di evidenziare le possibili peculiarità delle diverse tecnologie implementate, verificandone quindi le attitudini e l' idoneità a svolgere una tipologia di servizio rispetto ad un altro.

E' importante ribadire che il modello sviluppato si basa su diverse ipotesi semplificative, per questo motivo le conclusioni che verranno discusse in questo capitolo non possono essere considerate definitive,

in particolare per quanto riguarda il vero e proprio utilizzo relativo al servizio testato.

Tuttavia è possibile trarre conclusioni decisamente più affidabili per quanto riguarda il responso di ogni tecnologia, in particolare sottolineando le diverse risposte a seguito di stress della medesima natura.

Innanzitutto è indispensabile ricordare che la primaria distinzione tra le tre chimiche riguarda la loro natura “energetica” (vedasi *LiPo*), che garantisce una riduzione dei volumi (a parità di energia complessiva stoccata) ed una maggiore sicurezza intrinseca dovuta allo stato solido dell’elettrolita (questi aspetti non vengono evidenziati nelle simulazioni al calcolatore, ma sono particolarmente importanti a livello pratico), a differenza della propensione per i servizi di potenza delle due tecnologie rimanenti.

Questo aspetto è pienamente confermato dal test6, il quale richiede elevati picchi di potenza, e quindi di corrente, che non possono essere tollerati dalla famiglia *LiPo*, previa danneggiamento fisico-chimico dei materiali attivi. Infatti il BMS interviene staccando l’SdA, non permettendo il completamento del servizio richiesto.

Una prima evidenza, riscontrata anche nelle prove di caratterizzazione iniziali, riguarda l’andamento della tensione al variare dello stato di carica. La figura 7.3(a), relativa ad una scarica/carica standard a rate nominale, esplicita la peculiarità della chimica *LFP* di presentare una forte variazione della tensione nel passaggio da vuoto a carico, per poi assumere un andamento estremamente piatto fino al raggiungimento di bassi valori di carica (si nota una maggior pendenza negativa per *SOC* minore di 0.2). Lo stesso può essere affermato per quanto riguarda la fase di carica.

Viceversa, la famiglia ai polimeri e la *NMC*, non soffrono particolarmente del passaggio da vuoto a carico in fase di scarica, però presentano un andamento al variare del *SOC* del tutto privo di tratti “flat”, motivo per cui la gestione del DC bus normalmente connesso ai loro morsetti potrebbe risultare più complicato del caso precedente.

Un interessante spunto nasce dall’andamento della tensione nel test4 (figura 7.5(a)), nel quale vengono imposti dei gradini di corrente per un valore massimo di due volte la corrente di scarica nominale. In particolare, soffermandosi nell’intervallo di tempo compreso tra i 1000 sec e i 1500 sec, si può notare come la variazione di tensione dovuta al gradino di corrente sia più marcata per i casi *LiPo* ed *NMC*. Questo comportamento può essere imputato all’intrinseco andamento della tensione (quindi piatto) e dall’andamento delle tensioni ai capi dei diversi elementi elettrici interni caratterizzanti l’impedenza interna dell’oggetto.

Sempre in riferimento al medesimo esempio, si nota come, nel peggiore dei casi (famiglia *NMC*), la variazione della tensione sia pari a 6 V a partire da un valore approssimativo di 61.5 V iniziale. Si ha quindi una variazione percentuale leggermente inferiore al 10 %.

Prendendo invece come esempio i picchi di corrente estremamente elevati di figura 7.7, i quali sono richiesti in tempi molto brevi, si ottengono degli spike di tensione limitati. Infatti la figura 7.10(a) rimarca, sempre riferendosi al caso peggiore corrispondente alla famiglia *NMC*, una variazione del modulo della tensione di poco superiore ai 2 V. Se la si confronta con la tensione nominale di 50 V, si apprezza una variazione del 4 %.

Benchè il comportamento della tensione a seguito di vari stress test risulti abbastanza differente tra la chimica *LFP* e le altre due famiglie, con netta propensione della prima, si può affermare che la tensione ai capi di un sistema di accumulo elettrochimico risulti essere scarsamente sensibile al *SOC* (se si escludono stati di carica vicini alla scarica/carica totale, che raramente vengono utilizzati per garantire una miglior salvaguardia della batteria) e alle variazioni di corrente. L’ultimo possibile parametro di influenza, la temperatura interna (che va a modificare il valore dei parametri interni), non determina alcun impatto visibile semplicemente perchè la tensione a vuoto è praticamente insensibile a tale parametro, mentre gli elementi interni della modellizzazione, benchè pesantemente influenzati dalla temperatura, assumono valori estremamente piccoli per quanto riguarda le resistenze. La variazione delle capacità può essere notevole, tuttavia questo determina una variazione della costante di scarica che non comporta particolari effetti, soprattutto per i fenomeni di breve durata.

Questi risultati portano alla constatazione di come, sotto svariate ipotesi di funzionamento, la batteria assuma un comportamento simile ad un generatore di tensione in termini di tensione fornita ai morsetti. Questo argomento verrà trattato ed approfondito nei capitoli successivi.

Una ulteriore analisi può essere fatta per la tematica della temperatura interna, anche se non possono essere espresse delle considerazioni particolarmente approfondite in quanto le ipotesi del modello implementato sono particolarmente restrittive e “distanti” dalle condizioni reali durante il funzionamento di uno storage.

In tutte le prove proposte si nota la differenza di temperatura raggiunta dalle tre famiglie. In partico-

lare si nota come le tre tecnologie si assestino a temperature maggiori a partire dalla tecnologia *LFP*, passando per la famiglia *LiPo* e terminando con la chimica *NMC*. Per risalire alle motivazioni di tale comportamento, è necessario innanzitutto ricordare che il modello termico equivalente utilizza dei valori di riferimento univoci e quindi non adattati tecnologia per tecnologia, per questo motivo gli andamenti reali potrebbero discostarsi da quelli ottenuti. Questo è maggiormente vero in quanto non è stata implementata una logica relativa alla effettiva distribuzione della temperatura, agli squilibri tra le celle e ai sistemi di raffreddamento del modulo.

Tuttavia è possibile ricondurre tali andamenti alla configurazione necessaria delle celle al fine di ottenere le caratteristiche elettriche del modulo. Infatti, la potenza dissipata per effetto Joule è influenzata principalmente dal valore dei parametri resistivi interni (in realtà il parametro principale è il quadrato del valore di corrente circolante, tuttavia essendo tale valore comune alle tre famiglie, esso non rappresenta un elemento discriminante per questa analisi), in quanto connessi al valore della corrente.

Da un punto di vista resistivo, l'incremento di tale valore è determinato dal numero di celle messe in serie. Tale valore dipende quindi dal valore nominale della tensione di ogni singola cella che però risulta molto simile per tutte e tre le famiglie. Viceversa, la capacità nominale di cella determina il numero di stringhe da collegare in parallelo e, in questo caso, la famiglia *LFP*, con i suoi 2.1 Ah, risulta inferiore ai 12 Ah della famiglia *LiPo* e ai 43 Ah della *NMC*. Come conseguenza di ciò si ha un maggior numero di stringhe in parallelo nel primo caso rispetto agli altri due e del secondo caso rispetto al terzo, comportando quindi una divisione del valore della resistenza della singola stringa per il numero dei paralleli (in accordo con le ipotesi di idealità della serie/parallelo). Viste le comuni condizioni di lavoro delle tre famiglie, risulta evidente che questa è la reale causa delle differenze di temperatura raggiunte.

Un parametro che non presenta una particolare sensibilità alla chimica interna è il rendimento energetico, il quale si assesta su valori elevati, confermando la spiccata capacità delle batterie di convertire energia.

La modalità di verifica effettuata trascura alcuni fattori particolarmente importanti. Il primo, dovuto alla natura totalmente virtuale della simulazione, si riferisce alla problematica relativa agli ingombri, la quale incide in maniera determinante in fase di progetto sui temi meramente ambientali (temperatura, locazione, protezione meccanica) che rappresentano un ostacolo importante nelle applicazioni reali. Il secondo fattore risulta tanto rilevante quanto difficile da misurare e prevedere, ovvero l'invecchiamento del dispositivo e il conseguente decadimento delle prestazioni. Questa tematica coinvolge direttamente la chimica interna, e rappresenta un aspetto di fondamentale importanza per lo storage elettrochimico.

Capitolo 8

Analisi della risposta del sistema a rapidi transitori della tensione di rete

8.1 Premesse

Gli indiscussi vantaggi relativi ai sistemi di accumulo elettrochimico rispetto ad altre tecnologie di storage hanno prodotto una rapida espansione ed implementazione di tali dispositivi, ricoprendo un ruolo sempre maggiore in numerosi segmenti di mercato. Tale diversificazione, oltre a rappresentare un punto di forza, mette in evidenza la complessità di trattazione ed analisi dei sistemi in discussione.

Pur incentrando l'attenzione su tutte quelle applicazioni che, in un modo o nell'altro, vanno ad influire sul sistema elettrico, resta ad oggi difficile poter parlare in termini generici e, contemporaneamente, definire in modo chiaro e completo quali sono le caratteristiche, i comportamenti attesi e la reale influenza di questi sulla porzione di rete interessata.

Ovviamente, tutte queste questioni hanno portato inevitabilmente allo studio e allo sviluppo di normative che forniscano indicazioni utili a tutti i soggetti interessati, al fine di portare una certa standardizzazione e regolazione del prodotto.

8.2 Normative vigenti

Le normative di riferimento sono, per l'alta e la media tensione la CEI 0-16 [27], e la CEI 0-21 [28] per la bassa tensione. In realtà tali testi non prendono in considerazione l'accumulo elettrochimico, che invece viene trattato nelle rispettive varianti, denominate "V1", delle due normative ([29] e [30]).

I temi trattati sono particolarmente vasti, in quanto coprono tutti i possibili aspetti relativi a:

- caratterizzazione degli utenti;
- caratterizzazione delle reti;
- criteri per la scelta del livello di tensione e degli schemi di connessione;
- disposizioni per la compatibilità elettromagnetica;
- misura di continuità e qualità della tensione;
- sistemi di misura dell'energia;
- sistemi di comunicazione;
- contratti di connessione.

Tali precisazioni sono fondamentali al fine di garantire la massima qualità ed efficacia del servizio in un sistema dinamico e particolarmente esteso come quello elettrico. In aggiunta a tali voci, la norma contiene numerosi allegati, di carattere vincolante od indicativo, che si prestano ad un maggiore dettaglio di alcune tematiche tecniche particolarmente sensibili come:

- caratteristiche dei sistemi di protezione e loro coordinamento;
- caratterizzazione delle unità GD in termini di assistenza alla rete;
- prove sui generatori statici e dispositivi correlati.

Le normative in discussione forniscono particolari tecnici diretti principalmente agli utenti di rete e ai produttori dei dispositivi normalmente impiegati in essa. Per questo motivo le normative, ed in particolare le due varianti, rappresentano un importante sistema di chiarificazione tecnico-normativa dello storage di natura elettrochimica.

E' importante sottolineare, tuttavia, che vista la rapida espansione ed evoluzione dei SdA, le varianti non sono in grado, ad oggi, di coprire interamente le tematiche poste dallo storage. Per questo motivo le considerazioni che verranno fatte in seguito tengono conto della situazione attuale, ben consapevoli di come il contesto sia velocemente in mutazione. Ciò che si può affermare con certezza è che l'accumulo coprirà un ruolo sempre più importante sia a livello di rete, sia come supporto ed integrazione dei singoli utenti.

Come già citato nei punti precedenti, la normativa richiede di effettuare dei test di verifica dei generatori statici (come i sistemi di accumulo) e del sistema di cui essi normalmente fanno parte. Non è possibile definire in modo univoco il sistema che comprende il generatore, in quanto ogni applicazione può richiedere dispositivi di integrazione specifici. Tuttavia, un elemento imprescindibile è il dispositivo elettronico che consente di accoppiare e gestire al meglio i due sistemi interfacciati, il generatore e la rete elettrica.

Questa precisazione risulta essere indispensabile ai fini di poter identificare esattamente l'oggetto dell'esame, in quanto le normative prevedono una distinzione tra i generatori connessi alla rete mediante dispositivi rotanti o statici. In questo caso l'SdA viene considerato un generatore statico.

8.2.1 CEI 0-21

La normativa CEI 0-21 regola l'inserzione dell'accumulo elettrochimico nella rete di bassa tensione. Nel contesto attuale le applicazioni storage in BT non sono particolarmente diffuse a causa dell'elevato costo di installazione che frena la diffusione di questa tecnologia a livello abitativo. Tuttavia, benchè la norma non fornisca indicazioni particolarmente estese relative allo storage, è importante che essa sia presente al fine di garantire una minima regolamentazione futura.

La stessa rete in BT non è stata progettata per presentare sistemi di generazione (basti guardare i problemi relativi al fotovoltaico), tuttavia una possibile "minaccia", molto più attuale delle applicazioni residenziali, è data dai veicoli elettrici i quali sono in espansione e possono essere visti dalla rete come generatori distribuiti di notevole impatto (per un veicolo puramente elettrico l'accumulo si aggira intorno ai 20 kWh).

In riferimento alla norma, si vede come, per poter considerare un sistema di generazione attivo, la potenza dello stesso deve essere superiore a 1 kW. Visto e considerato che l'accumulo elettrochimico si presta ad un utilizzo di tipo attivo, verrà analizzato un sistema di potenza superiore al limite prescritto. Come accennato in precedenza, la normativa copre un vasto elenco di argomenti mentre le finalità di questo testo indirizzano l'attenzione al capitolo relativo alle "*Regole tecniche di connessione degli utenti attivi*", in quanto si vuole verificare il comportamento del sistema, ed in particolare dello storage, a seguito di particolari condizioni della rete. Tale aspetto è contenuto nei "*Servizi di rete*".

La qualità e la sicurezza del servizio elettrico rappresentano le fondamenta del sistema stesso, motivo per cui la normativa prevede un capitolo riguardante le prescrizioni relative alla GD, in cui ovviamente rientrano i SdA. Proprio questi ultimi rappresentano l'ultima sfida tecnico-normativa relativa all'integrazione delle nuove tecnologie "attive" all'interno della rete elettrica.

Viste le caratteristiche dell'accumulo elettrochimico e l'antecedente impatto della generazione distribuita, la normativa prevede una rigorosa verifica del comportamento del sistema all'interno dei normali fenomeni che si possono verificare in una rete elettrica durante il funzionamento. I servizi richiesti sono i seguenti:

- insensibilità agli abbassamenti di tensione;
- partecipazione al controllo della tensione;

- limitazione della potenza attiva generata;

La seconda e terza voce rappresentano dei requisiti fondamentali per il corretto esercizio della rete, infatti essi derivano dai servizi svolti dalle centrali di produzione tradizionali, le quali si prendevano interamente carico di garantire il mantenimento delle ottimali condizioni di esercizio. L'avvento massiccio, ampiamente distribuito e non regolato (per lo meno agli inizi), ha imposto un parziale trasferimento di compiti tra le centrali di produzione, il cui utilizzo è diminuito, alla GD, tra cui l'accumulo elettrochimico.

Questi aspetti, a causa dell'importante rilevanza, sono stati maggiormente approfonditi sia a livello teorico che pratico, mentre l'aspetto critico in cui si nota una mancanza di conoscenze riguarda il comportamento del sistema a seguito di variazioni di tensione di rete, con particolare enfasi per i transitori rapidi.

La prima voce, oggetto d'esame di questa analisi, assume particolare rilevanza in relazione ai fenomeni delle isole indesiderate e delle improvvise assenze di generatori o carichi anche in assenza di disturbi particolarmente intensi. Nel caso in cui il sistema si comporti come appena descritto, la rete, già sede di un disturbo, si ritroverebbe ad affrontare un'ulteriore fattore destabilizzante dovuto all'improvvisa mancanza di elementi passivi od attivi. Intrinsecamente, mantenendo la connessione del sistema con la rete, si determina una maggiore stabilità inoltre, in questo modo, è possibile richiedere al sistema stesso lo scambio di potenza attiva e/o reattiva in modo da sostenere la rete (di cui i punti due e tre dell'elenco). La normativa CEI EN 50160 fornisce la seguente definizione di *buco di tensione*: "Riduzione temporanea della tensione al di sotto del 90 % della tensione dichiarata per un periodo superiore o uguale a 10 ms e non superiore a 1 min, ove non sussistano le condizioni di interruzione; il buco di tensione unipolare è un buco di tensione che interessa una sola fase". Inoltre la profondità del buco di tensione viene definita come differenza tra il minimo valore efficace della tensione tra le fasi durante il buco e la tensione dichiarata tra le fasi. Infine, la durata di un buco di tensione è la differenza temporale tra l'istante di inizio della diminuzione della tensione e l'istante nel quale la stessa tensione ritorna oltre il 90 % del valore nominale.

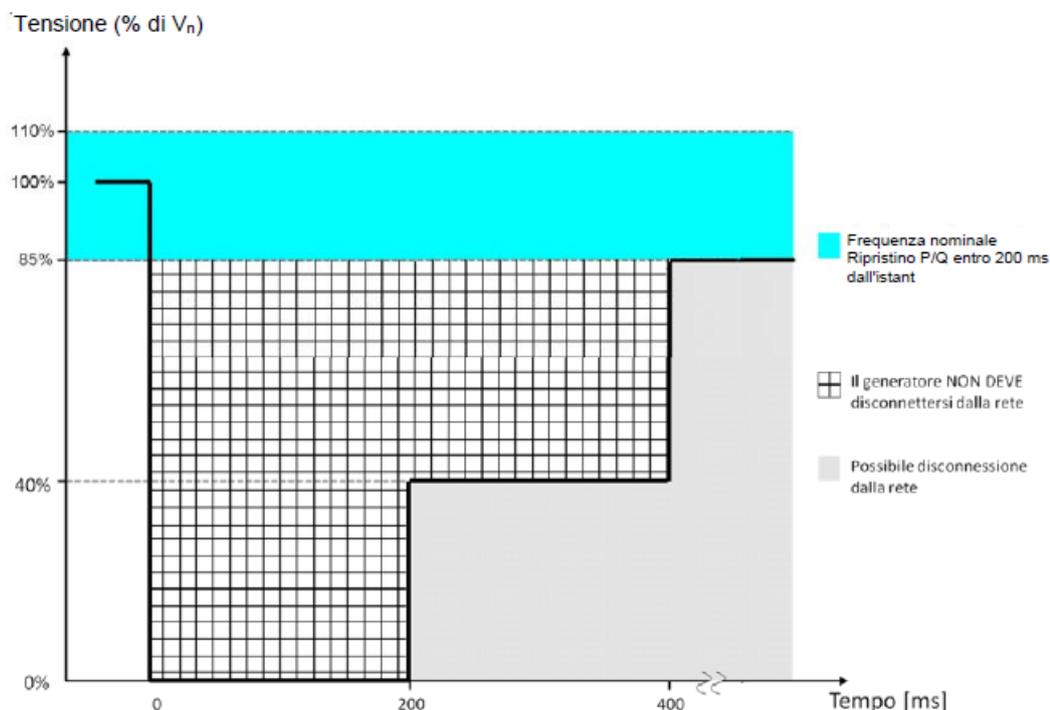


Figura 8.1: Requisiti per LVRT

La figura 8.1 regola il comportamento del sistema in risposta ad un buco della tensione di rete. Tali requisiti, validi per impianti di produzione con potenza complessiva superiore a 6 kW, vengono indicati

mediante l'acronimo LVFRT (Low Voltage Fault Ride Through), il quale indica la capacità del sistema di assicurare la continuità del parallelo rispettando i seguenti vincoli:

- deve essere garantita la connessione alla rete nella zona tratteggiata, consentendo comunque l'interruzione temporanea dell'erogazione di potenza attiva e reattiva;
- nella zona non tratteggiata il sistema può disconnettersi;
- entro 200 ms dal ripristino della tensione di rete compreso entro +10 % e -15 % della tensione nominale, il generatore deve riprendere l'erogazione della potenza attiva e reattiva immessa in rete prima della insorgenza del guasto, con una tolleranza massima del 10 % della potenza nominale.

Per una analisi più particolareggiata e specifica la normativa rimanda all'allegato B.1, paragrafo 6, denominato "Verifica della insensibilità agli abbassamenti di tensione (LVFRT capability)".

Nei passi introduttivi dell'allegato in questione, vengono descritte in modo accurato le procedure implementative per la verifica dei requisiti. La prima procedura si riferisce all'implementazione diretta nella rete elettrica del sistema, il che può rappresentare un ostacolo particolarmente gravoso in alcune situazioni. Per questo motivo viene concessa una prova alternativa mediante un simulatore di rete, la quale facilita tale operazione. Tuttavia, anche in questo caso, è necessario avere a disposizione la sorgente in c.c. e l'inverter.

Per quanto riguarda le modalità e le sequenze di verifica del LVFRT, esse sono specificate in figura 8.2 e devono essere eseguite con il generatore funzionante nei seguenti modi:

- tra il 10 % ed il 30 % della potenza nominale;
- al di sopra del 90 % della potenza nominale.

In entrambe le situazioni, il sistema deve funzionare per almeno 5 minuti o per il tempo necessario all'assestamento della temperatura interna del convertitore.

Elenco prove	Ampiezza residua della tensione fase-fase V/V_{nom}	Durata [ms]	Forma ^(*)
1 – guasto simmetrico trifase	$0,05 \pm 0,05$ (V_1/V_{nom})	200 ± 20	
2 – guasto simmetrico trifase	$0,45 \pm 0,05$ (V_2/V_{nom})	400 ± 20	
3 – guasto asimmetrico bifase	$0,05 \pm 0,05$ (V_3/V_{nom})	200 ± 20	
4 – guasto asimmetrico bifase	$0,45 \pm 0,05$ (V_4/V_{nom})	400 ± 20	
5 – guasto asimmetrico bifase in BT	$0,05 \pm 0,05$ (V_5/V_{nom})	200 ± 20	
6 – guasto asimmetrico bifase in BT	$0,45 \pm 0,05$ (V_6/V_{nom})	400 ± 20	

(*) A prescindere dal metodo utilizzato per simulare i transitori (simulatore o rete di impedenze), i fronti di discesa e di salita della tensione devono avere durata inferiore a 10ms

Figura 8.2: Sequenze dei test di verifica al LVFRT

Infine l'allegato fornisce indicazioni sui dati da evidenziare per verificare il corretto comportamento del sistema e definisce alcuni circuiti equivalenti utilizzabili per generare i disturbi di tensione di riferimento.

8.2.2 CEI 0-16

La norma CEI 0-16 nasce per le medesime motivazioni della norma precedente con la sola differenza che si attua nelle porzioni di rete esercite in media e alta tensione. Questo determina un approccio più specifico in quanto le potenze in gioco, i servizi richiesti e le modalità di funzionamento possono differire in maniera sostanziale dalle applicazioni in bassa tensione.

In questo caso, il *sistema di accumulo* (sempre considerato come generatore statico) viene definito dalla norma nel seguente modo: "insieme di dispositivi, apparecchiature e logiche di gestione e controllo,

funzionale ad assorbire o rilasciare energia elettrica, previsto per funzionare in maniera continuativa in parallelo con la rete di distribuzione”. Il sistema di accumulo (Energy Storage System, ESS) può essere integrato o meno con un generatore/impianto di produzione (se presente).

Mentre, in caso di *sistema di accumulo elettrochimico*, i principali componenti, sempre secondo definizione, “sono la batteria, i sistemi di conversione mono o bidirezionale dell’energia, gli organi di protezione, manovra, interruzione e sezionamento in corrente continua e alternata e i sistemi di controllo delle batterie (Battery Management System, BMS) e dei convertitori”.

Per quanto riguarda la potenza discriminante tra utenti attivi e passivi, le regole tecniche di connessione pongono come valore di riferimento 10 kW. Sia questo valore che quello di riferimento in BT risultano essere particolarmente bassi, motivo per cui praticamente ogni applicazione di storage risulti essere di natura attiva.

Nel documento di riferimento, la “*verifica della insensibilità alle variazioni di tensione (VFRT capability)*” viene esplicitata nell’allegato N, capitolo 8. Tuttavia, il testo citato, non fornisce indicazioni relative a generatori di natura elettrochimica. Per poter trovare il giusto riferimento è indispensabile porre l’attenzione alla variante VI, in particolare all’allegato Nbis, il quale contiene le medesime prove dell’allegato N originariamente presente nella normativa, riferite però ai sistemi di accumulo.

Le prove solitamente vengono eseguite in laboratori accreditati EA secondo la Norma ISO 17025, tuttavia esiste la possibilità di eseguire le verifiche in strutture non accreditate (ad esempio presso i costruttori) o in campo fintantochè le attrezzature usate rispettino i criteri della norma regolante e che le prove vengano effettuate sotto la supervisione diretta del personale del laboratorio accreditato.

Le modalità di prova richiedono quindi l’utilizzo fisico dell’accumulatore, comportando oneri pecuniari ed organizzativi elevati.

Per quanto riguarda le misure, esse devono essere effettuate ai terminali in corrente alternata del sistema di accumulo (comprendendo quindi il convertitore di accoppiamento alla rete), mentre, una specifica della normativa precisa come “le prove eseguite su un dato tipo di EESS sono ritenute valide in caso di varianti nella composizione dei componenti interni, se equivalenti ai fini del comportamento elettrico verso la rete, a fronte di un’adeguata documentazione tecnica a supporto”.

I due aspetti appena citati rappresentano i motivi di analisi dell’elaborato, in quanto vanno a definire in modo generico due questioni particolarmente complesse e ampie come l’influenza della chimica sulle prestazioni e l’utilizzo di modalità di verifica compatibili con i livelli di accuratezza richiesti ma adattati alle tecnologie di modellizzazione e visualizzazione presenti.

Le prove di verifica previste dall’allegato sono le seguenti:

- misure per la qualità della tensione;
- verifica del campo di funzionamento in tensione e frequenza;
- verifica delle condizioni di sincronizzazione e presa di carico;
- verifica dei requisiti costruttivi circa lo scambio di potenza reattiva;
- verifica dei requisiti costruttivi circa lo scambio di potenza attiva;
- verifica della insensibilità alle variazioni di tensione (VFRT capability);
- verifica della insensibilità alle richiuse automatiche in discordanza di fase.

Come in BT, l’attenzione verrà posta nel caso VFRT, nel quale la norma stabilisce, in base alle potenze in gioco, le modalità di prova di tabella 8.1

In aggiunta, la parte introduttiva dell’allegato fissa le condizioni ambientali e climatiche che devono essere rispettate durante le verifiche. Ciò è particolarmente vero nel caso in cui le verifiche vengano effettuate in laboratori i quali consentono un maggior controllo di questi parametri. Ovviamente, vista la complessità nella gestione di questi parametri per l’accumulo elettrochimico e, considerata la possibile presenza di ulteriori fonti di generazione, sono presenti particolari deroghe che “alleggeriscono” i vincoli richiesti.

A differenza della CEI 0-21, le prescrizioni relative alla VFRT capability in MT e AT sono più stringenti e dettagliate, a cui si aggiungono, inoltre, vincoli in caso di sovratensioni. La figura 8.3 mostra le diverse zone di funzionamento nelle quali la normativa prevede rigorosi codici di comportamento. Di seguito vengono elencate le disposizioni in caso di sottotensione (caratteristica LVRT):

Tabella 8.1: Condizioni di riferimento per la prova VFRT

Potenze fino a 200 kW	Potenze tra 200 kW e 1000 kW	Potenze superiori a 1000 kW
<ul style="list-style-type: none"> • su banco prova (prove a piena potenza) • in campo (prove a piena potenza) 	<ul style="list-style-type: none"> • su banco prova (prove a piena potenza) • in campo (prove a piena potenza) 	<ul style="list-style-type: none"> • su banco prova (prove a piena potenza) • in campo (prove a piena potenza) • simulazione con modello digitale validato (proposta da valutare in vista di uniformare con gli altri allegati relativi alle prove)

- il sistema di accumulo non deve disconnettersi dalla rete nella zona di colore bianco al di sopra e lungo i punti della caratteristica LVRT (V-t) indicata. I valori espressioni della tensione sono in termini percentuali riferiti alla tensione nominale concatenata in MT. In questa zona è consentito interrompere temporaneamente l'assorbimento o l'erogazione della potenza attiva scambiata prima dell'insorgenza del guasto. In qualsiasi caso il dispositivo non deve subire alcun danno;
- nella zona sottostante (area in grigio), il dispositivo può scollegarsi dalla rete;
- il comportamento descritto segue la logica "1 su 3", ovvero deve essere garantite le prescrizioni anche in caso di abbassamento di una sola delle tre tensioni concatenate;
- entro 400 ms dal ripristino del livello di tensione di rete compreso tra +10 % e -15 % della tensione nominale, il sistema di accumulo deve ripristinare l'assorbimento o l'erogazione della potenza attiva e reattiva scambiata presente nei momenti precedenti l'insorgenza del guasto con una tolleranza massima del 10 % della potenza nominale del convertitore. Nel caso in cui la tensione di rete si assesti nell'intervallo 85 %-90 %, è ammessa una riduzione della potenza assorbita/erogata in base ai limiti della corrente massima erogabile dal sistema di accumulo;
- in fase di studio, quindi non ritenuta vincolante ma indicativa in termini futuri, è la richiesta di sostentamento della tensione di rete, nella zona di distacco non ammesso, mediante l'erogazione di potenza reattiva.

Di seguito vengono elencati i comportamenti richiesti in caso di sovratensione (caratteristica OVRT):

- come per il primo punto del caso LVRT, il sistema di accumulo non deve disconnettersi dalla rete nella zona al di sotto e lungo i punti della caratteristica OVRT (V-t);
- nella zona sovrastante il sistema di accumulo può scollegarsi;
- la logica di funzionamento deve essere del tipo "1 su 3";
- entro 400 ms dal ripristino del livello di tensione di rete compreso tra +10 % e -15 % della tensione nominale, il sistema di accumulo deve ripristinare l'assorbimento o l'erogazione della potenza attiva e reattiva scambiata presente nei momenti precedenti l'insorgenza del guasto con una tolleranza massima del 10 % della potenza nominale del convertitore. Nel caso in cui la tensione di rete si assesti nell'intervallo 85 %-90 %, è ammessa una riduzione della potenza assorbita/erogata in base ai limiti della corrente massima erogabile dal sistema d accumulo.

Lo scopo attuale delle prove di prove riguarda solamente la capacità del sistema di riconoscere il guasto e di agire conseguentemente quanto prescritto in modo da ridurre le destabilizzazioni di rete ed assicurare, nel contempo, la salvaguardia del dispositivo. Come accennato nell'ultimo punto delle richieste

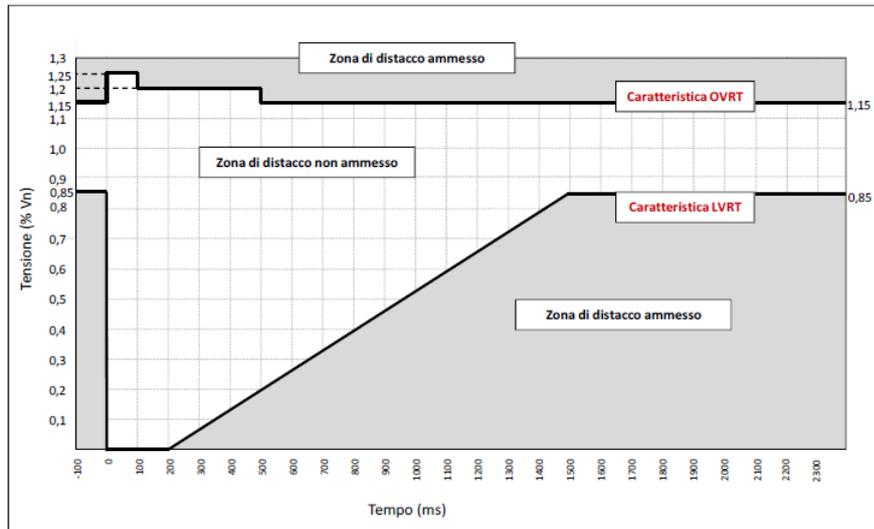


Figura 8.3: Requisiti per VFRT

relative al LVRT, la diffusione e distribuzione dei sistemi di storage all'interno della rete elettrica può avere un impatto uguale, se non superiore, a quello della produzione rinnovabile. Per questo motivo è indispensabile prendere provvedimenti nelle tempistiche corrette, in modo da sfruttare al meglio le potenzialità delle nuove unità di GD. Coerentemente con quanto visto nel caso delle fonti rinnovabili, ciò che verrà richiesto a queste unità è la disponibilità, in base alle proprie condizioni interne e di utilizzo dell'utente stesso, ad eseguire i servizi di regolazione di tensione e frequenza in loco, aiutando quindi la rete a riportare (o mantenere) i valori delle grandezze caratteristiche all'interno dei limiti consentiti. Anche in questo caso, le simulazioni di verifica sono quelle elencate in figura 8.4. Prima di ogni prova che si desidera eseguire, è indispensabile portare a regime termico il sistema.

Elenco prove	Ampiezza residua della tensione fase-fase V/V_n (*)	Durata [ms]	Forma(**)
1s – guasto simmetrico trifase	$0,05 \pm 0,05$ (V_1/V_n)	$= 200 \pm 20$	
1a – guasto asimmetrico bifase	$0,05 \pm 0,05$ (V_1/V_n)	$= 200 \pm 20$	
2s – guasto simmetrico trifase	$0,25 \pm 0,05$ (V_2/V_n)	$= 550 \pm 20$	
2a – guasto asimmetrico bifase	$0,25 \pm 0,05$ (V_2/V_n)	$= 550 \pm 20$	
3s – guasto simmetrico trifase	$0,50 \pm 0,05$ (V_3/V_n)	$= 950 \pm 20$	
3a – guasto asimmetrico bifase	$0,50 \pm 0,05$ (V_3/V_n)	$= 950 \pm 20$	
4s – guasto simmetrico trifase	$0,75 \pm 0,05$ (V_4/V_n)	$= 1400 \pm 20$	
4a – guasto asimmetrico bifase	$0,75 \pm 0,05$ (V_4/V_n)	$= 1400 \pm 20$	

(*) I valori di tensione residua sono espressi in per unit della tensione nominale concatenata in MT, quindi riferiti ai livelli di tensione previsti per guasti provocati su linee MT.

(**) A prescindere dal metodo utilizzato per simulare i transitori (rete di impedenze, simulatore o altro metodo), i fronti di discesa e di salita della tensione devono avere durata inferiore a 20 ms.

Figura 8.4: Sequenze dei test di verifica al LVFT

La normativa, oltre a fornire le misure necessarie da riportare per la verifica del corretto funzionamento del sistema, suggerisce un circuito di simulazione dei guasti nel caso in cui si utilizzi un simulatore di rete. In questo caso devono essere rispettati ulteriori vincoli riguardanti le tolleranze relative a scostamenti e ritardi della pendenza di discesa e salita della tensione, come riportato in figura 8.5.

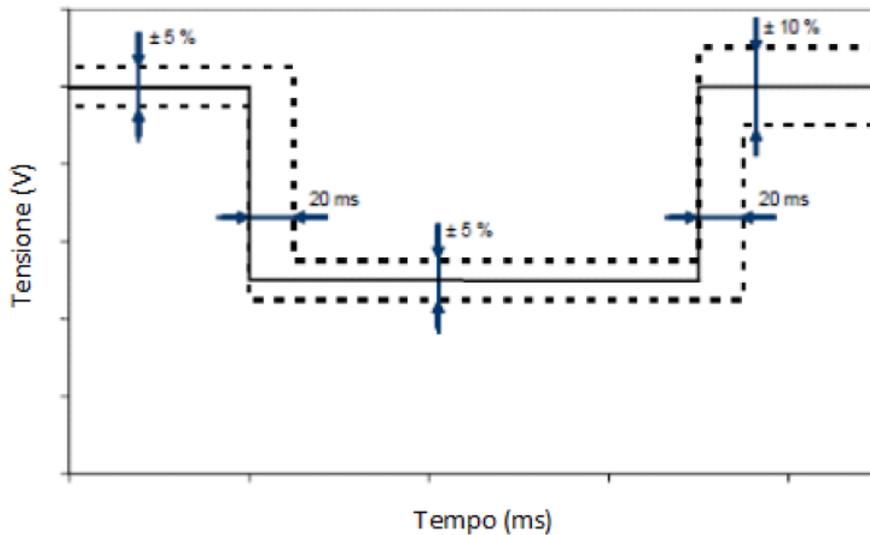


Figura 8.5: Tolleranze di ampiezza e tempo per le sequenze di prova di abbassamento della tensione di rete

Le stesse prescrizioni presenti per il test LVRT valgono anche per il test OVRT, la cui unica differenza riguarda le simulazioni di verifica, le quali sono riportate in figura 8.6. In figura 8.7 si riportano le tolleranze consentite secondo normativa.

Elenco prove	Ampiezza della tensione fase-fase V/V_n (*)	Durata [ms]	Forma(**)
OV1 – sovratensione simmetrica trifase	$1,25 \pm 0,05$ (V_{OV1}/V_n)	$= 100 \pm 20$	
OV2 – sovratensione simmetrica trifase	$1,20 \pm 0,05$ (V_{OV2}/V_n)	$= 500 \pm 20$	

(*) I valori di tensione sono espressi in per unit della tensione nominale concatenata in MT, quindi riferiti ai livelli di tensione previsti per guasti provocati su linee MT.
 (**) A prescindere dal metodo utilizzato per simulare i transitori (rete di impedenze, simulatore o altro metodo), i fronti di salita e di discesa della tensione devono avere durata inferiore a 20 ms.

Figura 8.6: Sequenze dei test di verifica al OVFT

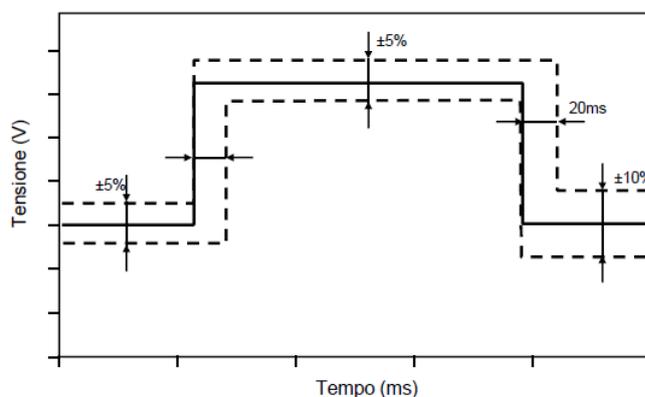


Figura 8.7: Tolleranze di ampiezza e tempo per le sequenze di prova di innalzamento della tensione di rete

La descrizione sin qui effettuata delle due normative, benchè incentrata sugli aspetti inerenti alle condizioni e agli obiettivi di questa tesi, evidenziano la meticolosità dei test di verifica. Tuttavia, due sono gli aspetti che colpiscono particolarmente, ovvero la mancata presa in considerazione

della possibilità di effettuare dei test in modalità simulata completa (non solo quindi per emulare la rete elettrica) e la “scarsa” importanza rivestita dal comportamento dell’accumulo stesso, in quanto vengono sempre prese in considerazione le grandezze di interfaccia tra il sistema e la rete elettrica.

L’assenza a riferimenti di modalità di simulazioni virtuali sorprende ma non del tutto, questo perchè gli sforzi intrapresi dai centri di ricerca in tutto il mondo diretti alla corretta modellizzazione dei sistemi di accumulo è stata particolarmente intensa negli ultimi anni, producendo infine risultati soddisfacenti per le svariate necessità e richieste di modellizzazione. La semplificazione portata dai simulatori è estremamente importante sia da un punto di vista tecnico che pecuniario, tuttavia a livello normativo è presente una rilevante mancanza. Questo è probabilmente giustificato dalla difficoltà nel definire una modellizzazione standard (e disponibile a tutti gli utenti richiedenti) che garantisca un livello di simulazione adeguato e rigoroso per lo scopo.

Per quanto riguarda la seconda questione, è evidente che la normativa preveda una accurata misurazione all’interfaccia dei due sistemi, tuttavia questo va a “cozzare” con la necessità di un utilizzo fisico dello storage in quanto basterebbe un modello equivalente che simuli correttamente il comportamento dell’accumulo elettrochimico.

Proprio per questo motivo, nei capitoli successivi verranno effettuati dei test di riferimento, in modo da poter trarre degli spunti a partire dai risultati conseguiti. Questo permetterà di “toccare con mano” le sollecitazioni e le effettive necessità del sistema, fornendo quindi indicazioni sulla possibilità o meno di utilizzare dei modelli virtuali e di definirne il livello di precisione ottimizzato all’uso.

8.3 Analisi del comportamento del sistema in LVRT

L’aspetto critico nell’uso di un modello equivalente di un SdA è dato certamente da eventi improvvisi che possono destabilizzare il normale funzionamento dello stesso. Questo aspetto risulta particolarmente importante per tutte quelle applicazioni connesse alla rete elettrica, essendo quindi soggette alle variazioni di esercizio di quest’ultima e alla relativa regolamentazione che ne vincola i comportamenti. Quando si parla di fenomeni transitori esistono numerose classificazioni, tuttavia in questo testo si desidera incentrare la trattazione sui transitori rapidi, i quali rappresentano ad oggi un elemento di discussione ed analisi, a differenza dei fenomeni “lenti” che sono stati ampiamente discussi in letteratura.

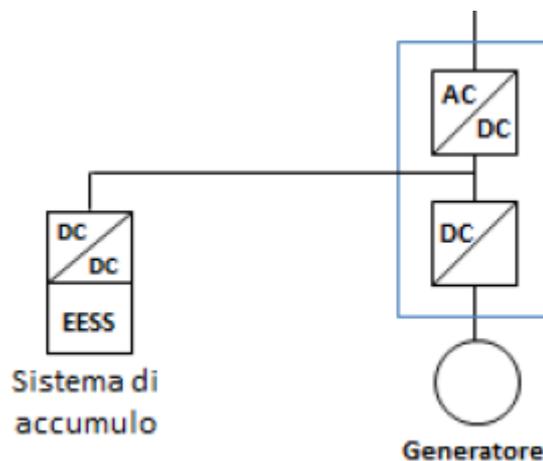


Figura 8.8: Esempio schema di connessione secondo normativa

Il modello implementato è stato scelto in modo da venire incontro a questa esigenza, infatti l’utilizzo del doppio bipolo in parallelo (riferimento al circuito equivalente elettrico) ha come scopo la miglior rappresentazione del comportamento dell’accumulo durante transitori particolarmente veloci. Tuttavia la normativa prevede l’analisi della risposta del sistema, il quale comprende, nel caso in esame, la batteria a Litio, un convertitore DC/DC, un bus DC e il convertitore finale di interfaccia con la rete elettrica. Questa serie di componenti rispecchia una applicazione standard reale, la quale può essere trovata anche all’interno delle normative CEI 0-16 e CEI 0-21, le quali prevedono inoltre la possibile presenza di altre fonti di generazione connesse al bus DC come mostrato in figura 8.8. Questo è particolarmente vero

per le applicazioni ad alta potenza ed energia tipiche della media e alta tensione, le quali rappresentano anche, ad oggi, la tipologia di utilizzo dei sistemi di accumulo più diffusa, ovvero quella relativa ai servizi di rete.

Il modello prodotto è tuttavia frutto di una serie di semplificazioni e restrizioni che ne limitano l'accuratezza e le modalità di simulazione, motivo per cui si è scelto di emulare il comportamento del suddetto sistema relativo ad un singolo modulo da 6 kW, connesso alla rete di distribuzione in BT. Inoltre, tutti i dispositivi e le sezioni a valle dello storage risultano essere ideali. Queste serie di semplificazioni tuttavia non vanno ad alterare lo scopo di questa trattazione, in quanto l'obiettivo non è quello di portare una documentazione estremamente accurata e standardizzata dei risultati ma di fornire utili indicazioni relative all'effettivo comportamento dello storage, evidenziando la necessità o meno dell'utilizzo di modelli di simulazione, della loro utilità e del livello di accuratezza necessario. L'analisi quindi sarà di natura introduttiva e volta a fornire indicazioni utili per futuri approfondimenti che aiutino a semplificare le modalità di verifica dei requisiti normativi, senza però dover rinunciare all'elevata qualità ed accuratezza richiesta in questi casi.

L'analisi punterà la propria attenzione ovviamente alla risposta del sistema a seguito della perturbazione, con però particolare attenzione al comportamento del modello equivalente della batteria.

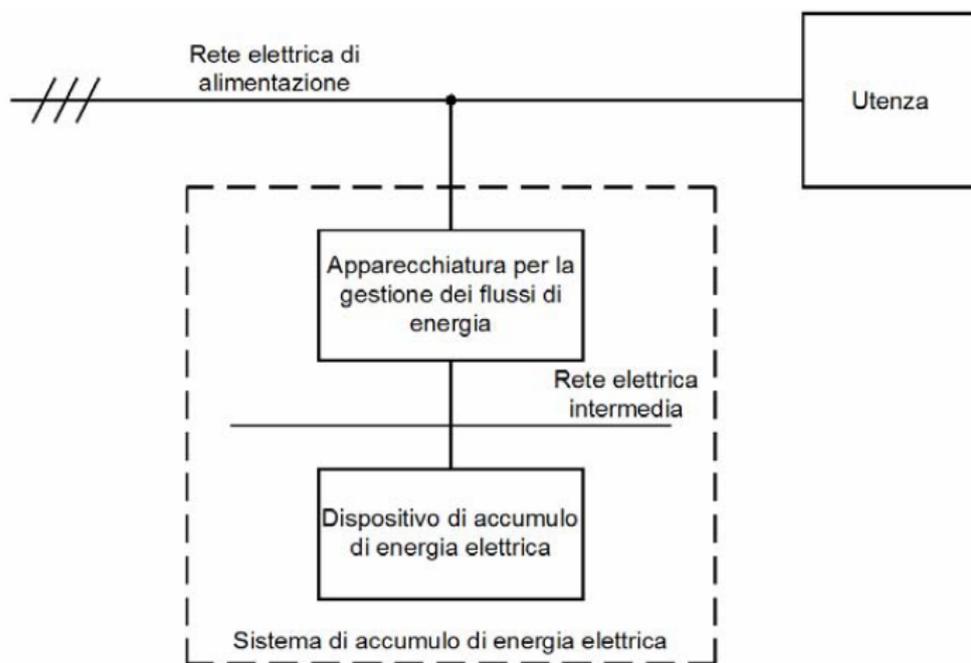


Figura 8.9: Schema a blocchi

Innanzitutto è indispensabile introdurre gli elementi costituenti il sistema di accumulo implementato, oltre al modello di batteria già ampiamente descritto. La figura 8.9 mostra la logica generica con la quale viene solitamente costituito un SdA al fine di ottimizzare l'utilizzo dell'accumulatore e, contemporaneamente, garantire il corretto comportamento del sistema visto dalla rete elettrica. Scendendo nel dettaglio, le configurazioni che possono essere assunte sono diverse in base alle necessità e al servizio svolto, tuttavia il caso più comune è quello rappresentato in figura 8.10.

Tale configurazione consente di svincolare la tensione ai morsetti della batteria con la parte in DC dell'inverter, permettendo quindi maggiori gradi di libertà nella gestione di entrambi i dispositivi. Questo determina l'impiego di logiche di controllo ottimizzate, oltre a facilitare la connessione di ulteriori fonti di energia mediante il bus DC. Di seguito si riporta la descrizione dei medesimi elementi implementati nel modello:

- immediatamente a valle dell'accumulatore si ha un *convertitore DC/DC*, il cui ruolo è quello di elevare la tensione ai capi della batteria per adeguarla a quella del bus DC. Questa scelta è stata

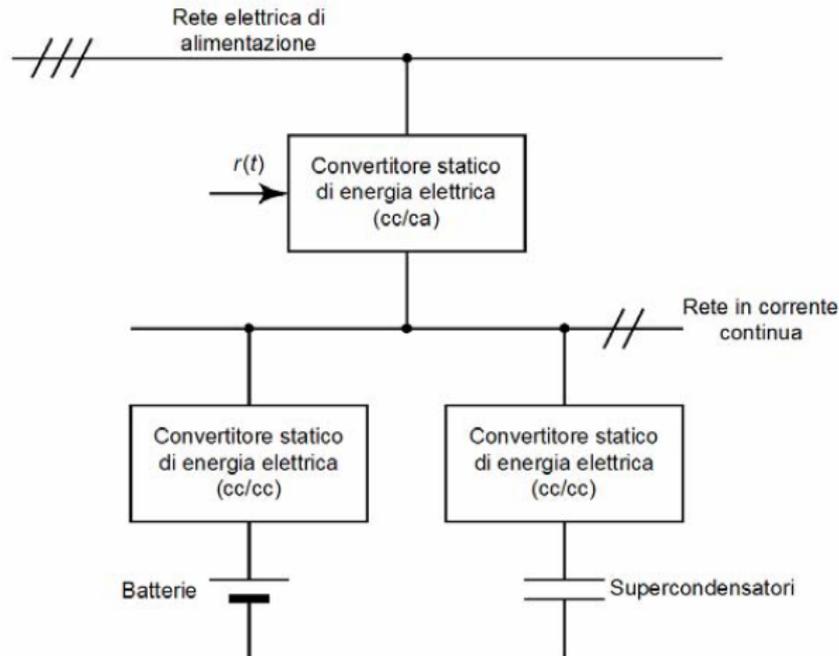


Figura 8.10: Schema di collegamento convertitori

fatta poichè, oltre ad essere uno degli schemi di connessione descritti nella normativa, identifica un caso reale nel quale sono presenti altre fonti energetiche connesse al bus. Da un punto di vista implementativo, non essendo richiesta un'elevata accuratezza, si è optato per un semplice meccanismo che scala la tensione della batteria per arrivare ai 680 V del bus DC (tale valore rimane costante). A sua volta la corrente viene ridotta mediante un fattore variabile definito dal rapporto tra la tensione del bus e quella della batteria. Si evidenzia che tale componente è trasparente alla potenza, ovvero non prevede elementi che comportino una perdita di potenza interna;

- il *bus DC* consente il trasferimento di potenza ad elevata tensione. A sua volta, esso costituisce il riferimento di tensione in ingresso all'inverter. Anche questo componente risulta essere trasparente alla potenza;
- l'*inverter monofase a un ramo*, costituito da componenti ideali, rappresenta invece il dispositivo di interfaccia tra la batteria e la rete elettrica. Il lato DC è costituito da un generatore di corrente controllato in modo tale da permettere il trasferimento di potenza desiderato. Nel lato AC è presente la tensione di rete imposta dalla stessa, quindi l'inverter è controllato in corrente, la quale è definita dalla potenza transitante desiderata. Il sistema tuttavia non permette la regolazione dello sfasamento della corrente erogata rispetto la tensione di rete, motivo per cui non è possibile effettuare una variazione della potenza attiva e reattiva, questo perchè non è lo scopo di questo elaborato quello di effettuare una regolazione di tali parametri. Infine, essendo l'inverter controllato mediante una logica PWM, è presente un filtro LC tra il dispositivo stesso e la rete, il quale determina lo sfasamento della corrente con la tensione di rete (il quale è controllabile regolando la fase della corrente imposta).

La simulazione riguarderà la richiesta di 6 kW di potenza da parte della rete elettrica. La batteria che supporterà tale flusso di potenza presenta una tensione nominale di 60 V ed una capacità nominale di 100 Ah.

Benchè il sistema presenti una struttura monofase, l'idea è quella di rappresentare un modulo relativo ad una applicazione trifase idonea ad eseguire servizi di rete, per questo motivo verrà eseguita sia la prova LVRT (uguale sia in monofase sia in trifase) sia una prova OVRT, la quale è prescritta solo

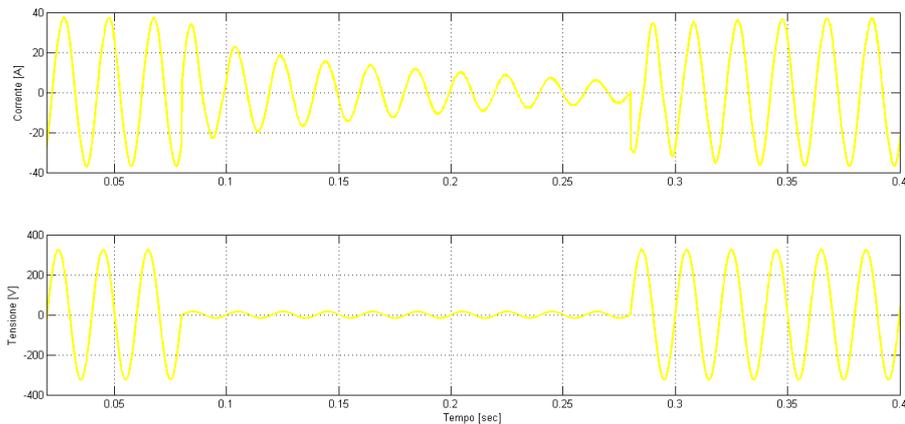


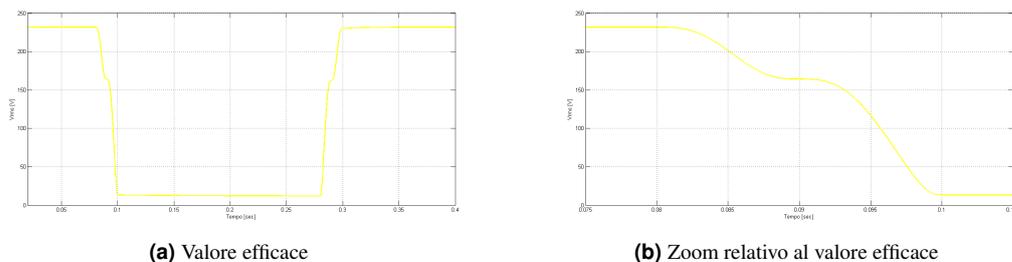
Figura 8.11: Andamento della tensione e della corrente nella rete elettrica

per applicazioni trifase. Questa “ambiguità” consente di ottenere una desamina di maggior spettro, permettendo quindi di stabilire con maggior accuratezza il comportamento del sistema.

8.3.1 Analisi risultati conseguiti

8.3.1.1 Prova LVRT

La prova implementata è, secondo il riferimento normativo, la 1s, la quale simula un guasto simmetrico trifase responsabile dell’abbassamento della tensione ad una ampiezza residua pari a 0.05 p.u.¹, per una durata pari a 200 ms. La figura 8.11 mostra l’andamento della tensione e della corrente di rete in normale funzionamento e in condizioni di disturbo transitorio da 0.08 s a 0.28 s. Quindi, in questo caso, la riduzione della tensione avviene proprio al passaggio per lo zero della stessa.



(a) Valore efficace

(b) Zoom relativo al valore efficace

Figura 8.12: Andamento del valore efficace della tensione di rete

Gli andamenti di figura 8.12 confermano l’avvenuta simulazione del guasto. Soffermandosi alla figura 8.12(b) si nota come la variazione del valore efficace avvenga entro i 200 ms prestabiliti da normativa. La figura 8.13 mostra come durante il transitorio il sistema non sia in grado di sostenere la potenza richiesta negli istanti precedenti al guasto. Questo comportamento, oltre ad essere già stato evidenziato dagli andamenti della tensione e della corrente di rete, è consentito dalla normativa attuale. Infatti il sistema si riporta, mediante un transitorio, alla modalità di lavoro precedente al guasto ben prima dei 400 ms successivi al ripristino della tensione all’interno del range previsto.

Gli andamenti riportanti in figura 8.14 mostrano il comportamento della tensione ai capi della batteria per tutte e tre le famiglie coinvolte. In particolare, passando dal dettaglio ritratto dalle figure di sinistra, in cui si possono notare lievi differenze tra le tecnologie, all’andamento della medesima grandezza delle figure di sinistra riportata ad una scala diversa, si nota come, ai fini pratici, la batteria in tutte le sue

¹rispetto al valore nominale della tensione concatenata

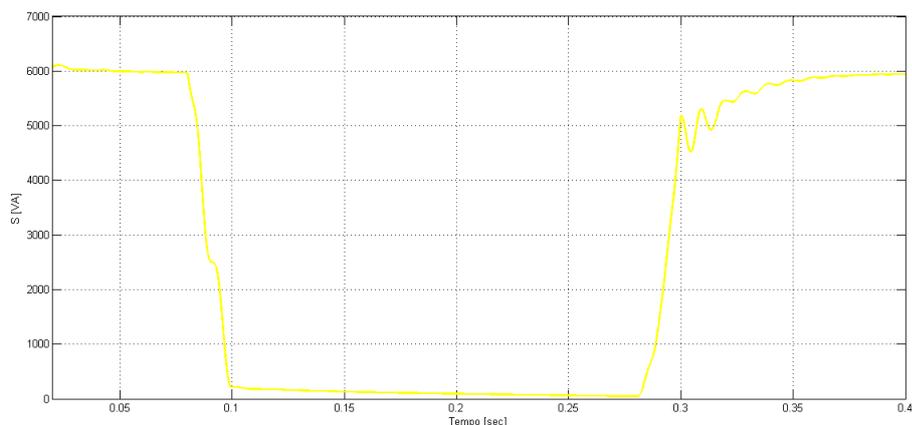
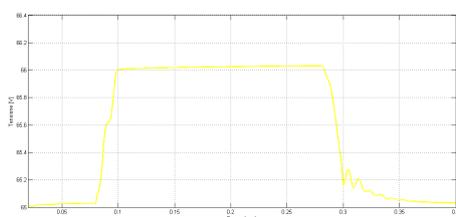
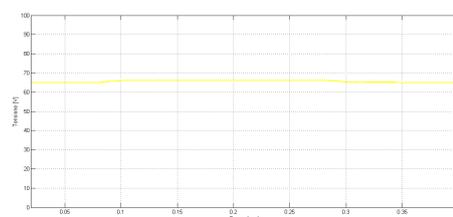


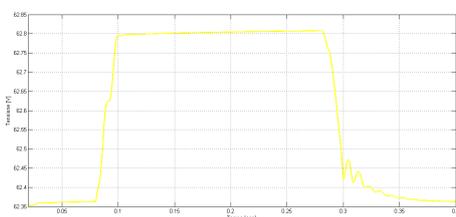
Figura 8.13: Andamento potenza apparente



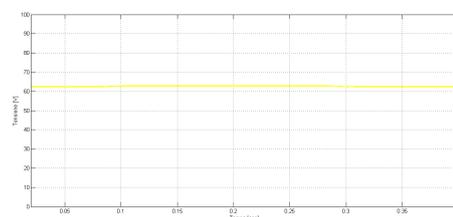
(a) Zoom tensione batteria NMC



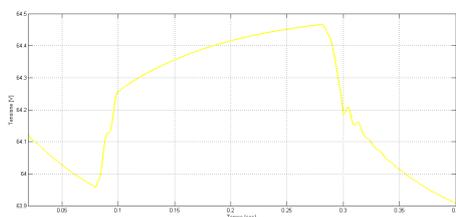
(b) Tensione batteria NMC



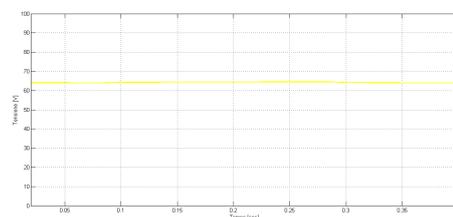
(c) Zoom tensione batteria LFP



(d) Tensione batteria LFP



(e) Zoom tensione batteria LiPo



(f) Tensione batteria LiPo

Figura 8.14: Andamenti delle tensioni ai capi della batteria per le tre famiglie

varianti, non presenti una importante sensibilità al disturbo di rete.

Infine, in figura 8.15, viene riportato l'andamento della corrente erogata dalla batteria, la quale segue l'andamento della potenza apparente a causa dell'insensibilità della tensione.

Per verificare il comportamento del sistema in modo completo, si è deciso di ripetere quanto fatto in precedenza, spostando tuttavia il momento di inizio del disturbo, in modo che avvenga quando il valore della tensione non sia nullo. Il momento stabilito è 0.075 ms, che corrisponde al raggiungimento

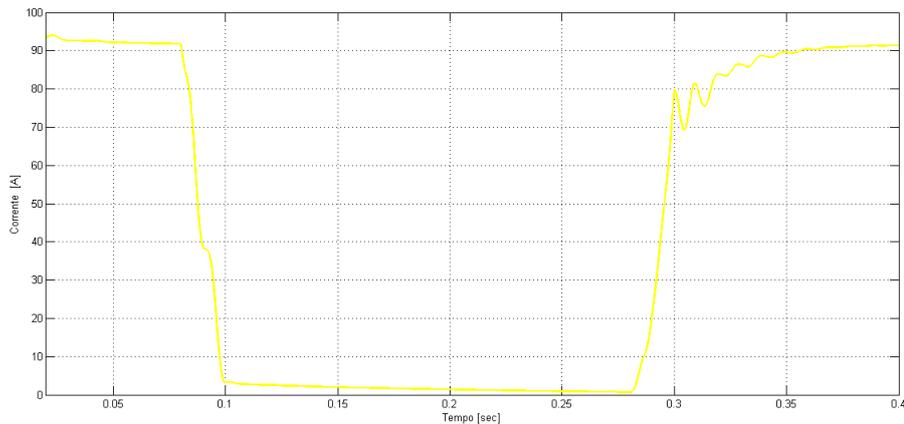


Figura 8.15: Andamento corrente erogata dalla batteria

del picco negativo della tensione di rete e che rappresenta il caso peggiore in quanto la variazione di tensione “indotta” raggiunge il suo valore massimo. La figura 8.16 evidenzia come il comportamento del sistema sia diverso.

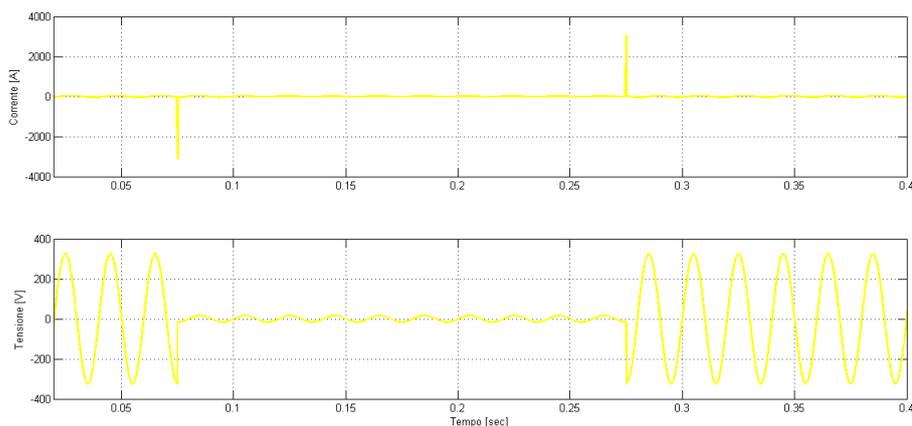


Figura 8.16: Andamento della tensione e della corrente nella rete elettrica

Il fatto che il disturbo avvenga in un istante in cui la tensione di rete non è nulla comporta una diversa risposta della corrente circolante, la quale presenta due spike in concomitanza dell'esatto momento di inizio e di fine del disturbo. Questo comportamento, oltre ad essere più gravoso per la rete elettrica e per il sistema, può essere problematico nel caso in cui la logica di protezione dell'inverter intervenga e scollegi il sistema dalla rete, non rispettando quindi la normativa vigente. L'inverter presenta una elevata tolleranza ai picchi di corrente in termini di modulo, tuttavia a causa dei rapidi regimi termici non è in grado di sostenere tali stress per lunghi periodi.

Mentre in figura 8.17 è mostrato l'andamento del valore efficace della tensione, il quale raggiunge il valore desiderato mediante un transitorio diverso e leggermente più lento rispetto al caso precedente, senza però violare i limiti normativi.

Questo comportamento è valido per qualsiasi altro istante di sviluppo del disturbo si scelga, tuttavia il momento scelto rappresenta la situazione più critica in termini di valore massimo raggiunto dal picco di corrente.

Un ulteriore elemento di controllo necessario nelle applicazioni reali riguarda la variazione di fase riscontrata durante il transitorio. E' indispensabile sottolineare che il modello implementato prevede un controllo in potenza apparente, nel senso che non è prevista una logica che permetta di soddisfare le

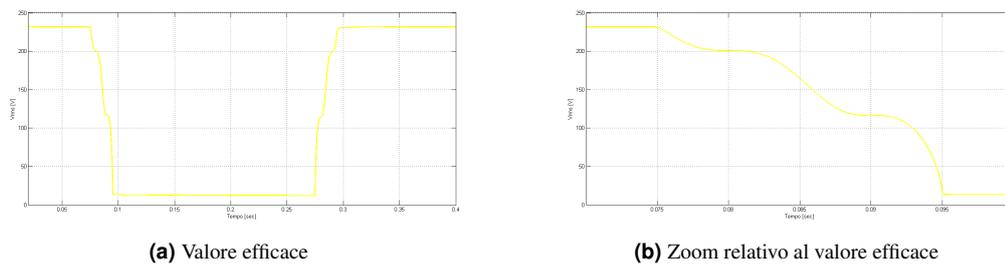


Figura 8.17: Andamento del valore efficace della tensione di rete

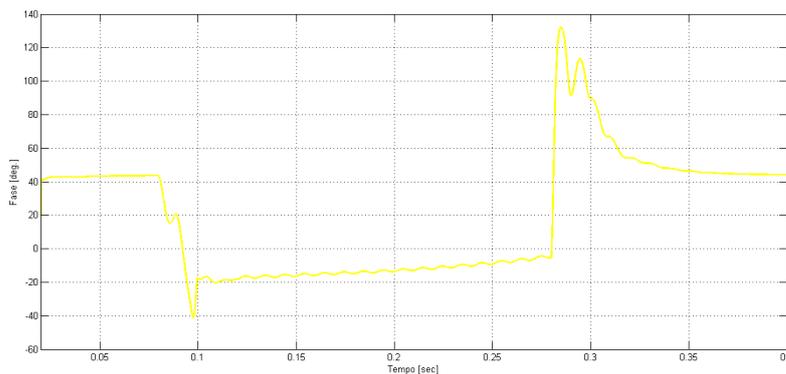


Figura 8.18: Andamento dello sfasamento visto dalla rete

richieste in potenza attiva e reattiva della rete. Questa decisione è stata presa in quanto non è motivo di interesse di questo elaborato prevedere un qualsiasi sistema di regolazione dello sfasamento presente tra tensione di rete e corrente circolante.

Tuttavia è giusto riportare la variazione ottenuta (vedasi figura 8.18), in quanto durante il disturbo può comportare ulteriori problemi oppure, potendo controllare il parametro, aiutare la rete nel ridurre gli effetti del disturbo.

8.3.1.2 Prova OVRT

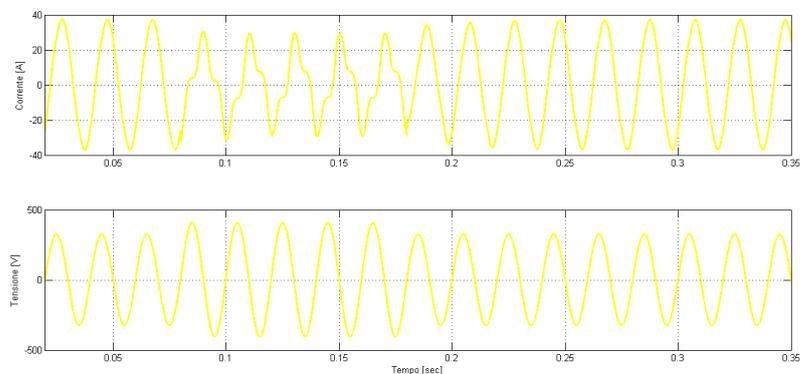


Figura 8.19: Andamento della tensione e della corrente nella rete elettrica

La prova implementata, denominata, secondo normativa, OV1, rappresenta una sovratensione simmetrica trifase che porta la tensione concatenata ad un valore 1.25 volte maggiore di quello nominale, per

un periodo di 100 ms.

La figura 8.19 mostra l'andamento della tensione e della corrente di rete in normale funzionamento e in condizioni di disturbo transitorio da 0.08 s a 0.18 s. Quindi, in questo caso, la riduzione della tensione avviene proprio al passaggio per lo zero della stessa. Un dettaglio di interesse è rappresentato dall'andamento della corrente durante il disturbo, la quale oltre a ridurre la propria ampiezza, presenta un andamento distorto sintomatico di una maggiore influenza delle armoniche indesiderate.

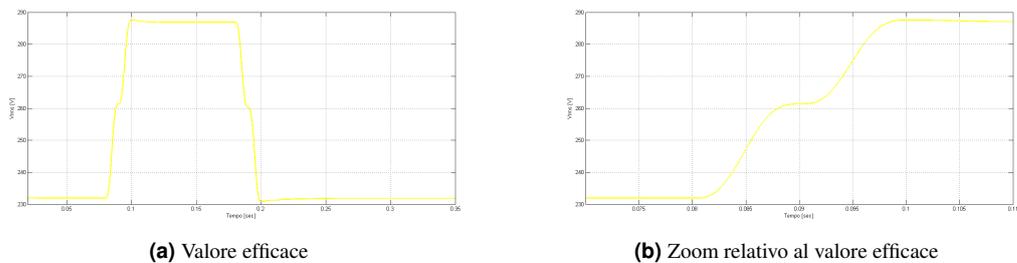


Figura 8.20: Andamento del valore efficace della tensione di rete

Gli andamenti di figura 8.20 confermano l'avvenuta simulazione del guasto. Soffermandosi sulla figura 8.20(b), si nota come la variazione del valore efficace avvenga entro i 200 ms prestabiliti da normativa.

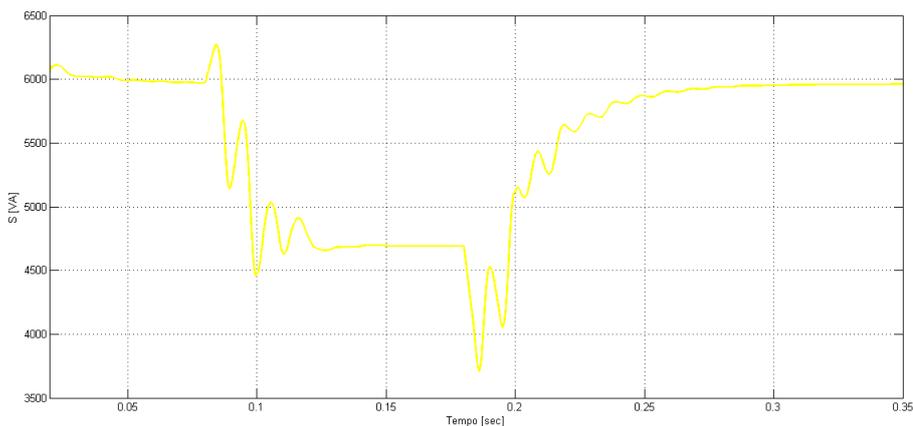


Figura 8.21: Andamento potenza apparente

La figura 8.21 mostra come durante il transitorio il sistema non sia in grado di sostenere la potenza richiesta negli istanti precedenti al guasto. A differenza del test LVRT, la potenza scambiata durante il disturbo non si annulla ma semplicemente si assesta su un valore inferiore, per poi tornare al valore precedente entro i 400 ms concessi da normativa.

Gli andamenti riportati in figura 8.22 confermano come le diverse risposte al disturbo dei tre casi implementati non influiscono sul comportamento generale della batteria.

Come per il caso precedente, l'andamento della corrente erogata dalla batteria (figura 8.23) segue l'andamento della potenza scambiata.

In analogia a quanto fatto in precedenza, per verificare il comportamento del sistema in modo completo, si è deciso di spostare il momento di inizio del disturbo, in modo che avvenga quando il valore della tensione non sia nullo. Il momento stabilito è 0.075 ms. La figura 8.24 evidenzia come il comportamento del sistema sia diverso.

Le considerazioni che possono essere fatte ricalcano esattamente quelle discusse nel paragrafo relativo al test LVRT, sottolineando quindi la propensione di questa tecnologia nel mantenere un rigido comportamento a fronte di situazioni particolarmente diverse e stressanti. Tuttavia si può notare come lo spike di corrente raggiunga valori inferiori al caso precedente, questo è dovuto al fatto che il passaggio dal

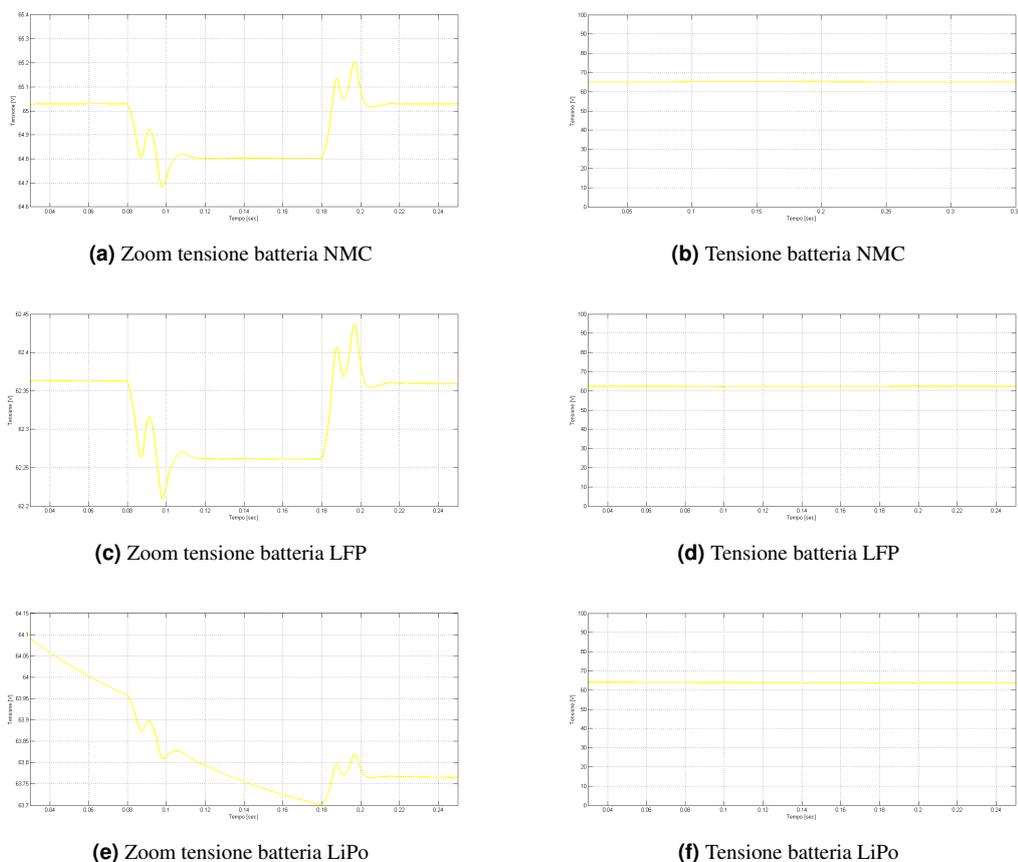


Figura 8.22: Andamenti delle tensioni ai capi della batteria per le tre famiglie

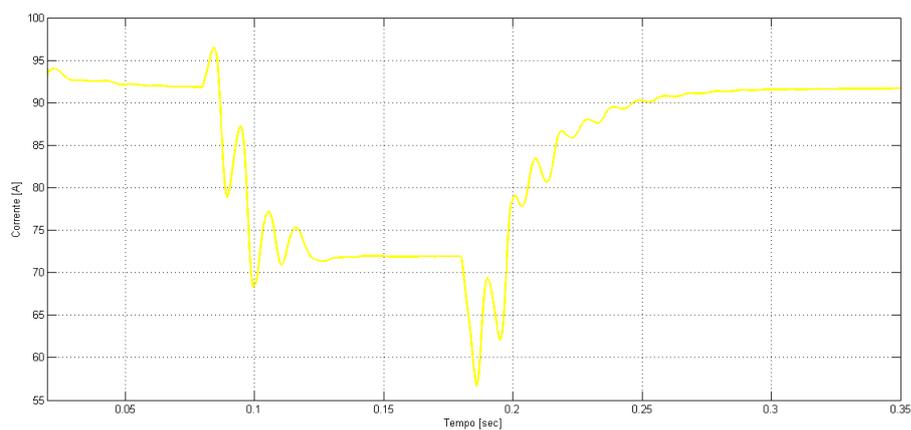


Figura 8.23: Andamento corrente erogata dalla batteria

normale funzionamento a quello disturbato risulta essere meno critico.

Lo spike di corrente è la naturale conseguenza della “richiesta” della rete di passare istantaneamente da un valore di tensione ad un altro, quindi maggiore è la differenza tra questi due valori (come per il caso precedente) maggiore sarà la corrente richiesta per compensare questo squilibrio. Vista la variazione di 0.95 pu del test LVRT rispetto i 0.25 pu del test in corso, è inevitabile che la variazione di corrente sia superiore nel primo test.

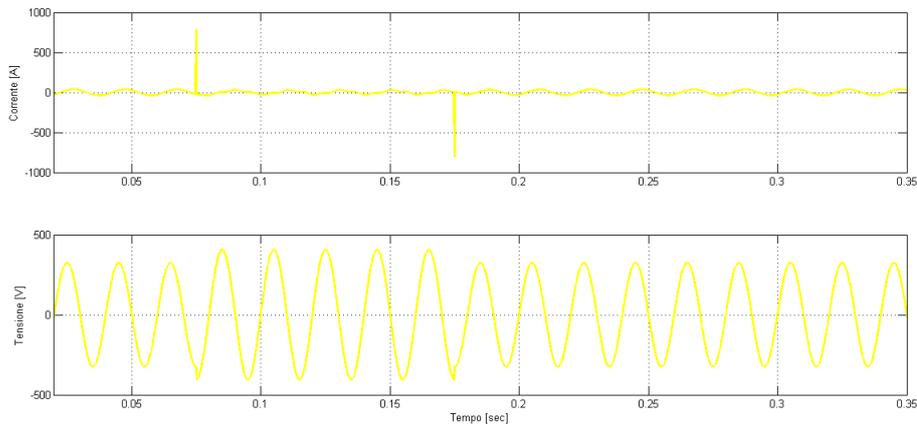


Figura 8.24: Andamento della tensione e della corrente nella rete elettrica

Infine, in figura 8.25 si riporta l'andamento dello sfasamento che, in questo caso, sembra avere un comportamento diverso rispetto alla prova precedente. Questo risvolto probabilmente verrà considerato all'interno della normativa in via di stesura relativa all'espletamento di servizi di rete da parte dell'accumulo elettrochimico.

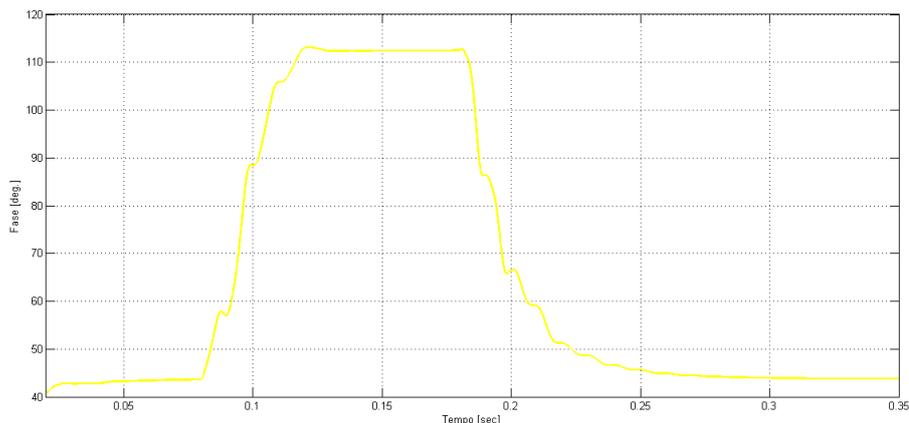


Figura 8.25: Andamento dello sfasamento visto dalla rete

8.3.2 Proposta di modellizzazione equivalente

La questione che verrà trattata è una naturale considerazione frutto dei risultati ottenuti dal modello sviluppato. In questo testo non si ha la pretesa e la possibilità di fornire una considerazione definitiva, ma ciò che si desidera fare è proporre una soluzione alternativa, sviluppata a partire dai risultati conseguiti, che possa essere presa in considerazione e sviluppata in altre sedi.

Il primo step, contenuto intrinsecamente nello sviluppo dei modelli equivalenti delle batterie, è quello di poter utilizzare tale simulatore come sostituto fisico dello storage nei processi di prova e verifica di un SdA all'interno della rete elettrica. Vista l'importanza e la rigida regolamentazione relativa ai test di prova dei generatori statici, risulta logico pensare di utilizzare un modello equivalente che sia il più accurato e fedele possibile al comportamento reale del dispositivo.

Come già visto nel capitolo relativo alle diverse modellizzazioni presenti, questa conclusione non solo non è possibile, ma è addirittura inutile e fuorviante. Per questo motivo sono stati sviluppati svariati modelli atti a garantire un'adeguata modellizzazione in termini di tempi di simulazione ed accuratezza.

La grande “conquista” riguarda la possibilità di eseguire svariati test ed analisi utilizzando un modello equivalente anziché un sistema di accumulo fisico, comportando la possibilità di testare velocemente ed agevolmente il dispositivo. Benchè questa considerazione possa essere trascurata, rappresenta invece un enorme vantaggio in tutte quelle applicazioni in cui i costi e gli ingombri delle batterie sono particolarmente importanti. Basti pensare a possibili piccoli utenti privati o ad applicazioni di rete di centinaia di MW.

Il problema principale risiede nell’identificazione di un modello comunemente accettato e in grado di soddisfare le esigenze relative a questo tipo di utilizzo. Tuttavia questo ostacolo risulta essere più di natura burocratica e temporale, nel senso che già ad oggi esistono modelli affidabili in tal senso. Il lavoro quindi consisterebbe nel verificare la bontà del modello e nel normare il suo impiego.

In questa tematica rientra necessariamente la difficoltà nel creare un modello adatto a tutte le caratteristiche chimico-fisiche dei vari accumulatori elettrochimici. Questa considerazione è valida all’interno di ogni singola tipologia di batteria, ma assume una rilevanza maggiore quando si devono simulare accumulatori di diversa natura chimica, questo perchè il loro comportamento può presentare differenze sostanziali.

L’insieme delle problematiche sollevate richiede un impegno ed una dedizione particolarmente elevata da parte delle autorità regolamentatrici, tuttavia una volta definiti i criteri di utilizzo le semplificazioni che ne deriverebbero sarebbero molteplici ed indiscutibili.

Un elemento di particolare aiuto verso l’utilizzo di verifiche di natura simulata nasce proprio dai risultati qui conseguiti. Ovviamente il contesto in cui questo avviene è limitato sia dalle ipotesi di implementazione del modello, sia dal fatto che sia stata fatta un’analisi relativa a sole due verifiche presenti nella normativa. Però, le analisi effettuate si riferiscono ad una natura del disturbo particolarmente difficoltosa e stressante per il sistema, come evidenziato dalla scarsità di materiale tecnico presente in letteratura. I risultati conseguiti dalle simulazioni suggeriscono, tuttavia, un ulteriore spunto di analisi riguardante la risposta della batteria ai rapidi transitori della tensione di rete. In particolare si osserva come la variazione di tensione sia impercettibile durante il transitorio, infatti l’andamento assunto rimane di tipo “flat”. Questa considerazione, valida per tutte le famiglie implementate e per entrambe le verifiche effettuate, consente di sviluppare un’ulteriore questione ed analisi inerente al livello di modellizzazione effettivamente richiesto all’interno delle prove di verifica. All’inizio di questo capitolo si è posta l’attenzione sulla naturale evoluzione dei test di prova da una condizione fisica ad una condizione simulata, frutto dei numerosi avanzamenti della capacità di riprodurre, in via virtuale, il comportamento di una batteria. I più importanti fattori ostacolanti questo sviluppo riguardavano la scelta e la standardizzazione del modello utilizzabile a questo scopo, tuttavia i risultati ottenuti suggeriscono, per questo tipo di applicazione, un’ulteriore passo di semplificazione.

La naturale conseguenza di quanto ottenuto porta ad una conclusione particolarmente sorprendente, ovvero la sostituzione del modello equivalente dell’elemento con un semplice generatore di tensione. Benchè tale affermazione possa sembrare esageratamente semplicistica, i dati relativi agli andamenti della tensione durante le verifiche effettuate sostengono prepotentemente l’affermazione precedente.

In aiuto a tale tesi si possono aggiungere i risultati conseguiti nel capitolo relativo alla desamina dell’influenza dei materiali attivi sulle prestazioni dello storage, nel quale sono state registrate delle variazioni percentuali di tensione massime del 10%, come conseguenza all’imposizione di gradini di corrente in successione².

8.3.3 Considerazioni finali

L’impatto dei fenomeni chimico-fisici interni all’accumulo elettrochimico, benchè fondamentali per il funzionamento dello stesso, non presentano alcuna rilevanza ed influenza nella risposta del sistema ai disturbi di rete esaminati. Questo perchè tali parametri incidono sicuramente negli aspetti caratteristici del dispositivo, ma non in modalità che possano influenzarne il comportamento complessivo durante l’esecuzione di queste prove. Inoltre, la batteria stessa, all’interno del sistema, non assume un ruolo fondamentale durante le simulazioni dei disturbi. Questo è dovuto principalmente al fatto che tra lo storage e la rete sono presenti numerosi elementi che vanno ad attenuare la “propagazione” del disturbo, a cui si aggiunge la particolare stabilità della tensione precedentemente verificata.

In realtà l’elemento principale che può influenzare la risposta del sistema è ovviamente l’inverter di

²Riferimento al test4

interfaccia. Le logiche di controllo rappresentano l'elemento cardine del problema, ma grazie ai diversi gradi di libertà "concessi" dall'architettura del sistema, è possibile prevedere e gestire al meglio i comportamenti del dispositivo durante i disturbi. L'unico elemento di influenza dello storage è determinato dal BMS, il quale, occupandosi della protezione del dispositivo, può intervenire nel caso in cui si realizzino condizioni di funzionamento lesive come, ad esempio, picchi di corrente particolarmente intensi. In questo caso, la chimica e la progettazione dello storage assumono un ruolo fondamentale. Tuttavia è da notare come, nelle prove precedenti, il BMS, benchè attivo, non sia mai intervenuto.

Le stesse considerazioni devono essere fatte per l'inverter, il quale è normalmente dotato di un sistema di protezione con una limitata tolleranza ai picchi di corrente. Questo è dovuto alla ridotta costante termica caratterizzante il dispositivo, la quale determina una veloce variazione della temperatura interna portando quindi a problemi di dissipazione del calore e a conseguenti danneggiamenti. L'inverter, essendo posto a monte del sistema, è usualmente dimensionato per una potenza superiore a quella dell'accumulo. Tale affermazione è ancor più vera nel caso in cui siano presenti ulteriori elementi di generazione connessi al DC bus. Nel modello implementato però, non è presente una logica che simuli la protezione dell'inverter, quindi non è possibile stabilire se il dispositivo è in grado di sopportare gli eventuali spike di corrente, i quali saranno presenti, seppur con valori differenti, nella maggior parte dei casi, in quanto la probabilità che il disturbo avvenga esattamente al passaggio per lo zero della tensione è estremamente bassa.

Un aiuto a tale problematica arriva sia dalla maggiore potenza di dimensionamento dell'inverter, sia dalla capacità di sopportare elevati picchi di corrente per tempi di decorrenza estremamente brevi (come per il caso esaminato). Inoltre, il fatto di poter simulare il disturbo e determinarne gli effetti, consente di effettuare degli interventi in via preliminare in modo da ridurre gli inconvenienti. In particolare è possibile dimensionare al meglio il valore dell'induttanza del filtro, la quale rappresenta un moderatore intrinseco del fenomeno in discussione.

Durante tutta la trattazione sin qui fatta è emerso un aspetto particolarmente indicativo in riferimento all'accumulo, ovvero che non è intrinsecamente possibile stabilire dei parametri e dei criteri di simulazione dell'accumulo elettrochimico del tutto generali. Questo comporta una fitta segmentazione nella trattazione e, talvolta, della confusione. In accordo con quanto detto, è logico sostenere una semplificazione relativa alla modellizzazione e alla verifica delle batterie nel contesto tecnico-normativo esaminato. Tale conclusione è supportata dai dati e dagli andamenti riscontrati non solo in questo capitolo, ma anche in quello precedente. Tuttavia è altresì logico sottolineare come queste conclusioni siano teoricamente valide nel campo testato, il quale presenta le proprie caratteristiche e necessità.

Considerando i vari elementi di influenza della tensione dello storage, e prendendo atto dei comportamenti rilevati durante i numerosi test eseguiti, si può sostenere come la corrente circolante e lo stato di carica incidano maggiormente rispetto la temperatura interna (la quale, tra l'altro, non influenza la tensione a vuoto). In precedenza è stato dimostrato come, nel peggiore dei casi, un gradino di corrente influenzi del 10 % il valore della tensione, mentre la variazione della stessa tra inizio e fine scarica possa raggiungere il 20 %. Tuttavia la variazione dovuta al gradino di corrente presenta un effetto così marcato nel caso in cui esso venga mantenuto per un determinato periodo di tempo, motivo per cui i gradini di corrente di breve durata non presentano la stessa influenza.

Visto è considerato che si sta parlando di casi estremi di variazione, i quali comunque non determinano particolari problematiche di trattazione e gestione, probabilmente è sufficiente considerare un generatore di tensione dipendente dal solo stato di carica come modello equivalente. Questo consente una maggior adesione alla realtà in quanto la quantità di carica disponibile è un parametro che influenza direttamente la tensione ai capi della batteria, mentre il modulo della corrente presenta un'incidenza implicita riconducibile sia allo stato di carica sia agli effetti dei parametri interni, rendendo quindi più complessa la modellizzazione.

Capitolo 9

Conclusioni

Il mondo dell'accumulo elettrochimico è estremamente vasto e complesso, nonchè in rapida e continua evoluzione. I settori interessati da questa tecnologia sono innumerevoli e notevolmente diversi tra loro, per questo motivo le direzioni intraprese nel settore della ricerca e dello sviluppo assumono connotazioni specifiche per ogni campo di applicazione. Le necessità dei dispositivi portatili riguardano l'incremento della densità dell'energia per ridimensionare i dispositivi, o, viceversa, incrementarne l'autonomia a parità di volume. La mobilità elettrica richiede, oltre a quanto detto in precedenza, un incremento della densità di potenza seguito da una maggiore sicurezza, resistenza alle sollecitazioni termiche-meccaniche e dal prolungamento della vita utile. L'utilizzo come unità di supporto o di integrazione a fonti rinnovabili a livello civile, richiede una riduzione dei costi mentre le applicazioni dirette all'esecuzione dei servizi di rete necessitano di una ottimale salvaguardia delle componenti interne, come anche la capacità di fornire, con alti rendimenti, sia servizi di energia sia di potenza.

Per questo motivo, e per la difficoltà a reperire informazioni dettagliate dalle case costruttrici, non è possibile formulare delle considerazioni approfondite se non per gli aspetti più generali. Infatti, il pregio di questa tecnologia rappresenta, al contempo, il più grande ostacolo per la standardizzazione e la regolamentazione. Tale pregio è dato dalla facilità con la quale è possibile modificare i comportamenti della batteria sin nei più piccoli dettagli, semplicemente agendo sui materiali attivi interni.

Le variazioni che possono essere fatte riguardano innumerevoli aspetti, tra i quali:

- la *geometria* fisica intesa come la disposizione e la forma assunta dai vari elementi caratteristici della cella, la quale influenza, ad esempio, la densità di potenza ed energia;
- la *struttura* chimico-fisica delle sostanze attive influisce sulla propensione degli elementi nel rilasciare ed accogliere gli ioni all'interno del reticolo cristallino;
- la *combinazione* degli elementi attivi e degli additivi assume un ruolo fondamentale nel garantire il corretto funzionamento della cella. Gli equilibri elettrochimici consentono l'incremento delle prestazioni e una migliore salvaguardia dell'integrità degli stessi, prolungando quindi la vita del dispositivo.

La vastità di interventi effettuabili consente di ottenere un'alta particolarizzazione dello storage in funzione delle richieste tipiche del servizio implementato. Tuttavia, tale quantità di informazioni, ha provocato una certa confusione all'interno della letteratura tecnico-scientifica prodotta pubblicando analisi che, a prima vista, possono sembrare in contrasto tra loro.

Inoltre, ad oggi, a conferma di quanto scritto fino ad ora, la sperimentazione in laboratorio della singola batteria rappresenta l'unico mezzo di sicuro affidamento nel caso si voglia ottenere una conoscenza approfondita e particolareggiata del dispositivo.

Una conclusione evidente di questo elaborato, seppur leggermente discostata dai principali obiettivi, riguarda chiaramente l'impossibilità di effettuare, nel contempo, una analisi approfondita che possa essere ritenuta valida genericamente. Le considerazioni che verranno fatte in seguito, saranno riferite e ritenute valide solo nel contesto analizzato, in quanto le ipotesi fatte e le procedure implementate durante lo sviluppo della tesi erano dirette a massimizzare i risultati in funzione degli obiettivi prefissati.

Le analisi finali che rappresentano l'obiettivo di questa tesi riguardano l'influenza che i materiali attivi

della cella possono avere sul comportamento della stessa, sia in termini generali che in contesti specifici, e lo studio del comportamento di un generico SdA a seguito di rapidi transitori della tensione di rete, con particolare attenzione all'influenza e al livello di conoscenza richiesta relativi al pacco batterie.

Questa elaborazione è stata condotta a partire dalla scelta e dall'implementazione di un modello equivalente in Simulink® di un accumulatore elettrochimico al Litio, a cui, in base alle diverse esigenze riscontrate durante lo sviluppo, sono stati aggiunti diversi componenti in modo da facilitare l'implementazione delle analisi e garantire una buona simulazione dei fenomeni in atto.

A seguito di un'indagine nel mondo della modellistica, si è optato per una soluzione di compromesso tra l'elevata capacità di riproduzione del comportamento dello storage con la complessità implementativa (e relative tempistiche di simulazione) e il livello di conoscenza del dispositivo richiesto. Questa scelta è assolutamente congruente con il contesto di riferimento, in cui non si richiede la fedeltà estremamente elevata degli ambienti di ricerca e sviluppo di soluzioni innovative nel settore, ma la capacità di simulare correttamente l'andamento della tensione e del *SOC* nelle tempistiche tipiche dei laboratori di verifica del componente.

La scelta è ricaduta su un "*modello elettrico equivalente ibrido del secondo ordine*". L'etimologia della denominazione consente di risalire alle logiche che hanno portato allo sviluppo di questa forma di modellizzazione, in particolare la parola "elettrico" evidenzia come la struttura sia costituita da elementi di natura elettrotecnica. Questo conferisce una facile e diretta implementazione del dispositivo nel contesto di utilizzo, ovvero la rete elettrica. Il termine "secondo ordine" si riferisce all'utilizzo, nel circuito elettrico equivalente, di un doppio parallelo RC "responsabile" del comportamento della cella nei transitori (permette di modellare i fenomeni interni relativi alla polarizzazione e alla concentrazione elettrochimica). L'utilizzo di due paralleli consente di riprodurre al meglio l'andamento della tensione nei transitori di breve durata, che rappresentano un obiettivo del lavoro qui svolto. Infine, il termine "ibrido" si riferisce all'utilizzo di un algoritmo di stima dello stato di carica non di origine elettrica ma di natura analitica, basato quindi sulla cinetica chimica caratteristica delle reazioni di ossidoriduzione coinvolte. Questo stimatore, appositamente tarato per i casi in esame, consente di riprodurre efficacemente l'andamento dello stato di carica in real time, senza però appesantire eccessivamente la complessità del modello.

La rappresentazione equivalente fin qui ottenuta consente di prendere in considerazione due dei tre parametri che maggiormente influenzano il comportamento della cella, ovvero lo stato di carica e la corrente elettrica circolante. Il terzo elemento (ma non per importanza), la temperatura interna, rappresenta ancora oggi un'ostica sfida per i simulatori. Questo è dovuto ad una serie di fattori che, agendo contemporaneamente, rendono difficile lo studio e la descrizione della propagazione e distribuzione della temperatura all'interno di un pacco batteria. La documentazione tecnica presente è ancora scarsa, e questo è da imputare alle ragioni che rendono questo fenomeno altamente non lineare:

- come specificato più volte, un pacco batteria, soprattutto in applicazioni ad alta potenza o energia, presenta una configurazione delle celle diretta a garantire le grandezze elettriche richieste dal servizio. La messa in serie e parallelo non solo comporta una variazione dei parametri elettrici equivalenti, ma anche un "ammassamento" di una notevole quantità di celle in spazi particolarmente ristretti. Stabilire l'andamento della temperatura nel tempo e nello spazio, in tempo reale, rappresenta una sfida tecnico-analitica estremamente complessa;
- le celle, oltre ad essere in numero particolarmente elevato, non necessariamente si trovano ad avere il medesimo stato di carica, la stessa impedenza interna, un uguale corrente circolante e temperatura iniziale. In soccorso a queste complicazioni si implementa una logica di controllo in grado di gestire al meglio, in base alla complessità del BMS utilizzato, ogni singola unità elementare al fine di mantenerne l'omogeneità di utilizzo e condizione;
- benchè le verifiche virtuali non ne tengano sempre conto, i sistemi di accumulo possono presentare degli stress meccanici e termici particolarmente gravosi a causa della loro locazione, degli spazi ridotti e di quei elementi esterni che possono, in qualche modo, alterare il normale funzionamento del dispositivo;
- il sistema di raffreddamento e di protezione meccanica/chimica, influiscono in modo diretto sull'andamento della temperatura interna, tuttavia, oltre alle difficoltà dovute al creare un modello che simuli tali sistemi, la varietà di applicazioni va a complicare la modellizzazione. Viceversa, la sua assenza, complica l'efficacia di smaltimento del calore da parte dello storage;

- le caratteristiche endotermiche e/o esotermiche dei materiali attivi introducono un'ulteriore parametro di influenza della temperatura, la quale è anche strettamente legata alle condizioni operative.

L'argomentazione precedente chiarifica le difficoltà di emulazione del fenomeno, tuttavia, a causa dell'elevato impatto del parametro sulle grandezze elettriche del circuito equivalente, si è implementato un semplice stimatore termico in grado di riprodurre abbastanza fedelmente la variazione del parametro a partire da una temperatura ambientale di 20 °C (modificabile). Ovviamente, per tenere conto dei fattori di influenza, si sono introdotte diverse ipotesi semplificative, in particolare la temperatura esterna viene considerata fissa (come in un pozzo infinito oppure capacità di mantenimento della temperatura ambientale molto elevata) e le condizioni delle celle risultano essere perfettamente uguali. A questo si aggiunge l'ipotesi di una distribuzione omogenea della temperatura all'interno del volume. Benchè queste considerazioni siano praticamente ideali, si è deciso di implementarle comunque in quanto l'influenza della temperatura sul comportamento dell'accumulo è di particolare importanza.

In supporto delle ipotesi usate, è da considerare che è stato implementato un ulteriore blocco di simulazione che emula, in via semplificata, il comportamento del BMS. Anche in questo caso è indispensabile ricordare che, come per lo storage elettrochimico in sé, il know-how di questa logica è estremamente preziosa nel campo commerciale in quanto consente di aumentare le performance e la durata di vita del dispositivo. Proprio per questo motivo le informazioni a riguardo sono esigue, quindi si è deciso di implementare un algoritmo inerente alla sola protezione della batteria, la quale viene salvaguardata dal funzionamento in condizioni operative dannose in termini di:

- valore massimo di corrente sopportata nella fase di scarica e carica continuativa o impulsiva;
- stato di carica superiore o inferiore ai limiti stabiliti dall'utente;
- sovratensioni.

Il modello creato è stato inoltre dotato di una serie di test diretti a fornire delle utili indicazioni relative al comportamento del sistema in risposta ad una serie diversificata di richieste, che variano da semplici prove di caratterizzazione, come cicli di scarica/carica e circolazione di correnti impulsive o a gradini, a prove specifiche nel campo della mobilità elettrica e dei servizi di rete. Questa varietà è stata implementata in modo da verificare il comportamento del sistema, nelle sue tre varianti, ad una serie di test differenti tra loro ed evidenziarne le peculiarità.

Per la parte inerente alle verifiche di VFRT capability, si è reso necessario l'introduzione di ulteriori elementi in modo da garantire una simulazione aderente alle condizioni operative generiche. In particolare, il dipartimento di mecatronica di Vicenza, nelle figure del prof. Mattavelli e dell'Ing. Dalla Santa, ha fornito il modello di un inverter monofase a singolo ramo controllato in corrente (tecnica PWM). A questo dispositivo sono stati aggiunti due elementi puramente ideali, un convertitore DC/DC in grado di connettere la batteria al bus DC, il quale permette il trasferimento della potenza tra la sorgente in DC e l'inverter che, a sua volta, è connesso ad un generatore di tensione ideale che simula la rete elettrica.

I dati utilizzati nella definizione dei parametri elettrici del circuito, derivano dalle sperimentazioni RSE nel caso della famiglia *NMC*, mentre per le altre due tipologie i valori sono stati ricavati da documenti presenti in letteratura. Questo comporta una distinzione tra le due categorie, in quanto i dati RSE ricostruiscono in modo più dettagliato gli andamenti dei vari parametri, riducendo gli errori di approssimazione già presenti a causa dell'interpolazione lineare implementata nelle look-up table. Tuttavia, visto che la "distanza" tra due punti successivi rilevati, anche nel caso delle famiglie *LFP* e *LiPo*, resta ridotta, la linearizzazione usata non inficia particolarmente i risultati ottenuti.

Infine, per poter interagire attivamente con il modello Simulink®, si è realizzata un'interfaccia GUI che consente di selezionare il test desiderato e i valori caratteristici della batteria simulata, per poi ottenere gli andamenti grafici delle principali grandezze, oltre ad un file di salvataggio dei dati ricavati.

Il primo proposito di questo elaborato consiste nel comparare le tre famiglie Litio implementate e nell'evidenziare le influenze che i materiali interni possono avere sul comportamento dello storage. A tale scopo sono stati eseguiti numerosi test in modo da verificare le risposte a seguito di input di natura diversa tra loro (ovviamente per ogni test le tre famiglie sono state sottoposte ai medesimi stress).

La conclusione più evidente riscontrata riguarda la natura della famiglia *LiPo*, la quale è stata progettata per applicazioni di energia e non di potenza. Infatti, nel test relativo alla mobilità elettrica, il BMS interviene già nei primi istanti di ciclaggio interrompendo la simulazione. Il picco di corrente richiesto

infatti, risulta essere maggiore dei limiti consentiti. Questo risultato, oltre a confermare le caratteristiche intrinseche della tecnologia ai polimeri, fornisce una prova evidente di come i materiali attivi possano predefinire gli utilizzi finali del dispositivo.

Il secondo aspetto di interesse registrato riguarda i diversi andamenti delle tensioni, in particolare i fattori discriminanti tra le diverse tipologie riguardano la variazione della tensione da inizio a fine scarica e il comportamento della batteria proprio nelle condizioni di carica estreme. In particolare la famiglia *NMC*, sottoposta a semplici test di caratterizzazione evidenzia una variazione percentuale della tensione, rispetto al valore nominale, che si aggira nell'intorno del 25%. A conferma di questo, si nota come l'andamento della tensione sia caratterizzato da una elevata pendenza durante tutto il processo di scarica (o carica). Questo andamento viene ripetuto anche dalla tecnologia *LiPo*, la quale però evidenzia una minore variazione percentuale (intorno al 18%).

Viceversa, il comportamento della famiglia *LFP* presenta diverse peculiarità, tra cui un andamento della tensione estremamente "flat". Se però si va ad analizzare la variazione percentuale, essa si assesta nell'intorno del 16%, che non è poi così lontano dal valore assunto dalla tipologia precedente. Questo è dovuto alla rapida variazione della tensione ai valori estremi dello stato di carica, che va ad alterare il valore indicato fornendo quindi un'informazione che rappresenta equamente l'andamento della grandezza. Tale comportamento può essere spiegato dalla maggiore difficoltà dei materiali attivi ad inserire o rilasciare ulteriori ioni nella propria struttura nelle condizioni di carica o scarica profonda. Il risultato ottenuto non è altro che la conseguenza di questo fenomeno, il quale comporta un improvviso incremento della resistenza interna della cella.

Tali variazioni di tensione raramente si verificano poichè lo storage, soprattutto per applicazioni ad alta energia o potenza, sono "accompagnate" dalla logica di controllo del BMS, il quale evita che il dispositivo lavori in condizioni di carica o scarica profonda. Per questo motivo le variazioni percentuali effettive sono inferiori, fornendo così ulteriori prove a favore della elevata stabilità della tensione di batteria.

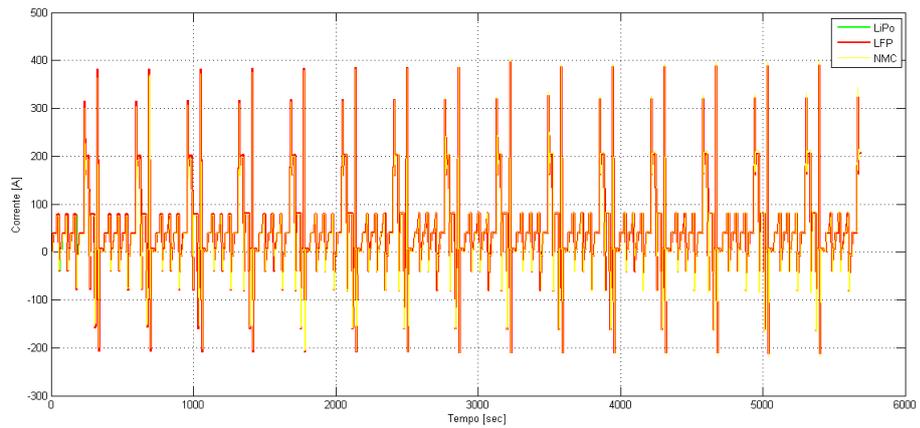
Un ulteriore conferma deriva dalle risposte degli accumulatori ad una serie di gradini di corrente, nel quale si vede come la tensione della chimica *LFP* tenda sempre ad assumere un andamento piatto. In questo caso, tuttavia, entrano in gioco ulteriori due fenomeni tipici delle batterie a Litio, ovvero il recovery-effect e il rate-effect, i quali rappresentano, rispettivamente, la capacità della batteria di fornire una quantità di carica diversa e la variazione della tensione a seconda del modulo della corrente circolante. Entrambi i fattori influenzano direttamente il *SOC*, giocando un ruolo importante nella definizione dell'andamento della tensione, tuttavia, anche in questo caso, la famiglia *LFP* dimostra una minore sensibilità a tali fenomeni, garantendo quindi una maggiore stabilità.

Un secondo fattore di analisi, soggetto ad una serie di ipotesi semplificative che rendono la natura dei test meno probanti ma pur sempre indicativi, è dato dall'andamento della temperatura e delle perdite di potenza interna. I due parametri sono strettamente legati tra loro, in quanto uno scostamento della temperatura determina una variazione dei parametri resistivi (e capacitivi) del circuito equivalente, portando quindi ad una alterazione della potenza dissipata, che si riflette sulla temperatura interna.

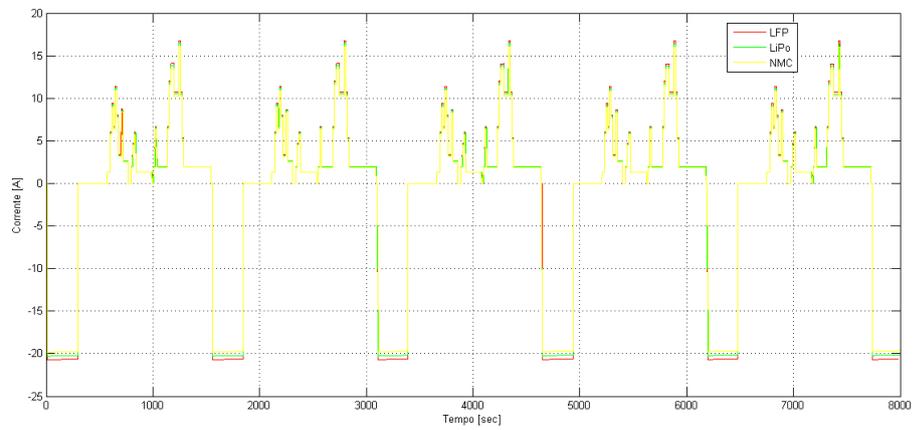
Prima di eseguire l'analisi degli andamenti ottenuti, è bene ricordare come la potenza dissipata nel dispositivo dipenda da tre fattori: la temperatura interna, il modulo della corrente circolante e i valori assunti dai parametri resistivi e capacitivi. Il primo dei tre, vista la medesima natura degli elementi presenti nel circuito equivalente, dipende solamente dalla potenza dissipata; il secondo non rappresenta un elemento discriminante per l'analisi di comparazione in quanto tale valore è identico per tutte e tre le famiglie (con una eccezione per il test5, test6 e test7 in quanto improntati su un riferimento di potenza che comporta le differenze trascurabili visibili in 9.1); il terzo elemento rappresenta il vero e proprio fattore discriminante.

L'ultimo elemento indicato presenta le seguenti influenze:

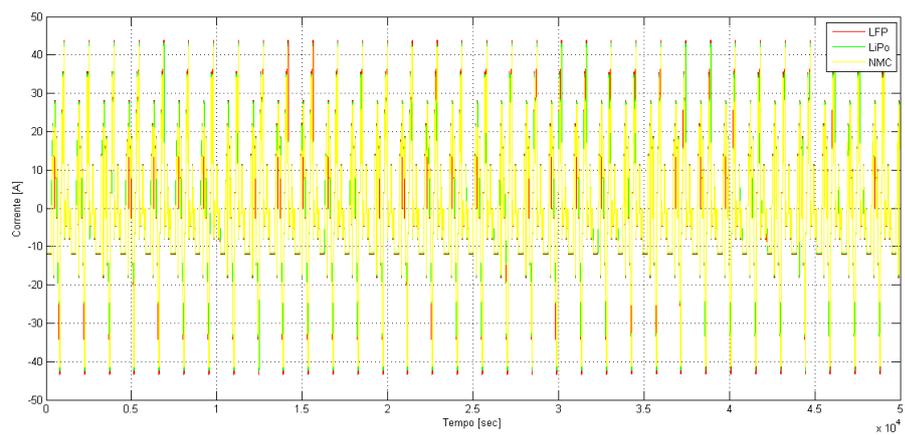
- stato di carica;
- temperatura interna;
- gli elementi attivi, mediante la loro geometria chimico-fisica e le loro modalità di interazione determinano i valori "originali" dei parametri;
- la messa in serie e parallelo delle celle comporta la variazione dell'impedenza circuitale equivalente.



(a) Correnti test5



(b) Correnti test6

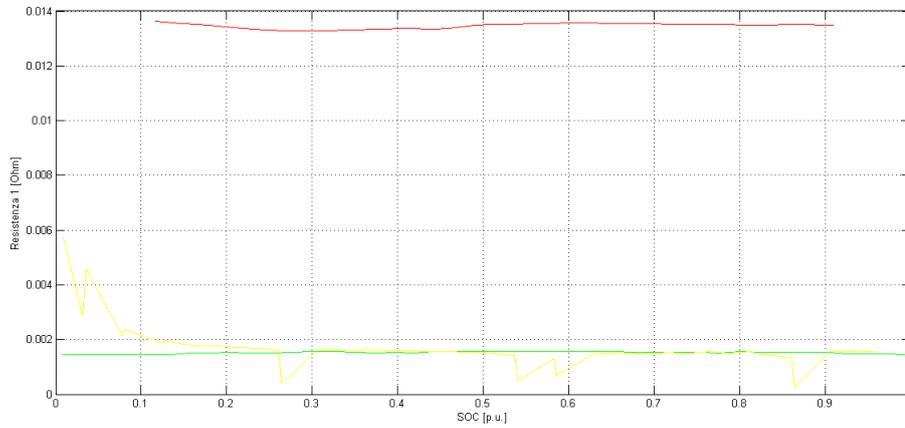


(c) Correnti test7

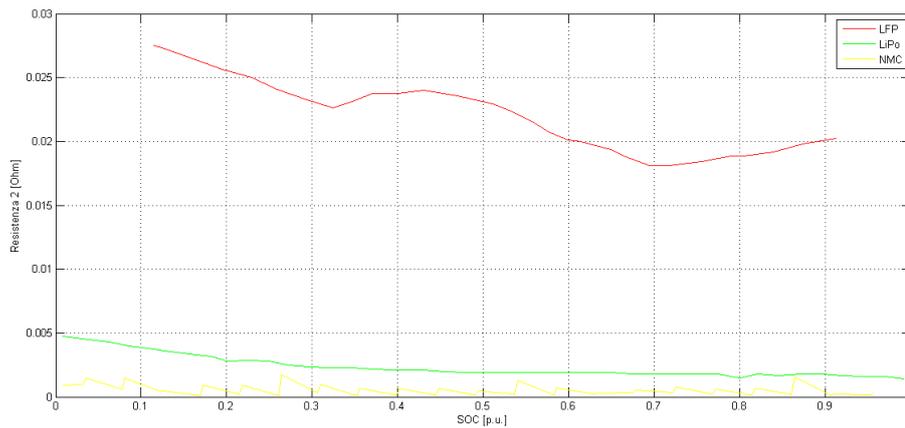
Figura 9.1: Confronto correnti

La dipendenza dalla temperatura conferma come i due fenomeni in esame siano profondamente legati tra loro, rendendo estremamente difficile ricavare in via analitica delle espressioni chiare che determinino le relazioni tra i diversi parametri, evidenziandone la rispettiva importanza. Per questo motivo l'analisi che

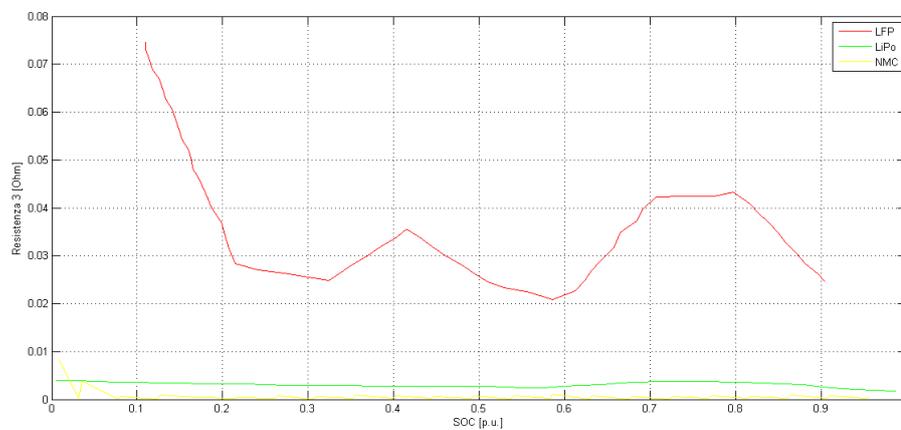
verrà fatta si baserà principalmente su ipotesi semplificative ed approssimazioni, evidenziando invece i fattori che più sottolineano le disomogeneità tra le tre famiglie implementate.



(a) Andamenti di R1



(b) Andamenti di R2



(c) Andamenti di R3

Figura 9.2: Confronto dei parametri resistivi equivalenti di cella

Innanzitutto è indispensabile ricordare che, benchè gli andamenti della temperatura possano superare i limiti esterni (determinati dai dati disponibili), in realtà le look-up table sono state implementate richiedendo che, in caso la temperatura superi gli estremi, essa assuma tale valore rendendo quindi l'algoritmo insensibile alle variazioni al di fuori del range preimpostato. Questo è stato fatto poichè le conoscenze degli andamenti dei parametri al di fuori dei limiti è pressochè sconosciuta. In questo modo si è ridotto il margine di errore.

Benchè questa rappresenti una forzatura “pesante”, è bene considerare che le batterie al Litio, per evitare precoci decadimenti e danneggiamenti, devono lavorare generalmente in un range di temperatura che va dai 0 °C ai 40 °C (mediante attenta progettazione), supportando così l'ipotesi fatta. Inoltre, considerando la temperatura iniziale pari a 20 °C, e che le reazioni chimiche interne sono solo di natura esotermica, si ottiene un effettivo campo di variazione ancora più ristretto.

Infine, se si prendono in considerazione i test riferiti ad applicazioni reali, si nota come le differenze di temperatura raggiunte dalle tre famiglie siano praticamente inferiori al grado centigrado¹. In conclusione si può affermare che, viste le ridotte differenze di temperatura, l'influenza di queste ultime non possono essere la principale causa della potenza dissipata.

Lo stato di carica non influenza l'analisi in quanto ogni tipologia è stata sottoposta al medesimo test, mentre la natura chimica degli elementi attivi indubbiamente influisce sul valore dei parametri. Questa affermazione trova sostegno dalla figura 9.2, la quale mette a confronto i parametri resistivi alla temperatura di 25 °C. In particolare, anche se il modulo dei parametri è estremamente basso, si nota come la famiglia *LFP* presenti dei valori equivalenti di cella particolarmente elevati rispetto alle altre due tecnologie (fino dieci volte tanto).

La costituzione del modulo rappresenta, anche in conseguenza di quanto appena detto, un importante elemento di distinzione tra i tre casi. La serie delle celle dipende dal valore nominale della tensione di cella e di quella desiderata, tuttavia, nel caso considerato, le tre famiglie presentano tensioni simili (3.6 V, 3.7 V e 3.2 V), motivo per cui è il parallelo a creare le vere differenze. Infatti i 43 Ah della cella *NMC* implicano un minor numero di celle in parallelo rispetto ai 12 Ah e ai 2.1 Ah di *LiPo* e *LFP*.

Come ben noto il parallelo ideale di elementi resistivi di ugual valore determina la divisione del singolo parametro per il numero di paralleli, mentre per le capacità il valore singolo viene moltiplicato dal parallelo. Considerando che i termini capacitivi rientrano nella potenza dissipata solo in termini di variazione della tensione ai capi, la costante τ non viene alterata dal parallelo, quindi la variazione temporale resta la medesima.

Viceversa, i termini resistivi influenzano direttamente la potenza persa, per questo motivo si può notare che generalmente la temperatura della famiglia *LFP* (dotata di una capacità nominale di cella inferiore), sia inferiore e più stabile delle altre due tipologie, mentre la famiglia *NMC* evidenzia una temperatura superiore ed una maggiore sensibilità alle variazioni di potenza.

Se invece si guarda il comportamento della potenza dissipata, si notano dei picchi relativi alla famiglia *LFP* abbastanza elevati, tuttavia se si verifica il rendimento energetico si nota come esso sia leggermente superiore rispetto alle altre tecnologie, sintomo che il presentare una temperatura inferiore comporta una riduzione delle perdite.

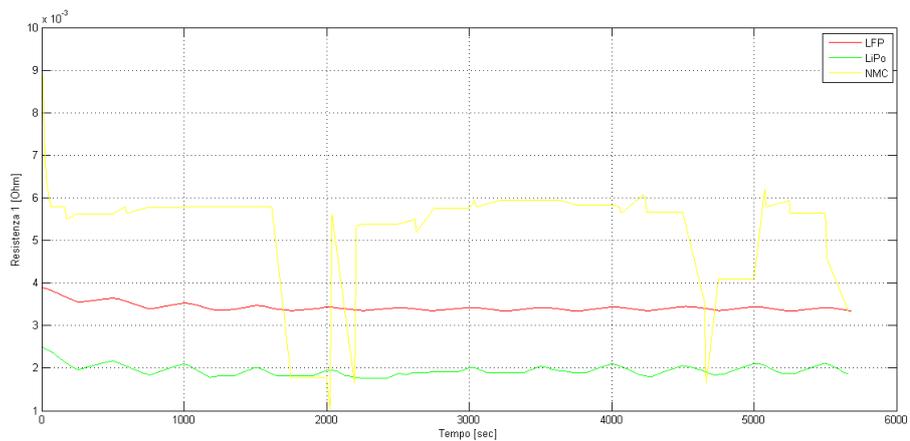
La figura 9.3 mette in evidenza l'andamento dei parametri elettrici resistivi equivalenti durante la simulazione del test², nel quale è possibile notare, innanzitutto, come i parametri della famiglia *LFP* diventino comparabili con quelli delle altre due tecnologie (grazie al maggior numero di celle in parallelo). Inoltre, la figura 9.3(a) evidenzia la “stabilità” del parametro *R1*, mentre le figure rimanenti indicano una maggiore variabilità degli elementi restanti.

I dati ottenuti, se confrontati con gli andamenti della potenza dissipata e della temperatura interna, non presentano evidenti legami diretti, in quanto ci si aspetterebbe un valore mediamente inferiore dei parametri del caso *LFP*, il quale ne giustifichi il miglior comportamento. Una correlazione può essere intravista dall'andamento particolarmente contenuto del parametro *R1* in riferimento ai casi *LFP* e *LiPo*, il quale probabilmente spiega la “stabilità” della temperatura interna durante il funzionamento.

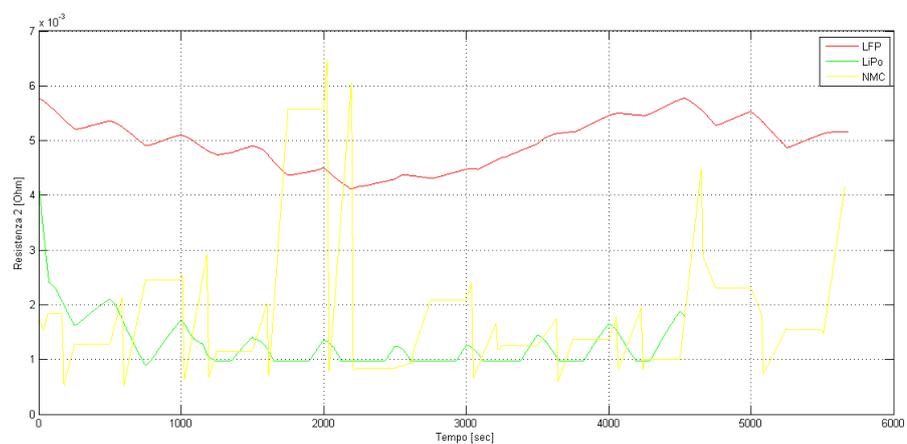
Come già detto in precedenza, la mutua influenza delle due grandezze in esame, presente sia in modo esplicito che implicito, non permettono di stabilire con chiarezza il “peso” di ogni singolo fattore, tuttavia l'analisi precedente dimostra come la chimica dei materiali influenzi i parametri equivalenti interni,

¹Questa considerazione non è valida nei test di caratterizzazione in quanto sono previsti lunghi periodi di circolazione della corrente

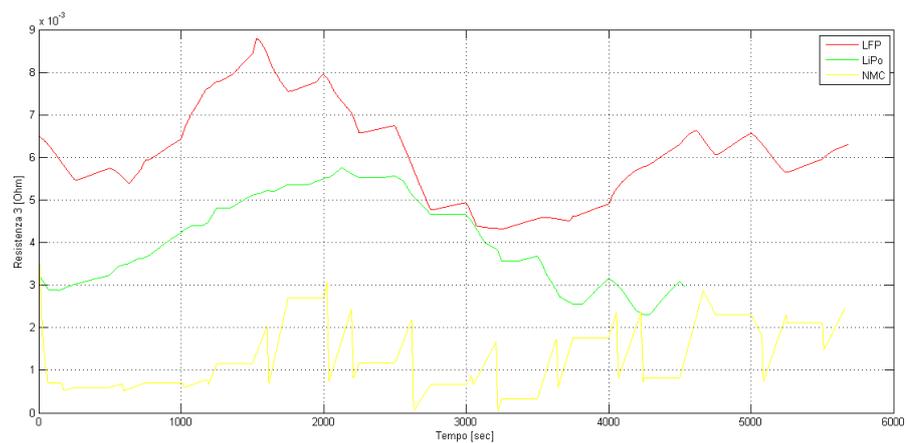
²Gli andamenti di tali parametri riferiti agli altri test non si discostano da quelli in figura



(a) Andamenti di R1



(b) Andamenti di R2



(c) Andamenti di R3

Figura 9.3: Confronto dei parametri resistivi equivalenti in riferimento al test2

i quali, a loro volta, sono pesantemente influenzati dalla disposizione interna delle celle e dalla temperatura da loro assunta. La combinazione di questi tre fattori rappresenta, quindi, l'elemento chiave "responsabile" del comportamento della batteria.

Vista la complessità dell'argomento, le numerose ipotesi implementate e i limiti dei test effettuati, non è possibile scendere maggiormente nei dettagli, tuttavia le indicazioni ottenute, oltre ad essere coerenti, forniscono una evidenza di come la chimica interna delle batterie comporti innumerevoli risvolti alla quale prestare attenzione in fase di idealizzazione e progettazione dell'accumulatore.

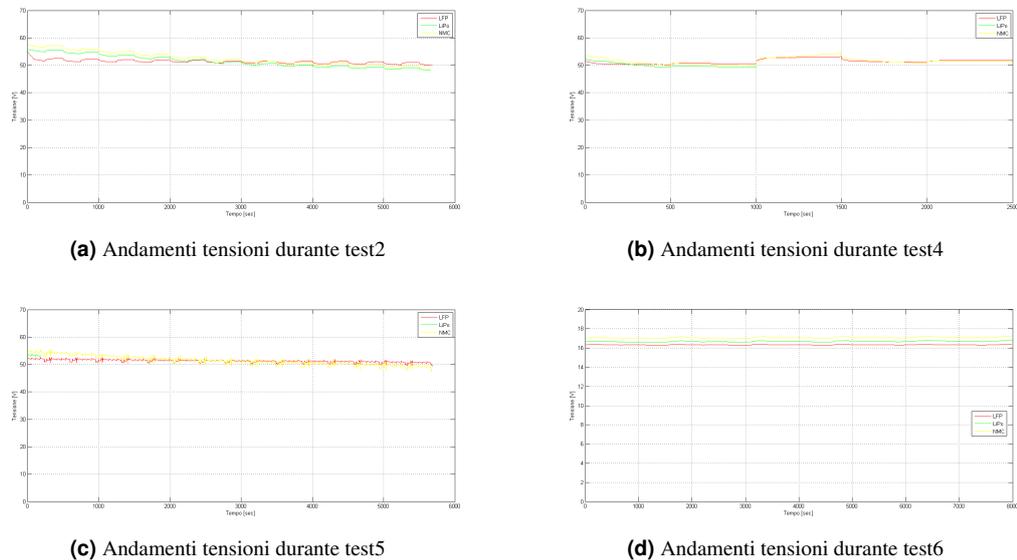


Figura 9.4: Confronto andamenti delle tensioni

Il secondo proposito dell'elaborato, benchè possa sembrare poco inerente al tema trattato fino ad ora, risulta invece essere frutto di tale analisi nel caso in cui si decida di cambiare il punto di vista di studio. Quanto riportato nella precedente argomentazione si riferisce ad uno studio di dettaglio dei singoli andamenti, giustamente rivolto ad evidenziare l'impatto della chimica interna in tutti i suoi aspetti. Tuttavia, allargando la visione d'insieme dell'oggetto, ovvero considerando solamente il comportamento dello stesso all'interno di un sistema atto a svolgere un qualsiasi tipo di servizio, è possibile notare come, utilizzando i medesimi risultati grafici ma spostando l'attenzione al concreto e alla realtà delle implementazioni, si arrivi a considerazioni diametralmente opposte a quelle fatte in precedenza.

La figura 9.4 ritrae la tensione ottenuta da serie di test fatti in precedenza, a cui è stata cambiato il range di valori compresi nelle ascisse. Ciò che questi grafici testimoniano è che, scendendo in termini più pratici, non si notano vere differenze tra le tecnologie, ed, in particolare, si prende visione di come in realtà la tensione sia poco influenzata dalle condizioni di utilizzo. Si può dire questo semplicemente perchè le figure precedenti rappresentano un estratto di una serie estremamente diversa di test, i quali comportano sollecitazioni elettriche di diversa natura. Questo tuttavia non altera il comportamento della batteria ai propri morsetti.

Questa considerazione, seppur fugace, porta inevitabilmente alla conclusione di portare ad un maggior livello di competenza e formalità i stress test per verificare il comportamento del sistema di accumulo. In particolare, mediante una serie di semplificazioni, si è deciso di implementare una serie di prove seguendo i riferimenti riportati nella normativa, ad oggi presente, riguardante le verifiche del comportamento di un sistema dotato di batteria a seguito di rapide variazioni della tensione di rete.

Le normative di riferimento sono la CEI 0-16, per l'alta e la media tensione, e la CEI 0-21 per la bassa tensione. La descrizione dettagliata delle modalità di prova, della tipologia di verifiche e dei comportamenti richiesti relativi alla VFRT capability sono presenti, per quanto riguarda i sistemi di accumulo elettrochimici, nelle rispettive varianti "V1".

In particolare, si è deciso di implementare due prove, duali tra loro, in grado di introdurre un tipo di stress particolarmente provante per il sistema e scarsamente presente nella letteratura tecnica ad oggi presente, ovvero una rapida variazione della tensione di rete. Questa tipologia di transitori risultano essere particolarmente gravosi e difficilmente implementabili in quanto richiedono una modellizzazione in grado di seguire le rapide variazioni del riferimento. Il modello qui proposto è stato appositamente

scelto in modo da garantire una buona emulazione del comportamento della batteria nei rapidi transitori (grazie al doppio parallelo RC), tuttavia, si è reso necessario un ulteriore sviluppo del modello in modo da ricreare un reale sistema di generazione distribuita. Per questo motivo si è aggiunto un sistema di conversione DC/DC ideale, il quale consente la connessione dell'accumulo elettrochimico al bus DC, nel quale confluiscono le potenze dei possibili ulteriori sistemi di generazione presenti nelle applicazioni reali. Infine, il bus DC "alimenta" un inverter, anch'esso ideale, il quale permette lo scambio di potenza con la rete.

Il sistema implementato, con eccezione della batteria, è fondamentalmente ideale, tuttavia consente una maggior adesione con la realtà e permette di implementare le prove descritte nelle normative. Infatti, l'inverter, essendo disaccoppiato dalla batteria, è primariamente controllato in potenza, la quale si ripercuote a livello di modellizzazione mediante un controllo in corrente. Questo è dovuto al fatto che si è considerato la tensione del bus DC e della rete come delle grandezze imposte.

Le prove implementate riguardano la capacità del sistema a sostenere improvvisi buchi di tensione, che comportano una tensione residua di 0.05 pu, o sovratensioni pari al 25%. Tali peculiarità vengono definite, rispettivamente, LVRT e OVRT capability. Inoltre, entrambi i test sono stati eseguiti imponendo due diversi momenti di sviluppo del disturbo, sollecitando il sistema sia nel caso meno aggravante (variazione della tensione al passaggio dello zero) sia in quello più aggressivo (variazione della tensione al picco massimo).

I risultati conseguiti portano ad una serie di riflessioni e considerazioni sicuramente non definitive visto le semplificazioni approntate in questo modello e la sensibilità richiesta in comportamenti di particolare incidenza sul servizio elettrico. Infatti l'obiettivo non è quello di portare dei dati definitivi ma una prima prova ed analisi che possa, in futuro, rappresentare motivo di spunto per una serie di verifiche, da parte degli enti predisposti, atte a definire una regolamentazione che segua le reali richieste e necessità del sistema in fase di studio, garantendo una elevata qualità di verifica mediante una serie di criteri adeguati e aderenti alle effettive necessità. Tale considerazione nasce dall'evoluzione dei sistemi di simulazione virtuale delle dinamiche di rete e dei componenti e dalla presa coscienza del comportamento dei singoli dispositivi.

Le prescrizioni delle normative riportano la rilevazione del comportamento del sistema nella sola sezione di interfaccia con la rete. Questa richiesta porta alle conclusioni che, giustamente, le figure responsabili della distribuzione e del dispacciamento dell'energia sono interessate solamente al comportamento complessivo dell'utente, in quanto strettamente legato alla rete. Questo determina intrinsecamente una riduzione di interesse, e quindi di vincoli, in riferimento ai dispositivi costituenti l'utente, come, nel caso in esame, dello storage.

Benchè le logiche di funzionamento di un qualsiasi sistema si basino sull'equilibrio dei componenti di cui è costituito, la considerazione precedente comporta un "alleggerimento" del livello di dettaglio richiesto, tuttavia è necessario mantenere tutti quei comportamenti che possono influenzare direttamente le modalità di interfaccia del sistema con la rete.

I risultati conseguiti nel capitolo precedente, evidenziano come la risposta dello storage durante i transitori risulti praticamente invariato. Questa conclusione, supportata inoltre dai stress test direttamente effettuati sulla batteria e relativi all'analisi dell'influenza della chimica sul comportamento del dispositivo, è dovuta ad una serie di ragioni di diversa natura. Innanzitutto fin da subito si è notata la particolare stabilità della tensione, la quale presenta una dipendenza sia dalla corrente circolante sia dallo stato di carica. Tale stabilità, oltre ad essere conseguenza della natura intrinseca del dispositivo, è dovuta, in accordo con gli ultimi test effettuati, anche all'azione "mitigante" messa in atto dalla serie di dispositivi interposti tra l'accumulo e la rete elettrica.

Anche se l'implementazione di dispositivi ideali sembra una grossolana approssimazione, nel contesto e nei termini in analisi la semplificazione non va ad incidere pesantemente sui risultati. Questo perchè notoriamente il bus DC presenta un'elevata stabilità di tensione e perchè, essendo presente un disaccoppiamento tra batteria e rete, il convertitore DC/DC e l'inverter DC/AC possono essere controllati in maniera specifica. In particolare il primo può dedicarsi al mero adattamento della tensione di batteria con quella del bus, il quale non rappresenta particolari difficoltà visto l'andamento flat della tensione e variazioni percentuali ridotte misurate in vari test. Il secondo dispositivo invece si occupa di permettere il trasferimento di potenza desiderato, nelle forme e modalità richieste dalla rete.

La scarsa sensibilità della batteria a condizioni di funzionamento particolarmente aggressive, unitamente ad una ridotta normativa che vincola i dispositivi costituenti il sistema, porta alla conclusione di utilizzare un modello equivalente dell'accumulo elettrochimico semplicistico, basato su un generatore

di tensione equivalente funzione del *SOC*, nel quale sia comunque presente una logica di “contorno” in grado di stimare e rilevare i parametri di controllo fondamentali, i quali verranno poi controllati dalla logica BMS dedicata. Questo permette una riduzione dell’emulazione solo all’essenziale, il quale però è in grado di fornire i medesimi risultati conferiti da un simulatore particolarmente accurato. Infatti il generatore di tensione si occuperà di riprodurre il riferimento di tensione per il convertitore associato, mentre la logica “nascosta” si occuperà di riprodurre fedelmente la sensibilità del dispositivo a condizioni di funzionamento non idonee, le quali sono le vere responsabili della capacità del sistema di funzionare nelle modalità anomale previste (questa considerazione tiene conto anche dell’inverter).

L’utilizzo di un sistema di simulazione della tensione accurato come quello sviluppato, nel contesto di applicazioni ad alta energia e potenza, risulta fuori luogo in quanto non determinante ai fini dello studio del comportamento complessivo. Questa considerazione non è valida, ad esempio, nelle applicazioni elettroniche portatili o nello studio dell’influenza della chimica interna, in quanto il livello di dettaglio e precisione è nettamente più alto. Per questo motivo una conferma, mediante metodologie e disposizioni superiori a quanto a disposizione per questo elaborato, risulta utile ma soprattutto ottimale, visto e considerato che l’implementazione di soluzioni che presentino, al contempo, la massima semplicità ed efficacia rappresenta uno degli obiettivi dell’ingegneria.

La vera conclusione generale di questa tesi, benchè non presenti, in realtà, alcun elemento di generalità, riguarda la necessità di concentrare le forze di ricerca nei vari ambiti relativi all’accumulo elettrochimico, implementando ipotesi, modelli e soluzioni focalizzate settore per settore. Questa affermazione nasce dall’elevata complessità chimico-fisica del dispositivo, unita alla facilità di adattamento dello stesso al funzionamento in settori tanto diversi tra loro, i quali richiedono quindi attenzioni particolareggiate. Questo elaborato ne è una dimostrazione, in quanto durante la trattazione dell’influenza dei materiali attivi si è vista l’importanza dei dettagli e dell’accuratezza della modellizzazione. Conclusione che va nettamente in contrasto con l’analisi LVRT e OVRT, la quale ha comprovato come dettaglio e precisione non siano sinonimo di qualità ed ottimizzazione.

Questo è il modo tecnico adeguato per trattare una tecnologia che evolve giorno dopo giorno, sia nei suoi aspetti di “origine”, come lo studio di composizioni e progettazioni chimico-fisiche dirette ad incrementare determinate prestazioni, sia in aspetti relativi allo studio dei comportamenti globali e alla reciproca influenza, per finire alla capacità di elaborare le misurazioni, stimare le grandezze utili e studiare un sistema di controllo e gestione in real time in grado di rendere sempre più sicuro e performante (ovvero più intelligente) l’applicazione di questo dispositivo.

Tuttavia questo richiede disciplina e chiarezza, in quanto le pubblicazioni scientifiche e normative devono, oltre a stare al passo con le veloci innovazioni, fornire indicazioni utili ma soprattutto specifiche in base ai vari utilizzi, altrimenti il rischio, già parzialmente intravisto a livello di pubblicazioni, di confondere i vari settori di ricerca e definire caratteristiche o risultati ottenuti in modo generico comporta solo ad un incremento della confusione e della complessità relativa ad un settore già di per se particolarmente complesso.

Bibliografia

- [1] F. Alessandrini, G. Appetecchi e M. Conte. *Studio di fattibilità tecnica sull'applicabilità delle batterie al Litio nelle reti elettriche-Stato dell'arte e limiti scientifici e tecnologici*. Report Ricerca di Sistema Elettrico. ENEA, 2010.
- [2] Antonucci Vincenzo. *Sistemi elettrochimici per l'accumulo dell'energia*. Relazione Tecnico Scientifica I anno. ITAE, 2010.
- [3] Antonucci Vincenzo. *L'accumulo di energia elettrica*. RSEview - Riflessioni sull'energia. RSE, 2011.
- [4] Buja G. *Slide del corso Veicoli elettrici stradali*. 2014/2015.
- [5] Tortella A. *Slide del corso di Generazione ed accumulo da fonti elettriche rinnovabili*. 2014/2015.
- [6] Bregolin A. «RESS: sistemi di accumulo dell'energia elettrica in ambito residenziale - Valutazioni tecnico-economiche». Tesi di laurea magistrale. Università degli Studi di Padova, 2011/2012.
- [7] Huria T. «Rechargeable lithium battery energy storage system for vehicular applications». PhD's thesis. Università degli Studi di Padova, 2012.
- [8] G. Viganò. «Modellizzazione elettrica e termica di una batteria agli ioni di Litio con stimatore dello stato di carica». Tesi di laurea magistrale. Politecnico di Milano, 2014.
- [9] B. Scrosati e J. Garche. «Lithium batteries: Status, prospects and future». In: *Journal of Power Sources* (2009).
- [10] H. J. Bergveld. *Battery Management Systems. Design by Modelling*. Philips Research Laboratories. 2001.
- [11] H. Aalto. «Battery Cell Modeling for Battery Management System». Master's thesis. Lappeenranta University of Technology, 2012.
- [12] Y. Xing et al. «Battery Management Systems in Electric and Hybrid Vehicles». In: *Energies* (2011).
- [13] V. Ramadesigan et al. «Modelling and simulation of Lithium-Ion batteries from a system engineering perspective». In: *Journal of Electrochemical Society* (2012).
- [14] M. R. Jongerden e B. R. Haverkort. «Battery modelling». In: *Software IET* (2009).
- [15] X. Lin et al. «A lumped-parameter electro-thermal model for cylindrical batteries». In: *Journal of Power Source* 257 (nov. 2014).
- [16] M. Daowd et al. «Battery Model Parameter Estimation based on Matlab/Simulink®». In: *ResearchGate* (nov. 2010). The 25th World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium and Exhibition, Shenzhen, China.
- [17] Taesic Kim. «A Hybrid Battery Model Capable of Capturing Dynamic Circuit Characteristics and Nonlinear Capacity Effects». Master's thesis. University of Nebraska, 2012.
- [18] H. He, R. Xiong e J. Fan. «Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach». In: *Energies* (mar. 2011).
- [19] I. Kaj e V. Konane. «Analytical and stochastic modelling of battery cell dynamics». In: *ResearchGate* (nov. 2010). The 25th World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium and Exhibition, Shenzhen, China.

- [20] H. Aalto. *Parametri LFP*. 2010. URL: <http://www.ecol.xyz/rechargeable-batteries-products/a123-26650-lifepo4-battery-cell-2300mah-3-2v-hot-sale-pro1365908.htm>.
- [21] H. Aalto. *Parametri LiPo*. 2010. URL: http://it.aliexpress.com/store/product/13pcs-3-7V-12ah-battery-li-polymer-3-7v-12000mah-lipo-polymer-lithium-high-drain-30A/1453301_32485900986.html.
- [22] R. Lazzari et al. *Procedure di prova RSE-ENEA per batterie litio-ioni*. ResearchGate. RSE, Enea, 2013.
- [23] Battery University. *Chimica Li-ion*. 2015. URL: http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion.
- [24] Battery University. *Chimica LiPo*. 2015. URL: http://batteryuniversity.com/learn/article/the_li_polymer_battery_substance_or_hype.
- [25] S.R.P. Mantravadi. «Modeling, simulation and implementation of Li-ion battery powered electric and plug-in hybrid vehicles». Master thesis. University of Akron, 2011.
- [26] M. Conte et al. *Analisi e definizione di strategie di gestione e controllo di sistemi di accumulo elettrico per applicazioni in reti di distribuzione attive automatizzate*. Report 1 - Analisi dello stato dell'arte. ENEA, 2011.
- [27] CEI. *Normativa CEI 0-16*. 2013. URL: <http://www.ceiweb.it/doc/norme/13453.pdf>.
- [28] CEI. *Normativa CEI 0-21*. 2014. URL: <http://www.ceiweb.it/doc/norme/13455.pdf>.
- [29] CEI. *Variante V1 della normativa CEI 0-16*. 2014. URL: <http://www.ceiweb.it/doc/norme/0-16-V1.pdf>.
- [30] CEI. *Variante V1 della normativa CEI 0-21*. 2014. URL: <http://www.ceiweb.it/doc/norme/0-21-V1.pdf>.

Appendici

In questa appendice verranno postati e velocemente analizzati i tre script utilizzati per la realizzazione delle simulazioni previste. In particolare si partirà dal corpo principale (.1), responsabile della gestione del flusso dei dati, dell'interfaccia utente e del controllo dei modelli Simulink, per poi esaminare i due script di supporto del principale (.2).

A completamento del lavoro svolto verrà fatta una disamina sia del modello Simulink relativo ai primi sette test implementati (.3), sia del modello incentrato sull'ottavo ed ultimo test simulato (.4).

.1 Main script

In questa appendice verranno evidenziate e descritte le parti principali relative al codice Matlab sviluppato. Il main script, denominato "modellobatteriaGUI.m", è responsabile dell'interfaccia GUI e di tutti i processi di elaborazione e trasferimento dati permettendo quindi all'utente una totale esperienza di controllo e gestione delle simulazioni. Al codice principale si aggiungono diversi script secondari adibiti a svolgere funzioni di supporto e completamento dell'attività simulata, i quali verranno analizzati successivamente.

La parte di codice sottostante rappresenta la parte iniziale standard di un qualsiasi codice Matlab sviluppato in modalità GUIDE, con l'eccezione della riga 55, la quale carica i dati delle look-up table del modello Simulink nel Workspace mediante il file .m "datigenerali". Questa operazione è necessaria per il corretto funzionamento del modello, in quanto Simulink preleva i valori delle costanti implementate mediante lo spazio di memorizzazione delle variabili base, ovvero il Workspace di Matlab.

```
1 function varargout = modellobatteriaGUI(varargin)
2 % modellobatteriaGUI MATLAB code for modellobatteriaGUI.fig
3 %   modellobatteriaGUI, by itself, creates a new modellobatteriaGUI or raises the
4 %   existing
5 %   singleton*.
6 %
7 %   H = modellobatteriaGUI returns the handle to a new modellobatteriaGUI or the
8 %   handle to
9 %   the existing singleton*.
10 %
11 %   modellobatteriaGUI('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
12 %   function named CALLBACK in modellobatteriaGUI.M with the given input
13 %   arguments.
14 %
15 %   modellobatteriaGUI('Property','Value',...) creates a new modellobatteriaGUI or
16 %   raises the
17 %   existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
18 %   applied to the GUI before modellobatteriaGUI_OpeningFcn gets called. An
19 %   unrecognized property name or invalid value makes property application
20 %   stop. All inputs are passed to modellobatteriaGUI_OpeningFcn via varargin.
21 %
22 %   *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
23 %   instance to run (singleton)".
24 %
25 % See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES
26
27 % Edit the above text to modify the response to help modellobatteriaGUI
```

.1. MAIN SCRIPT

```
25 % Last Modified by GUIDE v2.5 27-Nov-2015 07:55:01

27 % Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
29 gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                    'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                    'gui_OpeningFcn', @modellobatteriaGUI_OpeningFcn, ...
                    'gui_OutputFcn',  @modellobatteriaGUI_OutputFcn, ...
                    'gui_LayoutFcn',  [] , ...
                    'gui_Callback',    []);
35 if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
37 end

39 if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
41 else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
43 end
% End initialization code - DO NOT EDIT
45

47 % — Executes just before modellobatteriaGUI is made visible.
function modellobatteriaGUI_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
49 % This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
51 % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
53 % varargin  command line arguments to modellobatteriaGUI (see VARARGIN)

55 assign2workspace('datigenerali') %carica i dati delle lookup table nel workspace di
    matlab

57 warning('off','all');
% Choose default command line output for modellobatteriaGUI
59 handles.output = hObject;

61 % Update handles structure
    guidata(hObject, handles);
63

65 % UIWAIT makes modellobatteriaGUI wait for user response (see UIRESUME)
%    uiwait(handles.figure1);
67

69 % %updates the handles structure
% guidata(hObject, handles);
71

73 % — Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = modellobatteriaGUI_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
75 % varargout  cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject    handle to figure
77 % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
79
% Get default command line output from handles structure
81 % varargout{1} = handles.output;
```

Nel successivo segmento di codice sono rappresentate le istruzioni associate ai pulsanti adibiti alla visualizzazione dei principali andamenti delle grandezze interessate nella simulazione. La struttura del codice è identica per ogni pulsante e si basa sulla seguente logica:

- alla fine di ogni ciclo di simulazione i dati relativi alle principali grandezze vengono salvati in file esterni .mat, i quali, una volta premuto un pulsante di visualizzazione dei relativi grafici, vengono caricati nel Workspace (vedasi, come esempio, le righe 89 e 90);
- a questo punto, continuando a scorrere il codice, viene aperta una finestra (figura(#)) costituita da uno o più grafici (mediante comando subplot);

- i dati vengono visualizzati in un grafico specificatamente elaborato nel quale sono presenti tutti i riferimenti indispensabili, facilitandone la comprensione.

```

84 % — Executes on button press in togglebutton4.
function togglebutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
86 % hObject    handle to togglebutton4 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
88 % handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
load('tensionebat.mat'); %carica dati da file .mat
90 load('socrel.mat'); %carica dati da file .mat

92 % Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of togglebutton4

94 figure(1)
subplot(2,1,1);
96 plot(SOCeff(2,:),Vcella(2,:)); %V in f SOCeff
title('Vcella(SOCeff)');
98 xlabel('SOCeff [pu]');
ylabel('Vcella [V]');
100 hold on
Vmax=evalin('base','Vmax');
102 hline = reffline([0 Vmax]); % per visualizzare limite di tensione max
set(hline, 'Color', 'r');
104 hold on
Vco=evalin('base','Vco');
106 hline=reffline ([0 Vco]); % per visualizzare limite di tensione min
set(hline, 'Color', 'r');
108 subplot(2,1,2)
plot(Vcella(1,:),Vcella(2,:)); %V in f t
110 title('Vcella(t)');
xlabel('tempo [sec]');
112 ylabel('Vcella [V]');
hold on
114 % Vmax=evalin('base','Vmax');
hline = reffline([0 Vmax]); % per visualizzare limite di tensione max
116 set(hline, 'Color', 'r');
hold on
118 % Vco=evalin('base','Vco');
hline=reffline ([0 Vco]); % per visualizzare limite di tensione min
120 set(hline, 'Color', 'r');

122 % — Executes on button press in togglebutton5.
function togglebutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)
124 % hObject    handle to togglebutton5 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
126 % handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
load('corrente.mat'); %carica dati da file .mat
128
% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of togglebutton5
130
132 figure(2)
plot(I(1,:),I(2,:)); %I in f tempo
title('I(t)');
134 xlabel('tempo [sec]');
ylabel('I [A]');
136

138
% — Executes on button press in togglebutton6.
140 function togglebutton6_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to togglebutton6 (see GCBO)
142 % eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
144 load('socreal.mat'); %carica dati da file .mat
load('socrel.mat'); %carica dati da file .mat
146
% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of togglebutton6
148

```

```
figure(3)
150 subplot(2,1,1)
plot(SOCteo(1,:),SOCteo(2,:)); %SOCteo in f tempo
152 title('SOCteo(t)');
xlabel('tempo [sec]');
154 ylabel('SOCteo [pu]');
% legend('SOCteo');
156 subplot(2,1,2)
plot(SOCeff(1,:),SOCeff(2,:)); %SOCeff in f tempo
158 title('SOCeff(t)');
xlabel('tempo [sec]');
160 ylabel('SOCeff [pu]');
% legend('SOCeff');
162

164 % — Executes on button press in togglebutton7.
function togglebutton7_Callback(hObject, eventdata, handles)
166 % hObject handle to togglebutton7 (see GCBO)
% eventdata reserved – to be defined in a future version of MATLAB
168 % handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% load('socrel.mat'); %carica dati da file .mat
170 load('tensione1.mat'); %carica dati da file .mat
load('tensione2.mat'); %carica dati da file .mat
172 load('tensione3.mat'); %carica dati da file .mat
% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of togglebutton7
174 % andamenti delle tre c.d.t. in funzione t
figure(5)
176 plot(V1(1,:),V1(2,:), 'g',V2(1,:),V2(2,:), 'r',V3(1,:),V3(2,:), 'b');
title('Andamenti V1-V2-V3(SOCeff)');
178 xlabel('tempo [sec]');
ylabel('Tensioni [V]');
180 legend('V1','V2','V3');

182

% — Executes on button press in togglebutton8.
184 function togglebutton8_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to togglebutton8 (see GCBO)
186 % eventdata reserved – to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
188 %carica dati da file .mat
% load('socrel.mat');
190 load('res1.mat');
load('res2.mat');
192 load('res3.mat');
% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of togglebutton8
194 % andamenti resistenze al variare t
figure(6)
196 plot(R1(1,:),R1(2,:), 'g',R2(1,:),R2(2,:), 'r',R3(1,:),R3(2,:), 'b');
xlabel('tempo [sec]');
198 ylabel('Resistenze [Ohm]');
legend('R1','R2','R3');
200

202 % — Executes on button press in togglebutton9.
function togglebutton9_Callback(hObject, eventdata, handles)
204 % hObject handle to togglebutton9 (see GCBO)
% eventdata reserved – to be defined in a future version of MATLAB
206 % handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
%carica dati da file .mat
208 % load('socrel.mat');
load('cap2.mat');
210 load('cap3.mat');
% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of togglebutton9
212 % andamenti capacità al variare t
figure(7)
214 plot(C2(1,:),C2(2,:), 'r',C3(1,:),C3(2,:), 'b'); %C3 in f SOCeff
title('Andamenti C2-C3(t)');
216 xlabel('tempo [sec]');
ylabel('Capacità [F]');
218 legend('C2','C3');
```

```

220 % — Executes on button press in togglebutton10.
function togglebutton10_Callback(hObject, eventdata, handles)
222 % hObject    handle to togglebutton10 (see GCBO)
% eventdata  reserved – to be defined in a future version of MATLAB
224 % handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
%carica dati da file .mat
226 load('potterm.mat');
load('temp.mat');
228
% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of togglebutton10
230
figure(8)
232 subplot(2,1,1)
plot(Pjoule(1,:),Pjoule(2,:)); %Pjoule in f tempo
234 title('Pjoule(t)');
xlabel('tempo [sec]');
236 ylabel('Pjoule [W]');
subplot(2,1,2)
238 plot(Tstim(1,:),Tstim(2,:)); %T batteria in funzione tempo
title('Tstim(t)');
240 xlabel('tempo [sec]');
ylabel('T [°C]');
242
% — Executes on button press in togglebutton22.
244 function togglebutton22_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to togglebutton22 (see GCBO)
246 % eventdata  reserved – to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
248 load('energia.mat');
load('rendimento.mat');
250 % Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of togglebutton22
252
figure(4)
subplot(2,1,1);
254 plot(E(1,:),E(2,:)); %E in f t
title('Energia erogata');
256 xlabel('tempo [sec]');
ylabel('E [W]');
258 subplot(2,1,2);
plot(eta(1,:),eta(2,:)); %rendimento in f t
260 title('Rendimento energetico');
xlabel('tempo [sec]');
262 ylabel('eta [%]');

```

La parte successiva svolge la funzione di chiusura delle finestre Simulink aperte (i modelli utilizzabili sono due) e dell'interfaccia. Per prima cosa viene introdotto il parametro “open_db”, il quale fornisce il nome dei modelli Simulink aperti in quell'istante. Poi tale parametro viene usato come discriminante per consentire la corretta chiusura del modello. Infine, la riga 284 determina la chiusura definitiva dell'interfaccia.

```

% — Executes on button press in pushbutton1.
266 function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton1 (see GCBO)
268 % eventdata  reserved – to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
270
% chiudo modello simulink e gui
272 open_bd = find_system('type', 'block_diagram', 'open', 'on')
if strcmp(open_bd, 'modellobatteria')
274 close_system('modellobatteria');
end
276 if strcmp(open_bd, 'prova_inverter')
close_system('prova_inverter');
278 end
if length(open_bd)==2
280 close_system('modellobatteria');
close_system('prova_inverter');

```

```
282 end
284 close(handles.figure1);
```

La porzione di codice sottostante si riferisce alla logica di visualizzazione del pulsante premuto relativo alle tre tipologie di chimiche Litio implementate. Come si può vedere, la condizione relativa allo stato del pulsante determina il colore dello stesso. In particolare, nel caso il pulsante sia stato premuto, esso assume il colore verde, altrimenti mantiene la configurazione originale (di colore grigio). Questa logica viene attuata, nelle medesime modalità, anche per i pulsanti relativi alla scelta del test di simulazione.

```
470 % — Executes when selected object is changed in uipanel7.
function uipanel7_SelectionChangeFcn(hObject, eventdata, handles)
472 % hObject      handle to the selected object in uipanel7
% eventdata     structure with the following fields (see UIBUTTONGROUP)
474 %   EventName: string 'SelectionChanged' (read only)
%   OldValue:   handle of the previously selected object or empty if none was selected
476 %   NewValue:  handle of the currently selected object
% handles       structure with handles and user data (see GUIDATA)
478 % retrieve GUI data, i.e. the handles structure
handles = guidata(hObject);
480 % modifico i colori in base al fatto se sono premuti o meno per le fam Li
if get(handles.togglebutton18, 'Value')
482     set(handles.togglebutton18, 'BackgroundColor', [0 1 0])
    else
484     set(handles.togglebutton18, 'BackgroundColor', [0.941 0.941 0.941])
end
486
if get(handles.togglebutton19, 'Value')
488     set(handles.togglebutton19, 'BackgroundColor', [0 1 0])
    else
490     set(handles.togglebutton19, 'BackgroundColor', [0.941 0.941 0.941])
end
492
if get(handles.togglebutton20, 'Value')
494     set(handles.togglebutton20, 'BackgroundColor', [0 1 0])
    else
496     set(handles.togglebutton20, 'BackgroundColor', [0.941 0.941 0.941])
end
```

Di seguito viene riportata la parte di script associata alla selezione della famiglia *NMC*, tuttavia la logica rimane la stessa anche per le altre due tipologie, con la sola variazione dei riferimenti e dei dati associati. Per prima cosa vengono azzerati i riferimenti relativi a possibili cicli precedentemente svolti, questo sia in termini di logica implementata (BMS, *CO₂*, limiti di *SOC* etc...) sia in termini di dati da caricare nelle look-up table (mediante file .m “ric1”; per informazioni [.2](#)). Quest’ultimo passaggio risulta essere fondamentale in quanto, nel caso in cui sia stata fatta una precedente simulazione, se si desidera effettuare un’analisi successiva con la medesima famiglia, i valori implementati utilizzati sarebbero quelli precedentemente usati (quindi con una configurazione serie/parallelo non necessariamente coincidente con quella desiderata).

In cascata si trova la visualizzazione dei parametri nominali della singola cella (quindi predeterminati e fissi), per poi passare alla richiesta, mediante una finestra di input, dei valori caratteristici della batteria che si desidera implementare. Tali valori vengono quindi visualizzati nell’interfaccia e salvati nel Workspace (mediante comando “putvar”).

Una volta stabilita la configurazione delle celle, si passa al calcolo dei parametri elettrici equivalenti, che vengono quindi aggiornati e ricaricati nello spazio di memoria base.

La parte finale comprende la definizione dei parametri indispensabili per il taraggio dello stimatore del *SOC* (*k, c, z*) e l’inserimento degli array contenenti le informazioni relative al test4. L’ultima riga invece determina il deselezionamento del pulsante, il quale tuttavia rimarrà evidenziato in verde fino ad una successiva selezione di uno dei pulsanti del pannello associato.

```
500 switch get(eventdata.NewValue, 'Tag') % Get Tag of selected object.
```

```

502 case 'togglebutton18' %NMC
    %checkbox BMS
504 set(handles.checkbox3,'Value',0);
    %edit socmax e socmin
506 set(handles.edit16,'String','....');
    set(handles.edit15,'String','....');
508 %edit C0 e I
    set(handles.edit11,'String','.....');
510 set(handles.edit12,'String','.....');
    %visualizzo limiti carica scarica
512 set(handles.edit17,'String','....');
    set(handles.edit18,'String','....');
514 set(handles.edit19,'String','....');
    tipologia=1;
516 assign2workspace('ric1') % ricarico i dati base per non utilizzare quelli
        modificati dal ciclo precedente
    Vr=3.6;
518 Vcor=2.7;
    Vmaxr=4.205;
520 Cr=43;
    Cmaxr=45;
522 Cminr=39;
    putvar(Vr,Cr,Vmaxr,Vcor,Cmaxr,Cminr);
524 % visualizzo i valori
    set(handles.edit1,'String',num2str(Cr));
526 set(handles.edit2,'String',num2str(Vr));
    set(handles.edit5,'String','1C');
528 prompt = {'Capacità nominale desiderata [Ah]', 'Tensione nominale desiderata [V]',
        'Corrente di scarica nominale desiderata [A]'};
    dlg_title = 'Input NMC';
530 num_lines=1;
    answer = inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines);
532 % visualizzo i valori
    set(handles.edit7,'String',answer{1,1});
534 set(handles.edit8,'String',answer{2,1});
    set(handles.edit9,'String',answer{3,1});
536 Vn=str2double(answer{2,1});
    Cn=str2double(answer{1,1});
538 In=str2double(answer{3,1});
    ns=Vn/Vr;
540 Vmax=Vmaxr*ns;
    Vco=Vcor*ns;
542 np=Cn/Cr;
    Cmax=Cmaxr*np;
544 Cmin=Cminr*np;

546 putvar(Vn,Cn,In,Vmax,Vco,ns,np,Cmax,Cmin,tipologia);

548 %Calcolo serie parallelo parametri 0 gradi
    OCV_1=evalin('base','OCV_1');
550 OCV_1=OCV_1.*ns;
    C3_1_0=evalin('base','C3_1_0');
552 C3_1_0=((np.*C3_1_0).^ns)./(ns.*((np.*C3_1_0).^(ns-1))); %calcolo serie parallelo
    R3_1_0=evalin('base','R3_1_0');
554 R3_1_0=((ns.*R3_1_0).^np)./(np.*((ns.*R3_1_0).^(np-1))); %calcolo serie parallelo
    C2_1_0=evalin('base','C2_1_0');
556 C2_1_0=((np.*C2_1_0).^ns)./(ns.*((np.*C2_1_0).^(ns-1))); %calcolo serie parallelo
    R2_1_0=evalin('base','R2_1_0');
558 R2_1_0=((ns.*R2_1_0).^np)./(np.*((ns.*R2_1_0).^(np-1))); %calcolo serie parallelo
    R1_1_0=evalin('base','R1_1_0');
560 R1_1_0=((ns.*R1_1_0).^np)./(np.*((ns.*R1_1_0).^(np-1))); %calcolo serie parallelo

562 putvar(OCV_1,R1_1_0,R2_1_0,R3_1_0,C2_1_0,C3_1_0);
    %Calcolo serie parallelo parametri 10 gradi
564 C3_1_10=evalin('base','C3_1_10');
    C3_1_10=((np.*C3_1_10).^ns)./(ns.*((np.*C3_1_10).^(ns-1))); %calcolo serie
        parallelo
566 R3_1_10=evalin('base','R3_1_10');
    R3_1_10=((ns.*R3_1_10).^np)./(np.*((ns.*R3_1_10).^(np-1))); %calcolo serie
        parallelo

```

```

568 C2_1_10=evalin('base','C2_1_10');
C2_1_10=((np.*C2_1_10).^ns)/(ns.*((np.*C2_1_10)^(ns-1))); %calcolo serie
      parallelo
570 R2_1_10=evalin('base','R2_1_10');
R2_1_10=((ns.*R2_1_10).^np)/(np.*((ns.*R2_1_10)^(np-1))); %calcolo serie
      parallelo
572 R1_1_10=evalin('base','R1_1_10');
R1_1_10=((ns.*R1_1_10).^np)/(np.*((ns.*R1_1_10)^(np-1))); %calcolo serie
      parallelo

574
576 putvar(R1_1_10,R2_1_10,R3_1_10,C2_1_10,C3_1_10);
%Calcolo serie parallelo parametri 20 gradi
578 C3_1_20=evalin('base','C3_1_20');
C3_1_20=((np.*C3_1_20).^ns)/(ns.*((np.*C3_1_20)^(ns-1))); %calcolo serie
      parallelo
580 R3_1_20=evalin('base','R3_1_20');
R3_1_20=((ns.*R3_1_20).^np)/(np.*((ns.*R3_1_20)^(np-1))); %calcolo serie
      parallelo
582 C2_1_20=evalin('base','C2_1_20');
C2_1_20=((np.*C2_1_20).^ns)/(ns.*((np.*C2_1_20)^(ns-1))); %calcolo serie
      parallelo
584 R2_1_20=evalin('base','R2_1_20');
R2_1_20=((ns.*R2_1_20).^np)/(np.*((ns.*R2_1_20)^(np-1))); %calcolo serie
      parallelo
586 R1_1_20=evalin('base','R1_1_20');
R1_1_20=((ns.*R1_1_20).^np)/(np.*((ns.*R1_1_20)^(np-1))); %calcolo serie
      parallelo

588 putvar(R1_1_20,R2_1_20,R3_1_20,C2_1_20,C3_1_20);
%Calcolo serie parallelo parametri 30 gradi
590 C3_1_30=evalin('base','C3_1_30');
C3_1_30=((np.*C3_1_30).^ns)/(ns.*((np.*C3_1_30)^(ns-1))); %calcolo serie
      parallelo
592 R3_1_30=evalin('base','R3_1_30');
R3_1_30=((ns.*R3_1_30).^np)/(np.*((ns.*R3_1_30)^(np-1))); %calcolo serie
      parallelo
594 C2_1_30=evalin('base','C2_1_30');
C2_1_30=((np.*C2_1_30).^ns)/(ns.*((np.*C2_1_30)^(ns-1))); %calcolo serie
      parallelo
596 R2_1_30=evalin('base','R2_1_30');
R2_1_30=((ns.*R2_1_30).^np)/(np.*((ns.*R2_1_30)^(np-1))); %calcolo serie
      parallelo
598 R1_1_30=evalin('base','R1_1_30');
R1_1_30=((ns.*R1_1_30).^np)/(np.*((ns.*R1_1_30)^(np-1))); %calcolo serie
      parallelo

600
602 putvar(R1_1_30,R2_1_30,R3_1_30,C2_1_30,C3_1_30);
%Calcolo serie parallelo parametri 40 gradi
604 C3_1_40=evalin('base','C3_1_40');
C3_1_40=((np.*C3_1_40).^ns)/(ns.*((np.*C3_1_40)^(ns-1))); %calcolo serie
      parallelo
606 R3_1_40=evalin('base','R3_1_40');
R3_1_40=((ns.*R3_1_40).^np)/(np.*((ns.*R3_1_40)^(np-1))); %calcolo serie
      parallelo
608 C2_1_40=evalin('base','C2_1_40');
C2_1_40=((np.*C2_1_40).^ns)/(ns.*((np.*C2_1_40)^(ns-1))); %calcolo serie
      parallelo
610 R2_1_40=evalin('base','R2_1_40');
R2_1_40=((ns.*R2_1_40).^np)/(np.*((ns.*R2_1_40)^(np-1))); %calcolo serie
      parallelo
612 R1_1_40=evalin('base','R1_1_40');
R1_1_40=((ns.*R1_1_40).^np)/(np.*((ns.*R1_1_40)^(np-1))); %calcolo serie
      parallelo

614 putvar(R1_1_40,R2_1_40,R3_1_40,C2_1_40,C3_1_40);
%Calcolo serie parallelo dei parametri termici Rth e Cth
616 Cth=evalin('base','Cth');
Cth=((np*Cth)^ns)/(ns*((np*Cth)^(ns-1))); %calcolo serie parallelo
618 Rth=evalin('base','Rth');
Rth=((ns*Rth)^np)/(np*((ns*Rth)^(np-1))); %calcolo serie parallelo

```

```

620     k=0.000135;
622
624     %Crate max 10C e min 0.33C
626     c=Cmin/Cmax;
        z=Cmax/Cn;
628
        %carica dati test 5
        value4=[(2*In) In (-2*In) In 0];
630     time4=[0 500 1000 1500 2000];
        putvar(Cth,Rth,k,c,z,value4,time4);
632     % deseleziono il pulsante ma resta verde
        set(handles.togglebutton18,'Value',0);

```

La parte seguente di codice si riferisce al selezionamento del “test1”, il quale determina l’apertura del modello Simulink associato, in questo caso, come per i successivi sei, costituito da “modellobatteria”. Dopo la richiesta di implementazione o meno del BMS, il codice, nel caso di risposta affermativa, determina la visualizzazione dei principali limiti aggiustati a seconda della capacità nominale del modello in esame, seguito dalla richiesta di inserimento dei valori limite desiderati per il BMS e delle grandezze controllabili per la simulazione (valori che verranno poi visualizzati nella GUI). Ovviamente è presente la parte di codice relativa al mancato utilizzo del BMS, la quale coincide con la seconda parte di quanto descritto in precedenza.

Il passo successivo consiste nell’identificazione del parametro moltiplicativo f relazionato a k , il cui prodotto determina la quantità di carica circolante tra i due serbatoi (riferimento allo stimatore di carica).

Infine è presente la logica di funzionamento dei LED di stato, i quali vengono accesi e spenti in base al fatto se una simulazione sta avvenendo oppure no.

```

938     switch get(eventdata.NewValue,'Tag') % Get Tag of selected object.
940     case 'togglebutton11' % scarica/carica I costante
        open_system('modellobatteria'); %apre il modello simulink
942     ciclo=1;
        rich1={'Desidero implementare la logica del BMS?'};
944     titl='Richiesta BMS';
        lin1=1;
946     rix1=inputdlg(rich1,titl,lin1);
948
        if strcmp(rix1,'si')
            GD=1;
950         %checkbox BMS
            set(handles.checkbox3,'Value',1);
952         tipologia=evalin('base','tipologia');
            Cn=evalin('base','Cn');
954         if tipologia==1
            %visualizzo limiti carica scarica
956             set(handles.edit17,'String',num2str(3*Cn));
                set(handles.edit18,'String',num2str(5*Cn));
958             set(handles.edit19,'String',num2str(10*Cn));
            end
960         if tipologia==2
            %visualizzo limiti carica scarica
962             set(handles.edit17,'String',num2str(4*Cn));
                set(handles.edit18,'String',num2str(30*Cn));
964             set(handles.edit19,'String',num2str(52*Cn));
            end
966         if tipologia==3
            %visualizzo limiti carica scarica
968             set(handles.edit17,'String',num2str(0.5*Cn));
                set(handles.edit18,'String',num2str(3*Cn));
970             set(handles.edit19,'String',num2str(5*Cn));
            end
972         prompt1={'SOC massimo [pu]','SOC minimo [pu]','Corrente di scarica desiderata [A
                ]','Capacità iniziale [Ah]'};
            dlg_title1='Valori limite SOC';

```

```
974     num_lines1=1;
975     answer1=inputdlg(prompt1,dlg_title1,num_lines1);
976     %edit socmax
977     socmax=str2double(answer1{1,1});
978     set(handles.edit16,'String',answer1{1,1});
979     %edit socmin
980     socmin=str2double(answer1{2,1});
981     set(handles.edit15,'String',answer1{2,1});
982     %edit C0 e I
983     set(handles.edit11,'String',answer1{4,1});
984     set(handles.edit12,'String',answer1{3,1});
985     ans1=answer1(3:end,1);
986     conv1=str2double(ans1);
987     I=conv1(1,1);
988     C0=conv1(2,1);
989     int=0;
990     %checkbox limite SOC e V
991     set(handles.checkbox1,'Value',0);
992     set(handles.checkbox2,'Value',0);
993
994     else
995         GD=0;
996         %checkbox BMS
997         set(handles.checkbox3,'Value',0);
998         prompt1 = {'Desidero interrompere simulazione se la tensione supera i limiti?','
999                 Corrente di scarica desiderata [A]','Capacità iniziale [Ah]'};
1000        dlg_title1 = 'Input Test1';
1001        num_lines1 = 1;
1002        answer1 = inputdlg(prompt1,dlg_title1,num_lines1);
1003        % check dei checkbox
1004        if strcmp(answer1{1,1},'si')
1005            int=1;
1006            %checkbox limite SOC e V
1007            set(handles.checkbox1,'Value',1);
1008            set(handles.checkbox2,'Value',1);
1009        else
1010            int=0;
1011            %checkbox limite SOC e V
1012            set(handles.checkbox1,'Value',1);
1013            set(handles.checkbox2,'Value',0);
1014        end
1015        %edit C0 e I
1016        set(handles.edit11,'String',answer1{3,1});
1017        set(handles.edit12,'String',answer1{2,1});
1018        ans1=answer1(2:end,1);
1019        conv1=str2double(ans1);
1020        I=conv1(1,1);
1021        C0=conv1(2,1);
1022        socmax=1;
1023        socmin=0;
1024        %edit socmin e socmax
1025        set(handles.edit16,'String','...');
1026        set(handles.edit15,'String','...');
1027    end
1028
1029    In=evalin('base','In');
1030    tipologia=evalin('base','tipologia');
1031    f=1;
1032    % calcolo di f in base valore I e famiglia
1033    if tipologia==1
1034        if I>In
1035            f=(In/I)*1;
1036        end
1037        if I<In
1038            f=(In/I)*2.5;
1039        end
1040    end
1041    if tipologia==2
1042        if I>In
1043            f=(In/I)*3;
```

```

end
1044 if I<In
      f=(In/I)*0.3;
1046 end
end
1048 if tipologia==3
      if I~=In
1050         f=(In/I)*3;
          end
1052 end
T=15000;
1054 putvar(I,C0,int,ciclo,T,f,GD,socmax,socmin);
%LED tato in simulazione
1056 set(handles.text29,'Visible','off');
set(handles.text45,'Visible','off');
1058 set(handles.text44,'Visible','on');
set(handles.text46,'Visible','on');
1060
sim('modellobatteria',[0 T]);
1062 %LED stato pronto
set(handles.text44,'Visible','off');
1064 set(handles.text46,'Visible','off');
set(handles.text29,'Visible','on');
1066 set(handles.text45,'Visible','on');
%depressione testbutton
1068 set(handles.togglebutton11,'Value',0);

```

Test2

```

1070 case 'togglebutton12' %scarica/carica ad impulsi
open_system('modellobatteria'); %apre il modello simulink
1072 ciclo=2;
rich2={'Desidero implementare la logica del BMS?'};
1074 tit2='Richiesta BMS';
lin2=1;
1076 rix2=inputdlg(rich2,tit2,lin2);

1078 if strcmp(rix2,'si')
GD=1;
1080 %checkbox BMS
set(handles.checkbox3,'Value',1);
1082 tipologia=evalin('base','tipologia');
Cn=evalin('base','Cn');
1084 if tipologia==1
%visualizzo limiti carica scarica
1086 set(handles.edit17,'String',num2str(3*Cn));
set(handles.edit18,'String',num2str(5*Cn));
1088 set(handles.edit19,'String',num2str(10*Cn));
end
1090 if tipologia==2
%visualizzo limiti carica scarica
1092 set(handles.edit17,'String',num2str(4*Cn));
set(handles.edit18,'String',num2str(30*Cn));
1094 set(handles.edit19,'String',num2str(52*Cn));
end
1096 if tipologia==3
%visualizzo limiti carica scarica
1098 set(handles.edit17,'String',num2str(0.5*Cn));
set(handles.edit18,'String',num2str(3*Cn));
1100 set(handles.edit19,'String',num2str(5*Cn));
end
1102 prompt2={'SOC massimo [pu]','SOC minimo [pu]','Corrente di scarica desiderata [
A]','Capacità iniziale [Ah]'};
dlg_title2='Valori limite SOC';
1104 num_lines2=1;
answer2=inputdlg(prompt2,dlg_title2,num_lines2);
1106 %edit socmax
socmax=str2double(answer2{1,1});
1108 set(handles.edit16,'String',answer2{1,1});

```

```
1110 %edit socmin
socmin=str2double(answer2{2,1});
set(handles.edit15,'String',answer2{2,1});
1112 %edit C0 e I
set(handles.edit11,'String',answer2{4,1});
1114 set(handles.edit12,'String',answer2{3,1});
ans2=answer2(3:end,1);
1116 conv2=str2double(ans2);
I=conv2(1,1);
1118 C0=conv2(2,1);
int=0;
1120 %checkbox limite SOC e V
set(handles.checkbox1,'Value',0);
1122 set(handles.checkbox2,'Value',0);

1124 else
GD=0;
1126 %checkbox BMS
set(handles.checkbox3,'Value',0);
1128 prompt2 = {'Desidero interrompere simulazione se la tensione supera i limiti?',
'Corrente di scarica desiderata [A]','Capacità iniziale [Ah]'};
dlg_title2 = 'Input Test1';
1130 num_lines2 = 1;
answer2 = inputdlg(prompt2,dlg_title2,num_lines2);
1132 % check dei checkbox
if strcmp(answer2{1,1},'si')
1134 int=1;
%checkbox limite SOC e V
1136 set(handles.checkbox1,'Value',1);
set(handles.checkbox2,'Value',1);
1138 else
int=0;
1140 %checkbox limitw SOC e V
set(handles.checkbox1,'Value',1);
1142 set(handles.checkbox2,'Value',0);
end
1144 %edit C0 e I
set(handles.edit11,'String',answer2{3,1});
1146 set(handles.edit12,'String',answer2{2,1});
ans2=answer2(2:end,1);
1148 conv2=str2double(ans2);
I=conv2(1,1);
1150 C0=conv2(2,1);
socmax=1;
1152 socmin=0;
%edit socmin e socmax
1154 set(handles.edit16,'String','....');
set(handles.edit15,'String','....');
1156 end

1158 In=evalin('base','In');
tipologia=evalin('base','tipologia');
1160 f=1;
if tipologia==1
1162 if I>In
f=(In/I)*1;
1164 end
if I<In
1166 f=(In/I)*2.5;
end
1168 end
if tipologia==2
1170 if I>In
f=(In/I)*3;
1172 end
if I<In
1174 f=(In/I)*0.3;
end
1176 end
if tipologia==3
```

```

1178     if I~=In
1179         f=(In/I)*3;
1180     end
1181     end
1182     T=25000;
1183     putvar(I,C0,int,ciclo,T,f,GD,socmax,socmin);
1184     %LED stato in simulazione
1185     set(handles.text29,'Visible','off');
1186     set(handles.text45,'Visible','off');
1187     set(handles.text44,'Visible','on');
1188     set(handles.text46,'Visible','on');

1190     sim('modellobatteria',[0 T]);
1191     %LED stato pronto
1192     set(handles.text44,'Visible','off');
1193     set(handles.text46,'Visible','off');
1194     set(handles.text29,'Visible','on');
1195     set(handles.text45,'Visible','on');
1196     %depressione testbutton
1197     set(handles.togglebutton12,'Value',0);

```

Test3

```

1200     case 'togglebutton13' %ciclo scarica/carica
1201         open_system('modellobatteria'); %apre il modello simulink
1202         ciclo=3;
1203         rich3={'Desidero implementare la logica del BMS?'};
1204         tit3='Richiesta BMS';
1205         lin3=1;
1206         rix3=inputdlg(rich3,tit3,lin3);

1207         if strcmp(rix3,'si')
1208             GD=1;
1209             %checkbox BMS
1210             set(handles.checkbox3,'Value',1);
1211             tipologia=evalin('base','tipologia');
1212             Cn=evalin('base','Cn');
1213             if tipologia==1
1214                 %visualizzo limiti carica scarica
1215                 set(handles.edit17,'String',num2str(3*Cn));
1216                 set(handles.edit18,'String',num2str(5*Cn));
1217                 set(handles.edit19,'String',num2str(10*Cn));
1218             end
1219             if tipologia==2
1220                 %visualizzo limiti carica scarica
1221                 set(handles.edit17,'String',num2str(4*Cn));
1222                 set(handles.edit18,'String',num2str(30*Cn));
1223                 set(handles.edit19,'String',num2str(52*Cn));
1224             end
1225             if tipologia==3
1226                 %visualizzo limiti carica scarica
1227                 set(handles.edit17,'String',num2str(0.5*Cn));
1228                 set(handles.edit18,'String',num2str(3*Cn));
1229                 set(handles.edit19,'String',num2str(5*Cn));
1230             end
1231             prompt3={'SOC massimo [pu]', 'SOC minimo [pu]', 'Corrente di scarica desiderata [A
1232                 ]'};
1233             dlg_title3='Valori limite SOC';
1234             num_lines3=1;
1235             answer3=inputdlg(prompt3,dlg_title3,num_lines3);
1236             %edit socmax
1237             socmax=str2double(answer3{1,1});
1238             set(handles.edit16,'String',answer3{1,1});
1239             %edit socmin
1240             socmin=str2double(answer3{2,1});
1241             set(handles.edit15,'String',answer3{2,1});
1242             %edit C0 e I
1243             C0=socmax*Cn;
1244             set(handles.edit11,'String',num2str(C0));

```

```
1244     set(handles.edit12, 'String', answer3{3,1});
1245     ans3=answer3{3,1};
1246     conv3=str2double(ans3);
1247     I=conv3(1,1);
1248     %C0=conv3(2,1);
1249     %checkbox limite SOC e V
1250     set(handles.checkbox1, 'Value', 0);
1251     set(handles.checkbox2, 'Value', 0);
1252     else
1253         GD=0;
1254         %checkbox BMS
1255         set(handles.checkbox3, 'Value', 0);
1256         prompt3 = {'Corrente di scarica desiderata [A]'};
1257         dlg_title3 = 'Input Test3';
1258         num_lines3 = 1;
1259         answer3 = inputdlg(prompt3,dlg_title3,num_lines3);
1260         %checkbox limite SOC e V
1261         set(handles.checkbox1, 'Value', 1);
1262         set(handles.checkbox2, 'Value', 0);
1263         %edit C0 e I
1264         C0=evalin('base', 'Cn');
1265         set(handles.edit11, 'String', num2str(C0));
1266         set(handles.edit12, 'String', answer3{1,1});
1267         ans3=answer3{1,1};
1268         conv3=str2double(ans3);
1269         I=conv3(1,1);
1270         %C0=conv3(2,1);
1271         socmax=1;
1272         socmin=0;
1273         %edit socmax e socmin
1274         set(handles.edit16, 'String', '....');
1275         set(handles.edit15, 'String', '....');
1276     end
1277     int=0;
1278     In=evalin('base', 'In');
1279     tipologia=evalin('base', 'tipologia');
1280     f=1;
1281     if tipologia==1
1282         if I>In
1283             f=(In/I)*1;
1284         end
1285         if I<In
1286             f=(In/I)*2.5;
1287         end
1288     end
1289     if tipologia==2
1290         if I>In
1291             f=(In/I)*3;
1292         end
1293         if I<In
1294             f=(In/I)*0.3;
1295         end
1296     end
1297     if tipologia==3
1298         if I~=In
1299             f=(In/I)*3;
1300         end
1301     end
1302     T=35000;
1303     putvar(I, C0, int, ciclo, T, f, GD, socmax, socmin);
1304     %LED stato in simulazione
1305     set(handles.text29, 'Visible', 'off');
1306     set(handles.text45, 'Visible', 'off');
1307     set(handles.text44, 'Visible', 'on');
1308     set(handles.text46, 'Visible', 'on');
1309
1310     sim('modellobatteria', [0 T]);
1311     %LED stato a disposizione
1312     set(handles.text44, 'Visible', 'off');
1313     set(handles.text46, 'Visible', 'off');
```

```

1314     set(handles.text29,'Visible','on');
1315     set(handles.text45,'Visible','on');
1316     %depressione testbutton
1317     set(handles.togglebutton13,'Value',0);

```

Test4

```

1320     case 'togglebutton14' % ciclo a gradini
1321         open_system('modellobatteria'); %apre il modello simulink
1322         ciclo=4;
1323         rich4={'Desidero implementare la logica del BMS?'};
1324         tit4='Richiesta BMS';
1325         lin4=1;
1326         rix4=inputdlg(rich4,tit4,lin4);

1328         if strcmp(rix4,'si')
1329             GD=1;
1330             %checkbox BMS
1331             set(handles.checkbox3,'Value',1);
1332             tipologia=evalin('base','tipologia');
1333             Cn=evalin('base','Cn');
1334             if tipologia==1
1335                 %visualizzo limiti carica scarica
1336                 set(handles.edit17,'String',num2str(3*Cn));
1337                 set(handles.edit18,'String',num2str(5*Cn));
1338                 set(handles.edit19,'String',num2str(10*Cn));
1339             end
1340             if tipologia==2
1341                 %visualizzo limiti carica scarica
1342                 set(handles.edit17,'String',num2str(4*Cn));
1343                 set(handles.edit18,'String',num2str(30*Cn));
1344                 set(handles.edit19,'String',num2str(52*Cn));
1345             end
1346             if tipologia==3
1347                 %visualizzo limiti carica scarica
1348                 set(handles.edit17,'String',num2str(0.5*Cn));
1349                 set(handles.edit18,'String',num2str(3*Cn));
1350                 set(handles.edit19,'String',num2str(5*Cn));
1351             end
1352             prompt4={'SOC massimo [pu]','SOC minimo [pu]','Capacità iniziale [Ah]'};
1353             dlg_title4='Valori limite SOC';
1354             num_lines4=1;
1355             answer4=inputdlg(prompt4,dlg_title4,num_lines4);
1356             %edit socmax
1357             socmax=str2double(answer4{1,1});
1358             set(handles.edit16,'String',answer4{1,1});
1359             %edit socmin
1360             socmin=str2double(answer4{2,1});
1361             set(handles.edit15,'String',answer4{2,1});
1362             %edit C0
1363             set(handles.edit11,'String',answer4{3,1});
1364             ans4=answer4{3,1};
1365             conv4=str2double(ans4);
1366             C0=conv4;
1367             int=0;
1368             %checkbox SOC e V
1369             set(handles.checkbox1,'Value',0);
1370             set(handles.checkbox2,'Value',0);
1371         else
1372             GD=0;
1373             %checkbox BMS
1374             set(handles.checkbox3,'Value',0);
1375             prompt4 = {'Desidero interrompere simulazione se la tensione supera i limiti?',
1376                 'Capacità iniziale [Ah]'};
1377             dlg_title4 = 'Input Test4';
1378             num_lines4 = 1;
1379             answer4 = inputdlg(prompt4,dlg_title4,num_lines4);
1380             if strcmp(answer4{1,1},'si')
1381                 int=1;

```

```
1382     %checkbox SOC e V
1383     set(handles.checkbox1, 'Value', 1);
1384     set(handles.checkbox2, 'Value', 1);
1385     else
1386         int=0;
1387         %checkbox SOC e V
1388         set(handles.checkbox1, 'Value', 0);
1389         set(handles.checkbox2, 'Value', 0);
1390     end
1391     %edit C0 e I
1392     set(handles.edit11, 'String', answer4{2,1});
1393     set(handles.edit12, 'String', 'Tra 2In e -2In');
1394     ans4=answer4{2,1};
1395     conv4=str2double(ans4);
1396     C0=conv4;
1397     socmax=1;
1398     socmin=0;
1399     %edit socmax e socmin
1400     set(handles.edit16, 'String', '....');
1401     set(handles.edit15, 'String', '....');
1402     end
1403     In=evalin('base', 'In');
1404     f=1;
1405     I=In;
1406     T=2500;
1407     putvar(I, C0, int, T, ciclo, f, GD, socmax, socmin);
1408     %LED stato in simulazione
1409     set(handles.text29, 'Visible', 'off');
1410     set(handles.text45, 'Visible', 'off');
1411     set(handles.text44, 'Visible', 'on');
1412     set(handles.text46, 'Visible', 'on');
1413
1414     sim('modellobatteria', [0 T]);
1415     %LED stato disponibile
1416     set(handles.text44, 'Visible', 'off');
1417     set(handles.text46, 'Visible', 'off');
1418     set(handles.text29, 'Visible', 'on');
1419     set(handles.text45, 'Visible', 'on');
1420     %depressione testbutton
1421     set(handles.togglebutton14, 'Value', 0);
```

Il codice seguente si riferisce al test5, il quale assieme al test6 e test7, presenta alcune differenze. In particolare si nota l'assenza della logica adibita al calcolo del parametro f connesso al modulo della corrente circolante. Questa è una conseguenza del fatto che in questi cicli non viene imposta la corrente ma la potenza scambiata, la quale divisa per la tensione della batteria determina la corrente. Quindi per motivi strutturali non è stato possibile implementare il calcolo del parametro, che viene quindi imposto unitario. Questa approssimazione non risulta essere particolarmente influente sia perchè il set di potenza varia continuamente (non permettendo quindi al parametro di produrre un effetto) sia perchè la variazione introdotta alla capacità erogabile è, in termini percentuali, ininfluente.

```
1422     case 'togglebutton15' %test per veicoli elettrici
1423         open_system('modellobatteria'); %apre il modello simulink
1424         ciclo=5;
1425         rich5={'Desidero implementare la logica del BMS?'};
1426         tit5='Richiesta BMS';
1427         lin5=1;
1428         rix5=inputdlg(rich5, tit5, lin5);
1429
1430         if strcmp(rix5, 'si')
1431             GD=1;
1432             %checkbox BMS
1433             set(handles.checkbox3, 'Value', 1);
1434             tipologia=evalin('base', 'tipologia');
1435             Cn=evalin('base', 'Cn');
1436             if tipologia==1
1437                 %visualizzo limiti carica scarica
1438                 set(handles.edit17, 'String', num2str(3*Cn));
```

```

1440     set(handles.edit18,'String',num2str(5*Cn));
        set(handles.edit19,'String',num2str(10*Cn));
    end
1442    if tipologia==2
        %visualizzo limiti carica scarica
1444        set(handles.edit17,'String',num2str(4*Cn));
        set(handles.edit18,'String',num2str(30*Cn));
1446        set(handles.edit19,'String',num2str(52*Cn));
    end
1448    if tipologia==3
        %visualizzo limiti carica scarica
1450        set(handles.edit17,'String',num2str(0.5*Cn));
        set(handles.edit18,'String',num2str(3*Cn));
1452        set(handles.edit19,'String',num2str(5*Cn));
    end
1454    prompt5={'SOC massimo [pu]','SOC minimo [pu]','Capacità iniziale [Ah]'};
    dlg_title5='Valori limite SOC';
1456    num_lines5=1;
    answer5=inputdlg(prompt5,dlg_title5,num_lines5);
1458    %edit socmax
    socmax=str2double(answer5{1,1});
1460    set(handles.edit16,'String',answer5{1,1});
    %edit socmin
1462    socmin=str2double(answer5{2,1});
    set(handles.edit15,'String',answer5{2,1});
1464    %edit C0
    set(handles.edit11,'String',answer5{3,1});
1466
1468    ans5=answer5{3,1};
    conv5=str2double(ans5);
    C0=conv5;
1470    int=0;
    %checkbox limite SOC e V
1472    set(handles.checkbox1,'Value',0);
    set(handles.checkbox2,'Value',0);
1474    else
    GD=0;
1476    %checkbox BMS
    set(handles.checkbox3,'Value',0);
1478    prompt5 = {'Desidero interrompere simulazione se la tensione e/o SOC supera i
        limiti?','Capacità iniziale [Ah]'};
    dlg_title5 = 'Input Test5';
1480    num_lines5 = 1;
    answer5 = inputdlg(prompt5,dlg_title5,num_lines5);
1482    if strcmp(answer5{1,1},'si')
        int=1;
1484        %checkbox limite SOC e V
        set(handles.checkbox1,'Value',1);
1486        set(handles.checkbox2,'Value',1);
    else
1488        int=0;
        %checkbox limite SOC e V
1490        set(handles.checkbox1,'Value',0);
        set(handles.checkbox2,'Value',0);
1492    end
    %edit C0 e I
1494    set(handles.edit11,'String',answer5{2,1});
    set(handles.edit12,'String','Variabile');
1496    ans5=answer5{2,1};
    conv5=str2double(ans5);
1498    C0=conv5;
    socmax=1;
1500    socmin=0;
    %edit socmin e socmax
1502    set(handles.edit16,'String','...');
    set(handles.edit15,'String','...');
1504    end
    I=0;
1506    Cn=evalin('base','Cn');
    Vn=evalin('base','Vn');

```

```
1508     fs=11600/(Cn*Vn);
1509     T=50000;
1510     f=1;
1511     putvar(I,C0,int,fs,ciclo,T,f,GD,socmax,socmin);
1512     %LED stato in simulazione
1513     set(handles.text29,'Visible','off');
1514     set(handles.text45,'Visible','off');
1515     set(handles.text44,'Visible','on');
1516     set(handles.text46,'Visible','on');

1518     sim('modellobatteria',[0 T]);
1519     %LED stato pront
1520     set(handles.text44,'Visible','off');
1521     set(handles.text46,'Visible','off');
1522     set(handles.text29,'Visible','on');
1523     set(handles.text45,'Visible','on');
1524     %depressione testbutton
1525     set(handles.togglebutton15,'Value',0);
```

Test6

```
1528     case 'togglebutton16' % test time shift
1529         open_system('modellobatteria'); %apre il modello simulink
1530         ciclo=6;
1531         rich6={'Desidero implementare la logica del BMS?'};
1532         tit6='Richiesta BMS';
1533         lin6=1;
1534         rix6=inputdlg(rich6,tit6,lin6);

1535         if strcmp(rix6,'si')
1536             GD=1;
1537             %checkbox BMS
1538             set(handles.checkbox3,'Value',1);
1539             tipologia=evalin('base','tipologia');
1540             Cn=evalin('base','Cn');
1541             if tipologia==1
1542                 %visualizzo limiti carica scarica
1543                 set(handles.edit17,'String',num2str(3*Cn));
1544                 set(handles.edit18,'String',num2str(5*Cn));
1545                 set(handles.edit19,'String',num2str(10*Cn));
1546             end
1547             if tipologia==2
1548                 %visualizzo limiti carica scarica
1549                 set(handles.edit17,'String',num2str(4*Cn));
1550                 set(handles.edit18,'String',num2str(30*Cn));
1551                 set(handles.edit19,'String',num2str(52*Cn));
1552             end
1553             if tipologia==3
1554                 %visualizzo limiti carica scarica
1555                 set(handles.edit17,'String',num2str(0.5*Cn));
1556                 set(handles.edit18,'String',num2str(3*Cn));
1557                 set(handles.edit19,'String',num2str(5*Cn));
1558             end
1559             prompt6={'SOC massimo [pu]','SOC minimo [pu]','Capacità iniziale [Ah]'};
1560             dlg_title6='Valori limite SOC';
1561             num_lines6=1;
1562             answer6=inputdlg(prompt6,dlg_title6,num_lines6);
1563             %edit socmax
1564             socmax=str2double(answer6{1,1});
1565             set(handles.edit16,'String',answer6{1,1});
1566             %edit socmin
1567             socmin=str2double(answer6{2,1});
1568             set(handles.edit15,'String',answer6{2,1});
1569             %edit C0
1570             set(handles.edit11,'String',answer6{3,1});

1572             ans6=answer6{3,1};
1573             conv6=str2double(ans6);
1574             C0=conv6;
```

```

int=0;
1576 %checkbox limite SOC e V
set(handles.checkbox1,'Value',0);
1578 set(handles.checkbox2,'Value',0);
else
1580 GD=0;
%checkbox BMS
1582 set(handles.checkbox3,'Value',0);
prompt6 = {'Desidero interrompere simulazione se la tensione e/o SOC supera i
limiti?','Capacità iniziale [Ah]'};
1584 dlg_title6 = 'Input Test6';
num_lines6 = 1;
1586 answer6 = inputdlg(prompt6,dlg_title6,num_lines6);
if strcmp(answer6{1,1},'si')
1588 int=1;
%checkbox limite SOC e V
1590 set(handles.checkbox1,'Value',1);
set(handles.checkbox2,'Value',1);
1592 else
int=0;
1594 %checkbox limite SOC e V
set(handles.checkbox1,'Value',0);
1596 set(handles.checkbox2,'Value',0);
end
1598 %edit C0 e I
set(handles.edit11,'String',answer6{2,1});
1600 set(handles.edit12,'String','Variabile');
ans6=answer6{2,1};
1602 conv6=str2double(ans6);
C0=conv6;
1604 socmax=1;
socmin=0;
1606 %edit socmin e socmax vuote
set(handles.edit16,'String','....');
1608 set(handles.edit15,'String','....');
end
1610 I=0;
Cn=evalin('base','Cn');
1612 Vn=evalin('base','Vn');
fs=15000/(Cn*Vn);
1614 T=50000;
f=1;
1616 putvar(I,C0,int,fs,ciclo,T,f,GD,socmax,socmin);
%LED in simulazione
1618 set(handles.text29,'Visible','off');
set(handles.text45,'Visible','off');
1620 set(handles.text44,'Visible','on');
set(handles.text46,'Visible','on');
1622
sim('modellobatteria',[0 T]);
1624 %LED stato attesa
set(handles.text44,'Visible','off');
1626 set(handles.text46,'Visible','off');
set(handles.text29,'Visible','on');
1628 set(handles.text45,'Visible','on');
%depressione testbutton
1630 set(handles.togglebutton16,'Value',0);

```

Test7

```

1632 case 'togglebutton17' % test power balancing
open_system('modellobatteria'); %apre il modello simulink
1634 ciclo=7;
rich7={'Desidero implementare la logica del BMS?'};
1636 tit7='Richiesta BMS';
lin7=1;
1638 rix7=inputdlg(rich7,tit7,lin7);
1640 if strcmp(rix7,'si')

```

```
GD=1;
1642 %checkbox BMS
set(handles.checkbox3,'Value',1);
1644 tipologia=evalin('base','tipologia');
Cn=evalin('base','Cn');
1646 if tipologia==1
    %visualizzo limiti carica scarica
1648     set(handles.edit17,'String',num2str(3*Cn));
    set(handles.edit18,'String',num2str(5*Cn));
1650     set(handles.edit19,'String',num2str(10*Cn));
end
1652 if tipologia==2
    %visualizzo limiti carica scarica
1654     set(handles.edit17,'String',num2str(4*Cn));
    set(handles.edit18,'String',num2str(30*Cn));
1656     set(handles.edit19,'String',num2str(52*Cn));
end
1658 if tipologia==3
    %visualizzo limiti carica scarica
1660     set(handles.edit17,'String',num2str(0.5*Cn));
    set(handles.edit18,'String',num2str(3*Cn));
1662     set(handles.edit19,'String',num2str(5*Cn));
end
1664 prompt7={'SOC massimo [pu]', 'SOC minimo [pu]', 'Capacità iniziale [Ah]'};
dlg_title7='Input test7';
1666 num_lines7=1;
answer7=inputdlg(prompt7,dlg_title7,num_lines7);
1668 %valore socmax e visualizzazione
socmax=str2double(answer7{1,1});
1670 set(handles.edit16,'String',answer7{1,1});
%valore socmin e visualizzazione
1672 socmin=str2double(answer7{2,1});
set(handles.edit15,'String',answer7{2,1});
1674 %visualizzazione C0
set(handles.edit11,'String',answer7{3,1});
1676
ans7=answer7{3,1};
1678 conv7=str2double(ans7);
C0=conv7;
1680 int=0;
%checkbox relativi a limite SOC e V
1682 set(handles.checkbox1,'Value',0);
set(handles.checkbox2,'Value',0);
1684 else
GD=0;
1686 %checkbox BMS
set(handles.checkbox3,'Value',0);
1688 prompt7 = {'Desidero interrompere simulazione se la tensione e/o SOC supera i
    limiti?', 'Capacità iniziale [Ah]'};
dlg_title7 = 'Input Test7';
1690 num_lines7 = 1;
answer7 = inputdlg(prompt7,dlg_title7,num_lines7);
1692 if strcmp(answer7{1,1},'si')
    int=1;
1694 %checkbox relativi a limite SOC e V
    set(handles.checkbox1,'Value',1);
    set(handles.checkbox2,'Value',1);
1696 else
1698     int=0;
    %checkbox relativi a limite SOC e V
1700     set(handles.checkbox1,'Value',0);
    set(handles.checkbox2,'Value',0);
1702 end
%set C0 e I
1704 set(handles.edit11,'String',answer7{2,1});
set(handles.edit12,'String','Variabile');
1706 ans7=answer7{2,1};
conv7=str2double(ans7);
1708 C0=conv7;
socmax=1;
```

```

1710     socmin=0;
1711     %edit vuote per socmax e socmin
1712     set(handles.edit16,'String','...');
1713     set(handles.edit15,'String','...');
1714     end
1715     I=0;
1716     Cn=evalin('base','Cn');
1717     Vn=evalin('base','Vn');
1718     fs=15000/(Cn*Vn);
1719     T=50000;
1720     f=1;
1721     putvar(I,C0,int,fs,ciclo,T,f,GD,socmax,socmin);
1722     %LED stato simulazione
1723     set(handles.text29,'Visible','off');
1724     set(handles.text45,'Visible','off');
1725     set(handles.text44,'Visible','on');
1726     set(handles.text46,'Visible','on');

1727     sim('modellobatteria',[0 T]);
1728     %LED stato attesa
1729     set(handles.text44,'Visible','off');
1730     set(handles.text46,'Visible','off');
1731     set(handles.text29,'Visible','on');
1732     set(handles.text45,'Visible','on');
1733     %depressione testbutton
1734     set(handles.togglebutton17,'Value',0);

```

Oltre a determinare l'apertura del secondo modello Simulink implementato ("prova_inverter"), il codice relativo al test8 presenta una ulteriore sezione relativa al dimensionamento degli elementi circuitali relativi all'inverter e al calcolo dei parametri fondamentali per la logica di controllo PWM del dispositivo. Inoltre è presente una finestra di dialogo che permette di scegliere tra una simulazione di riduzione o di un innalzamento della tensione, sempre secondo normativa CEI.

Alla fine sono richiamati due file .m, "grafprovainv" e "salvataggio", le cui funzionalità verranno spiegate in coda all'analisi relativa al main script.

```

1738     case 'togglebutton23' % test LVRT/OVRT
1739         open_system('prova_inverter'); %apre il modello simulink
1740         ciclo=8;
1741         GD=1;
1742         %checkbox BMS
1743         set(handles.checkbox3,'Value',1);
1744         tipologia=evalin('base','tipologia');
1745         Cn=evalin('base','Cn');
1746         if tipologia==1
1747             %visualizzo limiti carica scarica
1748             set(handles.edit17,'String',num2str(3*Cn));
1749             set(handles.edit18,'String',num2str(5*Cn));
1750             set(handles.edit19,'String',num2str(10*Cn));
1751         end
1752         if tipologia==2
1753             %visualizzo limiti carica scarica
1754             set(handles.edit17,'String',num2str(4*Cn));
1755             set(handles.edit18,'String',num2str(30*Cn));
1756             set(handles.edit19,'String',num2str(52*Cn));
1757         end
1758         if tipologia==3
1759             %visualizzo limiti carica scarica
1760             set(handles.edit17,'String',num2str(0.5*Cn));
1761             set(handles.edit18,'String',num2str(3*Cn));
1762             set(handles.edit19,'String',num2str(5*Cn));
1763         end
1764         prompt1={'SOC massimo [pu]','SOC minimo [pu]','Capacità iniziale [Ah]'};
1765         dlg_title1='Valori limite SOC';
1766         num_lines1=1;
1767         answer1=inputdlg(prompt1,dlg_title1,num_lines1);
1768         %edit socmax
1769         socmax=str2double(answer1{1,1});

```

```
set(handles.edit16,'String',answer1{1,1});
1770 %edit socmin
socmin=str2double(answer1{2,1});
1772 set(handles.edit15,'String',answer1{2,1});
%edit C0 e I
1774 set(handles.edit11,'String',answer1{3,1});
In=evalin('base','In');
1776 I=In;
set(handles.edit12,'String',num2str(I));
1778 ans1=answer1{3,1};
conv1=str2double(ans1);
1780 C0=conv1(1,1);
int=0;
1782 %checkbox limite SOC e V
set(handles.checkbox1,'Value',0);
1784 set(handles.checkbox2,'Value',0);
%In=evalin('base','In');
1786 tipologia=evalin('base','tipologia');
f=1;
1788 % calcolo di f in base valore I e famiglia
if tipologia==1
1790     if I>In
1792         f=(In/I)*1;
1794     else
1796         f=(In/I)*2.5;
1798     end
1800     if I<In
1802         f=(In/I)*0.3;
1804     end
1806     if tipologia==3
1808         f=(In/I)*3;
1810     end
1812 T=0.5;
putvar(I,C0,int,T,f,ciclo,GD,socmax,socmin);
1814 %dati_inverter_prova
addpath regolatori
1816 Size      = 15;           % [kVA] Power-Size definition of Inverter model.
VacNOM     = 230;         % [Vac] Inverter nominal output voltage
1818 f0        = 50;          % [Hz] Freq. UPS [Hz]
L          = 0.02533/3;    % [Henry] Filter Inductor
1820 C        = (1e-4)*3;    % [Farad] Filter capacitor
VAD = 1.5;                % [Vdc] +/- Full scale voltage of a/d converter
1822 %feedbacks;            % feedbacks parameters calculation
s = tf('s');
1824 feedback_Iinv = (1.079e11)/(s^2 + 5.456e06*s + 4.456e12);
feedback_Vinv = (1.092e20*s^9 + 2.163e26*s^8 + 1.071e32*s^7 + 1.812e34*s^6 + 1
.313e36*s^5 ...
1826 + 5.294e37*s^4 + 1.287e39*s^3 + 1.897e40*s^2 + 1.576e41*s + 5.736e41)/...
(s^13 + 5.373e06*s^12 + 1.151e13*s^11 + 1.233e19*s^10 + 6.647e24*s^9 ...
1828 + 1.49e30*s^8 + 3.291e34*s^7 + 5.444e36*s^6 + 3.772e38*s^5 ...
+ 1.401e40*s^4 + 2.95e41*s^3 + 3.379e42*s^2 + 1.73e43*s+ 1.421e43);
Modulation = VacNOM * sqrt(2) * abs(evalfr(feedback_Vinv,i*2*pi*50)) / VAD;
% Peak of sinus voltage reference
1830 Modulation2 = sqrt(2) * abs(evalfr(feedback_Iinv,i*2*pi*50)) / VAD; % Peak
of sinus current reference
1832 FPWM      = 12500;       % freq.PWM in hertz.
TPWM       = 1/FPWM;      % PWM period
% regolatori nel DSP
1834 global PI_I PI_V
% %valori Kp Ki inseriti nel programma
Kp_i=3; Ki_i=0.1;
```

```

1836     Kp_v=1; Ki_v=0.15;
1837     PI_I = struct('kp',Kp_i,'ki',Ki_i,'min',-0.9,'max',0.9,'xint',0);
1838     PI_V = struct('kp',Kp_v,'ki',Ki_v,'min',-0.4,'max',0.4,'xint',0);
1839     putvar(VAD,f0,Size,FPWM,TPWM,Modulation2,feedback_Iinv);
1840     scelta=questdlg('Test desiderato','Scelta test','LVRT','OVRT','LVRT');
1841     switch scelta
1842     case 'LVRT'
1843         modulo=0.05;
1844         tidist=0.075;
1845         tfdist=0.275;
1846     case 'OVRT'
1847         modulo=1.25;
1848         tidist=0.075;
1849         tfdist=0.175;
1850     end
1851     putvar(modulo,tidist,tfdist);
1852     %LED stato in simulazione
1853     set(handles.text29,'Visible','off');
1854     set(handles.text45,'Visible','off');
1855     set(handles.text44,'Visible','on');
1856     set(handles.text46,'Visible','on');

1857     sim('prova_inverter',[0 T]);
1858     %LED stato pronto
1859     set(handles.text44,'Visible','off');
1860     set(handles.text46,'Visible','off');
1861     set(handles.text29,'Visible','on');
1862     set(handles.text45,'Visible','on');
1863     %depressione testbutton
1864     set(handles.togglebutton23,'Value',0);
1865     grafprovainv
1866 end
1867 % salva dati su file txt
1868 salvataggio
1869 %updates the handles structure
1870 guidata(hObject, handles);

```

Infine si riporta il codice relativo all'interruzione della simulazione ottenuta dalla selezione del pulsante associato. Anche in questo caso viene usata una logica di verifica del parametro "open", il quale identifica quale modello è in via di simulazione. Grazie a questa variabile è possibile quindi interrompere il modello corretto anche in caso siano entrambi aperti.

```

1938 % --- Executes on button press in pushbutton2.
1939 function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
1940 % hObject    handle to pushbutton2 (see GCBO)
1941 % eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
1942 % handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
1943 open=find_system('type','block_diagram','open','on')
1944 if length(open)==1
1945     set_param(open{1,1},'SimulationCommand','stop'); % stoppa simulazione
1946 end
1947 if length(open)==2
1948     run=get_param(open{1,1},'SimulationStatus');
1949     if strcmp(run,'running')
1950         set_param(open{1,1},'SimulationCommand','stop'); % stoppa simulazione
1951     else
1952         set_param(open{2,1},'SimulationCommand','stop'); % stoppa simulazione
1953     end
1954 end

```

.2 Script secondari

Il primo file di supporto utilizzato dal codice principale è denominato “salvataggio”. Svolge la funzione di produrre un file .txt alla fine di ogni test effettuato, contenente i valori assunti dai seguenti parametri:

- V : tensione della batteria simulata;
- I : corrente circolante;
- SOC_{rel} : valore del SOC relativo riferito alla carica estraibile a seguito di una scarica a corrente costante nominale;
- SOC_{ass} : valore del SOC assoluto, riferito quindi al massimo valore di carica estraibile;
- P_j : potenza interna dissipata;
- T : temperatura interna.

Questi parametri, caricati dai file .mat, vengono rielaborati ed inseriti nel file creato sotto forma di colonne parallele. Inoltre, il file prodotto verrà nominato secondo un ben preciso schema, costituito da “risultati” seguito dalla famiglia implementata e poi da “test” e il numero del ciclo simulato. Nel caso in cui sia implementato anche il BMS, la scritta verrà aggiunta al nome definito del file prodotto.

```
1  tipologia=evalin('base','tipologia');
   ciclo=evalin('base','ciclo');
3  GD=evalin('base','GD');
   load('tensionebat.mat');
5  % load('tensione1.mat');
   % load('tensione2.mat');
7  % load('tensione3.mat');
   % load('res1.mat');
9  % load('res2.mat');
   % load('res3.mat');
11 % load('cap2.mat');
   % load('cap3.mat');
13 load('temp.mat');
   load('potterm.mat');
15 load('corrente.mat');
   load('socrel');
17 load('socreal');
   % titolo colonne dati
19 header3 = 'V [V]';
   header4 = 'I [A]';
21 header5 = 'SOCrel [pu]';
   header6 = 'SOCass [pu]';
23 header7 = 'Pj [W]';
   header8 = 'T [°C]';
25 % creazione vettori
   Vcella=Vcella(2,:);
27 I=I(2,:);
   SOCEff=SOCEff(2,:);
29 SOCteo=SOCTeo(2,:);
   Pjoule=Pjoule(2,:);
31 Tstim=Tstim(2,:);

33 % check famiglia
   if tipologia==1
35     fam='NMC';
   end
37 if tipologia==2
     fam='LFP';
39 end
   if tipologia==3
41     fam='LiPo';
   end
43 % salvataggio file
   if GD==0
```

```

45 fid = fopen(['risultati',fam,'test',num2str(ciclo),'.txt'],'wt');
    fprintf(fid, [' ' header3 '\t\t' header4 '\t\t' header5 '\t' header6 '\t' header7 '\t
\t' header8 '\n']);
47 fprintf(fid, '%3.3f\t\t %3.3f\t\t %1.3f\t\t %1.3f\t\t %3.3f\t\t %3.3f\n', [Vcella; I;
    SOCeFF; SOCteo; Pjoule; Tstim]);
    fclose(fid);
49 else
    fid = fopen(['risultati',fam,'test',num2str(ciclo),'BMS','.txt'],'wt');
51 fprintf(fid, [' ' header3 '\t\t' header4 '\t\t' header5 '\t' header6 '\t' header7 '\t
\t' header8 '\n']);
    fprintf(fid, '%3.3f\t\t %3.3f\t\t %1.3f\t\t %1.3f\t\t %3.3f\t\t %3.3f\n', [Vcella; I;
    SOCeFF; SOCteo; Pjoule; Tstim]);
53 fclose(fid);
end

```

Il file “grafprovainv” è presente solo nel test8, in quanto quest’ultimo richiede una maggior quantità di dati da visualizzare al fine di poter comprendere al meglio il comportamento del sistema. Per questo motivo vengono rappresentate le ulteriori seguenti quattro grandezze (in due finestre distinte):

- *V*: tensione di rete;
- *I*: corrente circolante in rete;
- *S*: potenza apparente scambiata tra sistema e rete;
- *Fase*: fase relativa alla potenza apparente.

```

1 load('Vrete.mat');
  load('Irete.mat');
3 load('faseS');
  load('S');
5
6 figure(9)
7 subplot(2,1,1);
  plot(Vrete(1,:),Vrete(2,:)); %Vrete in f t
9 title('Tensione di rete');
  xlabel('tempo [sec]');
11 ylabel('V [V]');
  subplot(2,1,2);
13 plot(Irete(1,:),Irete(2,:)); %Irete in f t
  title('Corrente di rete');
15 xlabel('tempo [sec]');
  ylabel('I [A]');
17
18 figure(10)
19 subplot(2,1,1);
  plot(S(1,:),S(2,:)); %S in f t
21 title('Potenza scambiata');
  xlabel('tempo [sec]');
23 ylabel('S [VA]');
  subplot(2,1,2);
25 plot(faseS(1,:),faseS(2,:)); %fase in f t
  title('Fase potenza scambiata');
27 xlabel('tempo [sec]');
  ylabel('Fase [deg.]');

```

A differenza degli script precedenti, il file “datigenerali” svolge la funzione di caricare i dati relativi agli elementi circuitali presenti nel modello equivalente. Tale richiesta viene fatta all’apertura della finestra di interfaccia in modo da garantire una immediata operatività del sistema, tuttavia il caricamento di una grande quantità di dati distribuiti in più file determina un rallentamento nell’apertura iniziale della GUI.

```

%Script adibito all'inserimento dati relativi alla batteria da sottoporre a
2 %simulazione. Inoltre consente di scegliere la tipologia di batteria da
%simulare. Infine è possibile scegliere i cicli di simulazione che si
4 %vogliono fare

```

.2. SCRIPT SECONDARI

```
6 %Signorato Alekos, Università degli studi di Padova.
  %Tesi di laurea magistrale in ingegneria dell'energia elettrica, A.A.
8 %2015/2016
  %Versione 1
10 %%

12 % clear all
  % close all
14 % clc

16 %% inserimento dati

18 %inserisco dati nelle lookup table caso 1 NMC
  %par NMC 0°C
20   datiNMC0=xlsread('NMCdefault.xlsx',1);
   BR1_0=datiNMC0(:,1);

22   R1_1_0=datiNMC0(:,2)';
24   R2_1_0=datiNMC0(:,3)';
   R3_1_0=datiNMC0(:,4)';
26   C2_1_0=datiNMC0(:,5)';
   C3_1_0=datiNMC0(:,6)';
28 %   putvar(BR1_0,R1_1_0,R2_1_0,R3_1_0,C2_1_0,C3_1_0);

30 %par NMC 10°C
   datiNMC10=xlsread('NMCdefault.xlsx',2);
32   BR1_10=datiNMC10(:,1);
   R1_1_10=datiNMC10(:,2)';
34   R2_1_10=datiNMC10(:,3)';
   R3_1_10=datiNMC10(:,4)';
36   C2_1_10=datiNMC10(:,5)';
   C3_1_10=datiNMC10(:,6)';
38 %   putvar(BR1_10,R1_1_10,R2_1_10,R3_1_10,C2_1_10,C3_1_10);
  %par NMC 20°C
40   datiNMC20=xlsread('NMCdefault.xlsx',3);
   BR1_20=datiNMC20(:,1);
42   R1_1_20=datiNMC20(:,2)';
   R2_1_20=datiNMC20(:,3)';
44   R3_1_20=datiNMC20(:,4)';
   C2_1_20=datiNMC20(:,5)';
46   C3_1_20=datiNMC20(:,6)';
   %   putvar(BR1_20,R1_1_20,R2_1_20,R3_1_20,C2_1_20,C3_1_20);
48 %par NMC 30°C
   datiNMC30=xlsread('NMCdefault.xlsx',4);
50   BR1_30=datiNMC30(:,1);
   R1_1_30=datiNMC30(:,2)';
52   R2_1_30=datiNMC30(:,3)';
   R3_1_30=datiNMC30(:,4)';
54   C2_1_30=datiNMC30(:,5)';
   C3_1_30=datiNMC30(:,6)';
56 %   putvar(BR1_30,R1_1_30,R2_1_30,R3_1_30,C2_1_30,C3_1_30);
  %par NMC 40°C
58   datiNMC40=xlsread('NMCdefault.xlsx',5);
   BR1_40=datiNMC40(:,1);
60   R1_1_40=datiNMC40(:,2)';
   R2_1_40=datiNMC40(:,3)';
62   R3_1_40=datiNMC40(:,4)';
   C2_1_40=datiNMC40(:,5)';
64   C3_1_40=datiNMC40(:,6)';
   %   putvar(BR1_40,R1_1_40,R2_1_40,R3_1_40,C2_1_40,C3_1_40);
66 %OCV NMC con sola dipendenza dal SOC
   OCV1=xlsread('NMCdefault.xlsx',6);
68   OCV_1=OCV1(:,2)';
   BOCV_1=OCV1(:,1);
70   %breakpoint temperatura NMC
   T_1=[0 10 20 30 40];
72 %   putvar(OCV_1,BOCV_1,T_1);
  %inserisco dati nelle lookup table caso 2 LFP
74 %R1 LFP alle diverse temperature
```

```

    datiR1LFP5=xlsread('R1LFPult.xlsx',1);
76  BR1LFP_5=datiR1LFP5(:,1);
    R1_2_5=datiR1LFP5(:,2)';
78  datiR1LFP15=xlsread('R1LFPult.xlsx',2);
    BR1LFP_15=datiR1LFP15(:,1);
80  R1_2_15=datiR1LFP15(:,2)';
    datiR1LFP25=xlsread('R1LFPult.xlsx',3);
82  BR1LFP_25=datiR1LFP25(:,1);
    R1_2_25=datiR1LFP25(:,2)';
84  datiR1LFP35=xlsread('R1LFPult.xlsx',4);
    BR1LFP_35=datiR1LFP35(:,1);
86  R1_2_35=datiR1LFP35(:,2)';
    datiR1LFP45=xlsread('R1LFPult.xlsx',5);
88  BR1LFP_45=datiR1LFP45(:,1);
    R1_2_45=datiR1LFP45(:,2)';
90  %   putvar(BR1LFP_5,R1_2_5,BR1LFP_15,R1_2_15,BR1LFP_25,R1_2_25,BR1LFP_35,R1_2_35,
    BR1LFP_45,R1_2_45);
%R2 LFP alle diverse temperature
92  datiR2LFP5=xlsread('R2LFPult.xlsx',1);
    BR2LFP_5=datiR2LFP5(:,1);
94  R2_2_5=datiR2LFP5(:,2)';
    datiR2LFP15=xlsread('R2LFPult.xlsx',2);
96  BR2LFP_15=datiR2LFP15(:,1);
    R2_2_15=datiR2LFP15(:,2)';
98  datiR2LFP25=xlsread('R2LFPult.xlsx',3);
    BR2LFP_25=datiR2LFP25(:,1);
100 R2_2_25=datiR2LFP25(:,2)';
    datiR2LFP35=xlsread('R2LFPult.xlsx',4);
102 BR2LFP_35=datiR2LFP35(:,1);
    R2_2_35=datiR2LFP35(:,2)';
104 datiR2LFP45=xlsread('R2LFPult.xlsx',5);
    BR2LFP_45=datiR2LFP45(:,1);
106 R2_2_45=datiR2LFP45(:,2)';
    %   putvar(BR2LFP_5,R2_2_5,BR2LFP_15,R2_2_15,BR2LFP_25,R2_2_25,BR2LFP_35,R2_2_35,
    BR2LFP_45,R2_2_45);
108 %R3 LFP alle diverse temperature
    datiR3LFP5=xlsread('R3LFPult.xlsx',1);
110 BR3LFP_5=datiR3LFP5(:,1);
    R3_2_5=datiR3LFP5(:,2)';
112 datiR3LFP15=xlsread('R3LFPult.xlsx',2);
    BR3LFP_15=datiR3LFP15(:,1);
114 R3_2_15=datiR3LFP15(:,2)';
    datiR3LFP25=xlsread('R3LFPult.xlsx',3);
116 BR3LFP_25=datiR3LFP25(:,1);
    R3_2_25=datiR3LFP25(:,2)';
118 datiR3LFP35=xlsread('R3LFPult.xlsx',4);
    BR3LFP_35=datiR3LFP35(:,1);
120 R3_2_35=datiR3LFP35(:,2)';
    datiR3LFP45=xlsread('R3LFPult.xlsx',5);
122 BR3LFP_45=datiR3LFP45(:,1);
    R3_2_45=datiR3LFP45(:,2)';
124 %   putvar(BR3LFP_5,R3_2_5,BR3LFP_15,R3_2_15,BR3LFP_25,R3_2_25,BR3LFP_35,R3_2_35,
    BR3LFP_45,R3_2_45);
%C2 LFP alle diverse temperature
126 datiC2LFP5=xlsread('C2LFPult.xlsx',1);
    BC2LFP_5=datiC2LFP5(:,1);
128 C2_2_5=datiC2LFP5(:,2)';
    datiC2LFP15=xlsread('C2LFPult.xlsx',2);
130 BC2LFP_15=datiC2LFP15(:,1);
    C2_2_15=datiC2LFP15(:,2)';
132 datiC2LFP25=xlsread('C2LFPult.xlsx',3);
    BC2LFP_25=datiC2LFP25(:,1);
134 C2_2_25=datiC2LFP25(:,2)';
    datiC2LFP35=xlsread('C2LFPult.xlsx',4);
136 BC2LFP_35=datiC2LFP35(:,1);
    C2_2_35=datiC2LFP35(:,2)';
138 datiC2LFP45=xlsread('C2LFPult.xlsx',5);
    BC2LFP_45=datiC2LFP45(:,1);
140 C2_2_45=datiC2LFP45(:,2)';

```

2. SCRIPT SECONDARI

```
%      putvar(BC2LFP_5,C2_2_5,BC2LFP_15,C2_2_15,BC2LFP_25,C2_2_25,BC2LFP_35,C2_2_35,
BC2LFP_45,C2_2_45);
142 %C3 LFP alle diverse temperature
datiC3LFP5=xlsread('C3LFPult.xlsx',1);
144 BC3LFP_5=datiC3LFP5(:,1);
C3_2_5=datiC3LFP5(:,2)';
146 datiC3LFP15=xlsread('C3LFPult.xlsx',2);
BC3LFP_15=datiC3LFP15(:,1);
148 C3_2_15=datiC3LFP15(:,2)';
datiC3LFP25=xlsread('C3LFPult.xlsx',3);
150 BC3LFP_25=datiC3LFP25(:,1);
C3_2_25=datiC3LFP25(:,2)';
152 datiC3LFP35=xlsread('C3LFPult.xlsx',4);
BC3LFP_35=datiC3LFP35(:,1);
154 C3_2_35=datiC3LFP35(:,2)';
datiC3LFP45=xlsread('C3LFPult.xlsx',5);
156 BC3LFP_45=datiC3LFP45(:,1);
C3_2_45=datiC3LFP45(:,2)';
158 %      putvar(BC3LFP_5,C3_2_5,BC3LFP_15,C3_2_15,BC3LFP_25,C3_2_25,BC3LFP_35,C3_2_35,
BC3LFP_45,C3_2_45);
%OCV LFP con sola dipendenza dal SOC
160 OCV2=xlsread('OCVLFP.xlsx');
OCV_2=OCV2(:,2)';
162 BOCV_2=OCV2(:,1);

164 %breakpoint temperatura LFP
T_2=[5 15 25 35 45];
166 %      putvar(OCV_2,BOCV_2,T_2);
%inserisco dati nelle lookup table caso 3 LiP
168 %R1 LiP alle diverse temperature
datiR1LP5=xlsread('R1LPult.xlsx',1);
170 BR1LP_5=datiR1LP5(:,1);
R1_3_5=datiR1LP5(:,2)';
172 datiR1LP25=xlsread('R1LPult.xlsx',2);
BR1LP_25=datiR1LP25(:,1);
174 R1_3_25=datiR1LP25(:,2)';
datiR1LP40=xlsread('R1LPult.xlsx',3);
176 BR1LP_40=datiR1LP40(:,1);
R1_3_40=datiR1LP40(:,2)';
178 %      putvar(BR1LP_5,R1_3_5,BR1LP_25,R1_3_25,BR1LP_40,R1_3_40);
%R2 LiP alle diverse temperature
180 datiR2LP5=xlsread('R2LPult.xlsx',1);
BR2LP_5=datiR2LP5(:,1);
182 R2_3_5=datiR2LP5(:,2)';
datiR2LP25=xlsread('R2LPult.xlsx',2);
184 BR2LP_25=datiR2LP25(:,1);
R2_3_25=datiR2LP25(:,2)';
186 datiR2LP40=xlsread('R2LPult.xlsx',3);
BR2LP_40=datiR2LP40(:,1);
188 R2_3_40=datiR2LP40(:,2)';
%      putvar(BR2LP_5,R2_3_5,BR2LP_25,R2_3_25,BR2LP_40,R2_3_40);
190 %R3 LiP alle diverse temperature
datiR3LP5=xlsread('R3LPult.xlsx',1);
192 BR3LP_5=datiR3LP5(:,1);
R3_3_5=datiR3LP5(:,2)';
194 datiR3LP25=xlsread('R3LPult.xlsx',2);
BR3LP_25=datiR3LP25(:,1);
196 R3_3_25=datiR3LP25(:,2)';
datiR3LP40=xlsread('R3LPult.xlsx',3);
198 BR3LP_40=datiR3LP40(:,1);
R3_3_40=datiR3LP40(:,2)';
200 %      putvar(BR3LP_5,R3_3_5,BR3LP_25,R3_3_25,BR3LP_40,R3_3_40);
%C2 LiP alle diverse temperature
202 datiC2LP5=xlsread('C2LPult.xlsx',1);
BC2LP_5=datiC2LP5(:,3);
204 C2_3_5=datiC2LP5(:,5)';
datiC2LP25=xlsread('C2LPult.xlsx',2);
206 BC2LP_25=datiC2LP25(:,3);
C2_3_25=datiC2LP25(:,5)';
208 datiC2LP40=xlsread('C2LPult.xlsx',3);
```

```

BC2LP_40=datiC2LP40(:,3);
210 C2_3_40=datiC2LP40(:,5)';
% putvar(BC2LP_5,C2_3_5,BC2LP_25,C2_3_25,BC2LP_40,C2_3_40);
212 %C3 LiP alle diverse temperature
datiC3LP5=xlsread('C3LPult.xlsx',1);
214 BC3LP_5=datiC3LP5(:,3);
C3_3_5=datiC3LP5(:,5)';
216 datiC3LP25=xlsread('C3LPult.xlsx',2);
BC3LP_25=datiC3LP25(:,3);
218 C3_3_25=datiC3LP25(:,5)';
datiC3LP40=xlsread('C3LPult.xlsx',3);
220 BC3LP_40=datiC3LP40(:,3);
C3_3_40=datiC3LP40(:,5)';
222 % putvar(BC3LP_5,C3_3_5,BC3LP_25,C3_3_25,BC3LP_40,C3_3_40);
%OCV LiP con sola dipendenza dal SOC
224 OCV3=xlsread('OCV_25_40LP.xlsx');
OCV_3=OCV3(:,2)';
226 BOCV_3=OCV3(:,1);

228 %breakpoint temperatura LiP
T_3=[5 25 40];
230 % putvar(T_3,BOCV_3,OCV_3);

232 Tamb=20; %input('Temperatura ambiente [°C] ');

234 Cth=1700; %massacar*cs; J/kg capacità termica del modello termico
Rth=0.37; % K/W resistenza termica del modello termico
236 fs=1; %valore di inizializzazione per scalare i valori di potenza dei cicli 7,8,9
f=1; %valore di inizializzazione per il taraggio carica
238 p=0.1; %fattore di perdita pari al 10%
stop=0;
240 % putvar(Cth,Rth,fs,f,p,Tamb);
%carico dati test 7
242 dati7=xlsread('datitest7_8_9.xlsx',1);
time7=(dati7(:,1))';
244 value7=((dati7(:,2)).*1000)';

246 %carico dati test 8
dati8=xlsread('datitest7_8_9.xlsx',2);
248 time8=(dati8(:,1))';
value8=((dati8(:,2)).*1000)';

250 %carico dati test 9
252 dati9=xlsread('datitest7_8_9.xlsx',3);
time9=(dati9(:,1))';
254 value9=((dati9(:,2)).*1000)';

```

Come si può vedere i dati, suddivisi in base a *SOC* e temperatura, vengono letti da specifici file Excel per tutte e tre le famiglie. Il fatto che nel caso *NMC* il tutto si riconduca ad un unico file di riferimento mentre nei casi rimanenti ogni parametro presenti un file specifico per ogni elemento è solamente causa di una diversa origine dei dati, già ben strutturata nel primo caso ed invece ottenuta mediante una serie di elaborazioni successive per il secondo e terzo caso.

Infine, a partire dalla riga 228, sono presenti i dati relativi ad alcuni parametri fissi come i set di potenza previsti per i test 5,6 e 7 (file Excel associato “datitest7_8_9”), con relativi intervalli temporali di applicazione.

In precedenza, nella parte relativa alla descrizione del codice riferito alla tipologia chimica desiderata, è stato introdotto il concetto di ricaricamento dei dati presenti nelle look-up table ai fini di garantire il corretto funzionamento del sistema. Questo è ottenuto, in questo caso, mediante i file “ric1”, “ric2” e “ric3”, i quali non sono altro che la corrispettiva parte presente nel file precedente (come si può vedere nel codice seguente riferito alla famiglia *NMC*). Anche in questo caso il caricamento dati comporta un lieve rallentamento del processo.

```

1 %inserisco dati nelle lookup table caso 1 NMC
%par NMC 0°C
3 datiNMC0=xlsread('NMCdefault.xlsx',1);
BR1_0=datiNMC0(:,1);

```

2. SCRIPT SECONDARI

```
5     R1_1_0=datiNMC0(:,2)';
6     R2_1_0=datiNMC0(:,3)';
7     R3_1_0=datiNMC0(:,4)';
8     C2_1_0=datiNMC0(:,5)';
9     C3_1_0=datiNMC0(:,6)';

11  %par NMC 10°C
12     datiNMC10=xlsread('NMCdefault.xlsx',2);
13     BR1_10=datiNMC10(:,1);
14     R1_1_10=datiNMC10(:,2)';
15     R2_1_10=datiNMC10(:,3)';
16     R3_1_10=datiNMC10(:,4)';
17     C2_1_10=datiNMC10(:,5)';
18     C3_1_10=datiNMC10(:,6)';

19  %par NMC 20°C
20     datiNMC20=xlsread('NMCdefault.xlsx',3);
21     BR1_20=datiNMC20(:,1);
22     R1_1_20=datiNMC20(:,2)';
23     R2_1_20=datiNMC20(:,3)';
24     R3_1_20=datiNMC20(:,4)';
25     C2_1_20=datiNMC20(:,5)';
26     C3_1_20=datiNMC20(:,6)';

29  %par NMC 30°C
30     datiNMC30=xlsread('NMCdefault.xlsx',4);
31     BR1_30=datiNMC30(:,1);
32     R1_1_30=datiNMC30(:,2)';
33     R2_1_30=datiNMC30(:,3)';
34     R3_1_30=datiNMC30(:,4)';
35     C2_1_30=datiNMC30(:,5)';
36     C3_1_30=datiNMC30(:,6)';

37  %par NMC 40°C
38     datiNMC40=xlsread('NMCdefault.xlsx',5);
39     BR1_40=datiNMC40(:,1);
40     R1_1_40=datiNMC40(:,2)';
41     R2_1_40=datiNMC40(:,3)';
42     R3_1_40=datiNMC40(:,4)';
43     C2_1_40=datiNMC40(:,5)';
44     C3_1_40=datiNMC40(:,6)';

47  %OCV NMC con sola dipendenza dal SOC
48     OCV1=xlsread('NMCdefault.xlsx',6);
49     OCV_1=OCV1(:,2)';
50     BOCV_1=OCV1(:,1);

51     Tamb=20; %input('Temperatura ambiente [°C] ');

53     Cth=1700; %massacar*cs; J/kg capacità termica del modello termico
54     Rth=0.37; % K/W resistenza termica del modello termico
55     fs=1; %valore di inizializzazione per scalare i valori di potenza dei cicli 7,8,9
56     f=1; %valore di inizializzazione per il taraggio carica
57     p=0.1; %fattore di perdita pari al 10%

59  %carico dati test 7
60     dati7=xlsread('datitest7_8_9.xlsx',1);
61     time7=(dati7(:,1))';
62     value7=((dati7(:,2)).*1000)';

65  %carico dati test 8
66     dati8=xlsread('datitest7_8_9.xlsx',2);
67     time8=(dati8(:,1))';
68     value8=((dati8(:,2)).*1000)';

69  %carico dati test 9
70     dati9=xlsread('datitest7_8_9.xlsx',3);
71     time9=(dati9(:,1))';
72     value9=((dati9(:,2)).*1000)';
```

Durante la scrittura del codice sono state utilizzate delle funzioni di “alleggerimento” dello script complessivo. Tali codici sono disponibili gratuitamente in rete e sono contenuti nei seguenti file .m:

- “putvar”: consente di specificare un breve set di variabili da trasferire dallo spazio di memoria usato dalla GUI al Workspace base di Matlab;
- “assign2workspace”: consente di trasferire tutti i parametri presenti in un file .m nel Workspace di Matlab.

.3 Modellobatteria

In questa appendice verrà raffigurato il primo dei due modelli Simulink implementati. Ovviamente non sarà possibile fornire una descrizione dettagliata, per questo motivo verranno fornite delle indicazioni generali in modo da fornire un quadro completo del lavoro svolto.

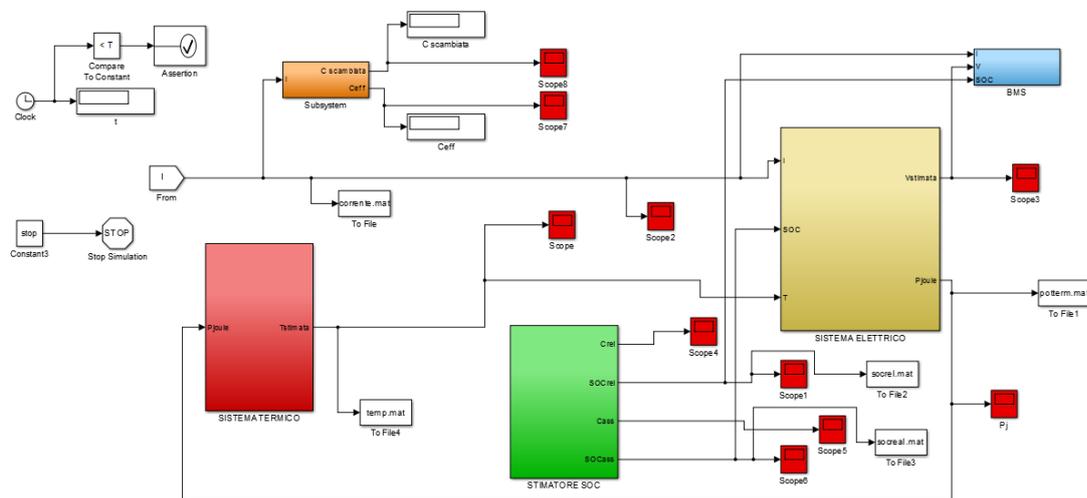


Figura 5: Schermata principale modello

La figura 5 mostra la schermata generale del modello principale, denominato appunto “modellobatteria”, il quale consente di effettuare i primi sette test presenti nell’interfaccia GUI. Sin da subito è possibile identificare i principali subsystem di cui il modello è costituito:

- in rosso lo *stimatore termico*;
- in verde lo *stimatore di carica*;
- in giallo il *circuito elettrico equivalente*;
- in azzurro il *BMS*.

Tali sottosistemi, interagendo tra loro, consentono di effettuare una simulazione completa del comportamento di un sistema di accumulo energetico elettrochimico.

Sono presenti, tuttavia, ulteriori funzionalità secondarie come la logica di interruzione nel caso di superamento del tempo limite di simulazione o su richiesta dell’utente (parte di sinistra), il calcolo della capacità interna e scambiata (blocco arancione) e i diversi blocchi adibiti al salvataggio dei parametri nei relativi file .mat.

Un blocco fondamentale per la simulazione è costituito dalla logica circuitale elettrica equivalente. Non essendo implementata mediante oggetti che direttamente rappresentano tali elementi (soluzione limitante), è necessaria una struttura più complessa come quella di figura 6, nella quale vengono implementate le equazioni caratteristiche del circuito equivalente (i due riquadri verdi).

Il blocco blu di destra contiene invece le equazioni caratteristiche relative al calcolo della potenza interna dissipata.

Le equazioni caratteristiche del circuito necessitano la conoscenza dei parametri costituenti istante per istante. Questo processo viene eseguito in due modalità leggermente diverse tra loro:

- mediante il circuito di figura 7 per la rappresentazione del generatore di tensione (rappresentante la tensione a vuoto). In base al valore del SOC vengono determinati i valori della tensione mediante look-up table 1D di tutte e tre le famiglie implementate, tuttavia mediante il selettore vengono inviati al circuito solo i dati relativi alla famiglia scelta per la simulazione;

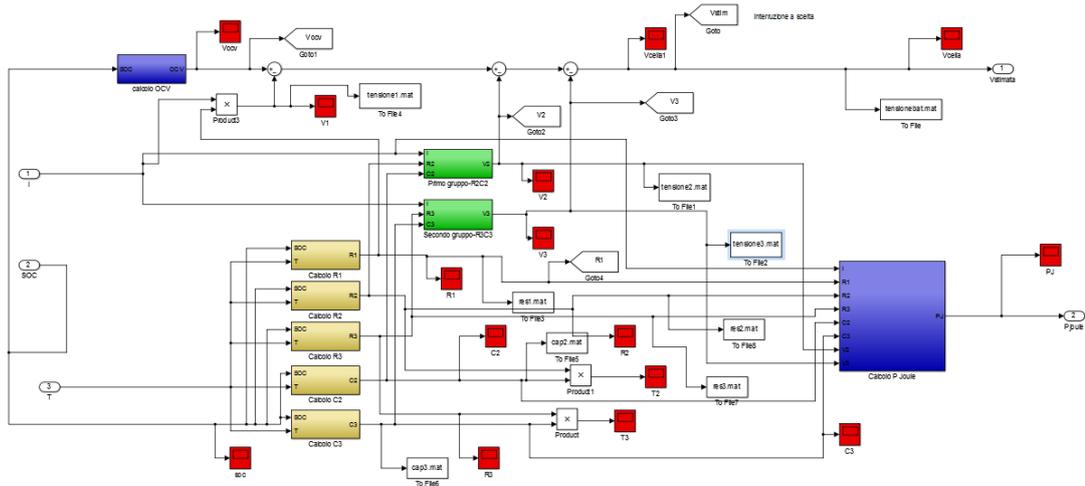


Figura 6: Schermata principale modello elettrico

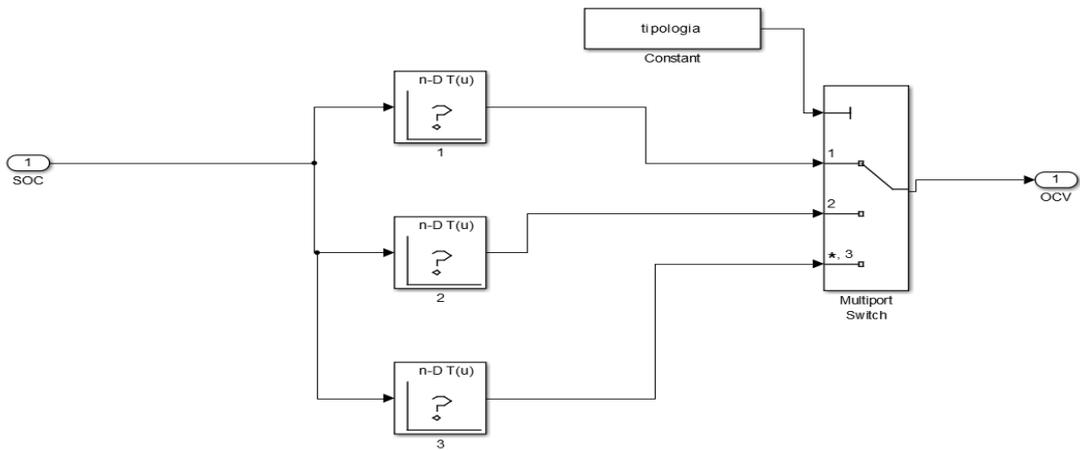


Figura 7: Sistema di determinazione OCV

- la soluzione di figura 8 si rifà alla struttura descritta nel punto precedente, riferendosi tuttavia al parametro $R1$. In realtà, ogni blocco è a sua volta costituito dalla logica raffigurata in 9, nel quale si vede come venga calcolato il valore del parametro alle diverse temperature a disposizione (dipende dai dati che si hanno) in base al SOC . Successivamente, mediante una look-up table dinamica, viene calcolato, in base al valore della temperatura interna, il valore reale del parametro attraverso una approssimazione lineare (entro la temperatura massima e minima a disposizione nei dati).

Questa soluzione consente di ottimizzare l'approssimazione del valore del parametro a seconda dei dati di partenza utilizzati. Non è stato fatto nel caso della tensione a vuoto in quanto è stato dimostrato che tale variabile presenta una scarsa dipendenza dalla temperatura.

La seconda modalità di approssimazione è utilizzata per tutti i parametri elettrici rimanenti nel circuito. Un subsystem altrettanto importante del precedente è lo stimatore di carica rappresentato in figura 10. Come la teoria insegna, il principio adottato si basa sullo spostamento di cariche tra i due serbatoi (rappresentati in giallo) e tra $y1$ ed il circuito equivalente. Ogni serbatoio è costituito dalle equazioni fondamentali che regolano lo scambio delle cariche come evidenziato dalla figura 11. In particolare si ricorda la dipendenza della quantità di carica scambiabile dal prodotto kf (valvola tra i serbatoi) e la differenza di altezza tra i serbatoi (la quale dipende anche dal modulo della corrente circolante).

Sempre in figura 11 sono visibili due ulteriori blocchi verdi, uno contenente la logica per il calcolo dell'energia scambiata e del rendimento e l'altro relativo all'implementazione dei cicli di test.

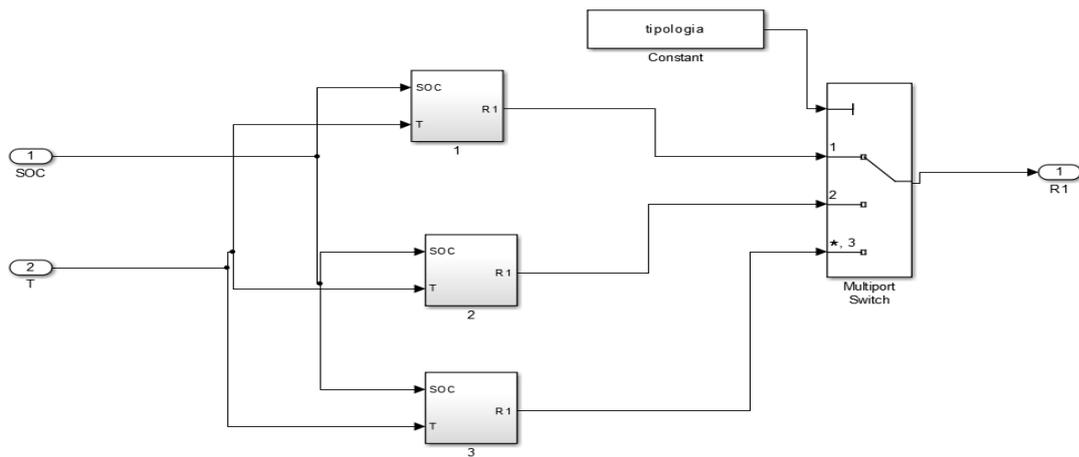


Figura 8: Sistema di determinazione R1

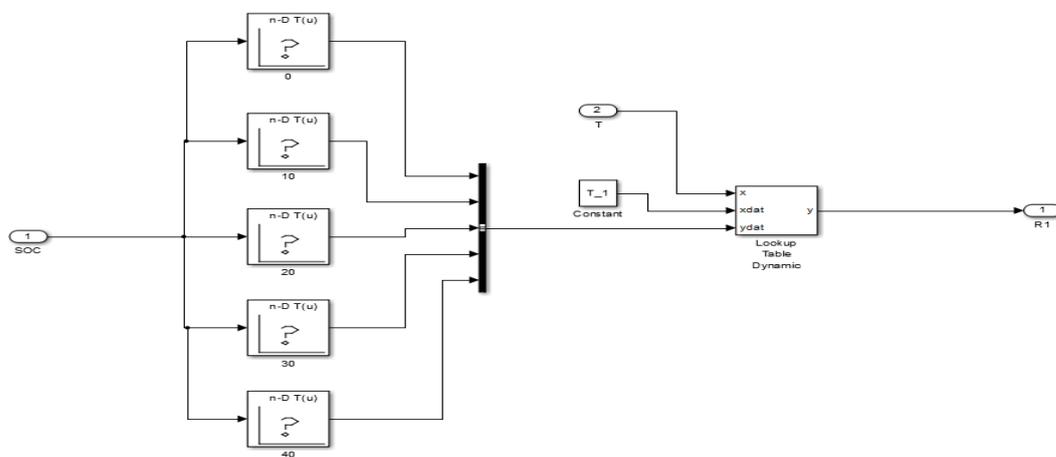


Figura 9: Focus modalità approssimazione di R1

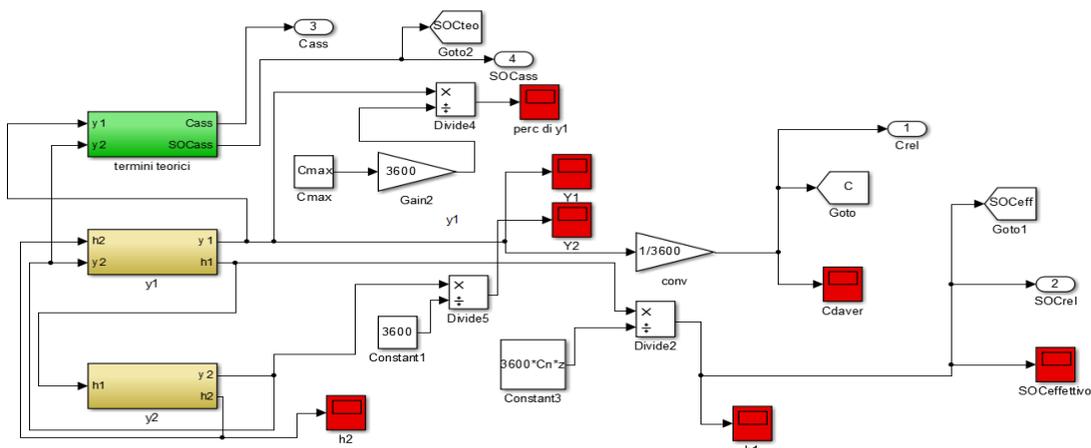


Figura 10: Schermata principali stimatore di carica

La figura 12 evidenzia la suddivisione della logica in base alla circolazione di corrente positiva o negativa, in base alla quale il dispositivo si comporta da generatore o da carico, richiedendo quindi un adeguamento del calcolo sia dell'energia sia del rendimento. La presenza dello switch per il passaggio da generatore a carico e viceversa, determina la non immediata risposta della logica comportando quin-

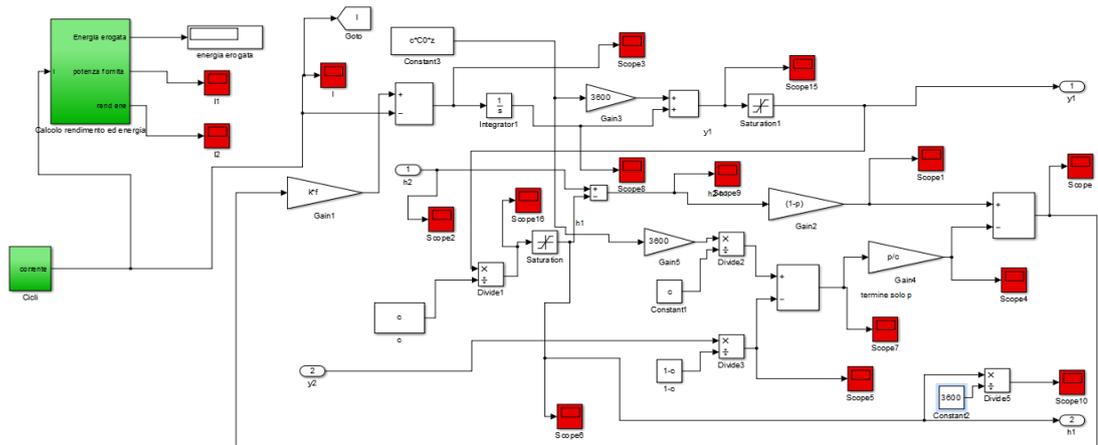


Figura 11: Schermata relativa a y1

di, nei primi istanti successivi alla variazione, un valore del rendimento calcolato non aderente al valore reale (riferimento al rendimento maggiore dell'unità). La figura 13 evidenzia la semplice logica responsabile del calcolo dell'energia, con la particolarità di utilizzare un reset dell'integratore quando la corrente cambia di segno.

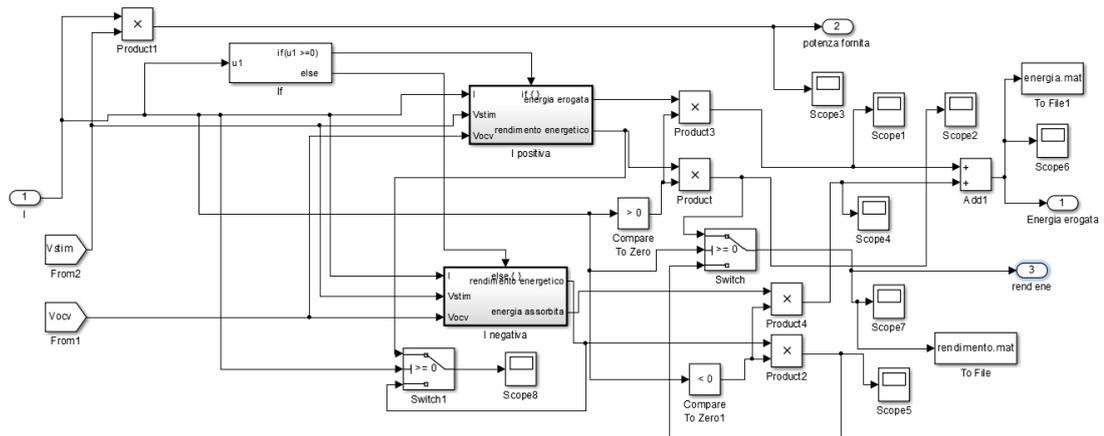


Figura 12: Schermata generale calcolo energia e rendimento

Il blocco comprendente i cicli implementabili è visualizzato in figura 14, nel quale si possono notare i sette blocchi, corrispondenti ai cicli, posti in diagonale, i quali vengono attivati dallo switch situato in alto (di colore verde), determinando quindi la circolazione della corrente richiesta dal ciclo desiderato. Il blocco di sinistra semplicemente contiene dei parametri che, per limiti di computazione del "Switch Case Action Subsystem", devono essere implementati esternamente. La scelta di comprendere la logica BMS durante la simulazione è garantita dallo schema contenuto nel subsystem di riferimento (figura 15), il quale consente l'attivazione dell' "If Action Subsystem". Ogni famiglia è caratterizzata da ben definiti e specifici limiti di funzionamento, i quali vengono attivati mediante lo "Switch Case" raffigurato in 16. All'interno di ogni blocco è presente una struttura comune in grado di rilevare l'andamento delle principali grandezze e di confrontarle con i valori limite prestabiliti, interrompendo la simulazione in caso di superamento degli stessi. Infine, la figura 17 rappresenta l'equazione che determina il calcolo della potenza dissipata interna. Come si può vedere è costituita dalla somma dei seguenti tre componenti:

- pura potenza dispersa per effetto Joule dovuta ad R1;
- potenza dissipata dal parallelo R2 – C2;

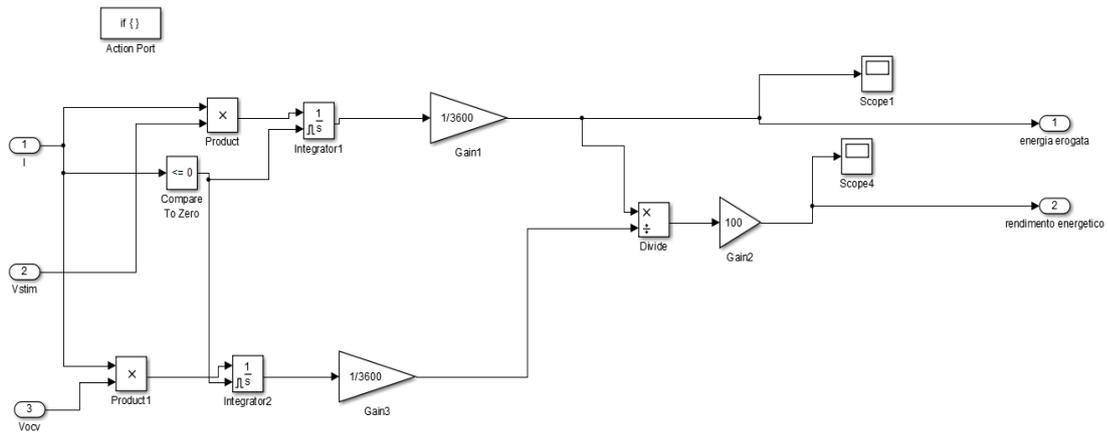


Figura 13: Focus calcolo energia e rendimento

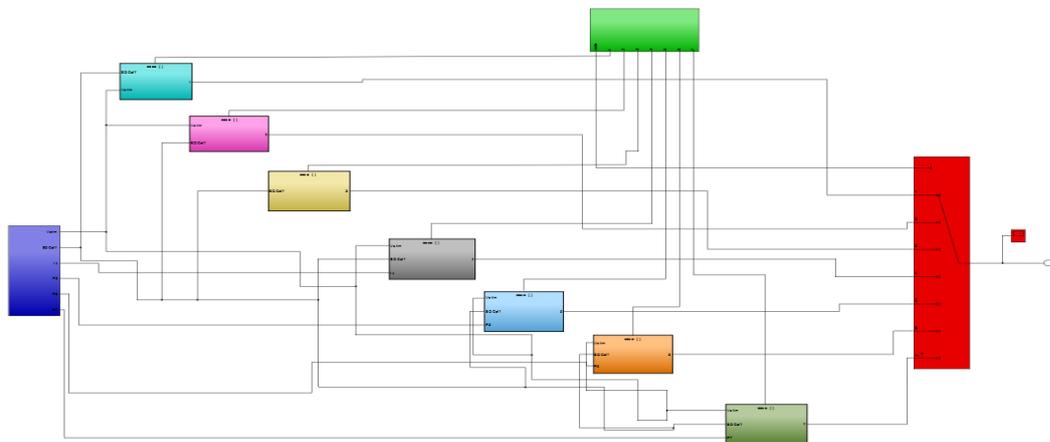


Figura 14: Schermata dei cicli implementati

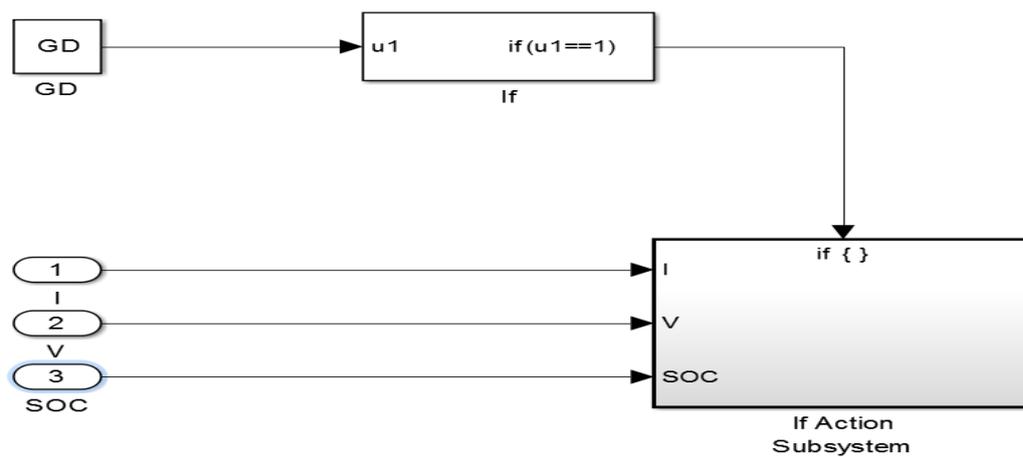


Figura 15: Attivazione BMS

- potenza dissipata dal parallelo R3 – C3.

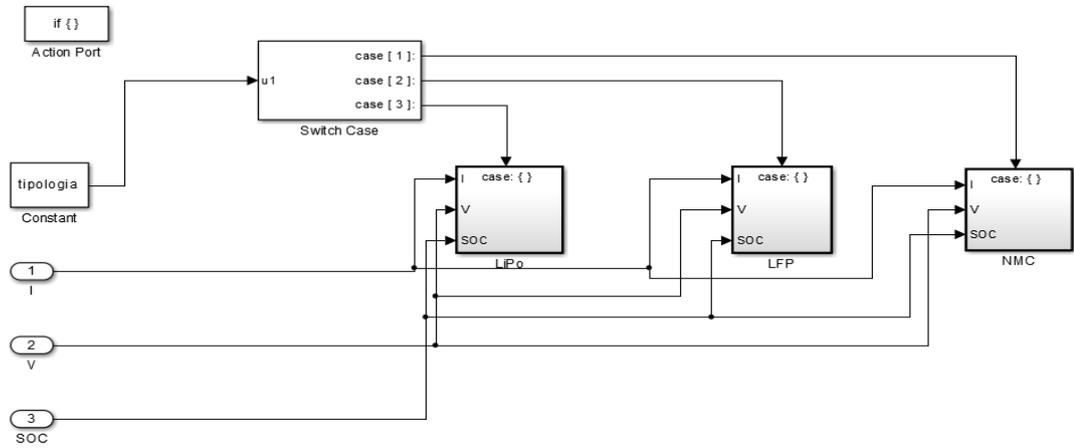


Figura 16: Selezione della famiglia desiderata

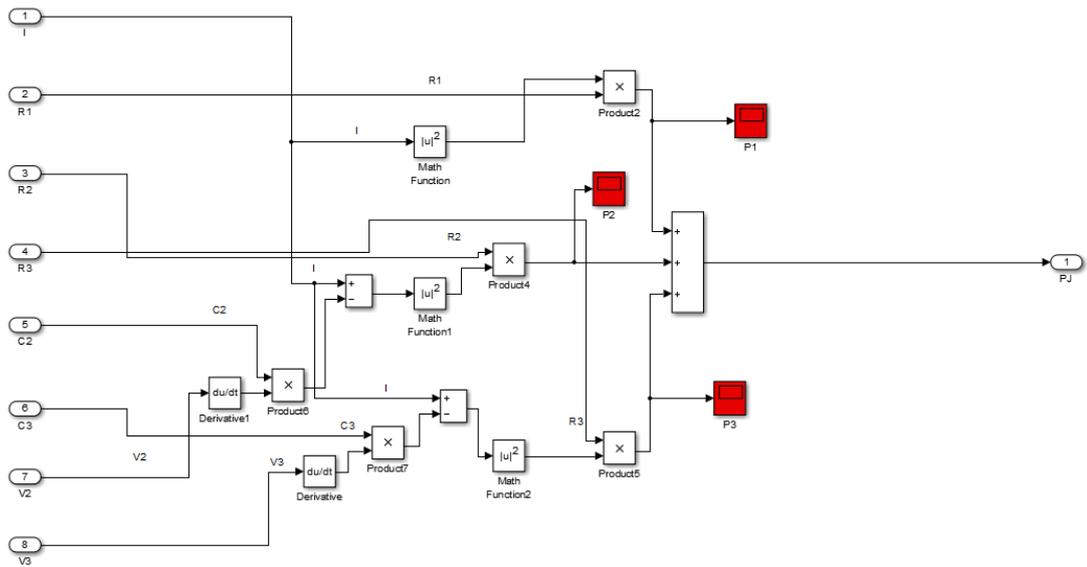


Figura 17: Logica responsabile del calcolo della potenza dissipata

4 prova_inverter

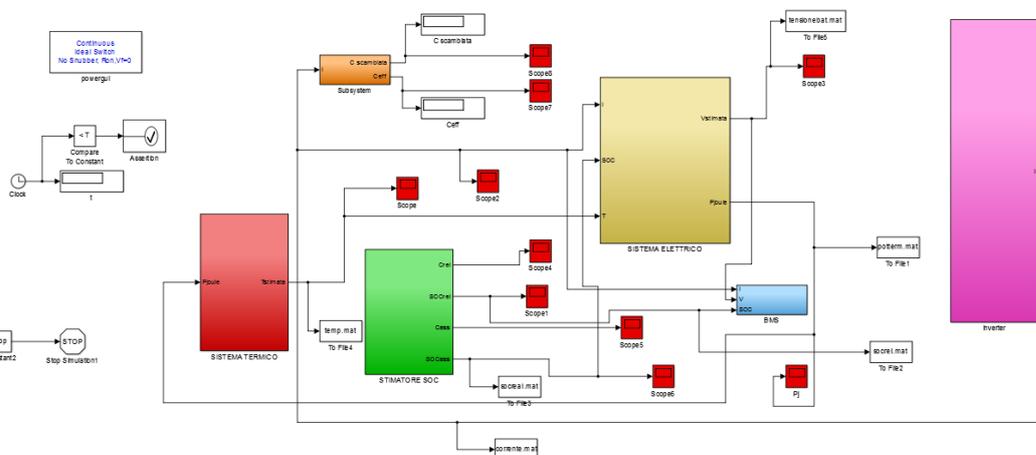


Figura 18: Schermata principale

Il secondo modello, implementato ed utilizzato per la verifica del comportamento di un tradizionale sistema di generazione in continua a fronte di improvvise variazioni della tensione di rete, è stato denominato “prova_inverter” e presenta una struttura ed una logica uguale al modello precedente.

Tuttavia, essendo la modalità di utilizzo e verifica diversa, si sono effettuate delle modifiche come l’introduzione di nuovi elementi e la cancellazione di alcune parti superflue.

La figura 18 evidenzia quanto appena detto, infatti si può notare il blocco viola posto sulla destra, il quale contiene tutta la componentistica relativa ai dispositivi a valle della batteria.

Inoltre è possibile notare il blocco “powergui”, il quale si è reso necessario vista la natura puramente elettrica ed elettronica degli elementi costituenti l’inverter. Infatti questa modalità di implementazione contiene le equazioni caratteristiche all’interno degli elementi impiegati, consentendo una semplificazione visiva e di implementazione a scapito di una minore “libertà” di azione e controllo del sistema.

Viste la natura abbastanza semplificata di questa parte del modello è stato possibile utilizzare questa modalità di implementazione, cosa che non è stata fatta per la parte inerente alla batteria in quanto troppo limitante vista la complessità implementativa.

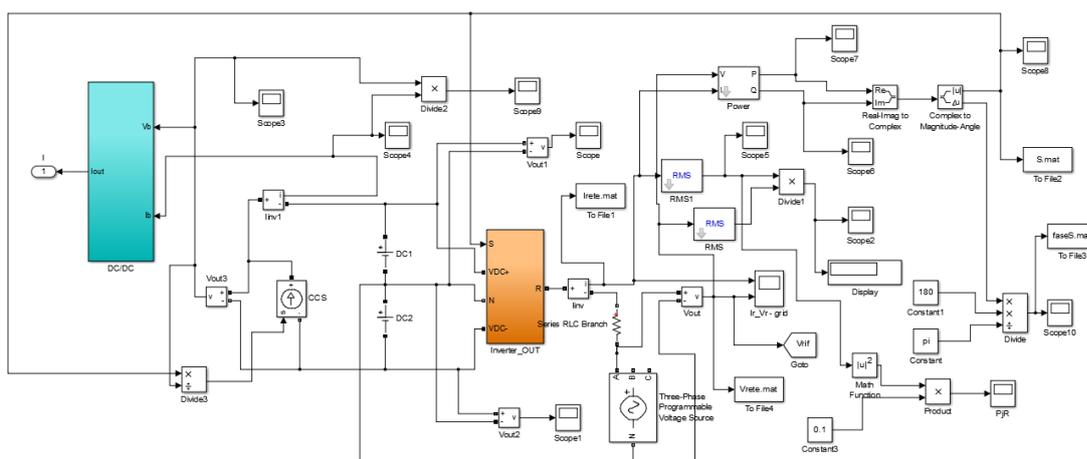


Figura 19: Schermata generale del sistema

La figura 19 mostra il contenuto del blocco evidenziato in precedenza. In particolare si può notare il blocco azzurro che svolge la funzione di un convertitore DC/DC ideale, in quanto converte il valore della corrente circolante nel DC bus al valore di riferimento per la batteria. Per fare questo è necessario definire un parametro che svolge la funzione di “rapporto di trasformazione” tra la tensione fissa del bus

