



**Politecnico
di Torino**

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica (LM-28)

Tesi di laurea di II livello

STUDIO DI UN SISTEMA DI ACCUMULO IBRIDO CON BATTERIE E SUPERCONDENSATORI DA SORGENTE FOTOVOLTAICA

Relatore:

Prof. Salvatore Musumeci

Correlatore:

Prof. Luigi Solimene

Candidato:

Luca Di Raimondo

A.A. 2024-2025

Abstract

Negli ultimi anni, la crescente diffusione delle fonti rinnovabili e la necessità di gestire in modo efficiente l'energia prodotta, hanno reso indispensabile lo sviluppo di sistemi di accumulo ibridi in grado di garantire al tempo stesso alta densità di energia e alta densità di potenza. La presente tesi si propone di progettare, modellare e analizzare un sistema di accumulo ibrido costituito da una batteria e un banco di supercondensatori, connessi a un bus DC alimentato da un generatore fotovoltaico. Gli obiettivi principali del lavoro riguardano: la progettazione di una topologia di sistema in grado di gestire in modo efficiente il flusso di energia tra la sorgente PV, l'accumulo ibrido e il carico; la realizzazione di un modello simulativo completo in ambiente PLECS e l'analisi del comportamento dinamico del sistema sotto differenti condizioni di carico e di irraggiamento solare. Attraverso una serie di simulazioni, è stato valutato l'impatto dell'integrazione dei supercondensatori in termini di riduzione dello stress sulle batterie, miglioramento della risposta transitoria e incremento della durata complessiva del sistema. I risultati ottenuti hanno evidenziato un'ottima gestione dell'energia grazie alla cooperazione tra i due dispositivi di accumulo: la batteria fornisce la componente a bassa frequenza della potenza, mentre il supercondensatore compensa i transitori di corrente e tensione. Inoltre, il funzionamento in configurazione interleaved ha permesso di ottenere una riduzione significativa del ripple di corrente e un miglior bilanciamento del carico tra i rami del convertitore.

Indice

1. INTRODUZIONE	1
1.1. Contesto e motivazioni	1
1.2. Obiettivi	1
1.3. Metodologia	2
1.4. Topologia del sistema	2
2. ENERGIA FOTOVOLTAICA E SISTEMI DI ACCUMULO	3
2.1. Il contesto della generazione distribuita	3
2.2. Curve I-V e P-V per diversi tipi di carico	4
2.3. Analisi della produzione fotovoltaica e del carico energetico	6
2.4. Tecnologie di accumulo dell'energia	8
3. BATTERIE	10
3.1. Aspetti generali	10
3.2. Parametri delle batterie	11
3.3. Tipologie di batterie	15
4. BATTERIE AL LITIO	16
4.1. Accumulatori al litio	16
4.2. Principio di funzionamento di una batteria al litio	17
4.2.1. La corrente di batteria e il tasso di carica/scarica	18
4.2.2. L'impedenza interna della batteria	19
4.2.3. La capacità della batteria	20
4.2.4. SoC e SoH	20
4.2.5. Modello elettrico	21
4.2.6. Modello termico	22
4.3. Batteria Litio-Ione	23
4.4. Batteria Litio Metallico	24
5. SUPERCONDENSATORI	25
5.1. Aspetti generali	25
5.2. Cenni storici	25
5.3. Classificazione dei supercondensatori	27
5.4. Caratteristiche costruttive	32
5.5. Parametri dei supercondensatori	34
5.6. Applicazioni di moduli di supercondensatori	36
6. MODELLI DEI SUPERCONDENSATORI	40

6.1. Modelli a circuito equivalente	40
6.1.1. Modello della serie RC	41
6.1.2. Modello a due rami.....	42
6.1.3. Modello Zubieta	43
6.1.4. Modello di rete delle linee di trasmissione	44
6.1.5. Modello a scala multistadio	44
7. SUPERCONDENSATORI E BATTERIE A CONFRONTO	46
7.1. I supercondensatori possono sostituire le batterie?	49
7.2. Sistemi ibridi batteria - supercondensatori	50
7.3. Architettura ibrida.....	52
8. APPLICAZIONI DEI SISTEMI DI ACCUMULO IBRIDI	56
9. METODOLOGIE DI CONTROLLO	58
9.1. Topologia del convertitore per l'interfacciamento	59
9.2. I convertitori DC/DC	59
9.3. Topologia Half-Bridge Interleaved	62
9.4. Strategia di controllo del convertitore.....	64
10. METODOLOGIE DI GESTIONE DELL'ENERGIA	65
10.1. PMS per carico generico alimentato da fotovoltaico	65
10.2. Caratterizzazione delle strategie di controllo	70
11. TOPOLOGIA DEL SISTEMA	72
12. MODELLAZIONE E SIMULAZIONE DEL SISTEMA.....	77
12.1. Modellazione del sistema a singolo ramo	78
12.2. Analisi dei risultati di simulazione	80
12.3. Modello Interleaved a doppio ramo	88
13. VERIFICA DELLA STRATEGIA DI CONTROLLO IN UN SISTEMA REALE	98
13.1. Descrizione dell'applicazione reale.....	98
13.2. Simulazione dell'applicazione reale.....	103
14. CONCLUSIONI	109
BIBLIOGRAFIA.....	110

Indice delle figure

Figura 1.1: Schema generale del sistema [10].....	2
Figura 2.1: Curve I-V e P-V di un pannello fotovoltaico per diversi carichi resistivi	5
Figura 2.2: Curve I-V e P-V di un pannello fotovoltaico per diversi tipi di carico	5
Figura 2.3: Produzione fotovoltaica vs Carico energetico	7
Figura 2.4: Classificazione dei sistemi di accumulo [7]	8
Figura 3.1: Scarica e carica di una cella elettrochimica [5].....	11
Figura 3.2: Effetto della temperatura sulle prestazioni di una batteria [5]	13
Figura 4.1: Schema di funzionamento di una batteria al litio [24]	17
Figura 4.2: Rappresentazione circuitale della batteria collegata ad un generico carico [24]	18
Figura 4.3: Rappresentazione circuitale della batteria e della sua resistenza [24]	19
Figura 4.4: Modello Elettrico di una batteria al litio [24]	21
Figura 5.1: Condensatori elettrostatici a doppio strato [7]	25
Figura 5.2: Condensatore brevettato dalla General Electric [7]	26
Figura 5.3: Classificazione gerarchica dei supercondensatori [17]	27
Figura 5.4: Modello di Helmholtz (a) e di Gouy-Chapman (b) del doppio strato elettrico [5]	27
Figura 5.5: Rappresentazione del doppio strato elettrico [17]	28
Figura 5.6: Rappresentazione schematica degli pseudo-condensatori	29
Figura 5.7: Rappresentazione schematica dei supercondensatori ibridi [17].....	31
Figura 5.8: Struttura interna di un condensatore elettrostatico [7]	32
Figura 5.9: Rappresentazione schematica di un EDLC [5]	32
Figura 5.10: Applicazione di supercondensatori in sistemi di generazione distribuita [7]	36
Figura 5.11: Utilizzo di supercondensatori su veicoli ibridi per il livellamento dei carichi [7]	37
Figura 5.12: Schema di sistema per mezzi di trasporto stradali [7]	37
Figura 5.13: Schema di sistema per il recupero di energia in impianti di sollevamento [7]	38
Figura 5.14: Apparecchiature di diagnostica ospedaliera [7].....	38
Figura 5.15: Schema di sistema impiegante supercondensatori su convogli metropolitani [7].....	39
Figura 5.16: Applicazione dei supercondensatori come stabilizzatori della tensione [7]	39
Figura 5.17: Applicazione di supercondensatori per il miglioramento della fornitura di energia elettrica [7]	39
Figura 6.1: Modello classico della serie RC [17]	41
Figura 6.2: Modello a due rami [17].....	42
Figura 6.3: Modello a due rami semplificato [17]	43
Figura 6.4: Modello Zubieta [17].....	43
Figura 6.5: Modello delle linee di trasmissione [17].....	44
Figura 6.6: Modello a scala multistadio [17]	45
Figura 7.1: Piano di Ragione per diverse tecnologie di accumulo [5]	46
Figura 7.2: Differenza tra le curve di scarica di un supercondensatore e di una batteria [5]	47
Figura 7.3: Principali differenze tra batterie e supercondensatori [17]	49
Figura 7.4: Classificazione dei sistemi HESS [17]	51
Figura 7.5: Alta richiesta di Potenza [7].....	52
Figura 7.6: Bassa richiesta di Potenza [7]	53
Figura 7.7: Frenata rigenerativa [7].....	53
Figura 7.8: Collegamento parallelo diretto [7].....	54
Figura 7.9: Collegamento Ultracapacitore – Convertitore DC/DC – Pacco Batterie [7].....	55
Figura 9.1: HESS Management [4]	58
Figura 9.2: Convertitori DC/DC [22]	60

Figura 9.3: Topologia del convertitore DC/DC Half-Bridge interleaved a due fasi [35]	63
Figura 9.4: Forme d'onda tipiche [35]	63
Figura 9.5: Schema di controllo del convertitore [4].....	64
Figura 10.1: Flowchart del PMS [6].....	68
Figura 10.2: Strategie di controllo per la condivisione di potenza tra batteria e supercondensatore [33]	70
Figura 10.3: Modifiche dei parametri di controllo con la strategia A [33].....	71
Figura 11.1: Architettura generale del sistema [10]	72
Figura 11.2: Schema elettrico del circuito [10]	74
Figura 11.3: Modello iniziale del sistema.....	75
Figura 12.1: Modello del sistema a singolo ramo.....	78
Figura 12.2: Profilo temporale delle correnti del generatore fotovoltaico e del carico	80
Figura 12.3: Profilo temporale della corrente del supercondensatore	81
Figura 12.4: Zoom profilo temporale della corrente del supercondensatore	82
Figura 12.5: Cicli del ripple di corrente del supercondensatore.....	82
Figura 12.6: Profilo temporale della corrente di batteria	83
Figura 12.7: Zoom profilo temporale della corrente di batteria	84
Figura 12.8: Profilo temporale della tensione del bus DC	85
Figura 12.9: Profilo della tensione del bus DC a larga scala	86
Figura 12.10: Profilo temporale della tensione del supercondensatore	87
Figura 12.11: Modello interleaved a doppio ramo	88
Figura 12.12: Profilo temporale delle correnti del generatore fotovoltaico e del carico	89
Figura 12.13: Profilo temporale delle correnti nei due rami del supercondensatore	90
Figura 12.14: Profilo temporale della corrente complessiva del supercondensatore	91
Figura 12.15: Zoom profilo temporale della corrente complessiva del supercondensatore.....	92
Figura 12.16: Cicli del ripple di corrente complessiva del supercondensatore.....	92
Figura 12.17: Profilo temporale delle correnti nei due rami della batteria	93
Figura 12.18: Profilo temporale della corrente complessiva di batteria	93
Figura 12.19: Zoom profilo temporale della corrente complessiva di batteria	94
Figura 12.20: Profilo temporale della tensione del bus DC.....	95
Figura 12.21: Profilo temporale della tensione del bus DC a larga scala	96
Figura 12.22: Profilo temporale della tensione del supercondensatore	96
Figura 13.1: Struttura del sistema [26].....	98
Figura 13.2: Temperatura media giornaliera e irraggiamento [26].....	100
Figura 13.3: Tensione del carico nell'arco di un giorno [26].....	101
Figura 13.4: Potenza del carico nell'arco di un giorno [26]	101
Figura 13.5: Potenza dei componenti nell'arco di un giorno [26]	102
Figura 13.6: Modello del sistema a singolo ramo per l'applicazione reale.....	103
Figura 13.7: Profilo temporale della potenza del generatore fotovoltaico	104
Figura 13.8: Profilo temporale della potenza del carico	104
Figura 13.9: Profilo temporale della tensione del carico	105
Figura 13.10: Profilo temporale della tensione del supercondensatore	105
Figura 13.11: Profilo temporale della potenza del supercondensatore	106
Figura 13.12: Profilo temporale della potenza di batteria	106
Figura 13.13: Potenza dei componenti del sistema a singolo ramo	107
Figura 13.14: Potenza dei componenti del sistema interleaving a doppio ramo	108

Indice delle tabelle

Tabella 2.1: Confronto tra le principali tecnologie di accumulo	9
Tabella 3.1: Classificazione delle batterie	15
Tabella 7.1: Confronto fra i principali parametri	47
Tabella 7.2: Confronto tra batterie e supercondensatori	48
Tabella 8.1: Principali tipologie di carico del sistema	57
Tabella 10.1: Scenario di Deficit di potenza (DPS)	66
Tabella 10.2: Scenario di Surplus di potenza (SPS)	67

1. INTRODUZIONE

1.1. Contesto e motivazioni

La transizione energetica in atto richiede una sempre maggiore penetrazione delle fonti rinnovabili nei sistemi di generazione elettrica. Tra queste, il fotovoltaico (PV) rappresenta una delle tecnologie più promettenti per la produzione distribuita, grazie all'abbondanza della risorsa solare, alla modularità degli impianti e ai costi in progressiva riduzione. Tuttavia, la produzione fotovoltaica è intrinsecamente aleatoria e dipendente dalle condizioni ambientali, risultando discontinua e scarsamente prevedibile nel breve periodo. Per garantire un bilanciamento tra generazione e carico, specialmente in sistemi stand-alone o in microgrid isolate, diventa essenziale integrare dispositivi di accumulo energetico che possano compensare le fluttuazioni della produzione e garantire continuità nella fornitura. Le batterie agli ioni di litio, grazie alla loro elevata densità energetica, rappresentano oggi lo standard per lo storage di energia elettrica. Tuttavia, esse soffrono di limitazioni per quanto riguarda la risposta dinamica in presenza di rapidi cambiamenti nel profilo di carico o nella produzione PV. L'erogazione o l'assorbimento di alte potenze in tempi ridotti riduce la vita utile del sistema, compromettendone l'affidabilità complessiva. In questo contesto, l'integrazione di supercondensatori all'interno del sistema di accumulo consente di alleggerire il carico dinamico sulle batterie. I supercapacitori sono dispositivi ad altissima densità di potenza, in grado di assorbire o fornire grandi quantità di corrente in tempi brevissimi, pur avendo una capacità energetica limitata. Un sistema ibrido batterie-supercapacitori permette quindi di unire le capacità di accumulo energetico delle batterie con la rapidità di risposta dei supercondensatori, migliorando l'efficienza operativa del sistema, estendendo la vita utile delle batterie e aumentando la robustezza complessiva della soluzione.

1.2. Obiettivi

Gli obiettivi del presente lavoro di tesi sono lo studio, la modellazione e l'analisi di un sistema di accumulo ibrido costituito da un banco di batterie agli ioni di litio e un banco di supercapacitori, integrati in un impianto fotovoltaico simulato. Il sistema sarà modellato e analizzato tramite simulazioni numeriche in ambiente PLECS, con l'intento di valutare le prestazioni energetiche e dinamiche dell'architettura ibrida.

Più nel dettaglio, si intende:

- Progettare una topologia di sistema in grado di gestire in modo efficiente il flusso di energia tra la sorgente PV, l'accumulo ibrido e il carico.
- Realizzare un modello simulativo del sistema completo, comprensivo del convertitore DC-DC bidirezionale necessario per il controllo del banco di supercondensatori.
- Analizzare il comportamento dinamico del sistema sotto differenti scenari di carico e irraggiamento solare.
- Valutare l'impatto della presenza dei supercapacitori in termini di riduzione dello stress sulle batterie, miglioramento della risposta transitoria e incremento della durata del sistema.

1.3. Metodologia

Il lavoro si articola secondo un approccio metodologico che prevede:

1. Analisi preliminare delle tecnologie: studio delle caratteristiche tecniche di batterie, supercondensatori, moduli fotovoltaici e convertitori elettronici di potenza.
2. Progettazione dell'architettura di sistema, definendo le connessioni tra i vari sottosistemi, i flussi di potenza e la strategia di controllo.
3. Sviluppo del modello simulativo, includendo le logiche di gestione dell'energia.
4. Definizione degli scenari di prova: variazione del carico, condizioni di irraggiamento mutevoli, profili di carico tipici di utenze reali.
5. Simulazioni ed elaborazione dei risultati, con analisi comparativa rispetto a configurazioni reali.

1.4. Topologia del sistema

Il sistema è composto dai seguenti elementi principali (Figura 1.1):

- Il generatore fotovoltaico produce energia in corrente continua,
- Il banco batterie è connesso al bus tramite un convertitore bidirezionale DC-DC, che permette sia carica che scarica,
- I supercondensatori sono collegati tramite un altro convertitore DC-DC, ottimizzato per fornire potenza rapidamente,
- Il carico elettronico,
- L'unità di controllo coordina l'interazione fra le fonti e il carico elettronico, simulando i reali consumi.

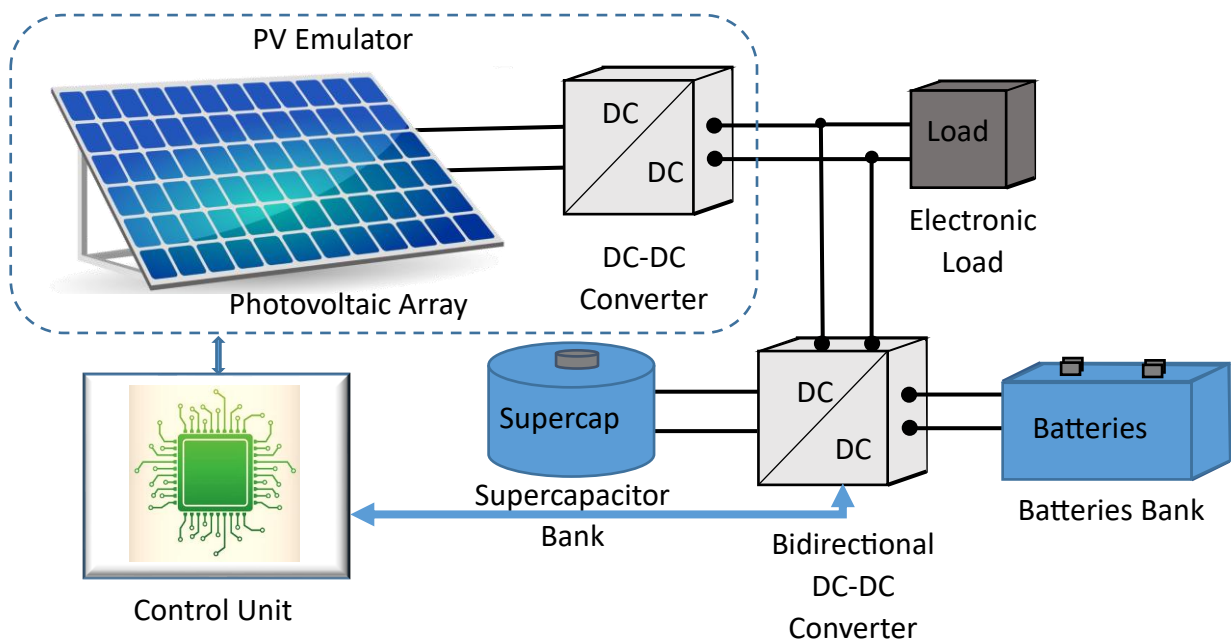


Figura 1.1: Schema generale del sistema [10]

2. ENERGIA FOTOVOLTAICA E SISTEMI DI ACCUMULO

2.1. Il contesto della generazione distribuita

Negli ultimi decenni, l'evoluzione del sistema elettrico sta procedendo verso un paradigma di generazione distribuita, decentralizzata e sostenibile. L'energia fotovoltaica si è affermata come una delle fonti rinnovabili più diffuse e promettenti grazie alla sua modularità, scalabilità e impatto ambientale minimo. In Italia, e in particolare in Piemonte, si è assistito a una progressiva diffusione degli impianti fotovoltaici di piccola e media taglia, spesso integrati in edifici residenziali, industriali o in contesti agricoli. Tuttavia, la variabilità della risorsa solare rappresenta una sfida tecnica per garantire la stabilità della rete e la qualità del servizio. In scenari off-grid o in microgrid isolate, tale variabilità può portare a interruzioni o inefficienze nella fornitura di energia. Per questo motivo, diventa cruciale il ruolo dei sistemi di accumulo, che permettono di scollegare temporalmente la produzione dalla domanda.

Un sistema fotovoltaico è composto principalmente da:

- Moduli fotovoltaici, che convertono l'energia solare incidente in energia elettrica tramite l'effetto fotovoltaico.
- Convertitori statici (DC/DC o DC/AC), che regolano la potenza in uscita e ne adattano la tensione e la frequenza.
- Sistemi di accumulo, nei casi in cui si desidera stoccare l'energia prodotta.
- Sistemi di controllo, per l'ottimizzazione del punto di lavoro (MPPT), la protezione e il monitoraggio.

I moduli fotovoltaici generano una corrente continua (DC), la cui intensità dipende direttamente dall'irraggiamento solare e dalla temperatura della cella. In assenza di un accumulo locale, l'energia prodotta deve essere consumata istantaneamente o immessa in rete, col rischio di sprechi in caso di surplus. L'energia solare è caratterizzata da un'alta variabilità temporale, sia nel breve periodo (es. passaggio di nuvole), sia nel lungo termine (es. cicli giorno/notte, stagionalità). Queste fluttuazioni si riflettono direttamente sulla potenza prodotta dal sistema fotovoltaico, rendendo difficile il bilanciamento tra domanda e offerta, soprattutto per carichi sensibili. Per esempio, in presenza di un carico a comportamento impulsivo o con variazioni rapide di assorbimento, l'assenza di un sistema tampone può portare a instabilità della tensione di alimentazione, degrado della qualità della potenza o addirittura a spegnimenti non voluti.

Per mitigare le problematiche descritte, si rende necessario affiancare alla generazione PV un sistema di energy storage. Questo consente:

- L'immagazzinamento dell'energia prodotta in eccesso durante le ore di punta.
- Il rilascio controllato dell'energia nei momenti di carico elevato o bassa produzione.
- L'assorbimento di variazioni rapide di potenza, migliorando la stabilità del sistema.

2.2. Curve I-V e P-V per diversi tipi di carico

Tracciare le curve tensione-corrente (I-V) e potenza-tensione (P-V) nei pannelli fotovoltaici è fondamentale per comprendere a fondo il comportamento del modulo in diverse condizioni operative e sotto diversi carichi. Le curve forniscono informazioni cruciali sia per il dimensionamento che per la gestione ottimale del sistema fotovoltaico.

In particolare, la curva I-V descrive la relazione tra la corrente erogata dal pannello e la tensione ai suoi capi. Essa parte dalla corrente di cortocircuito (I_{sc}), cioè il valore massimo di corrente quando i morsetti sono in cortocircuito (tensione nulla), e termina alla tensione a vuoto (V_{oc}), cioè il massimo valore di tensione quando il circuito è aperto e quindi la corrente è nulla. Tra questi due estremi, la corrente diminuisce in modo non lineare all'aumentare della tensione.

La curva P-V, invece, rappresenta la potenza prodotta dal pannello in funzione della tensione. Essa ha un andamento tipico a campana, raggiungendo un picco nel cosiddetto punto di massima potenza (Maximum Power Point, o MPP), caratterizzato da una certa tensione (V_{mp}) e corrente (I_{mp}). È proprio in questo punto che il pannello fornisce il massimo trasferimento di energia al carico.

Le caratteristiche di carico hanno un'influenza decisiva sul punto di lavoro del pannello. Se si collega un carico puramente resistivo, la relazione tra corrente e tensione è lineare ($I = V/R$). Il punto di lavoro corrisponde all'intersezione tra la curva I-V del pannello e la retta caratteristica del carico. A seconda del valore della resistenza, il punto di lavoro può trovarsi in una zona di bassa efficienza o vicino al punto di massima potenza. Una resistenza troppo bassa porta il pannello a lavorare vicino alla corrente di cortocircuito, mentre una troppo alta lo porta vicino alla tensione a vuoto. Solo un valore "ottimale" di resistenza ($R = 3.777 \Omega$) fa lavorare il sistema al massimo della potenza. Quando invece si utilizzano carichi elettronici dotati di sistemi MPPT (Maximum Power Point Tracking), questi adattano dinamicamente la resistenza vista dal pannello per farlo lavorare costantemente nel punto MPP, massimizzando così la produzione di energia in ogni momento, indipendentemente dalle condizioni ambientali o dalle variazioni di carico.

I grafici mostrati in Figura 2.1 rappresentano le curve I-V e P-V di un pannello fotovoltaico simulato. Su entrambi i grafici sono riportate le curve caratteristiche per diversi valori di resistenza di carico. È evidente come ogni carico sposti il punto di lavoro lungo le curve, e solo una resistenza specifica (quella blu, corrispondente alla resistenza "ottimale") intercetta il punto di massima potenza. Gli altri carichi, pur funzionando, operano in condizioni meno efficienti. Questi grafici sono strumenti essenziali per progettisti e tecnici del settore fotovoltaico.

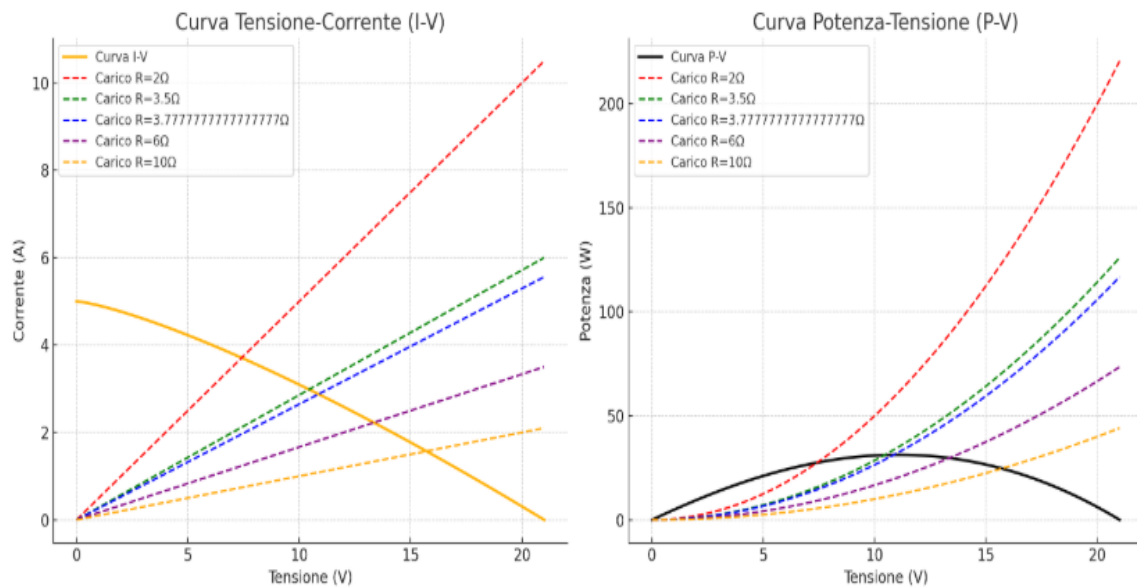


Figura 2.1: Curve I-V e P-V di un pannello fotovoltaico per diversi carichi resistivi

La Figura 2.2 riporta invece le curve tensione-corrente (I-V) e potenza-tensione (P-V) per un pannello fotovoltaico in presenza di diversi tipi di carico: resistivo, capacitivo, induttivo e non lineare.

Nella curva I-V, la risposta del carico resistivo è lineare, mentre quella del carico capacitivo mostra una corrente iniziale elevata che decresce con la tensione (simulando l'accumulo di carica su un condensatore). Il carico induttivo presenta invece una corrente che cresce con la tensione, imitando il comportamento ritardato di un'induttanza. Infine, il carico non lineare ha un andamento arbitrario, simile a quello di alcuni dispositivi elettronici controllati.

La curva P-V mostra come ciascun carico interagisce con la produzione di potenza del pannello. Solo il carico resistivo correttamente dimensionato riesce ad avvicinarsi al punto di massima potenza. Gli altri carichi, a causa delle loro caratteristiche dinamiche, fanno lavorare il pannello in condizioni subottimali.

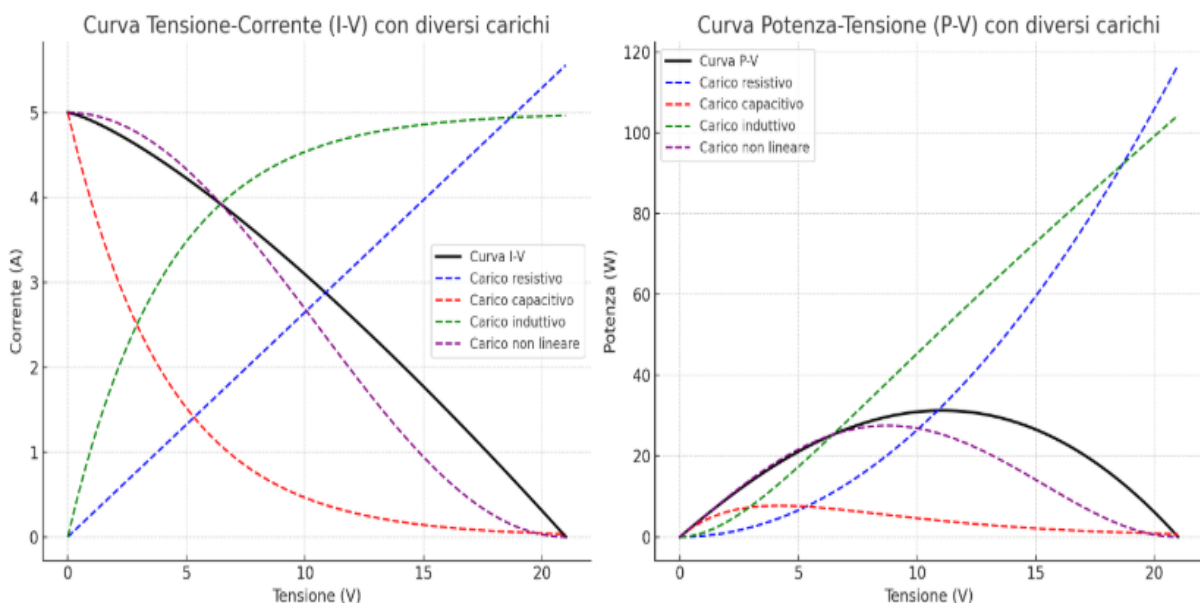


Figura 2.2: Curve I-V e P-V di un pannello fotovoltaico per diversi tipi di carico

In conclusione, si può dire che l'interazione tra il pannello fotovoltaico e il tipo di carico ha un impatto profondo sull'efficienza del sistema. I carichi resistivi permettono un comportamento prevedibile ma non garantiscono il massimo rendimento se non correttamente dimensionati. I carichi reattivi (induttivi e capacitivi) introducono complessità e inefficienze energetiche a causa dello sfasamento tra corrente e tensione. Il massimo rendimento si ottiene con carichi non lineari dotati di MPPT, che mantengono sempre il punto di lavoro del modulo nel punto di massima potenza, rendendo il sistema molto più efficiente e stabile nel tempo.

2.3. Analisi della produzione fotovoltaica e del carico energetico

La Figura 2.3 rappresenta un grafico che mette a confronto la produzione di energia fotovoltaica e il carico energetico, ovvero la domanda di energia elettrica, lungo l'arco di una giornata. L'obiettivo di questo tipo di rappresentazione è mostrare in modo chiaro e intuitivo come varia la produzione solare rispetto ai consumi e quanto di questa energia eventualmente non viene utilizzata, risultando così in eccesso. Questa analisi è particolarmente rilevante per comprendere l'efficienza dei sistemi fotovoltaici, il loro grado di autosufficienza e l'eventuale necessità di integrare sistemi di accumulo o connessioni con la rete elettrica nazionale.

Nel grafico, l'asse orizzontale rappresenta le ore del giorno, da mezzanotte fino a mezzanotte del giorno successivo (0–24), mentre l'asse verticale mostra la potenza espressa in Watt, che indica quanta energia viene prodotta o richiesta in un dato momento. La leggenda posizionata nella parte inferiore del grafico aiuta a distinguere i tre elementi principali rappresentati: la produzione fotovoltaica (indicata con una linea gialla), il carico (cioè, il consumo, rappresentato con una linea blu tratteggiata) e l'energia in eccesso (colorata in giallo chiaro come area compresa tra la curva di produzione e quella di consumo).

La curva gialla, che rappresenta l'andamento della produzione fotovoltaica, assume una forma a campana, tipica di un impianto solare. La produzione inizia a salire intorno alle 6–7 del mattino, raggiunge il suo massimo intorno a mezzogiorno o nelle prime ore del pomeriggio, e poi cala gradualmente fino ad azzerarsi verso le 18–19 di sera. Questo andamento riflette fedelmente l'irraggiamento solare durante la giornata: durante la notte non vi è produzione, e man mano che il sole sale nel cielo, l'energia prodotta aumenta, per poi diminuire con l'avvicinarsi del tramonto.

Il profilo del carico, rappresentato dalla linea blu tratteggiata, mostra un comportamento diverso. Esso tende ad avere due picchi: uno nelle prime ore del mattino e un altro nel tardo pomeriggio o in serata. Questi picchi sono tipici di un consumo domestico, in cui al mattino si utilizzano apparecchi per la colazione, l'illuminazione o il riscaldamento, mentre la sera il consumo sale nuovamente con il ritorno a casa e l'uso intensivo di elettrodomestici e dispositivi elettronici. Nelle ore centrali della giornata, invece, il carico tende a essere più basso, probabilmente perché molte persone non sono in casa.

L'elemento forse più interessante del grafico è l'area in giallo chiaro che rappresenta l'energia in eccesso. Questa zona evidenzia in modo visivo il surplus di energia prodotto durante le ore centrali del giorno, quando la produzione del fotovoltaico è molto alta ma il consumo è relativamente basso. In altre parole, durante queste ore si produce più energia di quanta se ne consuma, e questa

parte non viene utilizzata immediatamente. Se non esistono sistemi di accumulo o non viene immessa nella rete elettrica, quest'energia è destinata ad andare persa.

Dal punto di vista pratico, questo tipo di analisi mostra l'importanza dell'autoconsumo, ossia della capacità di un impianto fotovoltaico di soddisfare direttamente la domanda energetica dell'edificio o del sistema a cui è collegato. Quando la produzione è inferiore al carico, come avviene al mattino e alla sera, è necessario attingere energia da fonti esterne, come la rete o sistemi di batterie. Viceversa, nelle ore in cui la produzione supera il fabbisogno, l'energia eccedente può essere immagazzinata, venduta o persa, a seconda della configurazione del sistema. Questa considerazione porta alla riflessione sull'utilità dei sistemi di accumulo. Le batterie, ad esempio, consentono di immagazzinare l'energia prodotta in eccesso nelle ore centrali della giornata e di utilizzarla nei momenti di maggiore consumo, come al mattino o alla sera, riducendo la dipendenza dalla rete e migliorando l'efficienza dell'impianto. Infine, l'integrazione con la rete elettrica può svolgere un ruolo chiave. Un impianto ben progettato dovrebbe essere in grado non solo di compensare la domanda interna, ma anche di immettere nella rete l'energia in eccesso, ottenendo così vantaggi economici, oppure di prelevarla nei momenti di insufficienza.

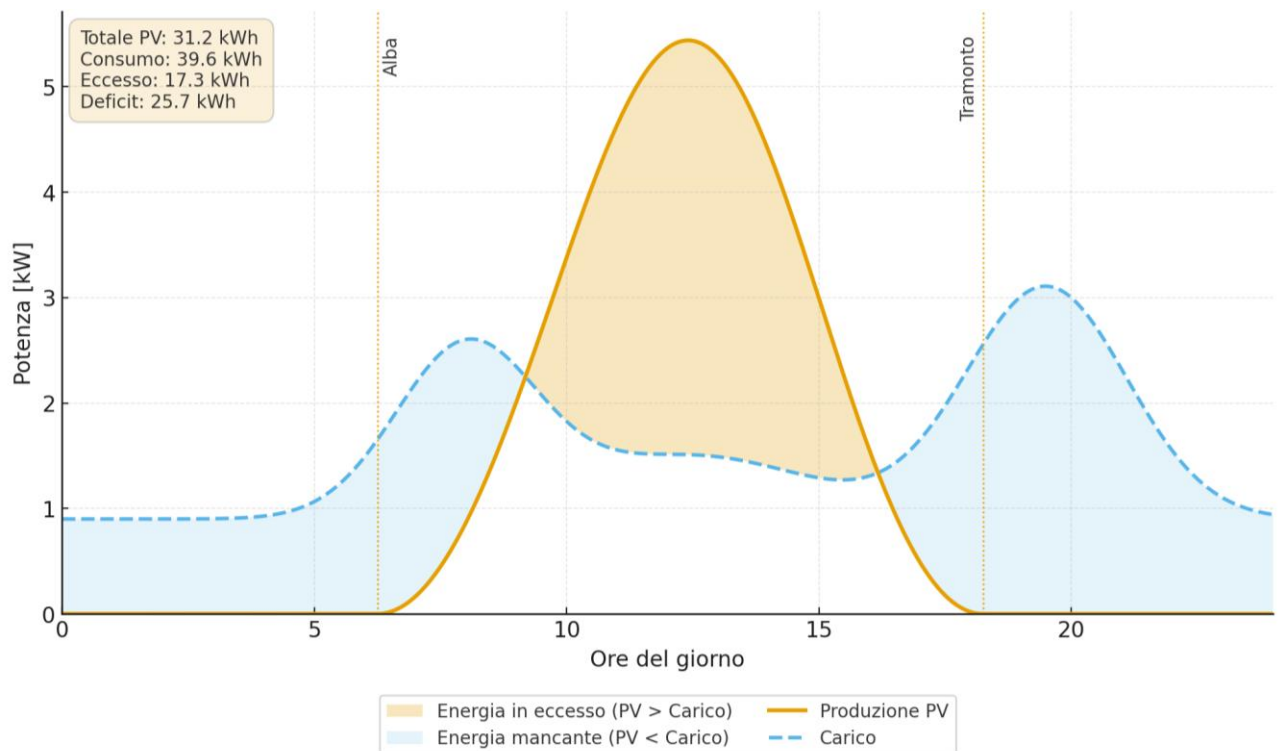


Figura 2.3: Produzione fotovoltaica vs Carico energetico

In conclusione, è bene ancora ricordare che l'energia solare non costituisce una sorgente costante, in quanto la sua produzione è direttamente influenzata dall'irraggiamento solare, il quale varia in funzione dell'ora del giorno, della latitudine, della stagione e delle condizioni meteorologiche. Questo, dunque, giustifica la necessità di utilizzare dei sistemi di accumulo di energia quali batterie e supercondensatori.

2.4. Tecnologie di accumulo dell'energia

Le tecnologie di accumulo energetico possono essere classificate in funzione del principio fisico che ne regola il funzionamento (Figura 2.4). Le principali categorie comprendono:

- Elettrochimiche, come le batterie al litio, al piombo-acido e al sodio-zolfo;
- Elettrostatiche, rappresentate dai supercondensatori;
- Meccaniche, quali i sistemi a volano o ad aria compressa;
- Termiche, che includono dispositivi a cambiamento di fase e serbatoi di accumulo di acqua calda.

Per applicazioni in ambito residenziale o nei sistemi di microgrid, le soluzioni elettrochimiche ed elettrostatiche risultano le più compatte ed efficienti, e costituiscono pertanto il principale oggetto di analisi del presente lavoro.

In particolare, l'adozione di un sistema ibrido che integri batterie al litio e supercondensatori offre una serie di vantaggi significativi, tra cui:

- l'ottimizzazione del flusso di potenza e della gestione dell'energia accumulata;
- il miglioramento della risposta dinamica del sistema in presenza di variazioni del carico;
- l'estensione della vita utile delle batterie, grazie alla riduzione del numero di cicli di carica e scarica completi;
- l'incremento della densità di potenza disponibile nei transistori di breve durata.

Attualmente, l'accumulo di energia elettrica può essere realizzato mediante diverse tecnologie, che si distinguono non soltanto per il principio fisico di funzionamento, ma anche per le prestazioni fornite, quali potenza specifica, densità energetica, efficienza di accumulo e rendimento in fase di riconversione. Le soluzioni ritenute più idonee per tali scopi comprendono le batterie elettrochimiche, i sistemi di stoccaggio basati sull'idrogeno e i condensatori, sia elettrochimici che elettrostatici (comunemente denominati supercondensatori o ultra-capacitori).

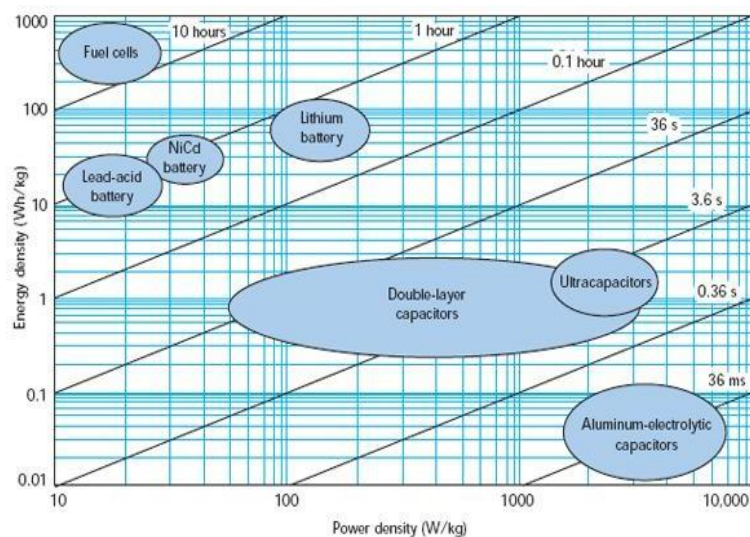


Figura 2.4: Classificazione dei sistemi di accumulo [7]

Le batterie elettrochimiche costituiscono una tecnologia di accumulo ormai consolidata, ampiamente disponibile in commercio in differenti configurazioni, sia per quanto riguarda la geometria costruttiva sia in relazione alle coppie elettrochimiche impiegate negli elettrodi. Tra queste, le batterie al piombo-acido si distinguono per l'elevata affidabilità e il ridotto costo, oltre che per valori soddisfacenti di densità di energia e di potenza. Tali caratteristiche le rendono, ancora oggi, la soluzione di accumulo più tradizionale e diffusa nelle applicazioni industriali e nei sistemi di generazione distribuita. Le tecnologie di accumulo basate su batterie si differenziano ulteriormente in funzione dei materiali costitutivi. Tra le più comuni si annoverano le batterie Piombo-Gel, le Nichel-Metal Idrato (NiMH), le Nichel-Cadmio (NiCad), e quelle al Litio, disponibili sia nella versione a Ioni di Litio (Li-Ion) sia in quella a Polimeri di Litio (Li-Po). Particolare attenzione merita la più recente generazione di batterie al Litio-Polimeri che, pur presentando un tasso di degrado superiore rispetto alle Li-Ion tradizionali, soprattutto in applicazioni di mobilità elettrica, offrono un vantaggio rilevante in termini di leggerezza a parità di densità di energia. I supercondensatori, invece, rappresentano una tecnologia di accumulo innovativa, caratterizzata da una densità di energia relativamente ridotta ma da una densità di potenza estremamente elevata. Poiché l'accumulo di energia avviene tramite processi elettrostatici pressoché reversibili, tali dispositivi garantiscono un'elevata efficienza e una lunga vita operativa. Grazie a queste peculiarità, i supercondensatori trovano impiego in configurazioni ibride, affiancando le batterie per fornire rapidamente potenza nei transitori o nei picchi di breve durata. I notevoli progressi registrati nell'ultimo decennio nello sviluppo delle celle a combustibile e dei sistemi di elettrolisi, accompagnati da una significativa riduzione dei costi, alimentano la prospettiva di un utilizzo sempre più esteso dell'idrogeno quale alternativa alle tradizionali tecnologie di accumulo elettrochimico. Dunque, l'integrazione tra sistemi di generazione fotovoltaica e dispositivi di accumulo energetico rappresenta un passaggio fondamentale per garantire la sostenibilità, la stabilità e l'affidabilità della generazione distribuita su larga scala. L'adeguato dimensionamento e la gestione ottimizzata dei sistemi di accumulo costituiscono, infatti, un tema di crescente interesse sia in ambito accademico sia industriale. Nei capitoli successivi verranno analizzate nel dettaglio le due tecnologie di accumulo considerate – batterie al litio e supercondensatori – e saranno discusse le strategie più efficaci per la loro integrazione in un sistema ibrido a supporto di un impianto fotovoltaico. In Tabella 2.1 viene presentato un confronto tra le principali soluzioni di accumulo energetico oggi disponibili.

Tecnologia	Tipo	Densità Energetica [Wh/kg]	Densità di Potenza [W/kg]	Cicli di Vita	Tempo di risposta	Costo per kWh (€)
Piombo-acido	Elettrochimico	30–50	200–400	500–1000	s	100–150
Ioni di Litio	Elettrochimico	150–250	1000–3000	2000–5000	ms–s	200–350
Supercapacitore	Elettrostatico	5–10	10.000–100.000	>1.000.000	μs–ms	500–1000
Volano	Meccanico	20–80	500–5000	>100.000	ms–s	>500

Tabella 2.1: Confronto tra le principali tecnologie di accumulo [7]

3. BATTERIE

In questo capitolo sono fornite delle nozioni generali riguardanti le batterie, sistemi di accumulo che consentono di immagazzinare e utilizzare l'energia elettrica in modo efficiente e flessibile.

3.1. Aspetti generali

Una batteria è un dispositivo elettrochimico in grado di convertire l'energia chimica immagazzinata nei materiali attivi in energia elettrica, attraverso una reazione di ossidoriduzione. Nei sistemi ricaricabili tale processo può essere invertito, consentendo la rigenerazione della capacità energetica del dispositivo.

Una reazione di ossidoriduzione è caratterizzata dal trasferimento di elettroni da una specie chimica che si ossida a un'altra che si riduce. Questo trasferimento può avvenire:

- per via chimica, quando le sostanze reagenti vengono poste a diretto contatto, con conseguente produzione di calore (ad esempio nella combustione);
- per via elettrochimica, quando le due specie sono mantenute separate e il passaggio di elettroni avviene attraverso un conduttore metallico esterno, generando una corrente elettrica. È questo il principio di funzionamento delle batterie.

Sebbene nel linguaggio comune i termini *cella* e *batteria* vengano spesso utilizzati come sinonimi, l'unità elettrochimica fondamentale in cui avviene la conversione di energia è la cella elettrochimica. Poiché una singola cella non è in genere sufficiente a soddisfare i requisiti di tensione e corrente richiesti dalle applicazioni pratiche, più celle vengono collegate elettricamente in serie e/o in parallelo. Con il termine *batteria* si identifica, dunque, un insieme organizzato di celle.

Nonostante siano state sviluppate nel tempo numerose varianti di celle, e molte altre siano tuttora oggetto di ricerca, è possibile individuare tre componenti principali comuni:

- Anodo (o terminale negativo): elettrodo conduttore di elettroni (conduttore di prima specie) che, durante la reazione elettrochimica, si ossida cedendo elettroni al circuito esterno;
- Catodo (o terminale positivo): elettrodo anch'esso conduttore di elettroni, che si riduce ricevendo elettroni dal circuito esterno;
- Elettrolita: conduttore ionico (conduttore di seconda specie), che costituisce il mezzo attraverso cui si realizza il trasporto degli ioni positivi e negativi. Può essere liquido (soluzione di sali, acidi o basi in un solvente, tipicamente acqua), solido o polimerico.

Dal punto di vista costruttivo, anodo e catodo sono generalmente immersi nell'elettrolita e separati da un separatore dielettrico, che impedisce il contatto diretto e quindi cortocircuiti interni, mantenendo al contempo la permeabilità ionica necessaria. La cella (o la batteria) è completata da ulteriori elementi ausiliari, tra cui:

- collettori di corrente, che garantiscono il collegamento tra elettrodi e circuito esterno;

- involucro di contenimento;
- dispositivi di sicurezza e altri componenti, la cui natura varia in base alla specifica chimica utilizzata.

Le celle elettrochimiche si distinguono in:

- primarie o non ricaricabili, nelle quali la reazione di ossidoriduzione non è reversibile (note anche come celle galvaniche o pile);
- secondarie o ricaricabili, caratterizzate da processi reversibili e comunemente denominate accumulatori.

Una rappresentazione schematica dei processi di scarica e ricarica di una cella elettrochimica è mostrata in Figura 3.1.

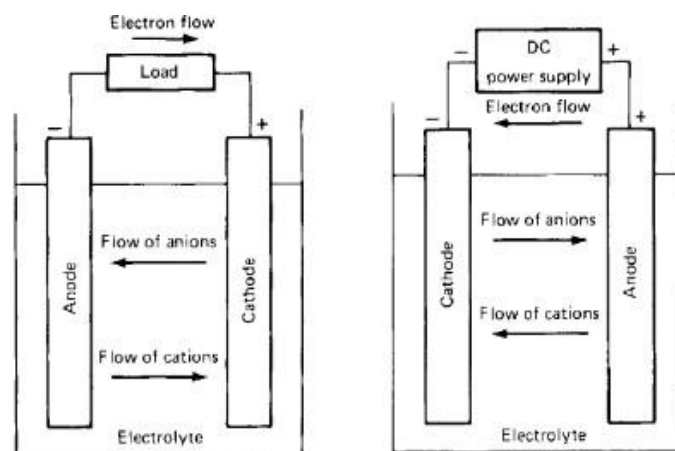


Figura 3.1: Scarica e carica di una cella elettrochimica [5]

Nel momento in cui un carico elettrico è collegato ai terminali, l'anodo, che ha maggior tendenza ad ossidarsi, cede elettroni al catodo attraverso il circuito esterno, la cella si scarica e il carico viene quindi alimentato. Il circuito elettrico viene completato nell'elettrolita dal flusso di anioni (ioni con carica negativa) e cationi (ioni con carica positiva), diretti rispettivamente verso catodo e anodo. Durante la carica di un accumulatore, il flusso di corrente, fornito da un alimentatore esterno, è invertito. Poiché l'elettrodo che si ossida è per definizione l'anodo e quello che si riduce il catodo, durante la scarica l'anodo è l'elettrodo positivo e il catodo è quello negativo.

3.2. Parametri delle batterie

In questa sezione vengono descritti i principali parametri caratteristici delle batterie, la cui conoscenza risulta indispensabile per un dimensionamento razionale ed efficace di un sistema di accumulo.

a. Tensione nominale

La tensione nominale rappresenta il valore di riferimento a cui una batteria è progettata per operare. Essa ha carattere puramente indicativo, poiché la differenza di potenziale ai morsetti varia in funzione delle condizioni operative. È possibile distinguere:

- Tensione a circuito aperto, misurata quando la batteria non alimenta alcun carico; in genere risulta leggermente superiore alla tensione nominale;
- Tensione di esercizio, corrispondente al valore istantaneo durante il funzionamento e inferiore a quella a circuito aperto;
- Tensione di cut-off (o di fine scarica), al di sotto della quale la batteria è considerata scarica, con valori dipendenti dai requisiti applicativi.

Durante la scarica, la tensione ai morsetti decresce progressivamente fino al valore di cut-off, mentre in fase di carica essa risulta superiore alla tensione a circuito aperto. Tali fenomeni sono riconducibili alla resistenza interna della batteria, che include le perdite ohmiche, le resistenze dovute alla cinetica delle reazioni elettrochimiche e quelle connesse ai processi di diffusione. In prima approssimazione, il comportamento può essere descritto dal modello di generatore equivalente:

$$V = E - R \cdot I \quad (3.1)$$

dove V è la tensione ai morsetti, E la forza elettromotrice e R la resistenza interna. Per corrente nulla ($I = 0$) la tensione ai morsetti coincide con E , considerata quindi come tensione a circuito aperto. Tale modello è valido per dinamiche lente, ma non rappresenta accuratamente il comportamento alle alte frequenze: in questi casi vengono impiegati modelli più complessi che tengono conto della dipendenza di E ed R da parametri come stato di carica, corrente e temperatura.

b. Capacità

La capacità indica la quantità di carica elettrica che una batteria può accumulare o fornire, espressa in ampere-ora (Ah). Una batteria da 10 Ah può teoricamente erogare 10 A per un'ora o 1 A per dieci ore. In pratica, la capacità effettiva dipende dall'intensità della corrente: a scariche elevate, la durata è sensibilmente ridotta per via delle perdite interne, descritte in prima approssimazione dalla relazione $P = RI^2$. Per questo motivo la capacità nominale viene espressa con la notazione C_n , riferita a un intervallo di tempo n (in ore). Ad esempio, $C_{10} = 100$ Ah indica una capacità nominale misurata su 10 ore di scarica.

c. Energia immagazzinata o capacità energetica

L'energia accumulata si calcola come prodotto tra tensione e capacità:

$$E = V \cdot C \quad (3.2)$$

ed è espressa in [Wh]. Sebbene utile per il dimensionamento, la formula deve essere applicata con cautela, poiché tensione e capacità variano con le condizioni operative. Di norma si fa riferimento ai valori nominali forniti dal costruttore.

d. Densità di energia

La densità energetica può essere rapportata alla massa (energia specifica) o al volume (densità volumetrica). Essa dipende dai materiali attivi e dai componenti ausiliari (separatori, involucri, sistemi di sicurezza). La conoscenza di questo parametro consente di stimare peso e volume necessari a soddisfare una determinata richiesta energetica.

e. Densità di potenza

Analogamente all'energia, anche la potenza può essere rapportata a massa o volume (potenza specifica e densità volumetrica di potenza). Questi parametri assumono un ruolo centrale nelle applicazioni mobili, come nei veicoli elettrici, dove peso e ingombro del sistema di accumulo rappresentano vincoli fondamentali.

f. Efficienza energetica o rendimento

Il rendimento di una batteria è definito come il rapporto tra energia restituita in scarica ed energia assorbita in carica. È sempre inferiore a 1 e dipende dal tipo di batteria e dalle condizioni operative.

g. Parametri operativi

Due parametri fondamentali per la gestione delle batterie sono:

- State of Charge (SoC): rapporto tra capacità residua e capacità nominale;
- Depth of Discharge (DoD): complemento del SoC, definito come $\text{DoD} = 1 - \text{SoC}$

Il SoC può essere stimato con diverse tecniche, la più semplice delle quali consiste nella misura della tensione ai morsetti. Tuttavia, l'accuratezza dipende fortemente dalla tecnologia della batteria.

h. Autoscarica

L'autoscarica rappresenta la perdita spontanea di capacità dovuta a reazioni chimiche parassite, anche in assenza di utilizzo. Essa dipende da tipologia di batteria, stato di carica e temperatura, aumentando all'aumentare di quest'ultima. I costruttori riportano tipicamente il tasso di autoscarica in percentuale della capacità nominale, su un determinato intervallo di tempo e a temperatura prefissata. Tale parametro è particolarmente rilevante nelle applicazioni stazionarie con lunghi periodi di inattività.

i. Temperatura

La temperatura influisce in modo significativo sulle prestazioni: a basse temperature l'attività chimica rallenta e la resistenza interna cresce, riducendo capacità e tensione disponibile; a temperature elevate l'attività chimica aumenta, ma si incrementa anche il tasso di autoscarica. Per questo motivo, la capacità nominale è sempre riferita ad una temperatura standard (tipicamente la temperatura ambiente). L'effetto è illustrato in Figura 3.2.

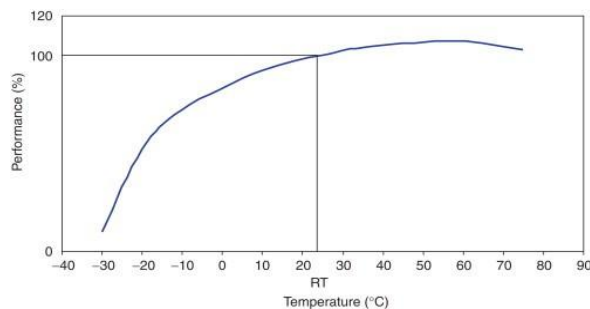


Figura 3.2: Effetto della temperatura sulle prestazioni di una batteria [5]

j. Durata di vita (numero di cicli)

La vita utile di una batteria viene generalmente espressa in numero di cicli carica/scarica che può sopportare prima che la capacità residua scenda sotto una soglia (tipicamente l'80% del valore nominale). Ogni ciclo causa un degrado progressivo, la cui entità dipende da profondità di scarica, modalità di ricarica e temperatura di esercizio. I datasheet riportano solitamente curve di durata in funzione di tali parametri.

k. Costo

Il costo costituisce un parametro determinante nella scelta della batteria e deve essere valutato in relazione alla vita utile e alle prestazioni complessive. A fini comparativi, esso è espresso in termini unitari rapportati all'energia accumulabile (€/Wh).

3.3. Tipologie di batterie

Nei sistemi ibridi batterie-supercondensatori, i tipi di batterie più comunemente accoppiati sono quelli che offrono un buon compromesso tra densità energetica, durata e velocità di carica/scarica. La Tabella 3.1 mostra le principali tipologie di batterie e le rispettive applicazioni quando accoppiate con i supercondensatori.

Tipo di Batteria	Vantaggi principali	Svantaggi principali	Quando si usa con Supercondensatori
Ioni di Litio (Li-ion)	Alta densità energetica, lunga durata	Sensibili ai picchi di corrente	- Auto elettriche (Tesla, Nissan Leaf) - Droni - Sistemi di accumulo domestico
Litio-Ferro-Fosfato (LiFePO₄)	Sicurezza elevata, lunghissima vita ciclica	Densità energetica inferiore alle Li-ion	- Bus elettrici - Energy Storage Systems (ESS) - Camper e barche elettriche
Litio-Titanato (LTO)	Carica/scarica ultrarapida, vita > 20.000 cicli	Densità energetica bassa, costo elevato	- Bus rapidi e tram - Veicoli industriali (carrelli elevatori) - Sistemi ferroviari
Piombo-Acido (AGM, Gel)	Costo basso, buona tolleranza a condizioni gravose	Molto pesanti, durata più breve	- UPS (gruppi di continuità) - Illuminazione pubblica - Sistemi fotovoltaici economici
Stato Solido (in sviluppo)	Alta sicurezza, grande densità energetica	Ancora costose e non largamente disponibili	- Futuri veicoli elettrici (prototipi) - Dispositivi elettronici avanzati - Sistemi di accumulo ad alta sicurezza

Tabella 3.1: Classificazione delle batterie [5]

Osservazioni:

- Batterie ad alta densità energetica (come le Li-ion) beneficiano dei supercondensatori per proteggersi dai picchi di corrente.
- Batterie ad alta potenza (come le LTO) si combinano perfettamente per creare sistemi ultrasensibili e rapidi.

4. BATTERIE AL LITIO

La tipologia di batteria che si vuole utilizzare nel sistema in esame è la batteria al litio, per alcuni vantaggi che consentono di soddisfare le richieste e le prestazioni elettriche stabilite.

4.1. Accumulatori al litio

Non esiste una singola tipologia di batteria al litio, bensì numerose varianti che si differenziano tra loro principalmente per i materiali elettrolitici impiegati. L'elemento comune a tutte è lo ione litio (Li^+), portatore della carica elettrica. Il litio, infatti, possiede il potenziale più negativo tra gli elementi, e il suo accoppiamento con altri materiali consente di ottenere una differenza di potenziale elevata, che rappresenta il motore stesso del funzionamento di una cella e determina la quantità di energia erogabile.

Dal punto di vista chimico, il litio è un metallo alcalino, terzo elemento della tavola periodica, caratterizzato da basso peso atomico e spiccata reattività. Queste proprietà lo rendono particolarmente adatto per l'impiego negli accumulatori, ma allo stesso tempo ne determinano la pericolosità: la manipolazione dei materiali deve quindi avvenire in condizioni ambientali rigorosamente controllate, prive di umidità e di contaminanti fisici, sia nella fase di produzione che durante l'esercizio e lo smaltimento.

Negli ultimi quindici anni le batterie al litio hanno conquistato una quota di mercato sempre più ampia, imponendosi in tutte le applicazioni portatili che richiedono dimensioni contenute (elevata densità energetica, Wh/l) e peso ridotto (alta energia specifica, Wh/kg). Nel settore *consumer* — telefoni cellulari, computer portatili, macchine fotografiche, videocamere — la tecnologia litio-ione è ormai dominante. Lo stesso vale per apparecchiature elettroniche quali televisori portatili, lettori musicali, videogame, dispositivi elettromedicali e sistemi per telecomunicazioni, nei quali le batterie al litio hanno progressivamente soppiantato i sistemi di accumulo tradizionali.

In termini generali, la scelta degli accumulatori al litio è privilegiata in tutti quei contesti in cui siano richieste elevata energia specifica, densità energetica e lunga vita utile in cicli. Viceversa, qualora tali requisiti non siano prioritari e prevalgano considerazioni di costo o di sicurezza, trovano ancora impiego altre tecnologie. Sono attualmente in corso studi mirati a migliorare le prestazioni degli accumulatori al litio, soprattutto per quanto concerne sicurezza e riduzione dei costi, al fine di estenderne l'utilizzo a settori strategici quali i veicoli elettrici e le reti di distribuzione.

Le batterie al litio possono essere distinte in due principali categorie:

- Litio metallico
- Litio-ione

A queste si affiancano alcune varianti, considerate sottoclassi delle precedenti, come le batterie litio-ione polimeriche e litio-metallico polimeriche.

Nelle batterie al litio metallico, l'anodo è costituito da litio metallico, mentre l'elettrolita può essere liquido o solido (a base ceramica, vetrosa o polimerica). Tali sistemi offrono notevoli

vantaggi in termini di bassa resistenza interna, elevata capacità e conseguentemente alte prestazioni di potenza ed energia specifica. Tuttavia, l'elevata reattività del litio metallico ha posto seri limiti di sicurezza, ostacolando un'ampia diffusione commerciale di questa tipologia.

Le batterie litio-ione si basano invece su materiali anodici e catodici di tipo intercalante, capaci di immagazzinare e rilasciare reversibilmente grandi quantità di ioni litio. Sebbene le prestazioni dell'anodo siano inferiori rispetto al litio metallico, la maggiore stabilità e sicurezza in esercizio hanno reso questa tecnologia la più diffusa. La scelta dei materiali anodici, catodici e dell'elettrolita determina la tensione di lavoro e incide sull'energia specifica: la maggior parte delle celle al litio presenta tensioni a vuoto superiori ai 3 V.

Rispetto ad altre tipologie di batterie e a ulteriori sistemi di accumulo, gli accumulatori al litio offrono dunque un vantaggio competitivo significativo, garantito dalla varietà dei campi applicativi e dalla solidità del mercato, che ne favoriscono il continuo sviluppo tecnico ed economico. La molteplicità di configurazioni costruttive rende inoltre i sistemi al litio estremamente flessibili, adattabili a funzioni diversificate: si trovano soluzioni ad alta potenza specifica, idonee a fornire energia in tempi molto brevi, e sistemi ad alta energia specifica, concepiti per un'erogazione prolungata.

Ne risulta evidente che le prestazioni e i costi delle batterie al litio variano in funzione dei materiali e delle soluzioni costruttive adottate. Così come non esiste un sistema di accumulo "universale" adatto a tutte le applicazioni di rete, allo stesso modo le batterie al litio richiedono ulteriori attività di ricerca, sviluppo e industrializzazione per esprimere appieno il loro potenziale in applicazioni di grande scala, attualmente ancora limitate a progetti dimostrativi sperimentali.

4.2. Principio di funzionamento di una batteria al litio

Il principio di funzionamento delle batterie agli ioni di litio si fonda sul moto ciclico degli ioni di litio tra anodo e catodo. Durante le fasi di carica e scarica, il flusso ionico interno compensa il flusso di corrente nel circuito esterno, garantendo così la neutralità elettrica degli elettrodi. Una rappresentazione schematica del processo è riportata in Figura 4.1.

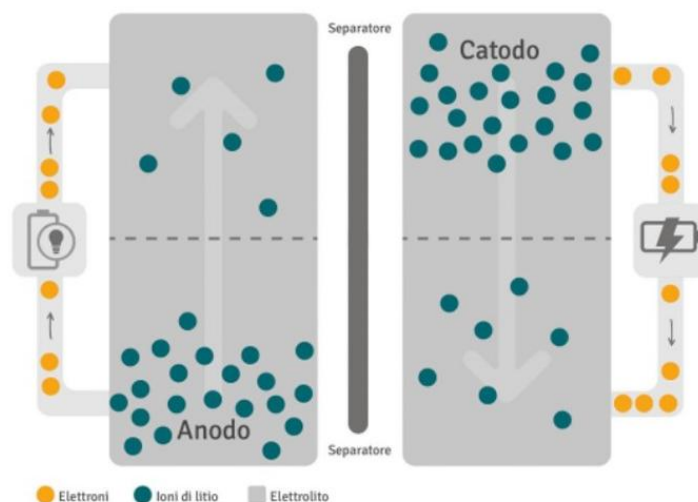


Figura 4.1: Schema di funzionamento di una batteria al litio [24]

1. Scaricamento

Durante la fase di scarica, ovvero quando l'energia della batteria viene utilizzata da un dispositivo esterno, gli atomi di litio cedono elettroni all'elettrodo negativo. Gli elettroni, attraverso il circuito esterno, raggiungono l'elettrodo positivo, mentre gli ioni di litio migrano in pari quantità dall'anodo al catodo, attraversando l'elettrolita e il separatore. L'accettazione degli elettroni al catodo avviene grazie alla presenza di ioni di metalli di transizione fortemente ionizzati, che fungono da centri di reazione. È opportuno sottolineare che il meccanismo specifico può variare a seconda della tipologia di batteria agli ioni di litio adottata. A differenza degli ioni di litio, gli ioni metallici presenti nella struttura del catodo non sono mobili, ma svolgono un ruolo chiave nell'accoglienza e stabilizzazione degli elettroni.

2. Caricamento

Durante la fase di carica, il processo si inverte: gli atomi di litio non ionizzati si spostano dall'elettrodo positivo verso quello negativo, attraversando il separatore. Qui vengono immagazzinati tra gli strati di grafite che compongono l'anodo, in un processo definito intercalazione. La carica avviene generalmente applicando una corrente costante fino al raggiungimento della tensione nominale della cella. Una volta raggiunto tale valore, la tensione viene mantenuta costante mentre la corrente progressivamente diminuisce, fino al completamento della carica.

4.2.1. La corrente di batteria e il tasso di carica/scarica

La corrente fornita dalla batteria o dalla cella elementare, in prima analisi, dipende dal carico ed è data dalla nota legge di ohm:

$$I = \frac{E}{R} \quad (4.1)$$

Dove I è la corrente espressa in ampere, E è la tensione di cella o di batteria, in volt, ed R è la resistenza del carico, in ohm (Figura 4.2).

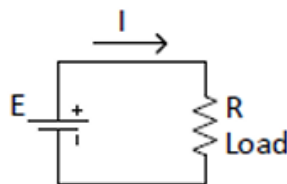


Figura 4.2: Rappresentazione circuitale della batteria collegata ad un generico carico [24]

Il tasso di scarica di una batteria è comunemente indicato con la lettera C . Contrariamente a quanto si potrebbe pensare, esso non rappresenta la corrente massima erogabile, bensì la corrente costante di carica o scarica che la batteria è in grado di sostenere per un'ora, espressa in ampere.

Ad esempio, una batteria da 12 V con capacità nominale di 20 Ah può erogare:

- una corrente costante di 20 A per un'ora (tasso di scarica pari a 1C);
- una corrente costante di 1 A per venti ore (tasso di scarica pari a 1/20C).

In generale, il tempo di scarica risulta inversamente proporzionale al valore del tasso C. Così, un tasso di scarica di 10C implica teoricamente che la batteria si esaurisca in un decimo di ora, ossia in circa 6 minuti.

È opportuno osservare che, nelle specifiche tecniche, il tasso di carica è solitamente inferiore al tasso di scarica, al fine di limitare fenomeni di degrado e garantire una maggiore durata di vita della batteria.

4.2.2. L'impedenza interna della batteria

I materiali chimici presenti all'interno della batteria, così come i conduttori che costituiscono anodo e catodo, introducono una resistenza interna che ostacola il libero flusso della corrente. Tale resistenza, comunemente indicata con r , può essere modellata come una resistenza elettrica posta in serie ai terminali della batteria, come mostrato schematicamente in Figura 4.3.

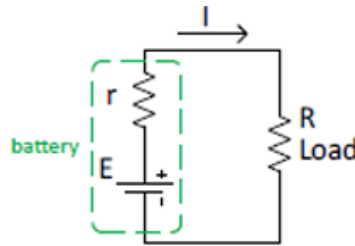


Figura 4.3: Rappresentazione circuitale della batteria e della sua resistenza [24]

Se il carico della batteria non è collegato o è trascurabile, la tensione vista ai terminali della batteria è esattamente la tensione di circuito aperto (E). Quando invece il carico connesso non è trascurabile, la corrente fornita dalla batteria al circuito è:

$$I = \frac{E}{R+r} \quad (4.2)$$

Dunque, ci sarà la caduta di tensione ai capi della resistenza interna della batteria, pari a:

$$e = r \cdot I = r \cdot \frac{E}{R+r} \quad (4.3)$$

Come conseguenza, porta ad avere una riduzione della tensione ai terminali della batteria, che sarà dunque:

$$(E - e) = E \cdot \left(1 - \frac{r}{R+r}\right) \quad (4.4)$$

La caduta di tensione associata alla resistenza interna di una batteria non è costante, ma varia in funzione dell'intensità della corrente erogata verso il carico. A livello teorico, la rappresentazione con una resistenza puramente ohmica costituisce una semplificazione, poiché in realtà intervengono ulteriori fenomeni elettrochimici e diffusivi che non possono essere descritti da un unico parametro resistivo.

Per molte tipologie di celle, la resistenza interna si colloca nell'ordine di pochi milliohm, rendendo trascurabili gli effetti sulle prestazioni complessive. Tuttavia, nelle batterie ad alta potenza tali effetti diventano rilevanti, poiché la dissipazione energetica dovuta all'effetto Joule può determinare un riscaldamento significativo della cella e una conseguente riduzione della potenza effettivamente disponibile.

4.2.3. La capacità della batteria

Come già accennato, la capacità di una cella o di una batteria viene espressa in ampere-ora (Ah) o in milliampere-ora (mAh) e rappresenta la quantità di carica elettrica che il dispositivo è in grado di erogare in un'ora prima di scaricarsi. In termini più rigorosi, essa corrisponde alla carica totale immagazzinata all'interno della cella.

Occorre sottolineare che il simbolo "C" viene talvolta impropriamente confuso con la capacità di accumulo dell'energia, senza considerare il ruolo della tensione della cella. In realtà, l'intensità con cui la carica viene trasferita verso la cella (in fase di carica) o dalla cella (in fase di scarica) è la corrente I.

La quantità di carica trasferita con intensità costante I, per un intervallo temporale t, è data dalla relazione:

$$Q = I \cdot t \quad (4.5)$$

dove Q è la carica trasferita, espressa in coulomb (C), e t è il tempo in secondi.

La capacità totale di una cella completamente carica può dunque essere espressa anche in coulomb, ricavandola dalla capacità nominale C (espressa in Ah) moltiplicata per 3600, ovvero il numero di secondi in un'ora. Ad esempio, una cella con capacità di 20 Ah immagazzina una carica complessiva pari a:

$$20 \cdot 3600 = 72\,000 \text{ C}$$

4.2.4. SoC e SoH

Lo stato di carica (State of Charge, SoC) rappresenta una misura relativa della quantità di energia immagazzinata in una batteria. Esso viene definito come il rapporto tra la carica elettrica ancora estraibile in un dato istante e la capacità totale nominale della cella. In altri termini, il SoC indica quanta energia la batteria è in grado di fornire in una specifica condizione di utilizzo e di temperatura.

La stima accurata del SoC riveste un ruolo fondamentale, poiché i sistemi di gestione della batteria (Battery Management Systems, BMS) si basano su tale parametro per:

- informare l'utente sull'autonomia residua fino alla successiva ricarica;
- garantire il funzionamento entro la finestra operativa sicura;
- implementare strategie di controllo ottimizzate;

- prolungare la vita utile della batteria.

Lo stato di salute (State of Health, SoH), invece, esprime il livello complessivo delle prestazioni di una batteria rispetto a quelle possedute al momento della sua immissione in servizio. La valutazione del SoH tiene conto di diversi parametri, quali tensione, tasso di autoscarica, resistenza interna e capacità residua (SoC). Una stima accurata e in tempo reale del SoH è essenziale per garantire la sicurezza operativa, ottimizzare l'efficienza del sistema e pianificare correttamente il ciclo di vita della batteria.

4.2.5. Modello elettrico

Un aspetto cruciale nella gestione delle batterie agli ioni di litio riguarda l'incremento della loro capacità di accumulo energetico e della durata operativa. Per perseguire tali obiettivi risulta indispensabile disporre di un modello accurato della batteria.

In particolare, la stima precisa dello stato di carica (SoC) e dello stato di salute (SoH) del pacco batterie costituisce un prerequisito fondamentale per la progettazione di algoritmi di controllo efficaci nei sistemi di accumulo di energia.

Un modello elettrico largamente adottato si basa sulla rappresentazione della batteria come l'associazione in serie di un generatore di tensione costante e di una resistenza interna (Figura 4.4). Il generatore riproduce la tensione a circuito aperto, mentre la resistenza tiene conto delle perdite interne. In configurazioni più evolute, il modello viene arricchito mediante l'inserimento di una o più reti RC in serie, con lo scopo di descrivere i fenomeni transitori che si verificano durante le variazioni di corrente.

In tali approcci i parametri elettrici non sono costanti, ma variano in funzione del SoC e della temperatura operativa della batteria. È importante sottolineare che ogni modello rappresenta un compromesso tra livello di accuratezza e rapidità di simulazione, e la scelta del modello dipende pertanto dallo specifico contesto applicativo.

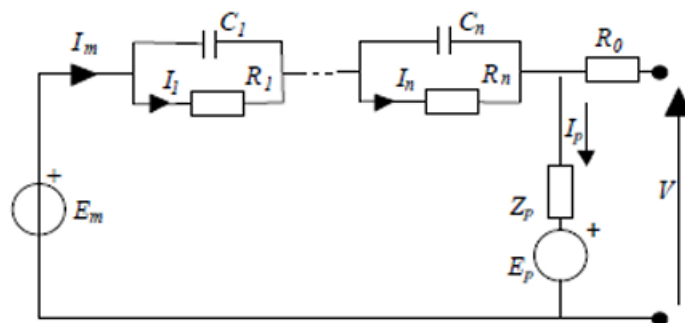


Figura 4.4: Modello Elettrico di una batteria al litio [24]

4.2.6. Modello termico

Le prestazioni delle batterie agli ioni di litio risultano fortemente influenzate dalla temperatura operativa della cella. In particolare, la potenza erogabile subisce una significativa riduzione a temperature superiori a 50 °C, mentre la capacità diminuisce sensibilmente al di sotto di -10 °C. Parametri fondamentali come lo stato di carica (SoC) e la resistività interna della batteria sono anch'essi strettamente dipendenti dalla temperatura.

Di conseguenza, la modellazione della dinamica termica riveste un ruolo cruciale nell'analisi e nella previsione delle prestazioni delle batterie. I valori dei componenti del circuito equivalente, riportato in Figura 4.4, sono infatti funzione sia del SoC sia della temperatura interna della cella.

Nell'ambito della modellazione si assume, per semplicità, che la temperatura interna della cella sia uniforme e rappresentata dal valore medio della temperatura del corpo. Tale temperatura può essere stimata risolvendo l'equazione del calore per un corpo omogeneo che scambia energia termica con l'ambiente circostante:

$$C_T \frac{dT}{dt} = -\frac{T-T_A}{R_T} + P_S \quad (4.6)$$

Si applica la trasformata di Laplace:

$$T(s) = \frac{P_S R_T + T_a}{1 + R_T C_T s} \quad (4.7)$$

Dove:

C_T = capacità termica della cella

P_S = potenza dissipata all'interno della cella

R_T = resistenza alla convezione

T_a = temperatura ambiente

T = temperatura interna della cella

4.3. Batteria Litio-Ione

L'elemento distintivo delle batterie agli ioni di litio attualmente più diffuse è la presenza di un elettrolita liquido, il quale impregna una matrice polimerica inerte che funge da separatore. Queste rappresentano, allo stato attuale, l'unica tipologia disponibile su larga scala commerciale, in particolare nel mercato consumer, mentre le altre varianti risultano ancora in fase di ricerca e sviluppo, con prospettive di un impiego più esteso in futuro.

L'elettrolita è costituito da uno o più solventi organici polari, all'interno dei quali vengono disciolti sali di litio quali LiPF_6 , LiAlCl_4 o LiAsF_6 . Poiché il litio è un metallo altamente reattivo e reagisce violentemente a contatto con l'acqua, i materiali impiegati devono essere rigorosamente non acquosi, pur mantenendo una polarità sufficiente a garantire la dissoluzione del sale di litio.

Le batterie agli ioni di litio costituiscono oggi lo standard di riferimento per l'accumulo elettrochimico grazie a un insieme di proprietà che combinano prestazioni elevate e compattezza. Dal punto di vista elettrico, la tensione di singola cella—tipicamente compresa tra 3 e 4.2 V—consente di ridurre il numero di elementi in serie rispetto ad altre chimiche, semplificando l'architettura dei pacchi. A ciò si aggiungono una densità di energia volumetrica fino a circa 530 Wh/l e un'energia specifica dell'ordine di 230 Wh/kg, che abilitano soluzioni leggere e poco ingombranti per dispositivi portatili e trazione elettrica. Anche la capacità di erogare potenza è rilevante: in condizioni transitorie le celle possono raggiungere potenze specifiche fino a 500 W/kg per intervalli dell'ordine di qualche decina di secondi, favorendo spunti e recuperi energetici efficienti. Sul piano operativo, l'assenza dell'effetto memoria e la possibilità di sostenere cicli profondi di carica/scarica, unite a un basso tasso di autoscarica e a una quasi unitaria efficienza coulombica, determinano un'elevata efficienza energetica complessiva (tipicamente > 90%) e una buona conservazione della carica durante lo stoccaggio; inoltre, non sono richiesti interventi di manutenzione ordinaria.

Tali vantaggi coesistono tuttavia con alcune criticità che ne guidano l'impiego in contesti applicativi specifici. Innanzitutto, la chimica agli ioni di litio presenta rischi di sicurezza intrinseci: sovraccariche e sovrascariche possono innescare condizioni di instabilità termica, rendendo indispensabile l'integrazione di sistemi di gestione elettronica (BMS) con funzioni di protezione e diagnostica. I tempi di ricarica rimangono generalmente più lunghi rispetto all'erogazione di potenza in scarica, e i costi—legati ai materiali attivi e ai processi produttivi—sono ancora superiori a quelli di tecnologie più mature come il piombo-acido. Nelle configurazioni con celle in serie è inoltre necessario il bilanciamento per garantire uniformità di tensione e prolungare la vita utile del pacco. Infine, i meccanismi di invecchiamento sono sensibili alle condizioni d'uso: temperature elevate, stati di carica estremi e lunghi periodi di stoccaggio possono accelerare la perdita di capacità e l'aumento della resistenza interna. In conclusione, le batterie agli ioni di litio offrono un eccellente compromesso tra energia, potenza ed efficienza, a patto di essere gestite con un adeguato controllo elettronico e un corretto profilo di esercizio.

4.4. Batteria Litio Metallico

A questa categoria appartengono gli accumulatori dotati di anodo in litio metallico, elemento caratterizzato dal potenziale standard più negativo rispetto all'idrogeno, da un basso peso atomico e da una capacità specifica teorica pari a circa 3850 Ah/kg.

Il litio metallico, tuttavia, è estremamente reattivo: a contatto con l'elettrolita tende immediatamente a ossidarsi, dando origine a un'interfase solida che svolge il ruolo di strato passivante, limitando la corrosione ulteriore. Da decenni esso trova applicazione nelle batterie primarie commerciali, mentre nelle batterie secondarie il suo impiego non è ancora consolidato, nonostante gli intensi studi condotti, a causa di criticità legate alla sicurezza e alla scarsa ciclabilità.

Il principale problema di questa tipologia di accumulatori è la formazione di dendriti, strutture ramificate che possono innescare un cortocircuito interno. Tale fenomeno è riconducibile all'eterogeneità dello strato passivante all'interfaccia litio/elettrolita, che induce la creazione di percorsi preferenziali per il passaggio degli ioni litio. Durante la carica, il deposito del litio avviene prevalentemente nelle zone a minore resistenza al trasferimento, anziché in maniera uniforme su tutta la superficie anodica. Con il susseguirsi dei cicli, ciò porta alla crescita delle protuberanze dendritiche che, raggiungendo il catodo, possono determinare un cortocircuito e, nei casi più gravi, l'esplosione della cella.

La ciclabilità del litio metallico risulta pertanto insufficiente per un utilizzo commerciale, poiché non garantisce un'adeguata reversibilità. Una bassa ciclabilità richiederebbe un sovradimensionamento dell'elettrodo negativo, con conseguenti ripercussioni negative sulla sicurezza e sull'energia specifica complessiva del sistema.

Un approccio innovativo recentemente proposto consiste nel rivestire l'anodo in litio metallico con un conduttore ceramico di ioni litio, in grado di svolgere una funzione protettiva. Sebbene i costi e la reale ciclabilità di tale soluzione debbano ancora essere verificati sperimentalmente, questa strategia rappresenta una prospettiva promettente per superare i limiti attuali e favorire lo sviluppo di batterie al litio metallico più sicure ed efficienti.

Come già evidenziato, uno dei principali limiti alla diffusione delle batterie al litio riguarda la scarsa stabilità del litio metallico a contatto con l'elettrolita liquido, che favorisce la formazione di dendriti e comporta gravi problemi di sicurezza. Una possibile soluzione consiste nella sostituzione dell'elettrolita liquido con elettroliti solidi.

In linea teorica, esistono buoni conduttori di ioni litio in forma solida; tuttavia, questa opzione risulta al momento difficilmente praticabile poiché, durante i cicli di carica e scarica si verificano variazioni di volume dei materiali. Tali deformazioni inducono la perdita del contatto all'interfaccia elettrodo/elettrolita, con conseguente disattivazione della cella.

5. SUPERCONDENSATORI

Nel presente capitolo sono introdotti i condensatori elettrochimici, meglio conosciuti come supercondensatori o ultracondensatori.

5.1. Aspetti generali

I supercondensatori rappresentano una tecnologia innovativa di accumulo dell'energia elettrica, basata sull'impiego di campi elettrostatici. Una cella elementare è costituita da due elettrodi porosi, caratterizzati da un elevato rapporto superficie/peso, immersi in una soluzione elettrolitica. L'accumulo energetico avviene prevalentemente tramite un processo di natura elettrostatica, dovuto alla formazione e distribuzione di cariche nella regione di interfaccia tra ciascun elettrodo e l'elettrolita. La Figura 5.1 riporta la struttura tipica di un supercondensatore.

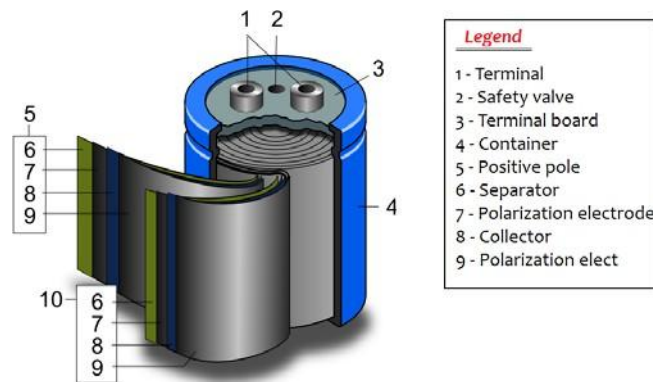


Figura 5.1: Condensatori elettrostatici a doppio strato [7]

I condensatori elettrostatici sono conosciuti anche con altre denominazioni derivanti dalla loro commercializzazione come, ad esempio:

- Condensatori a doppio strato
- Supercapacitori
- Ultracapacitori
- Power Capacitors
- Gold Capacitors
- Power Cache

5.2. Cenni storici

I fenomeni legati all'accumulo di carica elettrica nella regione di interfaccia tra un elettrodo metallico e una soluzione elettrolitica erano già oggetto di studio da parte di chimici e fisici nel XIX secolo. Nel 1853 il fisico tedesco Hermann von Helmholtz descrisse per la prima volta la distribuzione di carica a doppio strato.

La prima realizzazione di condensatori elettrochimici a doppio strato risale però soltanto al 1957, con il deposito di un brevetto da parte della General Electric.

Quest'ultimo descriveva un prototipo costituito da elettrodi di carbonio poroso impregnati da un elettrolita acquoso (Figura 5.2).

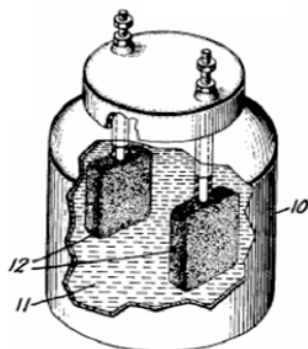


Figura 5.2: Condensatore brevettato dalla General Electric [7]

Nel 1966 la SOHIO (Standard Oil Company, Cleveland, Ohio) brevettò un dispositivo analogo, anch'esso basato su elettrodi in carbonio poroso, ma questa volta immersi in un solvente non acquoso contenente un elettrolita salino disciolto. La maggiore tensione di dissociazione degli elettroliti non acquosi rispetto a quelli acquosi consentiva al dispositivo di operare a tensioni relativamente elevate (3.4 – 4.0 V), garantendo così una densità di energia superiore a quella del prototipo General Electric.

Nel 1970 la SOHIO sviluppò un ulteriore prototipo, a forma di disco e con elettrodi in pasta di carbonio. L'anno successivo, tuttavia, a seguito di un calo nelle vendite, l'azienda decise di interrompere ulteriori sviluppi e cedette le licenze di produzione alla NEC, che fu la prima a produrre su larga scala dispositivi commercializzati con il nome di “Supercapacitors”.

Dal 1978 la Matsushita Electric Industrial Co. (nota in Occidente come Panasonic) sviluppò i cosiddetti “Gold Capacitor”. Nel corso degli anni '80 diverse aziende avviarono la produzione di supercondensatori; tra queste, la ELNA, che nel 1987 introdusse sul mercato i suoi dispositivi a doppio strato con il marchio “Dynacap”.

I prodotti commercializzati in quel periodo erano caratterizzati da basse tensioni operative e da un'elevata resistenza interna. Per tale motivo il loro impiego principale era nei circuiti di alimentazione dedicati alle memorie di backup nei dispositivi elettronici. I primi supercondensatori ad alta potenza vennero sviluppati nei primi anni '80 dalla Pinnacle Research Institute (PRI) per applicazioni militari, quali sistemi laser e di guida missilistica. Questi dispositivi, denominati “PRI Ultracapacitors”, erano costituiti da elettrodi in ossidi di rutenio/tantalio immersi in una soluzione concentrata di acido solforico. Essi garantivano un'elevata densità di potenza (oltre 10 kW/kg) e una bassa resistenza interna, ma presentavano una densità energetica limitata (circa 1 Wh/kg).

Negli anni '90 i supercondensatori iniziarono a suscitare grande interesse per le applicazioni nel settore dei veicoli elettrici. A partire dal 1992, il Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti (DoE) promosse un programma di ricerca nei laboratori Maxwell, volto a sviluppare supercondensatori da utilizzare come sistemi di accumulo ausiliari per supportare le batterie e le celle a combustibile nei veicoli elettrici, sia durante le fasi di accelerazione, sia per il recupero di energia in frenata.

5.3. Classificazione dei supercondensatori

I condensatori elettrochimici possono essere divisi in tre categorie principali in base al principio che regola il processo di accumulo di energia (Figura 5.3).

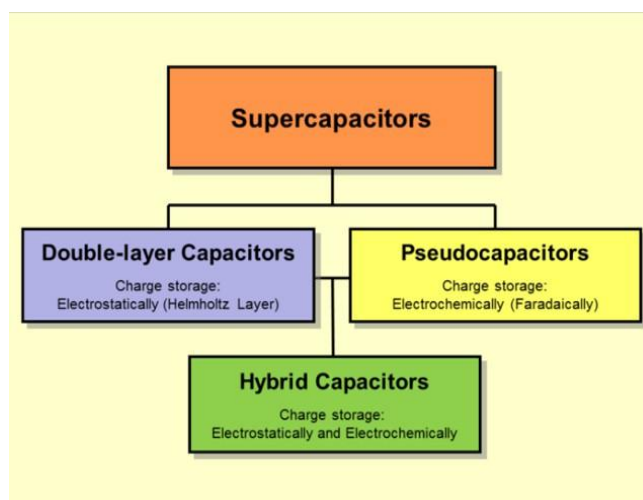


Figura 5.3: Classificazione gerarchica dei supercondensatori [17]

I. CONDENSATORI A DOPPIO STRATO

La prima tipologia di supercondensatori si basa sull'accumulo di energia elettrica sotto forma di energia elettrostatica nel doppio strato elettrico che si forma all'interfaccia tra un elettrodo solido e un elettrolita. Questo fenomeno può essere assimilato al comportamento di un condensatore a piastre, in cui le cariche positive e negative si dispongono ai lati opposti di un'interfaccia rigida.

Il modello elementare descrive tale configurazione come due strati di carica opposti separati da una distanza dell'ordine atomico, con una variazione lineare del potenziale elettrico. Nel tempo sono stati proposti numerosi modelli teorici di complessità crescente per descrivere con maggiore accuratezza questa particolare struttura interfacciale.

In Figura 5.4 sono rappresentati i modelli di Helmholtz e di Gouy-Chapman, nei quali ψ indica il potenziale, ψ_0 il potenziale dell'elettrodo e d la distanza delle cariche ioniche dalla superficie.

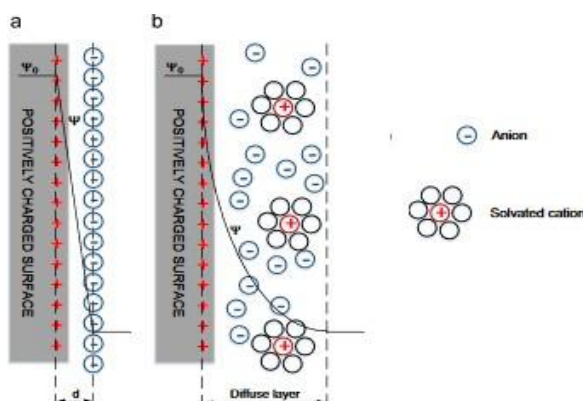


Figura 5.4: Modello di Helmholtz (a) e di Gouy-Chapman (b) del doppio strato elettrico [5]

Il modello di Helmholtz assume che la capacità del doppio strato rimanga costante indipendentemente dalla variazione del potenziale applicato. Tuttavia, tale modello considera esclusivamente l'interazione reciproca tra l'elettrodo e lo strato assorbito, trascurando l'influenza della concentrazione dell'elettrolita. Di conseguenza, l'analisi teorica risulta in accordo con i dati sperimentali solo in condizioni di elettroliti altamente concentrati e per differenze di potenziale sufficientemente elevate. In tutti gli altri casi si rende necessario ricorrere a modelli più complessi e corretti.

I supercondensatori basati su questo principio sono denominati condensatori elettrochimici a doppio strato (Electrochemical Double-Layer Capacitors, EDLC) e costituiscono attualmente la tipologia più diffusa sul mercato.

Durante la fase di carica di un EDLC, gli elettroni vengono sottratti all'elettrodo positivo e forzati a transitare, attraverso un circuito esterno, verso l'elettrodo negativo. In risposta, gli ioni positivi presenti nell'elettrolita si accumulano sulla superficie dell'elettrodo negativo, mentre gli ioni negativi si dispongono in prossimità dell'elettrodo positivo, dando origine al doppio strato elettrico che compensa lo squilibrio di carica agli elettrodi (Figura 5.5).

Il fattore chiave per ottenere valori elevati di capacità è rappresentato dall'incremento della superficie specifica degli elettrodi e dalla riduzione della distanza tra le cariche di segno opposto. Per questo motivo, il materiale più comunemente utilizzato per gli elettrodi degli EDLC è il carbone attivo, caratterizzato da un'elevatissima area superficiale.

Le caratteristiche principali degli EDLC possono essere sintetizzate come segue:

- l'energia elettrica è immagazzinata mediante la separazione delle cariche nel doppio strato;
- gli elettrodi sono generalmente costituiti da carbonio o suoi derivati (ad esempio polveri pressate di carbone);
- l'accumulo avviene con un meccanismo puramente elettrostatico.

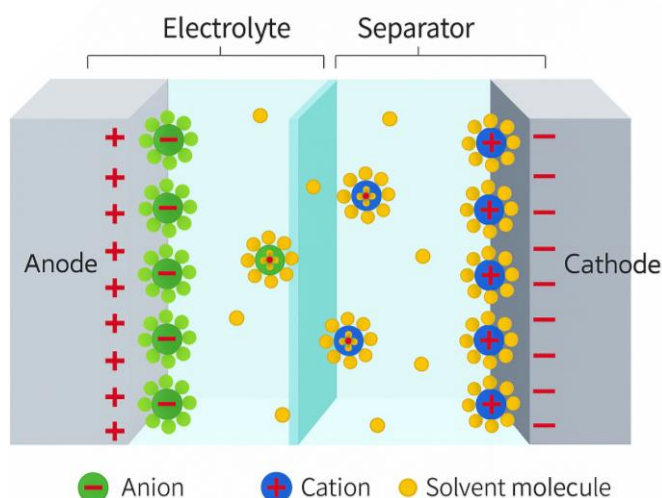


Figura 5.5: Rappresentazione del doppio strato elettrico [17]

II. PSEUDO-CONDENSATORI

La seconda categoria è costituita dai cosiddetti pseudo-condensatori, o supercondensatori faradici (PC). A differenza dei condensatori elettrochimici a doppio strato (EDLC), essi si basano su reazioni redox anziché sull'attrazione elettrostatica delle cariche.

Gli pseudo-condensatori sono oggi molto meno diffusi rispetto agli EDLC e soltanto pochi produttori ne hanno avviato la commercializzazione. Il loro principio di funzionamento risulta più simile a quello di una batteria che non a quello di un condensatore convenzionale.

La cosiddetta pseudo-capacità si manifesta quando, sulla superficie degli elettrodi, avvengono reazioni di ossidoriduzione che portano alla formazione di un sottile strato di ossido. In questo caso l'energia non viene immagazzinata sotto forma di energia elettrostatica, ma è associata ai legami chimici che si instaurano all'interfaccia elettrodo/elettrolita.

Il principale vantaggio di questi dispositivi è la maggiore densità energetica rispetto agli EDLC. Tuttavia, il meccanismo faradico comporta un maggiore stress sugli elettrodi durante i processi di carica e scarica, con conseguente accelerazione dei fenomeni di degradazione e riduzione della vita utile del dispositivo.

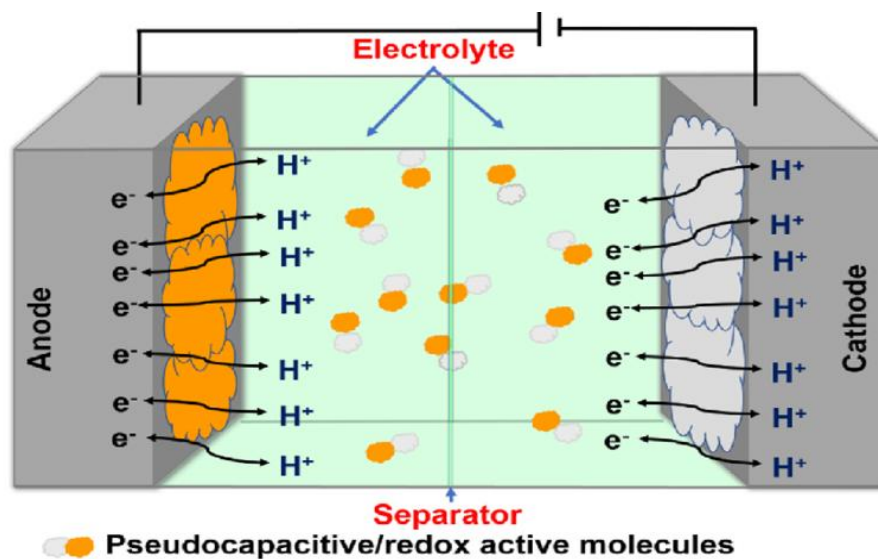


Figura 5.6: Rappresentazione schematica degli pseudo-condensatori

In Figura 5.6 è illustrato il passaggio di carica tra elettrolita ed elettrodo durante i processi di carica e scarica. Tale reazione redox, che coinvolge l'interfaccia elettrodo/elettrolita, è governata dalle proprietà termodinamiche del sistema e dalla finestra di potenziale operativa.

Quando si verifica la reazione redox, si attivano contemporaneamente sia il meccanismo di accumulo tipico degli EDLC sia quello caratteristico degli pseudo-condensatori (PC), a condizione che vengano selezionati materiali appropriati. Tra i più comuni si annoverano ossidi di metalli di transizione e materiali a base di carbonio.

Nel caso dei PC, la carica elettro-assorbita si combina con il potenziale dell'elettrodo, determinando l'entità del processo di assorbimento. In questo scenario, l'accumulo di carica non dipende più unicamente da meccanismi elettrostatici, ma è regolato dal trasferimento di elettroni, che diventa il fattore dominante rispetto al semplice accumulo superficiale di carica. È importante sottolineare che la pseudo-capacità non può manifestarsi senza la presenza preliminare del doppio strato elettrico, il quale fornisce gli ioni necessari al trasferimento di carica. Tale doppio strato si forma per effetto dell'attrazione elettrostatica tra le cariche presenti sugli elettrodi e gli ioni disciolti nell'elettrolita.

III. SUPERCONDENSATORI IBRIDI

La terza ed ultima categoria è rappresentata dai supercondensatori ibridi. Come suggerisce il nome, essi combinano le caratteristiche dei condensatori elettrochimici a doppio strato (EDLC) e degli pseudo-condensatori (PC).

Il principale vantaggio di questa configurazione risiede nella possibilità di ottenere elevate densità di energia insieme a correnti di scarica di alto valore. Negli ibridi, l'elettrodo negativo è generalmente costituito da un materiale a comportamento pseudo-capacitivo, che garantisce un'elevata densità energetica, mentre l'elettrodo positivo è solitamente realizzato in carbone attivo, accumulando energia nel doppio strato elettrico e consentendo il rilascio di correnti elevate.

Un ruolo cruciale è svolto anche dall'elettrolita, la cui concentrazione deve essere sufficientemente elevata per evitare eccessive variazioni dovute ai cicli di carica ripetuti. Una concentrazione troppo bassa rispetto alla superficie disponibile degli elettrodi ridurrebbe infatti la capacità complessiva del dispositivo. Importante è anche la conduttività dell'elettrolita, che influenza direttamente la resistenza interna e, conseguentemente, la potenza specifica. Inoltre, la natura dell'elettrolita determina la tensione massima operativa: gli elettroliti acquosi limitano la tensione a circa 1 V, mentre quelli organici permettono di raggiungere valori superiori, tipicamente intorno a 2.7 V o oltre. Tuttavia, la conduttività degli elettroliti organici è significativamente inferiore rispetto a quella degli elettroliti acquosi (fino a un rapporto di 1/50).

Nonostante i supercondensatori ibridi raggiungano densità di potenza elevate (circa 1000 W/kg con un'efficienza intorno al 95%), la loro capacità di potenza non cresce proporzionalmente all'aumento della densità energetica. La struttura di un supercondensatore ibrido è mostrata schematicamente in Figura 5.7: in esso coesistono simultaneamente i due meccanismi di accumulo, ossia la capacità elettrica a doppio strato e la capacità faradica. Gli elettrodi redox (di tipo batteria) garantiscono un'elevata densità di energia, mentre l'elettrodo capacitivo fornisce alta densità di potenza e ottima stabilità ciclica. L'insieme consente quindi un notevole incremento della densità energetica complessiva del dispositivo.

Nel settore dei condensatori ibridi, la ricerca scientifica e tecnologica ha portato allo sviluppo di soluzioni basate su ioni di litio e sodio, caratterizzate da alta tensione operativa e da una densità energetica superiore.

Le caratteristiche principali possono essere sintetizzate come segue:

- I supercondensatori ibridi rappresentano una combinazione dei due tipi fondamentali: EDLC e pseudo-condensatori;
- Gli elettrodi sono asimmetrici, poiché uno presenta comportamento elettrostatico e l'altro invece capacità elettrochimiche;
- La capacità totale è il risultato sinergico e inseparabile dei contributi dovuti sia al doppio strato elettrico sia ai fenomeni pseudo-capacitivi.

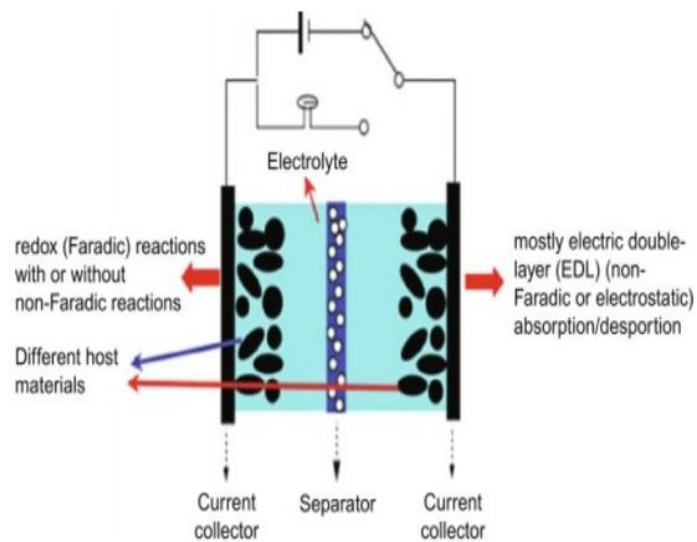


Figura 5.7: Rappresentazione schematica dei supercondensatori ibridi [17]

5.4. Caratteristiche costruttive

Una cella di supercondensatore è costituita da due elettrodi separati da un setto poroso, immersi in un elettrolita liquido. Gli elettrodi vengono definiti simmetrici quando presentano la stessa composizione, come nel caso degli EDLC, mentre si parla di configurazione asimmetrica nei supercondensatori ibridi. La Figura 5.8 mostra la struttura interna di un supercondensatore.

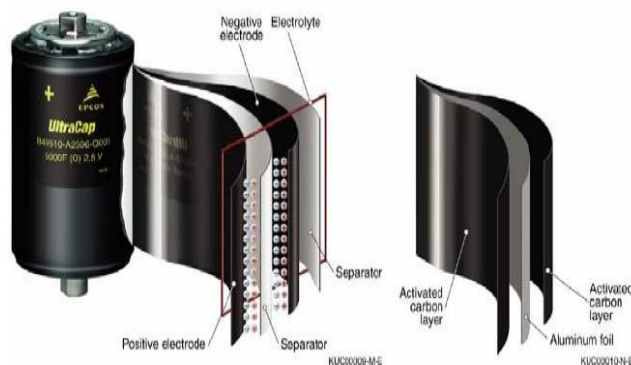


Figura 5.8: Struttura interna di un condensatore elettrostatico [7]

Il separatore ha la funzione di impedire il contatto diretto tra gli elettrodi, prevenendo cortocircuiti interni, e al tempo stesso deve essere permeabile agli ioni per consentire il trasferimento di carica. Per garantire elevate prestazioni, esso deve possedere alta conduttività ionica ed essere caratterizzato da uno spessore ridotto, unito a una resistenza elettrica elevata.

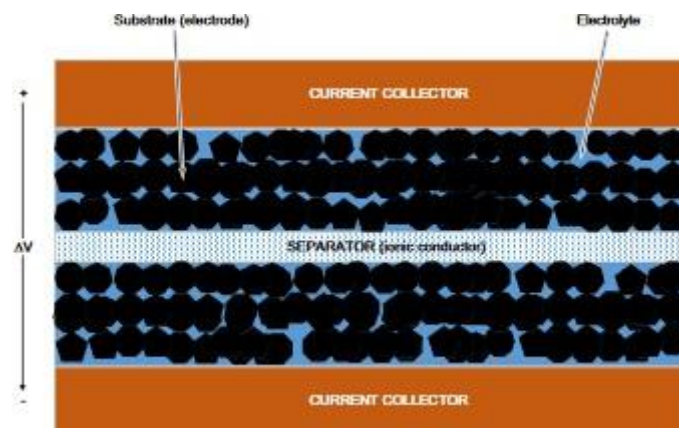


Figura 5.9: Rappresentazione schematica di un EDLC [5]

In Figura 5.9 è riportato lo schema di un condensatore elettrochimico a doppio strato con elettrodi in carbonio attivo immersi in un elettrolita acquoso.

Poiché la tensione di una singola cella è limitata, nelle applicazioni che richiedono elevate energie e potenze si ricorre all'associazione di più celle in serie e/o in parallelo, realizzando così un modulo. Tuttavia, le tensioni ai terminali delle singole celle possono differire a causa delle inevitabili disomogeneità nei parametri costruttivi. Tali squilibri possono avere conseguenze critiche: ad esempio, celle con capacità inferiore rischiano di essere sovraccaricate o sovrascaricate durante il funzionamento, con un rapido deterioramento o addirittura con rischio di

esplosione. Per prevenire tali fenomeni si impiegano circuiti di bilanciamento della tensione, che possono essere:

- Passivi, basati su resistori collegati in parallelo a ciascuna cella, i quali dissipano l'energia in eccesso. Si tratta di circuiti semplici ed economici, ma caratterizzati da bassa efficienza, pertanto utilizzati principalmente in applicazioni a bassa potenza.
- Attivi, che sfruttano convertitori di potenza per ridistribuire l'energia tra le celle, garantendo un'elevata efficienza e maggiore uniformità operativa.

Il materiale elettrodico riveste un ruolo cruciale nelle prestazioni di un supercondensatore. Le proprietà richieste includono:

- stabilità a lungo termine;
- elevato rapporto superficie/peso;
- resistenza ai processi di ossidoriduzione.

Il carbonio, in varie forme (polveri, fibre, tessuti) con superficie specifica fino a 2500 m²/g, rappresenta il materiale più largamente utilizzato grazie a:

- costi contenuti;
- ampia disponibilità commerciale;
- rapporti superficie/peso molto elevati;
- tecnologie di produzione mature.

Nei supercondensatori con elettrodi in carbonio, la capacità è attribuibile principalmente al processo di carica/scarica del doppio strato elettrico. Contributi addizionali di pseudo-capacità derivano dalla presenza di gruppi funzionali superficiali sui carboni attivi.

Un'alternativa è rappresentata dagli ossidi metallici, che offrono bassa resistività ed elevata capacità specifica, con conseguente potenziale incremento sia della densità di energia che di potenza. Tuttavia, il loro impiego è limitato dagli elevati costi di produzione. Il comportamento di supercondensatori con elettrodi in ossidi metallici non è riconducibile al solo doppio strato, ma deriva anche da una serie di reazioni redox superficiali. In particolare, gli ossidi di rutenio hanno suscitato notevole interesse per applicazioni militari, dove i costi risultano meno vincolanti. Ulteriori ricerche si sono concentrate sull'individuazione di materiali più economici, ma l'impiego di elettroliti acquosi a base di acidi concentrati limita significativamente le alternative, poiché la maggior parte degli ossidi metallici si dissolve rapidamente in tali ambienti.

In sistemi con elettrodi di ossidi metallici, l'elevata capacità specifica e la bassa resistività garantiscono valori molto elevati di densità di potenza, ma la tensione nominale rimane limitata a circa 1 V, essendo vincolata agli elettroliti acquosi. I guadagni in potenza sono dunque bilanciati dalle perdite dovute alla ridotta tensione operativa.

Un ulteriore approccio riguarda l'utilizzo di polimeri conduttori come materiale per gli elettrodi. Questi accumulano e rilasciano carica tramite reazioni redox: durante l'ossidazione gli ioni vengono incorporati nella matrice polimerica, mentre nella riduzione vengono rilasciati in

soluzione. A differenza del carbonio, l'accumulo non è limitato alla superficie, ma interessa l'intero volume dell'elettrodo, consentendo valori elevati di capacità specifica. Sono stati riportati per tali dispositivi risultati promettenti in termini di densità di potenza ed energia; tuttavia, la dilatazione e contrazione del polimero durante i cicli di carica/scarica provoca un progressivo deterioramento strutturale, limitandone la stabilità a lungo termine e la durata ciclica.

La composizione chimica dell'elettrolita incide anch'essa in modo determinante sulle caratteristiche del supercondensatore. L'elettrolita deve essere selezionato in funzione della tipologia di elettrodo, non solo in termini di materiale ma anche di dimensione dei pori. La tensione limite di cella dipende essenzialmente dalla tensione di dissociazione dell'elettrolita, mentre la densità di energia, correlata alla massima tensione applicabile, risulta quindi fortemente vincolata alla sua natura. La conduttività dell'elettrolita, inoltre, influenza la resistenza interna del dispositivo e, di conseguenza, la sua densità di potenza.

Si distinguono due principali categorie di elettroliti:

- Elettroliti acquosi: limitano la tensione operativa della cella a circa 1 V, riducendo quindi l'energia accumulabile rispetto agli organici. Presentano però vantaggi quali maggiore conduttività elettrica, minori vincoli produttivi e costi più bassi.
- Elettroliti organici: consentono tensioni operative più elevate (tipicamente 2.3 V, con picchi fino a 2.7 V). Alcuni produttori hanno sviluppato soluzioni innovative che, riducendo il contenuto di acqua e proteggendo gli elettrodi con rivestimenti specifici, permettono di raggiungere tensioni fino a 3.2 V. Tuttavia, questi elettroliti presentano conduttività notevolmente inferiore (anche 20–50 volte più bassa rispetto agli acquosi), con conseguente aumento della resistenza equivalente distribuita e riduzione della potenza erogabile. Tale svantaggio viene parzialmente compensato dalla maggiore tensione applicabile.

5.5. Parametri dei supercondensatori

Parametri elettrici:

a. Capacità

Gli ultracondensatori presentano valori di capacità tipicamente compresi tra pochi farad e diverse migliaia di farad, caratteristica che consente loro di immagazzinare e rilasciare quantità significative di carica elettrica.

b. Tensione nominale

La tensione nominale di un ultracondensatore può variare da pochi volt a diverse centinaia di volt, rappresentando il valore massimo di tensione operativa sicura.

c. Densità energetica

La densità energetica risulta generalmente inferiore rispetto a quella delle batterie elettrochimiche, ed è comunemente espressa in wattora per chilogrammo (Wh/kg) o wattora per litro (Wh/L).

d. Densità di potenza

Gli ultracondensatori si distinguono per l'elevata densità di potenza, che consente rapide operazioni di carica e scarica. Tale parametro è usualmente espresso in watt per chilogrammo (W/kg) o watt per litro (W/L).

e. Resistenza equivalente in serie (ESR)

Questi dispositivi sono caratterizzati da bassi valori di ESR, che favoriscono elevate velocità di carica e scarica, riducendo al minimo le perdite energetiche associate.

f. Ciclo di vita

Gli ultracondensatori offrono una vita utile molto estesa, con capacità di sopportare centinaia di migliaia, e in alcuni casi oltre un milione di cicli completi di carica e scarica.

Parametri termici:

a. Intervallo di temperatura di funzionamento

Gli ultracondensatori operano in modo efficiente entro un ampio intervallo di temperatura, generalmente compreso tra $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $+65\text{ }^{\circ}\text{C}$ (o superiore, a seconda del modello e della progettazione).

b. Autoriscaldamento

Durante le fasi di carica e scarica rapida si verifica un fenomeno di autoriscaldamento dovuto alla resistenza interna (ESR). Una gestione termica adeguata è pertanto fondamentale per preservare prestazioni e sicurezza nelle applicazioni ad alta potenza.

c. Fuga termica

In condizioni operative estreme o in caso di utilizzo improprio, gli ultracondensatori possono essere soggetti a fenomeni di fuga termica. Per questo motivo è essenziale rispettare i limiti di tensione e temperatura specificati dal costruttore.

d. Gestione termica

In applicazioni caratterizzate da elevata potenza e intenso consumo energetico, possono rendersi necessari sistemi di gestione termica — come soluzioni di raffreddamento o isolamento — al fine di mantenere condizioni operative ottimali e prolungare la durata del dispositivo.

5.6. Applicazioni di moduli di supercondensatori

In questo paragrafo viene proposta una panoramica delle principali applicazioni dei supercondensatori nei sistemi elettrici. L'interesse verso tali dispositivi deriva da diversi fattori, tra cui la possibilità di un utilizzo più efficiente delle risorse energetiche e un miglior dimensionamento degli impianti. È tuttavia necessario considerare che l'integrazione dei supercondensatori, unitamente ai convertitori di potenza necessari per l'interfacciamento con la rete, comporta un costo aggiuntivo che deve essere attentamente analizzato e valutato in funzione delle specifiche condizioni operative. In particolare, i benefici in termini di risparmio energetico risultano strettamente dipendenti dalla frequenza dei cicli di accelerazione e frenatura dei dispositivi alimentati dall'impianto elettrico. Ne consegue che, per ogni applicazione, è indispensabile condurre un'analisi tecnico-economica dedicata, volta a stimare il reale contributo dei supercondensatori in termini di efficienza, affidabilità e convenienza complessiva.

a) Applicazione dei supercondensatori nella generazione distribuita

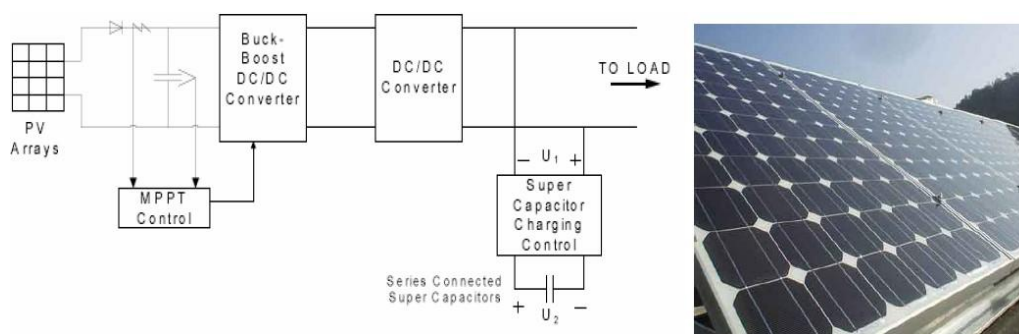


Figura 5.10: Applicazione di supercondensatori in sistemi di generazione distribuita [7]

Un tema di crescente interesse è rappresentato dalla generazione distribuita, ossia l'adozione di piccoli sistemi di produzione di energia elettrica installati in prossimità delle utenze e collegati a reti in media o bassa tensione (Figura 5.10). Tra le motivazioni che spingono verso questa direzione, un ruolo centrale è svolto dalla possibilità di valorizzare a livello locale fonti energetiche rinnovabili e a basso impatto ambientale, come l'energia solare e quella eolica. In tale contesto, l'impiego dei supercondensatori riveste particolare interesse per la loro capacità di compensare la discontinuità delle fonti primarie. Un esempio significativo è rappresentato dall'integrazione dei supercondensatori nei sistemi di generazione eolica: il loro inserimento a supporto della barra intermedia in corrente continua consente, durante i transitori, di attenuare le rapide fluttuazioni di potenza tipiche delle turbine eoliche, contribuendo così a una maggiore stabilità e affidabilità del sistema di produzione.

b) Livellamento dei carichi nei veicoli ibridi

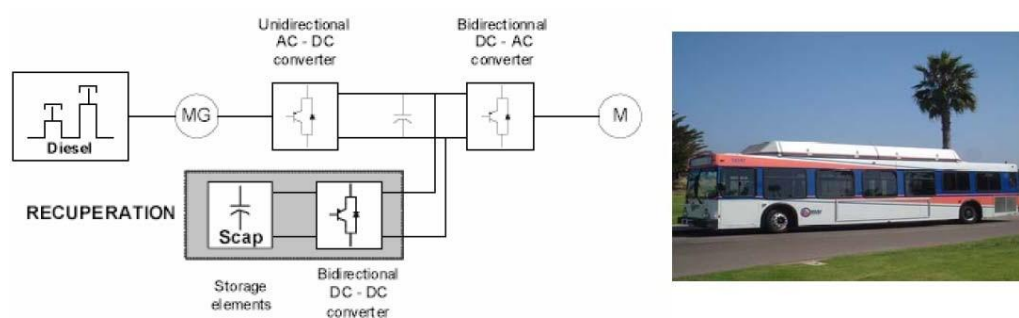


Figura 5.11: Utilizzo di supercondensatori su veicoli ibridi per il livellamento dei carichi [7]

c) Ricarica di mezzi di trasporto su strada

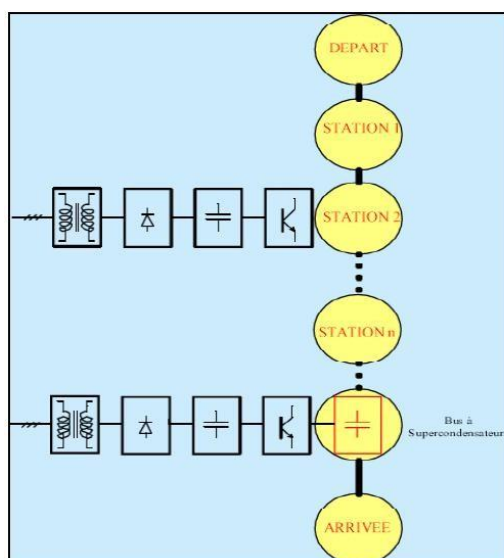


Figura 5.12: Schema di sistema per mezzi di trasporto stradali [7]

d) Recupero di energia in impianti di sollevamento

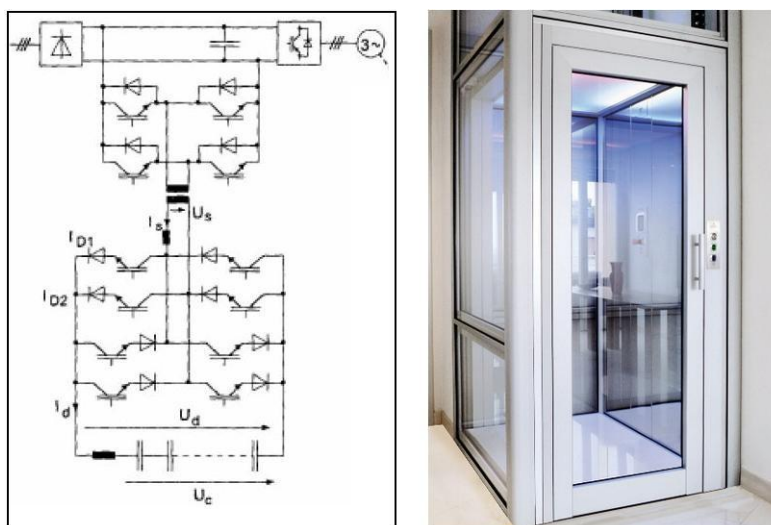


Figura 5.13: Schema di sistema per il recupero di energia in impianti di sollevamento [7]

e) Apparecchiature di diagnostica ospedaliera



Figura 5.14: Apparecchiature di diagnostica ospedaliera [7]

f) Frenatura con recupero di convogli metropolitani

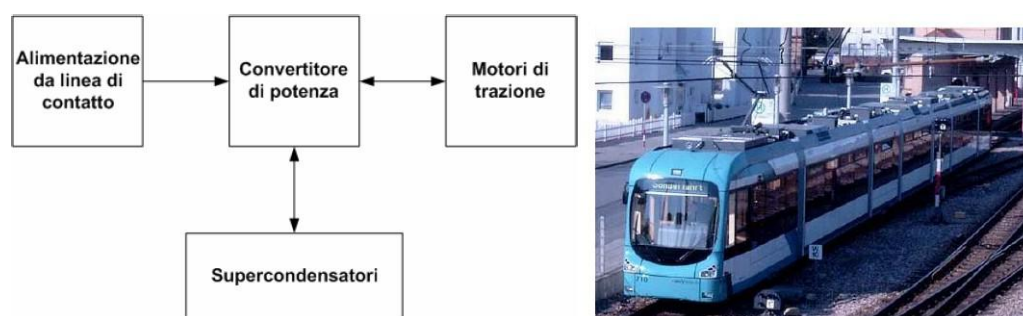


Figura 5.15: Schema di sistema impiegante supercondensatori su convogli metropolitani [7]

g) Compensazione della caduta di tensione in sistemi elettrici deboli



Figura 5.16: Applicazione dei supercondensatori come stabilizzatori della tensione [7]

h) Miglioramento della qualità della fornitura dell'energia elettrica

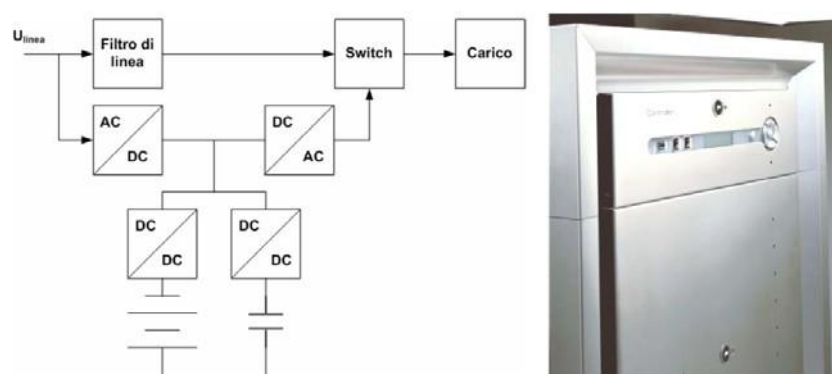


Figura 5.17: Applicazione di supercondensatori per il miglioramento della fornitura di energia elettrica [7]

6. MODELLI DEI SUPERCONDENSATORI

I supercondensatori sono dispositivi complessi, il cui comportamento richiede l'impiego di modelli semplificati per poterne analizzare in maniera efficace il funzionamento. In letteratura si distinguono principalmente due categorie di modelli:

- modelli basati sulla fisica, che descrivono in dettaglio i fenomeni elettrochimici e di trasporto all'interno della cella;
- modelli a circuito equivalente, che ne forniscono una rappresentazione elettrica semplificata.

Nel presente lavoro l'attenzione sarà rivolta ai modelli a circuito equivalente, poiché risultano più agevoli da implementare e, pur nella loro semplicità, consentono di ottenere previsioni sufficientemente accurate. Essi non descrivono in maniera esplicita le reazioni chimiche che avvengono all'interno della cella, ma permettono di riprodurre il comportamento elettrico in fase di carica e scarica.

Un buon modello a circuito equivalente dovrebbe rispettare alcuni requisiti fondamentali:

- garantire una rappresentazione accurata del comportamento del supercondensatore, in particolare nel breve termine;
- mantenere una struttura sufficientemente semplice da consentirne l'impiego in simulazioni in tempo reale;
- risultare adeguato alle scale temporali di interesse, tipicamente comprese tra alcuni secondi e pochi minuti.

6.1. Modelli a circuito equivalente

Il modello a circuito equivalente (Equivalent Circuit Model, ECM) rappresenta un approccio semplice, efficace e sufficientemente accurato per descrivere il comportamento dei supercondensatori (SC), a differenza dei modelli elettrochimici che, pur più dettagliati, richiedono un'elevata complessità computazionale. L'ECM può inoltre essere impiegato come strumento di analisi preliminare per evidenziare fenomeni non lineari legati ai processi di carica e scarica, alla ridistribuzione delle cariche e ai meccanismi di autoscarica, costituendo così un supporto essenziale prima dell'implementazione pratica dei supercondensatori in applicazioni reali.

In letteratura sono stati proposti numerosi modelli equivalenti, differenziati in funzione della specifica applicazione di riferimento. Nella maggior parte dei casi, la modellazione si basa su reti resistivo-capacitive (RC), il cui grado di complessità varia in relazione al livello di accuratezza richiesto.

Nel presente capitolo vengono introdotti alcuni tra i modelli di supercondensatori più noti, selezionati in base alla loro diffusione e rappresentatività:

- Modello RC in serie;
- Modello a due rami;
- Modello di Zubieta;
- Modello a rete di linee di trasmissione;
- Modello a rete a scala RC.

È importante sottolineare che la capacità effettiva di un supercondensatore tende a variare con la tensione applicata. Tra i modelli citati, quello RC in serie fornisce una descrizione molto semplificata del comportamento del componente, utile per analisi di base. Gli altri modelli, invece, introducono una maggiore accuratezza poiché consentono di scomporre la costante di tempo della cella in più contributi, rappresentandola tramite ramificazioni multiple che riflettono meglio i fenomeni reali.

6.1.1. Modello della serie RC

Il modello più semplice di circuito equivalente per un ultracondensatore è il modello RC in serie, costituito da un unico ramo RC. In Figura 6.1 è riportata la rappresentazione schematica di tale modello.

Esso è composto da:

- una resistenza R , che rappresenta le perdite ohmiche dell'ultracondensatore, comunemente indicate come Resistenza Equivalente Serie (ESR);
- un condensatore C , che simula la capacità della cella durante i processi di carica e scarica.

Il modello RC in serie introduce una sola costante di tempo caratteristica, pari al prodotto tra la resistenza e la capacità del dispositivo, che governa la dinamica complessiva della cella.

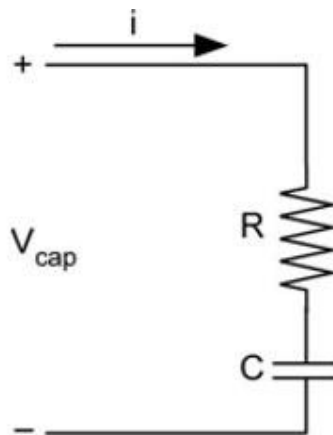


Figura 6.1: Modello classico della serie RC [17]

Il modello RC in serie viene impiegato principalmente per fornire una visione generale del comportamento di un ultracondensatore. Presenta tuttavia alcune limitazioni significative: in primo luogo, non tiene conto del fenomeno dell'autoscarica, poiché è caratterizzato da un'unica resistenza; in secondo luogo, non è in grado di rappresentare in maniera accurata i cicli di carica e scarica, nei quali si osservano variazioni di tensione sia in fase crescente che decrescente, non correttamente riproducibili con questa configurazione. D'altro canto, il vantaggio principale di questo modello risiede nella sua estrema semplicità, che lo rende facilmente implementabile e adatto per analisi preliminari o applicazioni in cui non è richiesta un'elevata accuratezza.

6.1.2. Modello a due rami

Il modello a due rami risulta più complesso rispetto al modello RC semplice. Come illustrato in Figura 6.2, esso prevede una suddivisione della costante di tempo, così da rappresentare in modo più accurato la dinamica del supercondensatore.

Il circuito equivalente è costituito da più rami, ciascuno dei quali contribuisce a descrivere specifici aspetti del comportamento del dispositivo. In particolare, il primo ramo comprende una resistenza e un condensatore a capacità variabile. Quest'ultimo è definito come la somma di due termini: una componente costante e una componente dipendente dalla tensione applicata. Tale capacità rappresenta il principale elemento di accumulo del modello, mentre la resistenza associata a questo ramo svolge la funzione di Resistenza Equivalente Serie (ESR).

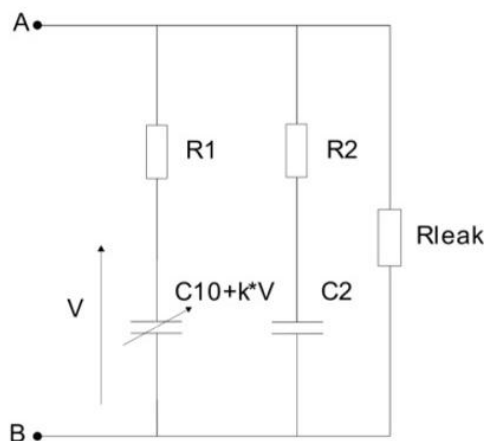


Figura 6.2: Modello a due rami [17]

- Il primo ramo è quello con la dinamica più rapida.
- Il secondo ramo ha dinamica più lenta, è nell'ordine dei minuti e non contiene termini variabili.
- Il terzo ramo è quello che rappresenta il fenomeno dell'autoscarica. Questo termine è effettivamente rilevante per la rappresentazione completa del componente. Tuttavia, questo modello viene utilizzato per rappresentazioni di un periodo generalmente più breve.

Solitamente, si semplifica questo modello eliminando il terzo ramo e ottenendo il modello di Figura 6.3. L'aumento della capacità, all'aumentare della tensione, implica anche un aumento dell'energia immagazzinata.

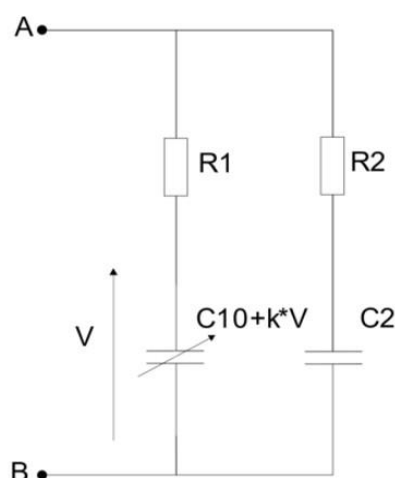


Figura 6.3: Modello a due rami semplificato [17]

6.1.3. Modello Zubieta

Il modello include tre rami RC in parallelo denominati ramo immediato, ramo ritardato e ramo a lungo termine, insieme a un resistore di dispersione, come mostrato in Figura 6.4.

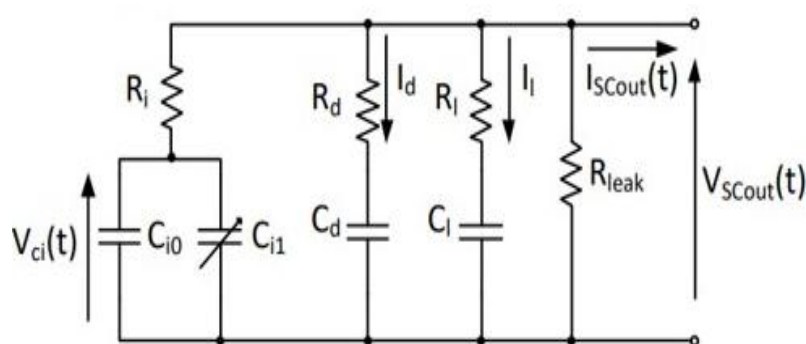


Figura 6.4: Modello Zubieta [17]

- Il ramo immediato, che include R_i , C_{i0} e un condensatore dipendente dalla tensione C_{i1} , viene utilizzato per descrivere il comportamento immediato del SC nell'intervallo di tempo dei secondi.
- Il ramo ritardato con R_d e C_d viene utilizzato per descrivere il comportamento del condensatore a scarica continua nell'intervallo di tempo dei minuti.
- Il ramo a lungo termine con R_i e C_i determina il comportamento per tempi superiori a dieci minuti.
- Il resistore di dispersione R_{leak} viene utilizzato per descrivere il fenomeno di autoscarica nell'intervallo di tempo delle ore.

6.1.4. Modello di rete delle linee di trasmissione

Il supercondensatore può essere rappresentato anche mediante un modello a linea di trasmissione, caratterizzato da una capacità distribuita e dipendente dalla tensione. In tale modello, la capacità aumenta con l'incremento della tensione applicata e si introduce una capacità apparente variabile nel tempo, dovuta alla distribuzione spaziale della carica elettrica e dell'energia elettrostatica.

Il modello a linea di trasmissione, con una corrente a gradino di intensità I , è riportato in Figura 6.5, dove la variabile x rappresenta la distanza lungo la linea. Rispetto al modello a tre rami, esso evidenzia una differenza nella quantità di carica immagazzinata o erogata dal supercondensatore, la quale risulta dipendente dal livello di corrente per una determinata variazione di tensione. In particolare, il modello mostra come l'energia e la carica erogabili siano inferiori rispetto a quanto previsto da modelli più semplici.

Sebbene il modello a linea di trasmissione offra una rappresentazione più accurata del comportamento reale del supercondensatore, la complessità della procedura di identificazione e lo sviluppo del relativo modello analitico ne limitano la diffusione. Per questo motivo, esso non trova ampia applicazione nelle simulazioni pratiche dei supercondensatori.

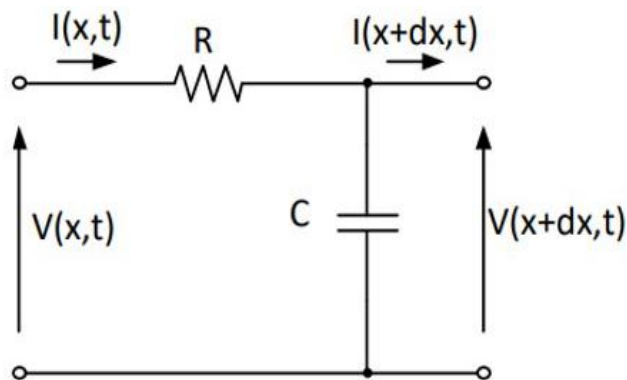


Figura 6.5: Modello delle linee di trasmissione [17]

6.1.5. Modello a scala multistadio

Il modello a scala multistadio per supercondensatori, derivato da misurazioni di spettroscopia di impedenza elettrochimica (EIS), è costituito da cinque stadi di Miller (Figura 6.6) e consente un'analisi in frequenza accurata fino a circa 10 kHz.

Nonostante l'elevata precisione nella caratterizzazione della dinamica in frequenza, i limiti temporali introdotti dai termini di ordine superiore rendono questo modello poco efficiente nelle simulazioni a lungo termine. Per ovviare a tale inconveniente è stato sviluppato un metodo di selezione automatica dell'ordine, che permette di adattare il modello a diverse bande di frequenza nelle simulazioni. Ogni ordine corrisponde a un intervallo di frequenza specifico, consentendo così di giustificare la scelta del livello di complessità della rete a scala. Questa ottimizzazione garantisce un compromesso ottimale tra accuratezza ed efficienza,

riducendo gli errori di calcolo e contenendo i tempi di simulazione in linea con il passo temporale richiesto.

I parametri del modello di ordine ridotto vengono ricavati dal modello a scala a cinque stadi, preservando l'accuratezza, pur semplificando il processo di simulazione. Nonostante questi vantaggi, l'identificazione dei parametri resta complessa e richiede un'analisi approfondita tramite spettroscopia di impedenza. Inoltre, la risposta in frequenza del modello può variare sensibilmente in funzione della tipologia di supercondensatore e delle condizioni operative, rendendo talvolta necessario un aggiustamento del numero di ordini per coprire l'intero spettro di frequenze e garantire l'adattabilità a scenari differenti.

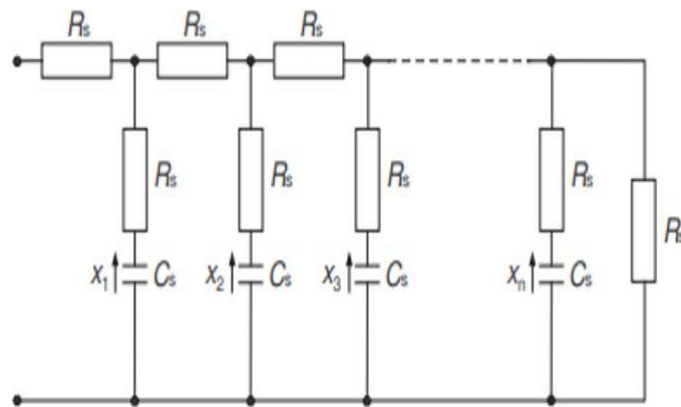


Figura 6.6: Modello a scala multistadio [17]

7. SUPERCONDENSATORI E BATTERIE A CONFRONTO

Risulta particolarmente utile analizzare il confronto tra supercondensatori e batterie elettrochimiche, poiché tali dispositivi presentano caratteristiche operative di natura complementare. Le batterie elettrochimiche si distinguono per l'elevata densità di energia, che le rende adatte ad applicazioni in cui è richiesta una prolungata autonomia, ma sono penalizzate da una bassa densità di potenza, che limita le capacità di erogazione immediata. Al contrario, i supercondensatori offrono una densità di energia relativamente ridotta, ma sono caratterizzati da una densità di potenza molto elevata, che li rende particolarmente idonei in contesti dove sono necessarie rapide fasi di carica e scarica. Le prestazioni delle due tecnologie di accumulo possono essere efficacemente messe a confronto mediante il piano di Ragone (densità di potenza vs densità di energia), riportato in Figura 7.1.

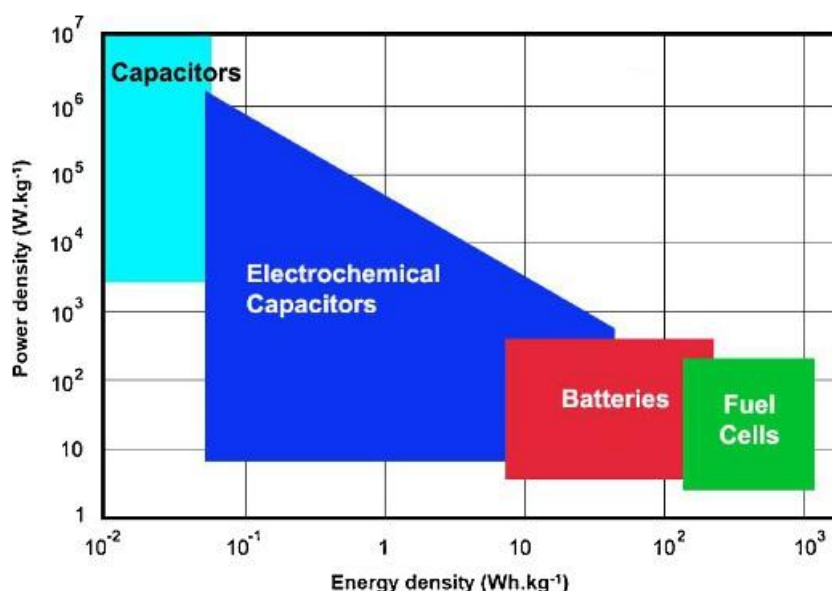


Figura 7.1: Piano di Ragone per diverse tecnologie di accumulo [5]

I supercondensatori sono dispositivi in grado di erogare correnti molto elevate se confrontati con le batterie convenzionali. Sebbene siano caratterizzati da una densità di potenza nettamente superiore, la loro densità di energia risulta significativamente inferiore, con valori generalmente compresi tra 3 e 30 volte più bassi rispetto a quelli delle batterie elettrochimiche. La potenza specifica in uscita, pur essendo inferiore a quella dei condensatori tradizionali, può comunque raggiungere valori dell'ordine dei 10 kW/kg. Queste peculiarità collocano i supercondensatori in una posizione intermedia tra i condensatori e le batterie, rendendoli dispositivi particolarmente versatili. È opportuno osservare che il diagramma di Ragone non tiene conto di ulteriori parametri fondamentali, quali costo, sicurezza e numero di cicli di vita, che devono essere considerati per una valutazione completa dei vantaggi e dei limiti delle diverse tecnologie di accumulo. Un ulteriore aspetto di rilievo è la capacità dei supercondensatori di scaricarsi in pochi secondi e, con la stessa rapidità, di essere nuovamente ricaricati. Questa caratteristica li rende ideali per applicazioni di recupero energetico, come nei sistemi di trasporto dove l'energia cinetica viene

recuperata in fase di frenata. Analogamente, la possibilità di effettuare ricariche ultrarapide consente, ad esempio, di alimentare sistemi di trazione urbana, con ricariche effettuate nelle brevi soste tra una fermata e la successiva.

La Tabella 7.1 offre un confronto tra condensatori, supercondensatori e batterie sui principali parametri finora menzionati.

Parametri	Condensatori	Supercondensatori	Batterie
Energia specifica [W h kg ⁻¹]	< 0,1	1-10	10-100
Potenza specifica [W kg ⁻¹]	> 10 000	500-10 000	< 1000
Tempo di scarica	10 ⁻⁶ -10 ⁻³	da s a min	0,3-3 h
Tempo di carica	10 ⁻⁶ -10 ⁻³	da s a min	1-5 h
Efficienza [%]	c.ca 100	85-98	70-85
Numero di cicli	Quasi infinito	> 500 000	c.ca 1000

Tabella 7.1: Confronto fra i principali parametri [5]

Dalla tabella si osserva come uno dei principali vantaggi dei supercondensatori risieda nella loro elevata durata di vita. I condensatori elettrochimici, infatti, possono sopportare migliaia di cicli di carica e scarica, poiché il meccanismo di accumulo della carica elettrica al doppio strato è di natura elettrostatica. Ciò consente di superare ampiamente la vita ciclica delle batterie elettrochimiche, che generalmente non superano alcune migliaia di cicli. L'accumulo altamente reversibile tipico dei supercondensatori non provoca variazioni di volume negli elettrodi, evitando così i rigonfiamenti derivanti dai processi redox che interessano i materiali attivi delle batterie durante i cicli di carica e scarica. Inoltre, l'accumulo elettrostatico non è soggetto ai limiti cinetici delle reazioni redox, permettendo di raggiungere le elevate densità di potenza già descritte in precedenza. Un'ulteriore conseguenza del differente meccanismo di accumulo è evidenziata dal confronto tra le curve di scarica a corrente costante di una batteria e di un supercondensatore, riportate in Figura 7.2.

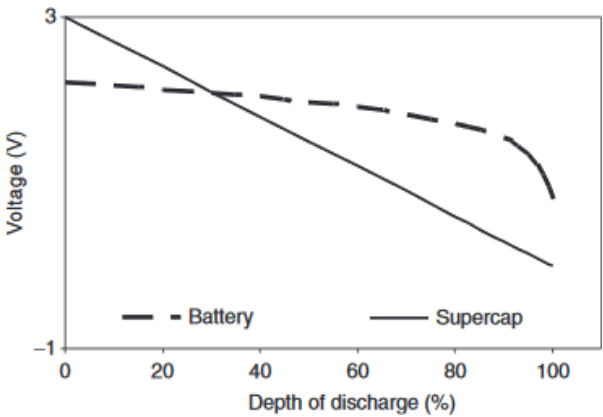


Figura 7.2: Differenza tra le curve di scarica di un supercondensatore e di una batteria [5]

La tensione ai morsetti di una batteria, determinata dalla tensione di equilibrio elettrochimico delle celle (tensione a circuito aperto), rimane pressoché costante durante gran parte della scarica. Al contrario, nei supercondensatori la tensione decresce linearmente con l'avanzare della scarica. Per tale motivo, quando la scarica viene regolata tramite convertitori elettronici, è prassi operare i supercondensatori entro un intervallo di tensione ridotto: in questo modo si evitano sia tensioni troppo basse (nel caso di scarica a corrente costante), sia correnti eccessive (nel caso di scarica a potenza costante) come ingresso al convertitore. Tuttavia, questa limitazione comporta una riduzione dell'energia effettivamente immagazzinabile nel sistema.

Nella Tabella 7.2 sono riassunte le differenze fin qui riportate tra batterie e supercondensatori.

PARAMETRO DI CONFRONTO	BATTERIE	SUPERCAP
Meccanismo di accumulo	Chimico	Fisico
Limiti di potenza	Cinetica delle reazioni, Trasporto di massa	Conduttività di elettrolita
Accumulo dell'energia	Elevato	Limitato
Velocità di carica	Limitata dalla cinetica	Alta
Limiti al numero di cicli	Stabilità meccanica, Reversibilità chimica	Reazioni parassite

Tabella 7.2: Confronto tra batterie e supercondensatori [5]

Un ulteriore aspetto di rilievo è rappresentato dal range di temperatura operativa dei supercondensatori. Essi, infatti, possono funzionare in maniera affidabile fino a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, mantenendo prestazioni elevate, un risultato attualmente non raggiungibile dalle batterie commerciali. Inoltre, i condensatori elettrochimici risultano generalmente più sicuri delle batterie nelle condizioni di carica e scarica rapide. In particolare, gli EDLC, non basandosi su reazioni chimiche che coinvolgono metalli, non sono soggetti al fenomeno del “metal plating”, uno dei principali meccanismi di degrado e guasto delle batterie, responsabile della formazione di cortocircuiti interni e di reazioni incontrollate ad alto contenuto energetico.

In sintesi, a differenza delle batterie, i supercondensatori immagazzinano energia tramite lo spostamento di carica e non attraverso reazioni chimiche. La loro relativamente bassa densità energetica deriva dal peculiare meccanismo di accumulo, che si basa sul confinamento degli elettroni su strati isolanti. La repulsione elettrostatica tra elettroni, tutti con carica negativa, limita l'efficienza dell'accumulo: un eccessivo incremento della densità di carica può infatti provocare la rottura dello strato dielettrico, con formazione di percorsi ionizzati che portano al rilascio incontrollato di elettroni. Questo fenomeno catastrofico rende necessario mantenere la densità energetica dei supercondensatori su valori relativamente contenuti. Le caratteristiche descritte rendono i supercondensatori particolarmente adatti ad applicazioni che richiedono elevati picchi

di potenza e/o un numero molto elevato di cicli di carica e scarica, come i sistemi di recupero energetico e le applicazioni in ambito veicolare o industriale.

Le batterie, al contrario, immagazzinano energia tramite processi elettrochimici che intrappolano elettroni all'interno dei materiali attivi. In questi sistemi, i protoni negli atomi sono disposti in modo tale da ridurre la pressione elettronica, favorendo la stabilità di configurazioni chimiche che permettono la coesistenza tra protoni ed elettroni. Tuttavia, tale legame chimico introduce vincoli significativi: i composti risultanti dipendono dal numero di elettroni coinvolti e le trasformazioni chimiche sono influenzate da fattori esterni quali temperatura, tempo e possibili reazioni che possono produrre composti impermeabili agli elettroni. La scelta dei materiali attivi, pertanto, costituisce un aspetto delicato e complesso, che mette in evidenza le sfide insite nei sistemi di accumulo elettrochimico. In Figura 7.3 sono elencate le principali differenze.

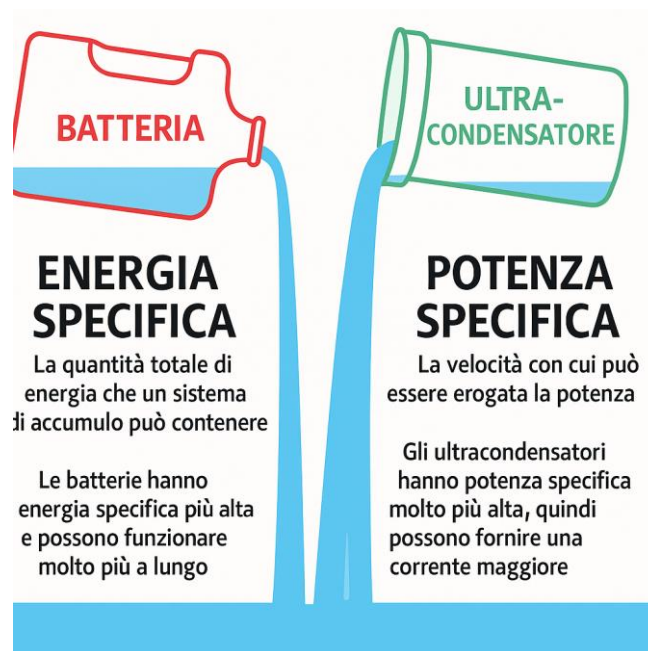


Figura 7.3: Principali differenze tra batterie e supercondensatori [17]

7.1. I supercondensatori possono sostituire le batterie?

La scelta tra batterie e supercondensatori dipende fortemente dall'applicazione prevista, poiché ciascuna tecnologia presenta vantaggi e svantaggi. Come discusso in precedenza, le batterie offrono una densità energetica molto più elevata rispetto agli ultracondensatori, risultando quindi più adatte per applicazioni che richiedono un'elevata autonomia o un funzionamento prolungato con una singola ricarica. Al contrario, gli ultracondensatori si distinguono per la densità di potenza superiore, che li rende ideali per applicazioni ad alto assorbimento energetico istantaneo, come ad esempio nei sistemi di trazione elettrica. Un ulteriore vantaggio degli ultracondensatori è la loro durata ciclica: mentre una batteria tradizionale può sopportare circa 2000–3000 cicli di carica-scarica, gli ultracondensatori superano generalmente il milione di cicli, con conseguenti risparmi in termini di materiali e costi di sostituzione. Essi risultano inoltre più sicuri e meno tossici rispetto alle batterie, poiché non contengono metalli pesanti né sostanze chimiche pericolose, e presentano un rischio significativamente ridotto di esplosione.

Dal punto di vista ambientale e operativo, i supercondensatori si caratterizzano per un ampio intervallo di temperatura di funzionamento (da $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+65\text{ }^{\circ}\text{C}$) e per una lunga durata di conservazione: alcuni modelli, come le celle SkelCap, possono essere stoccati fino a 15 anni con perdite minime o nulle di capacità. Sul piano economico, essi rappresentano una soluzione particolarmente vantaggiosa nelle applicazioni che richiedono brevi impulsi di energia, mentre le batterie risultano più idonee per fornire correnti costanti e di bassa intensità per lunghi periodi.

Un quesito frequentemente discusso è se gli ultracondensatori possano in futuro sostituire le batterie nei veicoli elettrici. In realtà, gli ultracondensatori si rivelano più idonei nei contesti in cui è richiesta potenza istantanea, come nei picchi di accelerazione. Ne sono un esempio la concept car Toyota Yaris Hybrid-R, che impiega supercondensatori per fornire energia supplementare durante l'accelerazione, e i sistemi start-stop sviluppati da PSA Peugeot Citroën per ridurre i consumi. Analogamente, il sistema I-ELOOP di Mazda utilizza supercondensatori per immagazzinare energia in fase di decelerazione, mentre alcuni autobus ibridi sfruttano tali dispositivi per ricariche ultrarapide alle fermate. Anche Lamborghini ha introdotto supercondensatori nei propri modelli ibridi ad alte prestazioni.

Nonostante ciò, i supercondensatori non rappresentano ancora una soluzione sostitutiva delle batterie nei veicoli elettrici di serie: è altamente probabile che le batterie agli ioni di litio rimangano la tecnologia dominante nel prossimo futuro. Gli ultracondensatori troveranno impiego con maggiore probabilità come sistemi di supporto, in grado di recuperare energia in frenata e restituirla nelle fasi di accelerazione.

Alcuni studi suggeriscono possibili sviluppi futuri. In particolare, ricerche condotte dalla Rice University e dalla Queensland University of Technology hanno dimostrato il potenziale dei supercondensatori a base di grafene. La struttura proposta, costituita da due strati di grafene separati da uno strato elettrolitico, ha dato origine a un film sottile, resistente e capace di erogare grandi quantità di energia in tempi estremamente ridotti. I ricercatori ipotizzano inoltre l'integrazione di tali dispositivi direttamente nei pannelli della carrozzeria, nel tetto, nei pavimenti e persino nelle portiere dei veicoli elettrici. In teoria, questa soluzione potrebbe non solo fornire al veicolo l'energia necessaria, ma anche ridurre significativamente il peso complessivo rispetto ai veicoli alimentati esclusivamente da batterie.

7.2. Sistemi ibridi batteria - supercondensatori

La progettazione e realizzazione di dispositivi di accumulo elettrochimico caratterizzati da maggiore densità di energia e potenza riveste un ruolo cruciale per numerosi settori applicativi, che spaziano dai dispositivi elettronici multifunzionali ai veicoli di trasporto, fino alle apparecchiature industriali.

In questo contesto, i sistemi ibridi batteria-supercondensatore (Battery-Supercapacitor Hybrid, BSH), illustrati in Figura 7.4, hanno suscitato notevole interesse grazie alle loro prestazioni superiori rispetto sia ai supercondensatori che alle batterie convenzionali. Tali sistemi combinano elettrodi capacitivi ad alta velocità con elettrodi di batteria ad alta capacità, offrendo così vantaggi peculiari quali elevata efficienza, costi contenuti, sicurezza operativa e processi produttivi ecocompatibili.

Gli ibridi batteria–supercondensatore rappresentano quindi un approccio innovativo all’accumulo di energia e alla gestione della potenza, poiché sono in grado di sfruttare i punti di forza di entrambe le tecnologie al fine di ottimizzare la densità energetica, la densità di potenza e le prestazioni complessive del sistema. Tra le possibili configurazioni, la combinazione di una batteria agli ioni di litio (LiB) con un ultracondensatore (UC) è spesso considerata la soluzione più efficace, in quanto garantisce un compromesso ottimale tra alta densità di energia, elevata densità di potenza e lunga durata operativa.

In tale configurazione ibrida, l’ultracondensatore fornisce la potenza necessaria durante i transitori dinamici (ad esempio accelerazioni e frenate), mentre la batteria eroga energia costante per garantire l’autonomia complessiva del sistema. Inoltre, nei sistemi di accumulo ibrido (Hybrid Energy Storage Systems, HESS), lo stress sulla batteria viene significativamente ridotto, poiché quest’ultima non è costretta a rispondere a richieste improvvise di potenza, con conseguente miglioramento della durata utile.

Sebbene la batteria rappresenti generalmente la scelta più conveniente in termini di densità energetica e costo per wattora, la richiesta di potenza in un veicolo elettrico presenta una natura intrinsecamente variabile: i picchi transitori si verificano soltanto nelle fasi di accelerazione e frenatura, e per intervalli di tempo relativamente brevi rispetto all’intera autonomia di guida. Per gestire efficacemente tali transitori, è quindi necessario un sistema di accumulo dotato di elevata capacità di accettazione dinamica della carica.

Infine, parametri quali durata di carica/scarica, costo complessivo e peso del sistema rappresentano criteri fondamentali da considerare nella selezione della tecnologia di accumulo più idonea per l’applicazione richiesta. In Figura 7.4 sono riportate le principali tipologie dei sistemi ibridi HESS. Il caso studio in esame utilizza una configurazione attiva parallela.

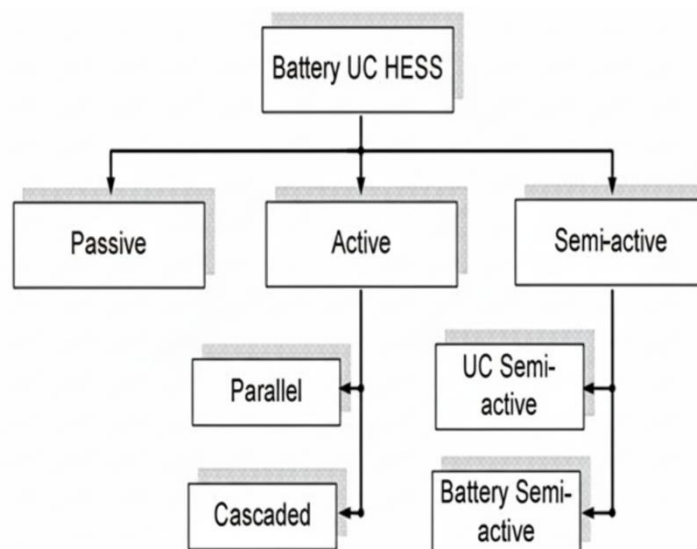


Figura 7.4: Classificazione dei sistemi HESS [17]

7.3. Architettura ibrida

Dall'analisi degli impieghi potenziali dei moduli di supercondensatori in ambito industriale emerge come tali dispositivi, pur essendo in grado di sostenere elevate potenze di picco, presentino una densità di energia troppo bassa per poter essere utilizzati come veri e propri sistemi di accumulo energetico autonomi.

Per questo motivo, in questo paragrafo vengono esaminati i possibili collegamenti tra batterie elettrochimiche e moduli di supercondensatori. L'ibridazione tra componenti tradizionali di accumulo consente infatti di combinare modalità differenti di stoccaggio dell'energia, sfruttando i vantaggi di ciascuna tecnologia e compensandone al contempo gli svantaggi.

In particolare, l'integrazione tra una batteria elettrochimica e un ultracondensatore permette di superare due limiti fondamentali: la bassa potenza specifica tipica delle batterie e la bassa energia specifica degli ultracondensatori. Il risultato è un sistema di accumulo innovativo, in grado di garantire contemporaneamente elevata energia specifica ed elevata potenza specifica.

Dal punto di vista funzionale, la tecnologia ibrida si basa su due “depositi” energetici complementari:

- il primo, costituito dalla batteria, caratterizzato da alta energia specifica;
- il secondo, rappresentato dal supercondensatore, con alta potenza specifica.

Durante i regimi operativi a forte richiesta di potenza (ad esempio nelle fasi di accelerazione), entrambi i sistemi contribuiscono all'alimentazione del convertitore di potenza, garantendo prestazioni superiori rispetto a quelle ottenibili con i singoli dispositivi (Figura 7.5).

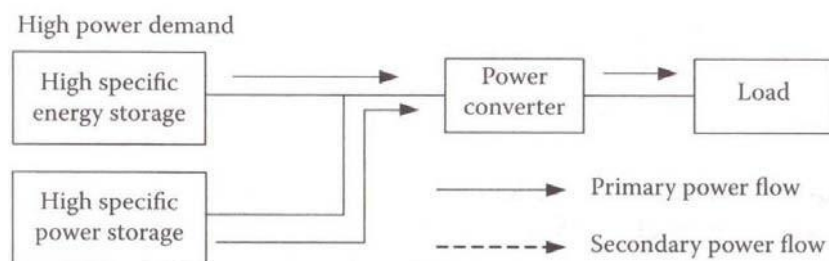


Figura 7.5: Alta richiesta di Potenza [7]

Quando, invece, la richiesta di potenza è contenuta – come nel funzionamento a regime – l'energia primaria alimenta direttamente il convertitore di potenza e, al tempo stesso, provvede alla ricarica del deposito ad alta potenza specifica (supercondensatore), precedentemente utilizzato nelle fasi transitorie (Figura 7.6).

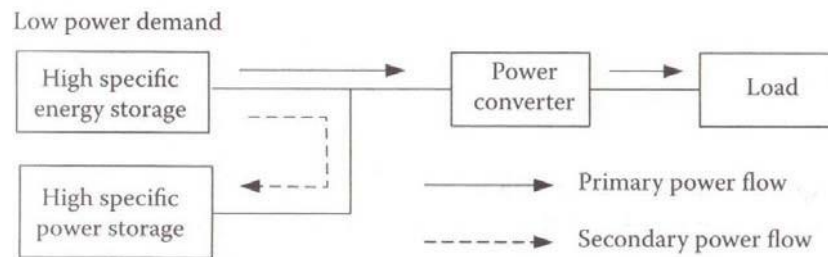


Figura 7.6: Bassa richiesta di Potenza [7]

Infine, durante la fase di frenata, quando la richiesta di potenza assume valori negativi, il picco rigenerativo viene assorbito principalmente dal deposito ad alta potenza specifica (supercondensatore), mentre solo una quota limitata dell'energia recuperata è destinata alla ricarica del deposito ad alta energia specifica (batteria), come si nota in Figura 7.7.

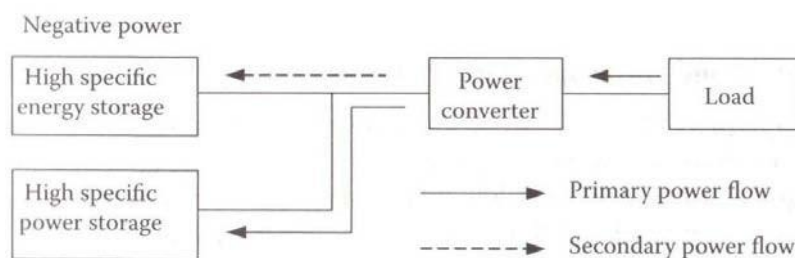


Figura 7.7: Frenata rigenerativa [7]

L'integrazione di batterie e supercondensatori consente di ottenere un sistema complessivo più compatto e leggero rispetto all'impiego separato delle due tecnologie di accumulo.

Come già evidenziato, le soluzioni oggi disponibili per l'accumulo elettrochimico di energia, ad eccezione dell'idrogeno, possono essere ricondotte a tre categorie principali:

- batterie tradizionali,
- batterie ibride,
- batterie ibride integrate con supercondensatori.

Quest'ultima configurazione rappresenta l'opzione più efficiente, in quanto l'ultracondensatore è in grado di fornire una densità di potenza nettamente superiore a quella delle batterie, collaborando al contempo con diverse tipologie di accumulatori per ottimizzare le prestazioni complessive del sistema.

Si osservano tre modalità di collegamento di una batteria con un supercondensatore:

I. Collegamento in parallelo diretto (passivo)

Il modo più semplice per unire la batteria e il supercondensatore risulta quello di collegare direttamente e parallelamente l'ultra-capacitore alle batterie (Figura 7.8).

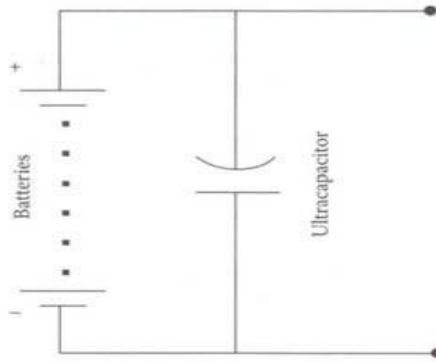


Figura 7.8: Collegamento parallelo diretto [7]

- Batteria e supercondensatore sono collegati direttamente in parallelo sullo stesso bus di tensione. Non è presente alcun convertitore DC/DC per disaccoppiare la batteria dall'ultracondensatore.
- Vantaggi:
 - Il supercondensatore assorbe/spinge rapidamente correnti impulsive,
 - La batteria fornisce energia più lentamente,
 - Riduzione dei costi,
 - Minima complessità dovuta all'assenza di qualsiasi interfaccia elettronica di potenza.
- Svantaggi:
 - Il flusso di potenza non può essere controllato attivamente,
 - L'energia del supercondensatore non può essere completamente utilizzata,
 - Se il supercondensatore si scarica troppo, la batteria può stressarsi.

II. Collegamento con convertitori DC/DC dedicati (attivo)

In alternativa, risulta possibile, come mostrato in Figura 7.9, collegare il pacco batterie al supercondensatore mediante l'utilizzo di un convertitore DC/DC a due quadranti. Il controllo attivo di questi due componenti migliora le prestazioni e la flessibilità complessive del sistema. Si prevede inoltre un notevole miglioramento del ciclo di vita della batteria.

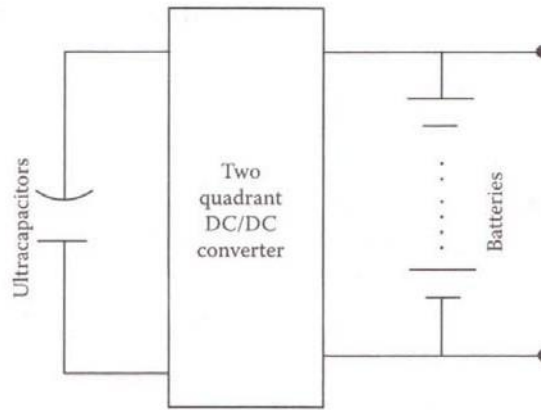


Figura 7.9: Collegamento Ultracapacitore – Convertitore DC/DC – Pacco Batterie [7]

Esistono due tipi di configurazioni HESS attive: la configurazione parallela attiva e quella a cascata. Nella configurazione HESS parallela attiva sia la batteria che l'UC sono isolati dal collegamento DC. Nella configurazione a cascata, il convertitore lato batteria è solitamente controllato in corrente, per prevenire elevate correnti di carica e scarica, mentre il convertitore lato UC è controllato in tensione per la regolazione uniforme della tensione del collegamento DC. Le perdite di potenza in questa configurazione sono solitamente elevate a causa delle grandi oscillazioni di tensione tra l'ultracondensatore e il collegamento DC.

- Vantaggi:
 - I flussi di potenza scambiati tra i componenti possono essere controllati attivamente,
 - L'energia nel supercondensatore può essere utilizzata pienamente
 - Tensione continua stabile,
 - Miglioramento dell'efficienza volumetrica degli ultracondensatori,
 - È l'architettura usata nei sistemi più moderni e sofisticati.

III. Collegamento in serie con gestione elettronica (meno comune)

Usato quando si vogliono gestire differenze di tensioni importanti tra batteria e supercondensatore, ma è complesso da controllare.

Nel progetto in esame verrà utilizzato il collegamento attivo, nel quale tra ciascun dispositivo di accumulo di energia sarà collegato un convertitore di potenza DC/DC, al fine di ottenere efficienza, flessibilità e affidabilità.

8. APPLICAZIONI DEI SISTEMI DI ACCUMULO IBRIDI

I sistemi di accumulo ibridi che combinano batterie e supercondensatori stanno emergendo come soluzioni promettenti per diverse applicazioni grazie alla loro capacità di unire l'elevata densità energetica delle batterie con l'elevata densità di potenza e la rapidità di risposta dei supercondensatori. Ecco una panoramica delle principali applicazioni:

I. MOBILITÀ ELETTRICA E TRASPORTO PUBBLICO

- Veicoli ibridi ed elettrici: l'integrazione di supercondensatori con batterie agli ioni di litio migliora le prestazioni in termini di accelerazione e autonomia. I supercondensatori forniscono potenza immediata durante l'accelerazione e recuperano energia durante la frenata rigenerativa, mentre le batterie gestiscono l'energia a lungo termine.
- Tram e metropolitane: in Cina, sistemi ibridi "supercondensatore + batteria al litio titanato" sono stati implementati in tram, permettendo la ricarica rapida alle fermate e migliorando l'efficienza energetica. Inoltre, dispositivi di accumulo ibridi sono stati testati nelle metropolitane di Pechino per recuperare energia di frenata e fornire alimentazione di emergenza.

II. SISTEMI DI ACCUMULO PER ENERGIE RINNOVABILI

- Aree remote: i sistemi di accumulo ibridi sono stati proposti per stabilizzare la fornitura di energia in aree isolate alimentate da fonti rinnovabili. Le batterie gestiscono l'energia a lungo termine, mentre i supercondensatori rispondono rapidamente alle variazioni di carico, migliorando l'affidabilità e la durata del sistema.

III. APPLICAZIONI RESIDENZIALI E INDUSTRIALI

- Accumulo domestico: i supercondensatori ibridi stanno emergendo come alternativa alle batterie tradizionali per l'accumulo di energia fotovoltaica domestica, offrendo maggiore sicurezza e longevità.
- UPS e illuminazione pubblica: sistemi ibridi sono utilizzati in gruppi di continuità (UPS) e nell'illuminazione pubblica per garantire un'alimentazione stabile e affidabile, sfruttando la rapidità di risposta dei supercondensatori.

IV. RICERCA E SVILUPPO

- Progetti europei: Il progetto LEFAPO, finanziato dall'UE, ha sviluppato un dispositivo che combina batterie agli ioni di litio con supercondensatori, offrendo una maggiore densità energetica e una durata prolungata, ideale per veicoli ibridi.
- Tesi accademiche: Studi universitari, come quelli dell'Università di Padova e del Politecnico di Torino, hanno esplorato l'applicazione di sistemi di accumulo ibridi in veicoli per il trasporto di persone, evidenziando i benefici in termini di efficienza energetica e prestazioni.

Nel contesto dello schema elettrico analizzato (sistema di accumulo ibrido con fotovoltaico, batterie e supercondensatori), le tipologie di carico che possono essere alimentate dipendono dalla configurazione dell'impianto e dalla capacità dei dispositivi di accumulo.

Di seguito, in Tabella 8.1, una panoramica sintetica in formato tabellare delle principali tipologie di carico, con le richieste tipiche di potenza e le considerazioni operative:

Tipologia di Carico	Esempi	Potenza Richiesta	Uso di Supercondensatori
Residenziale (domestico)	Elettrodomestici, illuminazione, pompe di calore	10 W – 3 kW	Picchi assorbiti dai supercondensatori
Industriale leggero / medio	Motori, CNC, saldatrici	5 – 500 kW	Carichi impulsivi e ciclici → supercap molto utili
Ricarica veicoli elettrici (EV)	Stazioni AC e DC	3.7 – 150 kW	Supercap riducono picchi su batterie nelle ricariche rapide
UPS e carichi critici	Server, ospedali, telecomunicazioni	2 – 500 kW	Supercap mantengono continuità durante transizioni
Microgrid / Applicazioni remote	Comunità isolate, rifugi, isole	5 kW – 1 MW	Gestione intelligente tra batteria e supercap necessaria

Tabella 8.1: Principali tipologie di carico del sistema

9. METODOLOGIE DI CONTROLLO

In questo capitolo vengono descritte alcune metodologie di controllo per sistemi di accumulo ibrido Batteria–Supercondensatore (HESS) in configurazione semi-attiva. Le ricerche incentrate sulla gestione energetica di tali sistemi si articolano principalmente in tre aree fondamentali, come schematizzato in Figura 9.1:

- **System Management:** riguarda il controllo e la gestione del duty cycle del convertitore DC/DC interfacciato al sistema di accumulo ibrido. Si tratta del livello di controllo a dinamica più rapida, con tempi dell'ordine dei microsecondi.
- **Power Management:** definisce la distribuzione della potenza tra i diversi componenti del sistema HESS, stabilendo quanta energia ciascuna unità debba fornire al carico. La dinamica di controllo corrisponde a tempi intermedi, tipicamente dell'ordine dei millisecondi.
- **Energy Management:** ha l'obiettivo di garantire un funzionamento sicuro e duraturo dei componenti, mantenendoli entro i limiti di temperatura operativa e assicurando che lo State of Charge (SOC) di ciascuna fonte rimanga nei valori corretti. Questo livello di gestione opera con la dinamica più lenta, dell'ordine dei secondi.

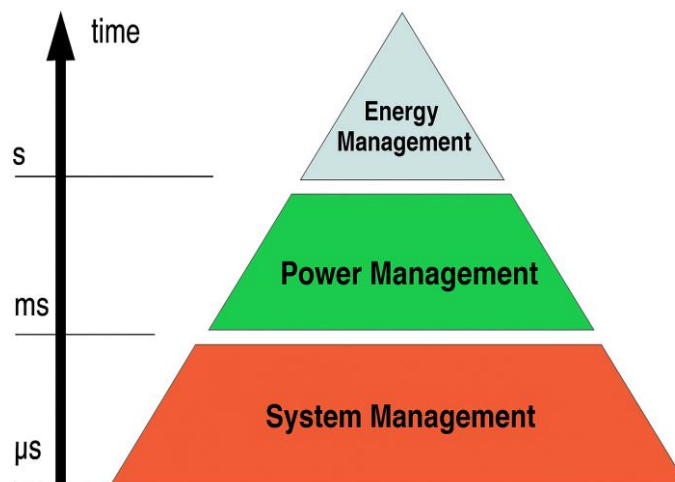


Figura 9.1: HESS Management [4]

9.1. Topologia del convertitore per l'interfacciamento

Un aspetto fondamentale del presente progetto consiste nella scelta del convertitore di potenza per l'interfacciamento del sistema ibrido batteria–supercondensatore. La funzione dei convertitori di potenza è quella di trasformare l'energia proveniente da forme alternative in energia direttamente utilizzabile dal carico, garantendo un corretto adattamento tra la sorgente e l'apparato di destinazione.

Essi rivestono un ruolo cruciale all'interno di un sistema elettrico, poiché devono svolgere la conversione minimizzando le perdite energetiche, assicurando al tempo stesso affidabilità, efficienza, ridotti costi e ingombri, nonché il rispetto dei requisiti di Power Quality.

Tra le diverse tipologie disponibili, i convertitori che meglio rispondono a tali esigenze sono i convertitori switching, nei quali il flusso di potenza viene regolato mediante il controllo dei tempi di conduzione (on) e interdizione (off) degli interruttori elettronici (switch). Tradizionalmente, tali dispositivi sono realizzati in silicio (Si), materiale abbondante in natura ma soggetto a limitazioni operative in termini di temperatura massima e frequenza di commutazione.

Le più recenti soluzioni si basano invece su materiali semiconduttori a wide bandgap, come il carburo di silicio (SiC) e il nitruro di gallio (GaN), i quali offrono migliori prestazioni in termini di velocità di commutazione e resistenza a temperature elevate, pur comportando un incremento dei costi di produzione. La scelta della tecnologia più idonea deve quindi essere effettuata sulla base di un compromesso tra prestazioni richieste e sostenibilità economica.

Una prima classificazione dei convertitori di potenza si basa sulle forme d'onda della corrente in ingresso e in uscita:

- DC/DC
- DC/AC (inverter)
- AC/DC (raddrizzatori)
- AC/AC (cicloconvertitori e trasformatori elettronici)

Per l'interfacciamento del sistema ibrido batteria–supercondensatore, oggetto di studio, l'attenzione sarà rivolta in particolare ai convertitori DC/DC, le cui caratteristiche specifiche verranno analizzate nelle sezioni successive.

9.2. I convertitori DC/DC

Nella maggior parte dei convertitori DC/DC, la conversione da corrente continua in ingresso a corrente continua in uscita avviene applicando una tensione continua a un induttore per un intervallo di tempo sufficiente a consentirgli di immagazzinare energia magnetica. Una volta disalimentato, l'induttore rilascia tale energia verso l'uscita in modo controllato.

Questo processo si realizza tramite il passaggio ciclico dello switch tra gli stati di conduzione (on) e interdizione (off). La periodicità di tale sequenza definisce il periodo di commutazione (switching period, T_{sw}). Il rapporto tra il tempo di conduzione dello switch (T_{on}) e il periodo di commutazione è detto duty cycle, espresso come:

$$D = \frac{T_{on}}{T_{sw}} \quad (9.1)$$

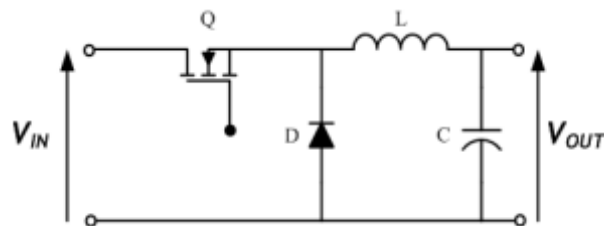
I principali componenti di un convertitore DC/DC sono:

- lo switch (interruttore elettronico di potenza),
- il diodo,
- l'induttore,
- il condensatore.

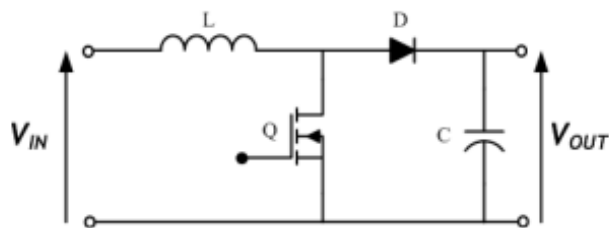
Combinando opportunamente questi elementi, si ottengono le configurazioni fondamentali di un convertitore DC/DC:

- Buck (step-down),
- Boost (step-up),
- Buck-Boost,

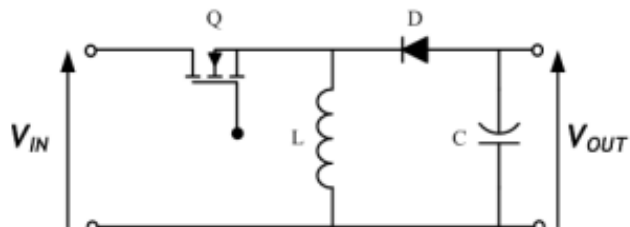
illustrate in Figura 9.2 (a), (b) e (c).



(a) Topologia Buck



(b) Topologia Boost



(c) Topologia Buck-Boost

Figura 9.2: Convertitori DC/DC [22]

La crescente diffusione dei convertitori switching è dovuta anche alla loro struttura circuitale semplice. Inoltre, la tecnologia di conversione a commutazione garantisce un'elevata efficienza (generalmente compresa tra l'80% e il 95%), a differenza dei tradizionali alimentatori lineari. Lo svantaggio principale è rappresentato dal rumore elettromagnetico generato dalle rapide variazioni di corrente, che tuttavia può essere mitigato mediante l'impiego di opportuni filtri di soppressione.

Per massimizzare l'efficienza complessiva, i componenti principali devono rispettare precise caratteristiche: l'induttore deve presentare perdite minime, il diodo deve garantire una commutazione rapida, mentre il condensatore deve essere caratterizzato da una bassa resistenza serie equivalente (ESR).

Dal punto di vista funzionale:

- i convertitori Buck hanno lo scopo di fornire in uscita una tensione inferiore rispetto a quella di ingresso;
- i convertitori Boost svolgono la funzione inversa, innalzando la tensione in uscita;
- i convertitori Buck-Boost possono operare in entrambe le modalità, a seconda delle condizioni operative del sistema.

Per l'applicazione oggetto di studio è richiesta la bidirezionalità in corrente, ovvero la capacità di trasferire energia in entrambe le direzioni. Tale requisito risulta difficilmente realizzabile mediante un unico circuito; per questo motivo, la soluzione più immediata consiste nel separare le funzioni, adottando due circuiti distinti.

Infine, quando è necessario soddisfare requisiti di tensione molto differenti tra ingresso e uscita, è consigliabile ricorrere a un trasformatore, così da garantire un adeguato adattamento dei livelli energetici. Ne consegue che la definizione della configurazione ottimale del convertitore dipende da una pluralità di fattori, che devono essere accuratamente bilanciati in funzione della specifica applicazione.

9.3. Topologia Half-Bridge Interleaved

Il convertitore in esame appartiene alla categoria “Bridge”, che comprende le topologie Half-Bridge e Full-Bridge. Entrambe generano una forma d’onda quasi quadrata sull’avvolgimento di un trasformatore senza necessità di componenti in continua, garantendo al contempo un elevato isolamento galvanico tra ingresso e uscita.

La topologia Half-Bridge è generalmente utilizzata in applicazioni a modesto assorbimento di potenza (tipicamente 50–300 W). Essa presenta un numero ridotto di componenti e un controllo più semplice dei power devices driver rispetto alla Full-Bridge. Quest’ultima, pur richiedendo un numero maggiore di dispositivi e un layout circuitale più complesso, consente di applicare ai trasformatori l’intera tensione d’ingresso. Di conseguenza, a parità di potenza trasferita, gli Half-Bridge lavorano con correnti doppie rispetto ai Full-Bridge, mentre questi ultimi sono più indicati per applicazioni con ampio range di potenza (100–600 W). Entrambe le soluzioni garantiscono un utilizzo ottimale del trasformatore, un buon isolamento e la possibilità di gestire uscite multiple.

Un’ulteriore caratteristica del convertitore in esame è l’interleaving. Il convertitore Half-Bridge interleaved è costituito da più rami identici collegati in parallelo, ciascuno formato da due interruttori attivi (tipicamente MOSFET o IGBT) disposti in configurazione Half-Bridge e da un induttore connesso tra il nodo centrale del ponte e il nodo comune verso il carico o un’altra sorgente. Questo convertitore può operare sia in modalità step-down (Buck), trasferendo energia dal bus DC al supercondensatore, sia in modalità step-up (Boost), trasferendo energia dal supercondensatore al bus DC o al carico.

La tecnica di interleaving consiste nello sfalsare i segnali PWM dei vari rami di un angolo φ , definito come segue:

$$\varphi = \frac{360^\circ}{n} \quad (9.2)$$

dove n è il numero di rami in parallelo. Ad esempio, in un sistema a tre rami i segnali risultano sfalsati di 120° . Ciò comporta:

- una significativa riduzione del ripple di corrente,
- una frequenza apparente del ripple moltiplicata per il numero di rami,
- la possibilità di utilizzare induttori e condensatori di dimensioni ridotte.

Nel contesto dell’interfacciamento ibrido batteria–supercondensatore, il convertitore Half-Bridge interleaved bidirezionale consente una gestione dinamica ed efficiente dei flussi energetici: la batteria, caratterizzata da un’elevata capacità energetica ma da una risposta più lenta, viene affiancata dal supercondensatore, in grado di assorbire ed erogare rapidamente potenza durante i transitori (accelerazioni e frenate rigenerative). In tal modo, il convertitore regola lo scambio di energia tra i due sistemi di accumulo, migliorando le prestazioni complessive e prolungando la vita utile della batteria.

I principali vantaggi dei convertitori interleaved possono essere così sintetizzati:

- suddivisione della corrente (I/n),

- riduzione delle dimensioni e delle emissioni elettromagnetiche,
- incremento dell'efficienza del sistema,
- miglioramento della risposta ai transitori,
- maggiore affidabilità,
- riduzione dell'ondulazione della corrente in ingresso e della tensione in uscita,
- possibilità di ridurre la capacità di uscita,
- elevata densità di potenza,
- migliore gestione termica.

In Figura 9.3 è riportata la topologia di un convertitore DC/DC Half-Bridge Interleaved a due fasi:

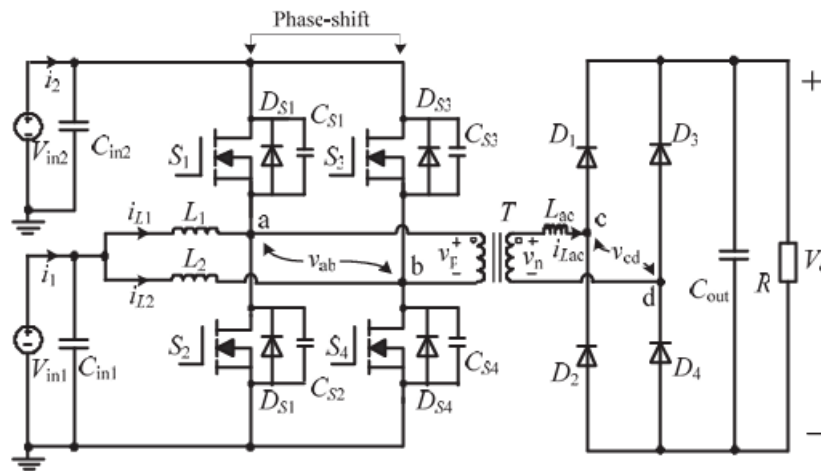


Figura 9.3: Topologia del convertitore DC/DC Half-Bridge interleaved a due fasi [35]

Il circuito è costituito da due sezioni boost Half-Bridge interleaved, un trasformatore e un raddrizzatore a ponte di diodi. L'elemento di interfaccia tra i due lati del trasformatore è un induttore AC, che rappresenta la combinazione dell'induttanza di dispersione e di quella ausiliaria. La regolazione della tensione di uscita e il decoupling dei due ingressi sono ottenuti mediante un controllo di sfasamento. In Figura 9.4 sono invece illustrate le rispettive forme d'onda tipiche di tensione e corrente.

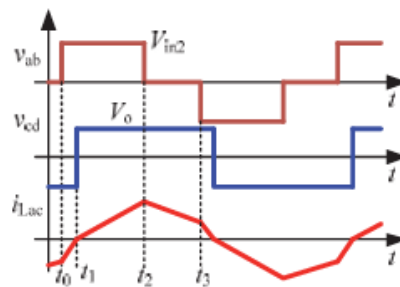


Figura 9.4: Forme d'onda tipiche [35]

9.4. Strategia di controllo del convertitore

La strategia di controllo adottata è stata progettata in modo tale che, durante le richieste di picco di potenza da parte del carico, il convertitore operi in modalità Boost, così da stabilizzare la tensione del dc-link. In questo caso, l'errore tra la tensione del dc-link e la tensione della batteria viene utilizzato come segnale di ingresso per un controllore PI, il quale genera la corrente di riferimento che deve essere seguita dalla corrente che attraversa l'induttore del convertitore. Successivamente, al termine di ciascun picco di potenza, il convertitore passa in modalità Buck per consentire la ricarica dei supercondensatori. In questa fase, l'errore in ingresso al controllore PI è rappresentato dalla differenza tra la tensione di riferimento dei supercondensatori e la tensione effettivamente misurata ai loro capi.

Lo schema a blocchi del controllo implementato è riportato in Figura 9.5.

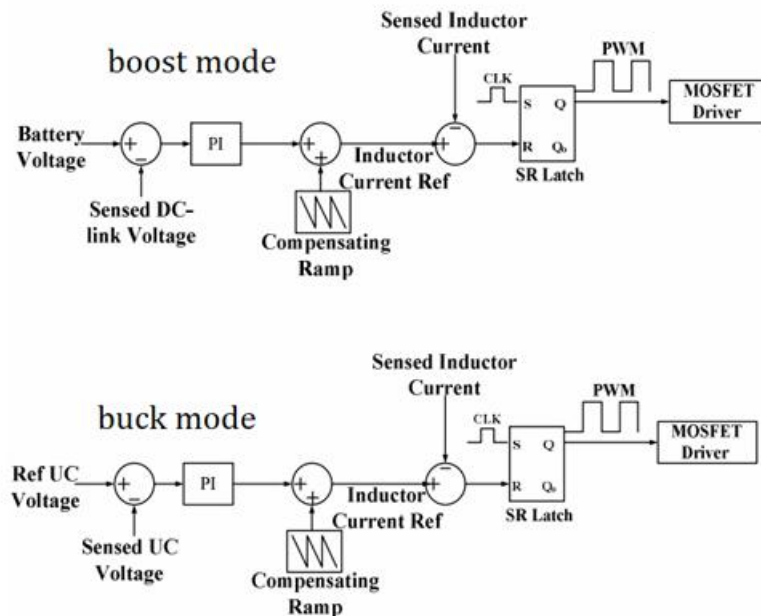


Figura 9.5: Schema di controllo del convertitore [4]

In sostanza, il sistema di controllo ha il compito di pilotare il convertitore DC/DC affinché la ripartizione della potenza richiesta tra i diversi componenti del sistema risulti ottimale. Ciò avviene mediante un controllo in corrente. Ne consegue l'adozione di una strategia di gestione della potenza basata proprio sul controllo della corrente del convertitore interfacciato ai supercondensatori, la quale consente di garantire un funzionamento dinamico ed equilibrato del sistema ibrido.

10. METODOLOGIE DI GESTIONE DELL'ENERGIA

Il Power Management System (PMS), ovvero il sistema di gestione dell'energia, è implementato all'interno del blocco di controllo con lo scopo di regolare il flusso di potenza tra i diversi componenti del sistema HESS. Tale sistema raccoglie in tempo reale le informazioni provenienti sia dalle sorgenti energetiche sia dai carichi, per poi elaborare le decisioni più opportune volte a garantire un'ottimale gestione dell'energia.

Gli obiettivi principali del PMS possono essere così sintetizzati:

- ridurre lo stress dinamico sulla batteria, limitandone le sollecitazioni nei transitori di potenza;
- regolare la tensione del bus DC durante le variazioni delle sorgenti e dei carichi;
- prevenire fenomeni di scarica profonda della batteria, che ne comprometterebbero la durata operativa;
- migliorare l'efficienza complessiva del sistema ibrido di accumulo.

10.1. PMS per carico generico alimentato da fotovoltaico

Il diagramma di flusso del Power Management System (PMS) è riportato in Figura 10.1. La logica di gestione prevede in particolare due scenari distinti, in funzione della domanda di potenza richiesta dal carico:

- **Scenario di deficit di potenza (DPS):** si verifica quando la potenza generata dal sistema fotovoltaico risulta inferiore alla potenza totale richiesta dal carico. In tale condizione, il fabbisogno energetico mancante viene coperto dalle unità di accumulo. I diversi casi operativi e le relative azioni di controllo sono riportati in Tabella 10.1.
- **Scenario di surplus di potenza (SPS):** si manifesta quando la potenza generata dal fotovoltaico è superiore alla potenza richiesta dal carico. In questa situazione, l'energia in eccesso viene utilizzata per la ricarica delle unità di accumulo. I casi specifici e le relative azioni sono dettagliati in Tabella 10.2.

Caso	SOCs	Azioni
1	$SOC_{bat} > 10\%$ e $SOC_{sc} > 85\%$	<ul style="list-style-type: none"> - Il fotovoltaico (PV) fornisce la sua potenza media disponibile; - La batteria fornisce la potenza mancante rispetto al fabbisogno medio; - Il supercondensatore (SC) gestisce la domanda di potenza transitoria.
2	$SOC_{bat} < 10\%$ e $SOC_{sc} > 85\%$	<ul style="list-style-type: none"> - Il PV fornisce la sua potenza media disponibile; - Il SC soddisfa la domanda di potenza transitoria; - Nessuna azione da parte della batteria.
3	$SOC_{bat} > 10\%$ e $SOC_{sc} < 85\%$	<ul style="list-style-type: none"> - Il PV fornisce la sua potenza media disponibile; - La batteria fornisce la potenza mancante rispetto al fabbisogno medio; - Nessuna azione da parte dell'SC.
4	$SOC_{bat} < 10\%$ e $SOC_{sc} < 85\%$	<ul style="list-style-type: none"> - Il PV fornisce la sua potenza media disponibile; - Nessuna azione da parte della batteria e dell'SC.

Tabella 10.1: Scenario di Deficit di potenza (DPS) [30]

Caso	SOCs	Azioni
1	$SOC_{bat} < 90\%$ e $SOC_{sc} < 95\%$	<ul style="list-style-type: none"> - Il fotovoltaico (PV) fornisce l'intero fabbisogno medio di potenza; - L'energia fotovoltaica in eccesso viene utilizzata per caricare le unità di accumulo fino ai limiti massimi di sicurezza; - Il supercondensatore (SC) soddisfa la domanda di potenza transitoria.
2	$SOC_{bat} > 90\%$ e $SOC_{sc} < 95\%$	<ul style="list-style-type: none"> - Il PV fornisce l'intero fabbisogno medio di potenza; - Il surplus di energia PV è usato per caricare l'SC fino al suo limite massimo di sicurezza; - L'SC soddisfa la domanda di potenza transitoria; - Nessuna azione da parte della batteria.
3	$SOC_{bat} < 90\%$ e $SOC_{sc} > 95\%$	<ul style="list-style-type: none"> - Il PV fornisce l'intero fabbisogno medio di potenza; - L'energia PV in eccesso viene utilizzata per caricare la batteria fino al suo limite massimo di sicurezza; - Nessuna azione da parte dell'SC.
4	$SOC_{bat} > 90\%$ e $SOC_{sc} > 95\%$	<ul style="list-style-type: none"> - Il PV fornisce l'intero fabbisogno medio di potenza; - Nessuna azione da parte di batteria e SC.

Tabella 10.2: Scenario di Surplus di potenza (SPS) [30]

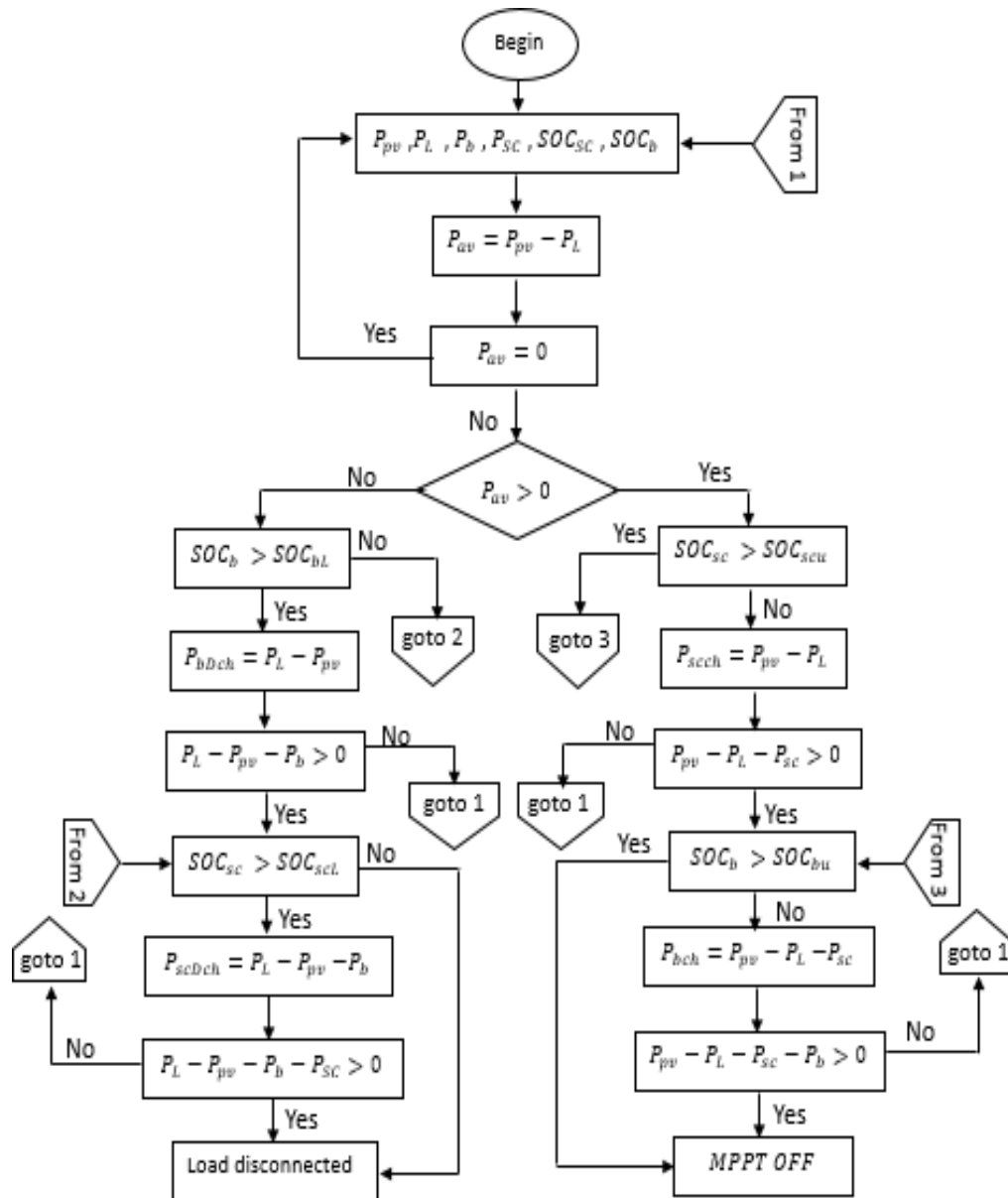


Figura 10.1: Flowchart del PMS [6]

Dove:

- P_{pv} , P_L rappresentano la potenza fotovoltaica e la potenza del carico;
- V_{Bat} , P_{Bat} , I_{Bat} , SOC_b rappresentano rispettivamente tensione, potenza, corrente e stato di carica della batteria;
- V_{sc} , P_{sc} , I_{sc} e SOC_{sc} rappresentano rispettivamente tensione, potenza, corrente e stato di carica del supercondensatore;
- $P_{b,Dch}$ è la potenza fornita dalla batteria quando si scarica per contribuire al carico;
- $P_{sc,ch}$ è la potenza usata per caricare il supercondensatore;
- $P_{b,ch}$ è la potenza usata per caricare la batteria;
- SOC_{scl} è il limite minimo di carica accettabile per il supercondensatore;
- SOC_{scu} è il limite massimo di carica accettabile per il supercondensatore.

ALGORITMO DI CONTROLLO:

1. Inizio

Il sistema legge i parametri:

- P_{pv} : potenza dal fotovoltaico
- P_L : potenza richiesta dal carico
- P_b : potenza della batteria
- P_{sc} : potenza del supercondensatore
- SOC_{sc} : stato di carica del supercondensatore
- SOC_b : stato di carica della batteria

2. Bilancio potenza

Calcola:

$$P_{av} = P_{pv} - P_L$$

- Se $P_{av} = 0$, la potenza solare copre esattamente il carico, quindi nessuna azione.
- Se $P_{av} > 0$, energia in eccesso, che quindi può essere immagazzinata.
- Se $P_{av} < 0$, energia insufficiente, quindi serve supporto da batteria e/o supercondensatore.

3. Gestione dell'energia in eccesso ($P_{av} > 0$)

- Se $SOC_{sc} > SOC_{scu}$ (cioè SC è carico oltre la soglia), carico energia nella batteria ($P_{b,ch}$).
- Se $SOC_{sc} < SOC_{scu}$, prima si carica il supercondensatore ($P_{sc,ch}$), poi la batteria.
- Se la batteria è già piena ($SOC_b > SOC_{bu}$), e l'energia non può essere stoccata, MPPT OFF (disattiva l'inseguimento del punto di massima potenza del fotovoltaico).

4. Gestione della mancanza di energia ($P_{av} < 0$)

- Se $SOC_{sc} > SOC_{scl}$, prima si scarica il supercondensatore (P_{sc}).
- Se $SOC_{sc} < SOC_{scl}$, prima si scarica la batteria ($P_{b,Dch}$).
- Se nessuna delle due è disponibile, si valuta la possibilità di disconnettere il carico per protezione.

Protezione energetica

- Il sistema controlla costantemente i limiti di SOC per evitare sovraccariche o scariche profonde.
- Le decisioni seguono una priorità gerarchica: prima il supercondensatore (per reattività), poi la batteria (più capiente ma più lenta).

10.2. Caratterizzazione delle strategie di controllo

Il sistema analizzato nel presente lavoro è un sistema ibrido di accumulo (HESS) costituito da una batteria, un supercondensatore e una fonte di alimentazione primaria, tutti interconnessi sul medesimo bus DC mediante opportuni convertitori DC/DC. In tale configurazione:

- la fonte primaria provvede alla fornitura della potenza media necessaria al carico;
- la batteria e il supercondensatore gestiscono rispettivamente le componenti transitorie e i picchi di potenza.

La gestione della condivisione di potenza è affidata al controllo dei convertitori DC/DC, che regolano il flusso energetico tra i diversi elementi di accumulo e il bus. La corrente complessiva in uscita dal sistema dipende principalmente dalla corrente erogata dalla batteria, mentre la modalità operativa del sistema viene selezionata in base alla potenza richiesta e alle condizioni di stato di carica (SOC) dei singoli componenti.

In particolare, si distinguono le seguenti modalità operative:

- scarica simultanea di batteria e supercondensatore;
- ricarica della batteria e contemporanea scarica del supercondensatore;
- ricarica simultanea di batteria e supercondensatore;
- scarica della batteria e contemporanea ricarica del supercondensatore.

La scelta della modalità più opportuna dipende dai parametri di ponderazione, funzione dello stato di carica dei dispositivi, e dai rispettivi limiti fisici di funzionamento.

Sono state individuate tre strategie di controllo, riportate in Figura 10.2, in grado di coprire la maggior parte delle condizioni operative che possono presentarsi durante il funzionamento del sistema.

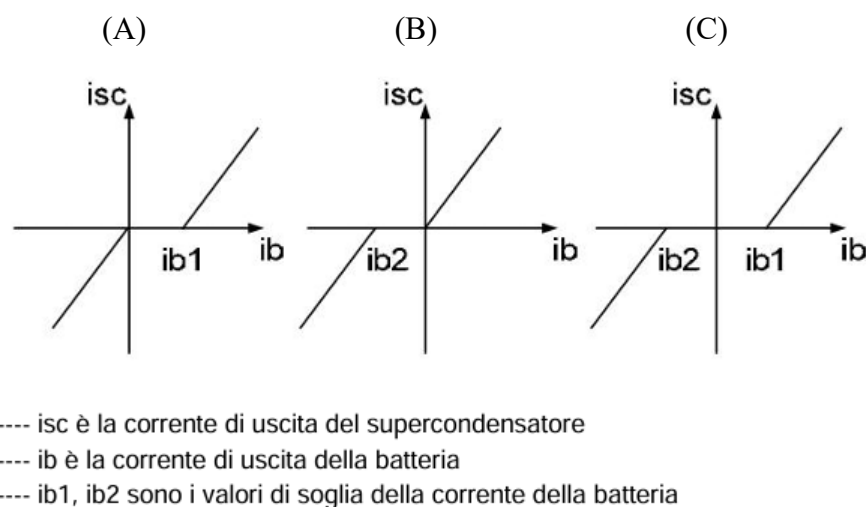


Figura 10.2: Strategie di controllo per la condivisione di potenza tra batteria e supercondensatore [33]

Strategia di controllo A: quando la richiesta di potenza da parte del carico è elevata, la batteria si scarica per prima. Al raggiungimento della soglia di corrente $ib1$, il supercondensatore interviene a supporto, avviando la fase di scarica. Viceversa, quando la domanda di potenza è ridotta, batteria e supercondensatore vengono caricati simultaneamente. La corrente di carica del supercondensatore è regolata dinamicamente in funzione della corrente di carica della batteria.

Strategia di controllo B: in questo caso, la batteria e il supercondensatore si scaricano contemporaneamente durante i picchi di potenza del carico. Nelle fasi a bassa richiesta, la batteria ha priorità nella ricarica. Quando la corrente di carica della batteria raggiunge la soglia $ib2$, il supercondensatore inizia a caricarsi. Anche in questa strategia, la corrente del supercondensatore è vincolata al valore assunto dalla corrente della batteria.

Strategia di controllo C: la scarica avviene in modo analogo alla strategia A; dunque, la batteria si scarica per prima e, al raggiungimento della soglia $ib1$, entra in gioco il supercondensatore. Nella fase di ricarica, tuttavia, la batteria ha priorità: essa si ricarica per prima e, al raggiungimento della soglia $ib2$, viene avviata anche la ricarica del supercondensatore.

È importante notare che le pendenze delle linee in Figura 10.2 determinano il rapporto di potenza condiviso da ciascun dispositivo di accumulo di energia. Prendendo ad esempio la strategia A, la Figura 10.3 mostra le diverse modifiche dei parametri di controllo, che influiranno sulle prestazioni del sistema. I tassi di condivisione della corrente, determinati dalle pendenze delle due linee in ciascuna figura, sono importanti parametri di progettazione nella strategia di controllo.

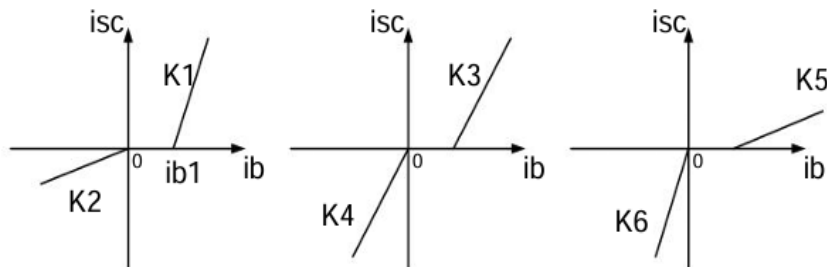


Figura 10.3: Modifiche dei parametri di controllo con la strategia A [33]

11. TOPOLOGIA DEL SISTEMA

In questo capitolo, sarà analizzata la topologia del sistema in esame. Partendo dal modello di partenza, si segue una logica sequenziale che consente di arrivare al sistema finale, nel quale è stato implementato il controllo di interesse. La Figura 11.1 illustra l'architettura generale di un sistema ibrido di accumulo energetico (Hybrid Energy Storage System, HESS) integrato con un impianto fotovoltaico (PV) destinato all'alimentazione di un carico in corrente continua. L'obiettivo principale di tale configurazione è garantire un'alimentazione stabile e continua del carico, compensando le fluttuazioni di potenza tipiche della generazione fotovoltaica attraverso una gestione coordinata dei due dispositivi di accumulo: batterie e supercondensatori (supercap). In seguito, vengono descritti i principali componenti del sistema in esame.

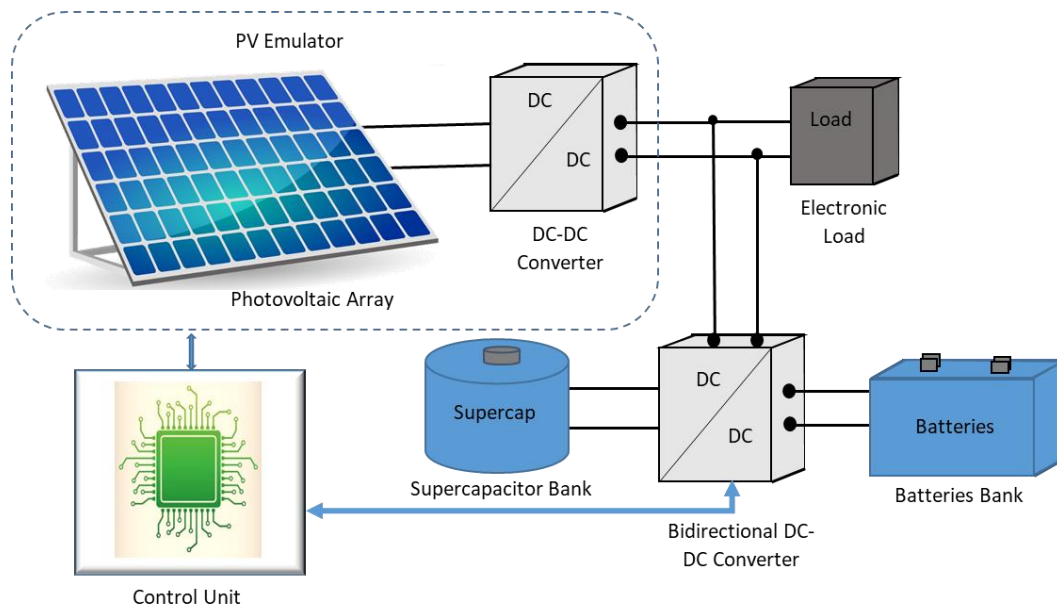


Figura 11.1: Architettura generale del sistema [10]

Generatore fotovoltaico

Nella parte superiore sinistra dello schema è rappresentato il campo fotovoltaico, costituito da un insieme di moduli collegati opportunamente per fornire la potenza desiderata. L'energia elettrica prodotta, di natura continua variabile nel tempo, dipende dall'irraggiamento solare e dalla temperatura dei moduli. Tale energia viene convogliata verso un convertitore DC che adegua la tensione proveniente dal campo PV a quella del bus DC comune, assicurando il funzionamento nel punto di massima potenza (Maximum Power Point Tracking, MPPT). Nella nostra applicazione non è stato considerato questo convertitore.

Convertitore DC-DC Half-Bridge bidirezionale in corrente

Il convertitore di interfacciamento per le batterie e i supercondensatori è un convertitore DC-DC Half-Bridge bidirezionale in corrente. Esso è costituito da più rami identici collegati in parallelo, ciascuno formato da due interruttori attivi (tipicamente MOSFET o IGBT) disposti in configurazione Half-

Bridge e da un induttore connesso tra il nodo centrale del ponte e il nodo del dispositivo di accumulo. Questo convertitore può operare sia in modalità step-down (Buck), trasferendo energia dal bus al supercondensatore, sia in modalità step-up (Boost), trasferendo energia dal supercondensatore al bus o al carico.

La tecnica di interleaving consiste nello sfalsare i segnali PWM dei vari rami di un angolo φ , definito come segue:

$$\varphi = \frac{360^\circ}{n} \quad (11.1)$$

dove n è il numero di rami in parallelo.

Sistema di accumulo ibrido

Il bus DC è connesso a due rami di accumulo energetico distinti:

- Batterie, caratterizzate da un'elevata densità energetica ma da una risposta dinamica relativamente lenta.
- Supercondensatori, dispositivi con elevata densità di potenza e tempi di risposta rapidi, ma con capacità di accumulo più limitata.

Ciascun ramo di accumulo è interfacciato al bus DC tramite un proprio convertitore bidirezionale DC/DC, che consente il flusso di potenza in entrambe le direzioni, permettendo quindi sia la carica che la scarica dei dispositivi. Questa struttura conferisce al sistema una maggiore flessibilità operativa: i supercondensatori sono impiegati per compensare rapidamente variazioni improvvise di potenza (transienti o picchi di carico), mentre le batterie operano prevalentemente nella regolazione a più lungo termine, mantenendo il bilancio energetico del sistema.

Carico

Il carico in corrente continua (Load) è alimentato attraverso il bus DC comune. In condizioni di generazione fotovoltaica superiore al fabbisogno del carico, l'eccesso di energia viene accumulato nei dispositivi di storage. Viceversa, in condizioni di bassa irradiazione o elevata richiesta di potenza, la gestione integrata batteria-supercap consente di fornire l'energia necessaria al carico mantenendo stabile la tensione del bus.

Unità di controllo

Il blocco di controllo rappresenta l'unità di elaborazione dedicata alla gestione intelligente dei flussi di energia. Esso implementa strategie di Energy Management System (EMS), volte a:

- coordinare il funzionamento dei convertitori DC/DC associati ai due dispositivi di accumulo;
- garantire il rispetto dei limiti di tensione e corrente per ciascun elemento (protezioni di sovra/sottotensione);
- mantenere la stabilità della tensione sul bus DC;
- ottimizzare l'efficienza complessiva del sistema e la durata degli elementi di accumulo.

Il controllo riceve in ingresso i segnali di misura (tensione e corrente di ciascun ramo) e calcola le correnti di riferimento per batteria e supercap in base allo stato di carica e alla dinamica di potenza richiesta.

In Figura 11.2, viene riportato lo schema elettrico del circuito illustrato in precedenza. Si possono osservare, più nel dettaglio, i componenti descritti prima.

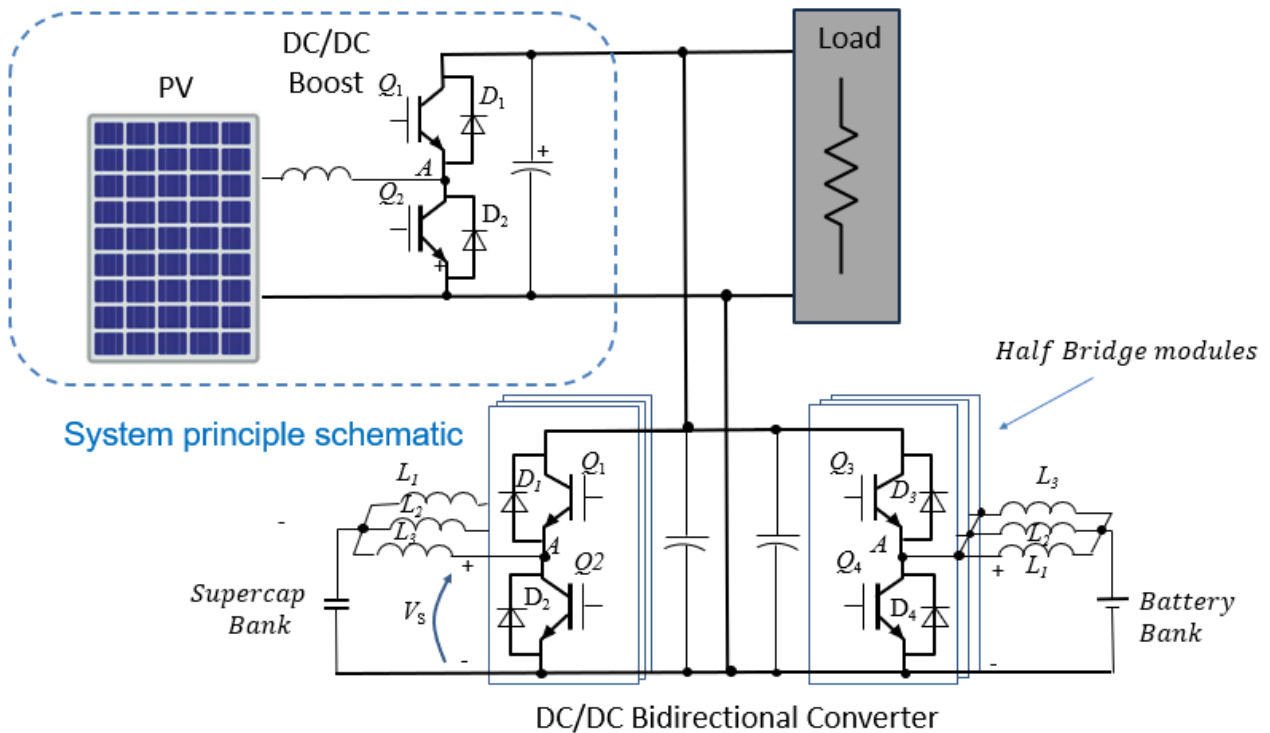


Figura 11.2: Schema elettrico del circuito [10]

11.1. Modello iniziale

In Figura 11.3 è stato riportato il modello iniziale, dal quale si è partiti. In particolare, la figura illustra il modello simulativo realizzato in ambiente PLECS, rappresentante un sistema di accumulo ibrido (Hybrid Energy Storage System, HESS) connesso a un bus DC comune. Il sistema è composto da due sottosistemi distinti, ciascuno dedicato rispettivamente al supercondensatore e al pacco batterie, entrambi controllati tramite convertitori half-bridge bidirezionali. Tale configurazione consente la gestione coordinata dei flussi energetici, garantendo stabilità della tensione sul bus e un'adeguata ripartizione dei transitori di potenza tra i due dispositivi di accumulo.

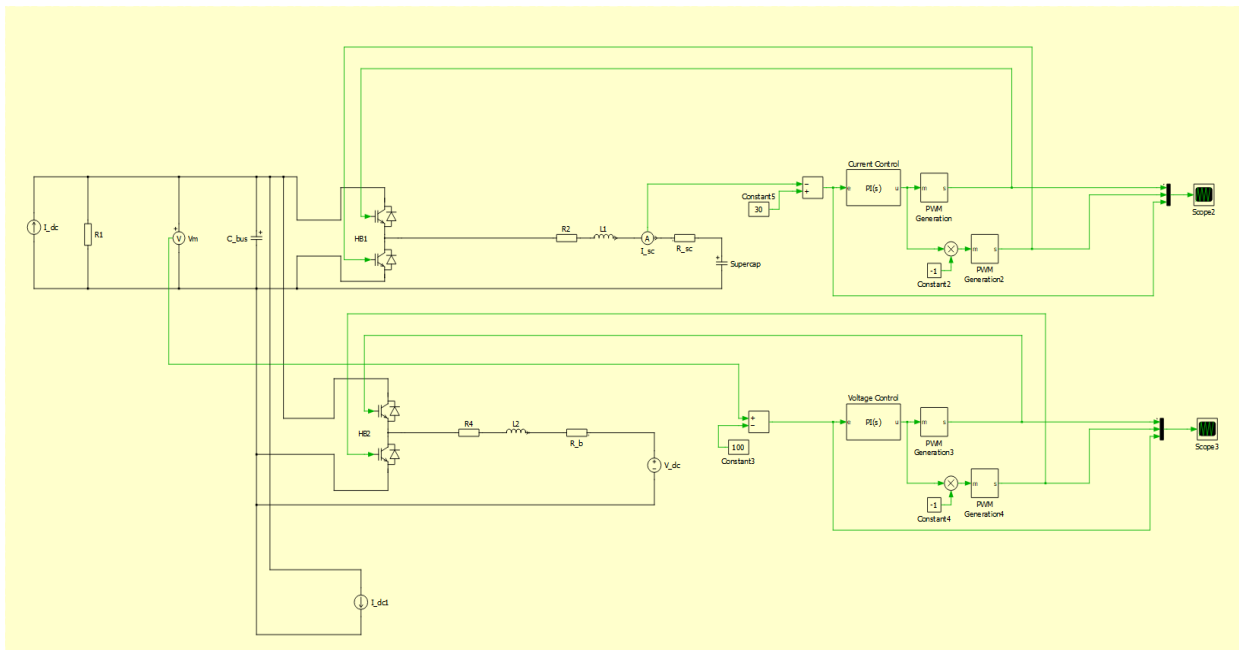


Figura 11.3: Modello iniziale del sistema

Struttura generale del sistema

Il bus DC costituisce il nodo centrale del sistema e rappresenta il collegamento comune tra le fonti di energia e il carico. Esso è modellizzato tramite una capacità C_{bus} , utile per smorzare le oscillazioni di tensione, e una resistenza parassita R_1 che riproduce le perdite ohmiche della linea. La tensione del bus (V_m) è continuamente monitorata e fornisce un segnale di riferimento ai controllori di ciascun ramo di conversione. Sia la sorgente che il carico sono modellizzati, per semplicità, da un generatore ideale di corrente. Nello schema finale, saranno poi modificati al fine di rendere più realistico il controllo e gestire i flussi di potenza in maniera più efficace.

Ramo del supercondensatore ($V=60$ V, $C=130$ F, $R_{sc}=5e-3$ Ω)

Il ramo superiore dello schema è dedicato al supercondensatore, collegato al bus DC mediante un convertitore DC/DC half-bridge bidirezionale (HB1). L'andamento della corrente del supercap I_{sc} viene misurato attraverso un sensore di corrente e confrontato con il valore di riferimento, in questo caso costante e pari a 30 A.

- Controllo di corrente (Current Control): Un regolatore di tipo PI(s) elabora l'errore tra la corrente misurata e la corrente di riferimento, generando il segnale di modulazione

necessario alla generazione PWM del convertitore. L'obiettivo di questo controllo è regolare rapidamente la corrente erogata o assorbita dal supercondensatore, così da compensare i transitori di potenza sul bus DC.

- Parametri principali del ramo:
 - Induttanza L_1 e resistenza R_2 rappresentano i componenti passivi del filtro lato convertitore.
 - La resistenza R_{sc} e la capacità equivalente del supercap modellano le caratteristiche elettriche reali del dispositivo.

Il controllo bidirezionale consente sia la fase di carica (corrente positiva verso il supercap) sia la fase di scarica (corrente negativa), in funzione della dinamica di potenza richiesta dal bus DC.

Ramo della batteria ($V=100\text{ V}$, $R_b=0.1\ \Omega$)

Il secondo ramo rappresenta il sottosistema dedicato alla batteria, anch'esso interfacciato al bus DC tramite un convertitore half-bridge bidirezionale (HB2). A differenza del supercap, in questo caso il controllo è orientato alla regolazione della tensione del bus DC, al fine di mantenere costante il valore di V_{bus} entro i limiti prefissati.

- Controllo di tensione (Voltage Control): Il regolatore PI elabora l'errore tra la tensione misurata sul bus DC e il valore di riferimento pari a 100 V. L'uscita del controllore fornisce la corrente di riferimento per il convertitore, successivamente modulata mediante la generazione del segnale PWM.
- Elementi circuitali:
 - Il filtro L_2-R_4 limita il ripple di corrente e attenua le armoniche di commutazione.
 - La batteria è modellata come un generatore ideale di tensione V_{dc} in serie con una resistenza R_b , in grado di riprodurre il comportamento dinamico semplificato della cella.

Logica di generazione PWM e simmetria di pilotaggio

In entrambi i rami di conversione (supercap e batteria), i segnali PWM sono generati tramite modulatori complementari. La costante “-1” in ciascun ramo consente di invertire la modulazione, garantendo il funzionamento simmetrico delle due metà del ponte (upper e lower switch), così da realizzare una corretta commutazione del convertitore half-bridge.

Analisi dei segnali

Le principali grandezze elettriche – tra cui la corrente del supercap I_{sc} e la tensione del bus DC V_m – vengono visualizzate sugli scope, permettendo di analizzare in tempo reale la risposta dinamica del sistema. Attraverso tali segnali è possibile valutare l'efficacia dei controllori PI nel mantenere la stabilità del bus DC e nella corretta ripartizione dei transitori di potenza tra batteria e supercondensatore.

12. MODELLAZIONE E SIMULAZIONE DEL SISTEMA

In questa sezione vengono presentati e analizzati i risultati della simulazione del sistema di accumulo ibrido batteria–supercondensatore, realizzato in ambiente PLECS. L'obiettivo principale della simulazione è studiare il comportamento dinamico del sistema in presenza di variazioni simultanee della potenza fotovoltaica e del carico, valutando l'efficacia della strategia di controllo implementata, al fine di garantire la stabilità della tensione del bus DC e la corretta gestione dei flussi energetici tra i diversi sottosistemi.

Le principali grandezze analizzate includono:

- corrente del generatore fotovoltaico, per valutare la risposta della sorgente alle variazioni di irraggiamento;
- le correnti di carico, supercondensatore e batteria, utili per comprendere la distribuzione dinamica della potenza e il comportamento coordinato tra i due accumuli;
- la tensione del bus DC e quella del supercondensatore, rappresentative dello stato energetico del sistema.

L'obiettivo della simulazione è dunque quello di implementare una logica di controllo funzionante e basilare, nella quale il principio di funzionamento è il seguente: sfruttare il supercondensatore al massimo delle sue capacità e per il resto fare agire la batteria. È pure vero che ci sono poi delle strategie di gestione di carica e scarica più sofisticate, che non sono state valutate nel presente lavoro, ma che possono diventare gli obiettivi futuri del progetto.

Nella prima parte del presente capitolo, sarà analizzata la modellazione e la seguente simulazione del sistema a singolo ramo, nella quale sia il supercondensatore che la batteria, sono associati ad un unico convertitore. Successivamente, sarà sviluppata la logica interleaved a due rami, nella quale i due sistemi di accumulo sono questa volta accoppiati a due convertitori, sfasati rispettivamente di 180° . Confrontando i profili ottenuti in simulazione, sarà possibile identificare i vantaggi di questa tecnologia.

12.1. Modellazione del sistema a singolo ramo

Partendo, dunque, dal modello iniziale, sono state eseguite alcune modifiche, dalle quali è stato trovato il modello illustrato in Figura 12.1. Il modello realizzato in ambiente PLECS rappresenta sempre il sistema di accumulo ibrido HESS composto da una batteria e da un supercondensatore, entrambi collegati al bus DC comune attraverso un convertitore DC/DC bidirezionale indipendente. Tale configurazione consente di gestire in modo coordinato il flusso di energia tra le due sorgenti di accumulo e il carico, assicurando una distribuzione ottimale della potenza in funzione delle condizioni operative istantanee. L'obiettivo complessivo è quello di migliorare l'efficienza energetica del sistema, ridurre lo stress sulla batteria e garantire la stabilità della tensione del bus DC, anche in presenza di variazioni rapide del carico o della produzione fotovoltaica.

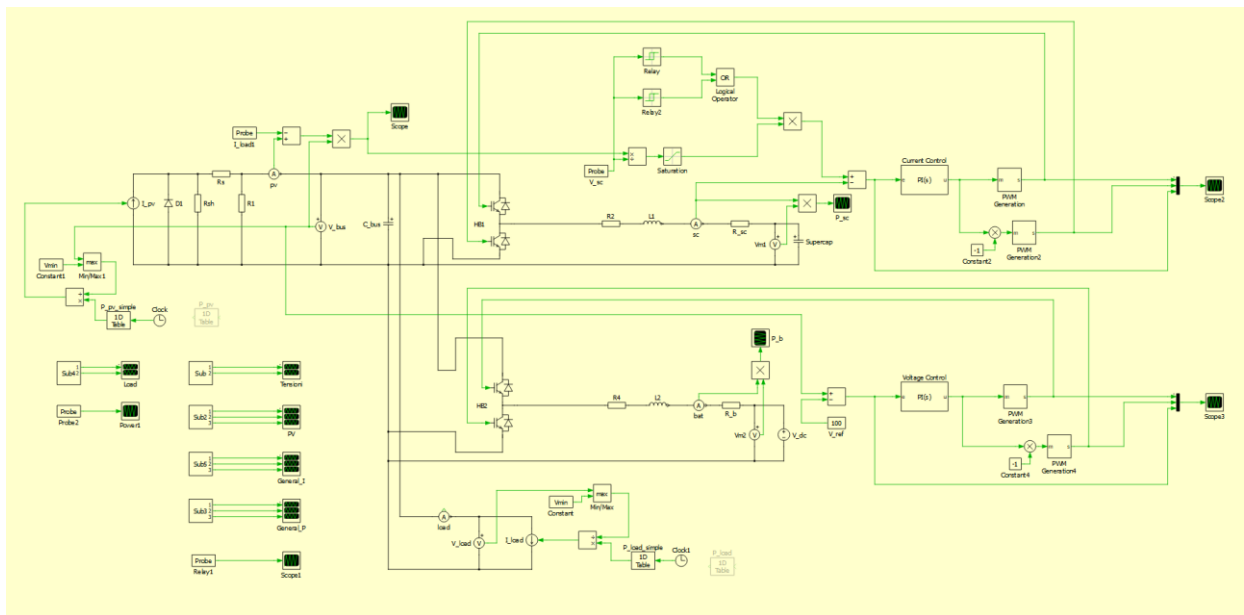


Figura 12.1: Modello del sistema a singolo ramo

Struttura generale del sistema

Nella parte sinistra dello schema è rappresentato il bus DC principale, punto di interfaccia comune tra la sorgente fotovoltaica (PV), il carico e i due rami di accumulo. La sorgente PV è modellizzata mediante un blocco di sorgente di corrente controllata, la cui intensità dipende dalla tensione ai capi del generatore e dalle condizioni di irraggiamento, simulando il comportamento non lineare caratteristico di una cella fotovoltaica. Il carico è gestito da un profilo temporale di corrente controllata, al fine di riprodurre le condizioni dinamiche di esercizio.

Ramo del supercondensatore ($V=60$ V, $C=130$ F, $R_{sc}=5e-3$ Ω)

La parte superiore dello schema rappresenta il ramo del supercondensatore, connesso al bus DC tramite un convertitore DC/DC bidirezionale. Il supercondensatore, caratterizzato da un'elevata densità di potenza e una risposta dinamica molto rapida, è destinato a compensare le variazioni transitorie di potenza dovute a improvvisi cambi di carico o a fluttuazioni della produzione fotovoltaica. Il controllo del convertitore è realizzato attraverso una struttura ad anello di corrente. Il segnale di riferimento della corrente del supercondensatore è generato dal blocco di distribuzione della potenza, che definisce la quota di potenza istantanea da assegnare al

supercondensatore in funzione dello stato di carica dei due dispositivi di accumulo e della potenza richiesta dal bus. Il regolatore PI di corrente confronta il riferimento con la corrente effettiva misurata, producendo un segnale di controllo proporzionale alla differenza. Tale segnale viene poi opportunamente limitato da un blocco di saturazione, che impone vincoli massimi e minimi sulla corrente erogabile, prevenendo condizioni di sovracorrente o sovraccarico. A valle del regolatore, il segnale di comando è elaborato dal blocco di generazione PWM, che pilota i dispositivi semiconduttori del convertitore bidirezionale. Il comando PWM è sincronizzato mediante un blocco di comparazione con un'onda triangolare, consentendo la modulazione del duty cycle in funzione del riferimento di corrente. A scopo di protezione, il circuito comprende due relay logici e un operatore booleano (OR) che intervengono automaticamente in caso di sovratensione sul supercondensatore. In tali condizioni, il segnale di controllo viene disattivato, interrompendo il flusso di corrente e salvaguardando il dispositivo. Questa logica di protezione differenzia le condizioni di carica e scarica, permettendo di stabilire soglie di intervento distinte e garantendo una gestione sicura dell'accumulo rapido.

Ramo della batteria ($V=100\text{ V}$, $R_b=0.1\ \Omega$)

La sezione inferiore dello schema rappresenta il ramo della batteria, anch'essa connessa al bus DC mediante un convertitore DC/DC bidirezionale. A differenza del supercondensatore, la batteria è caratterizzata da una maggiore densità energetica ma da una minore capacità di risposta dinamica, pertanto è destinata a fornire la componente di potenza a bassa frequenza, responsabile del bilanciamento energetico nel lungo periodo e del mantenimento della tensione del bus DC. Il controllo di questo ramo adotta una struttura ad anello di tensione, che confronta la tensione del bus DC con il suo valore di riferimento (100 V). Il segnale risultante governa la generazione PWM del convertitore, determinando la direzione del flusso di energia: in condizioni di surplus energetico ($PV > Load$) la batteria viene caricata, mentre in condizioni di deficit ($PV < Load$) la batteria fornisce energia al bus.

Strategia di controllo e cooperazione energetica

La strategia complessiva di controllo mira a ottenere una cooperazione sinergica tra i due dispositivi di accumulo:

- Il supercondensatore gestisce le variazioni rapide di potenza, assorbendo o fornendo energia per smorzare i transitori e stabilizzare la tensione del bus.
- La batteria interviene nei regimi a bassa frequenza, garantendo il bilanciamento energetico e mantenendo costante il valore medio della tensione DC.

Dunque, il modello implementato in PLECS rappresenta una piattaforma di simulazione completa per l'analisi e la progettazione di sistemi di accumulo ibrido. L'integrazione tra controlli di tensione e corrente, protezioni logiche e strumenti di misura consente di:

- Valutare la stabilità del bus DC sotto differenti condizioni operative;
- Analizzare l'interazione dinamica tra batteria e supercondensatore;
- Studiare l'impatto della strategia di gestione energetica sull'efficienza e sulla durata del sistema.

12.2. Analisi dei risultati di simulazione

Le figure riportate di seguito, rappresentano i risultati ottenuti in simulazione in termini di tensioni e correnti dei principali componenti presenti. La simulazione si riferisce a un modello a singolo ramo del sistema HESS, in cui il supercondensatore e la batteria sono connessi direttamente al bus DC attraverso un unico convertitore bidirezionale. Al fine di verificare che il controllo implementato effettivamente funzioni, questa prima simulazione considera un caso molto semplice, nel quale sia la sorgente fotovoltaica, sia il carico, sono rappresentati da una funzione a impulso. L'obiettivo è verificare che, al variare della sorgente e del carico, i due sistemi di accumulo si comportino in un certo modo. Dunque, si parte da un profilo generico, con delle caratteristiche ben precise, per mettere in risalto il concetto delle cariche/scariche e si vuole osservare, in particolare, il comportamento del supercap, al fine di capirne la sua azione.

Analisi delle correnti del generatore fotovoltaico e del carico

La Figura 12.2 riporta l'evoluzione temporale della corrente erogata dal generatore fotovoltaico (curva nera) e della corrente assorbita dal carico (curva rossa).



Figura 12.2: Profilo temporale delle correnti del generatore fotovoltaico e del carico

Nella prima fase, immediatamente successiva all'avvio della simulazione, si osserva che la corrente del carico si porta rapidamente al valore nominale di circa 50 A, mentre la corrente fornita dal modulo fotovoltaico si stabilizza su un livello di circa 10 A. Questa condizione riflette il principio di funzionamento del sistema ibrido di accumulo (HESS): la potenza generata dal campo fotovoltaico non è sufficiente a coprire interamente la richiesta del carico, e la differenza viene compensata dal sistema di accumulo (batteria e supercondensatore) attraverso i rispettivi convertitori DC/DC. Tale comportamento è coerente con la strategia di power management implementata nello schema di controllo, che assegna al fotovoltaico la funzione di generatore primario e agli accumulatori quella di compensatori dinamici. Al tempo $t \approx 20$ s, si verifica una variazione del profilo di carico, che comporta la disconnessione temporanea del carico. Di

conseguenza, la corrente del carico si riduce bruscamente, mentre la corrente fotovoltaica mostra una rapida transizione al valore nominale del nuovo punto di lavoro, mantenendo la continuità della generazione.

Analisi delle correnti di supercondensatore e batteria

La Figura 12.3 rappresenta l'andamento temporale della corrente del supercondensatore, mentre la Figura 12.6 riporta la corrente di batteria. Tali grandezze descrivono il comportamento dinamico del sistema di accumulo ibrido (HESS), con riferimento alla condivisione della potenza tra i due elementi in presenza di variazioni di carico e di generazione fotovoltaica.

Corrente del supercondensatore

Il profilo della corrente nel supercondensatore, in Figura 12.3, evidenzia un comportamento fortemente dinamico, come previsto per questo tipo di componente, progettato per fornire o assorbire rapidamente energia durante i transitori di potenza. All'istante iniziale, la corrente assume valori negativi dell'ordine di $-60 \div -80$ A, indicando una fase di scarica del supercondensatore volta a sostenere la potenza richiesta dal carico, in un momento in cui la produzione fotovoltaica risulta insufficiente. L'andamento progressivamente decrescente in modulo testimonia la riduzione della corrente di scarica dovuta alla naturale diminuzione della tensione ai capi del componente. Al tempo $t \approx 20$ s, in corrispondenza della riduzione del carico precedentemente osservata nel grafico delle correnti, si verifica una rapida inversione del flusso di corrente. La corrente del supercondensatore passa bruscamente da valori negativi a positivi, indicando l'avvio di una fase di ricarica. Questa transizione dimostra la corretta risposta del sistema di controllo in corrente, che regola istantaneamente il contributo del supercondensatore per compensare le variazioni di potenza e mantenere la tensione del bus DC entro i limiti nominali.

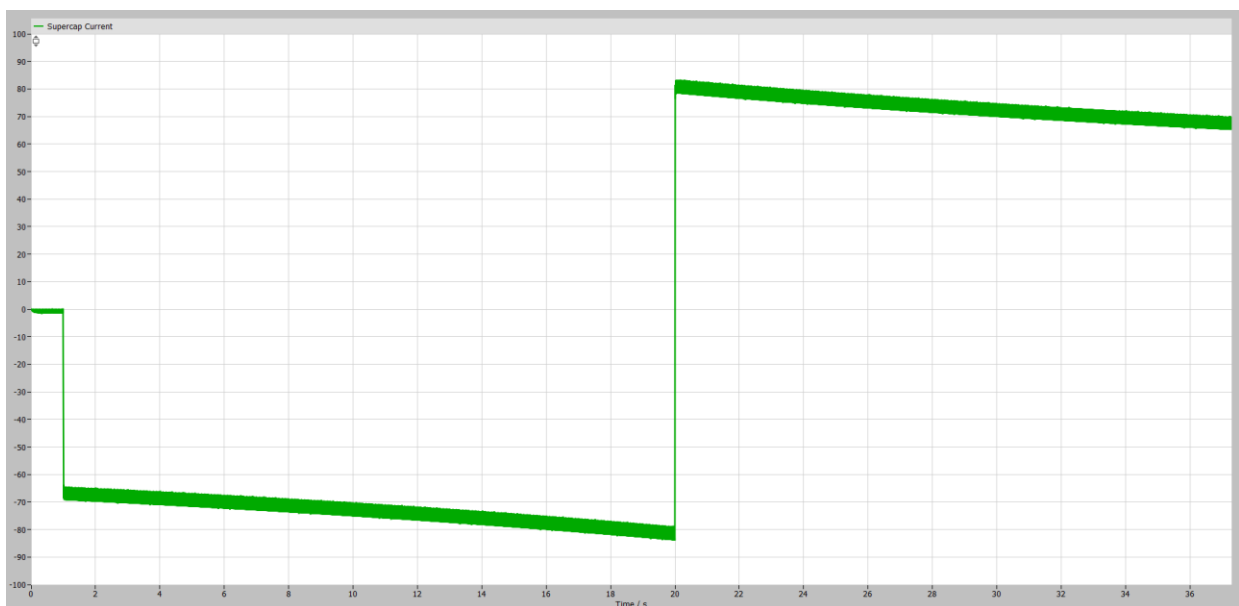


Figura 12.3: Profilo temporale della corrente del supercondensatore

Facendo uno zoom sul profilo di corrente del supercondensatore, si può osservare l'andamento triangolare del ripple, piuttosto rilevante (Figura 12.4).

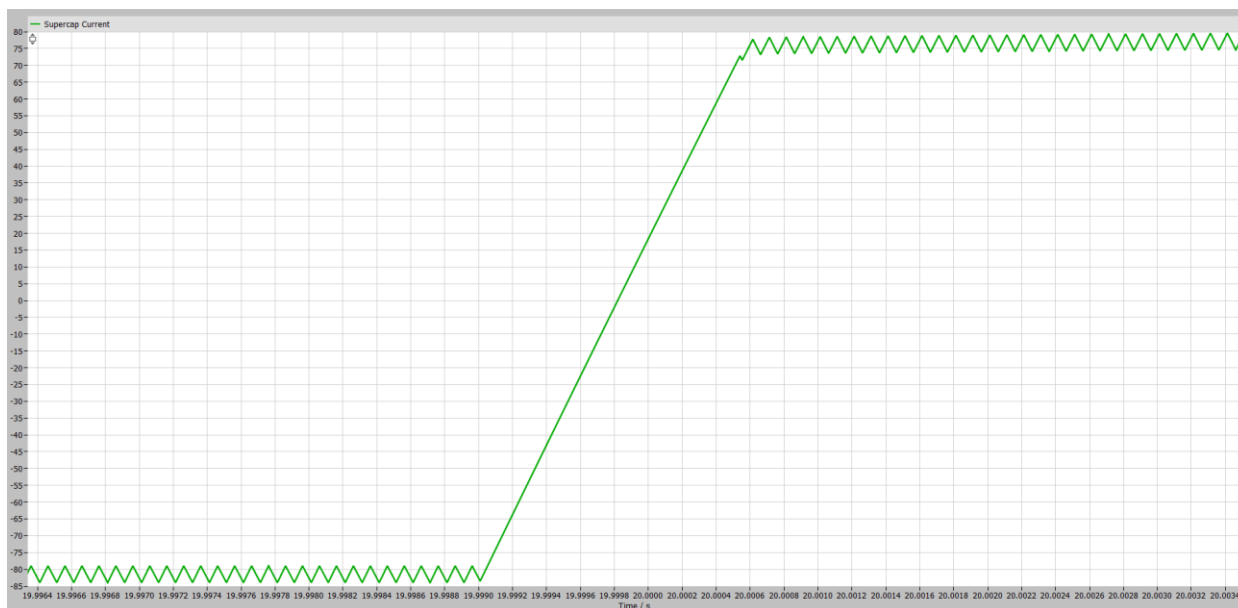


Figura 12.4: Zoom profilo temporale della corrente del supercondensatore

In Figura 12.5 si osservano i cicli del ripple triangolare di corrente del supercondensatore.

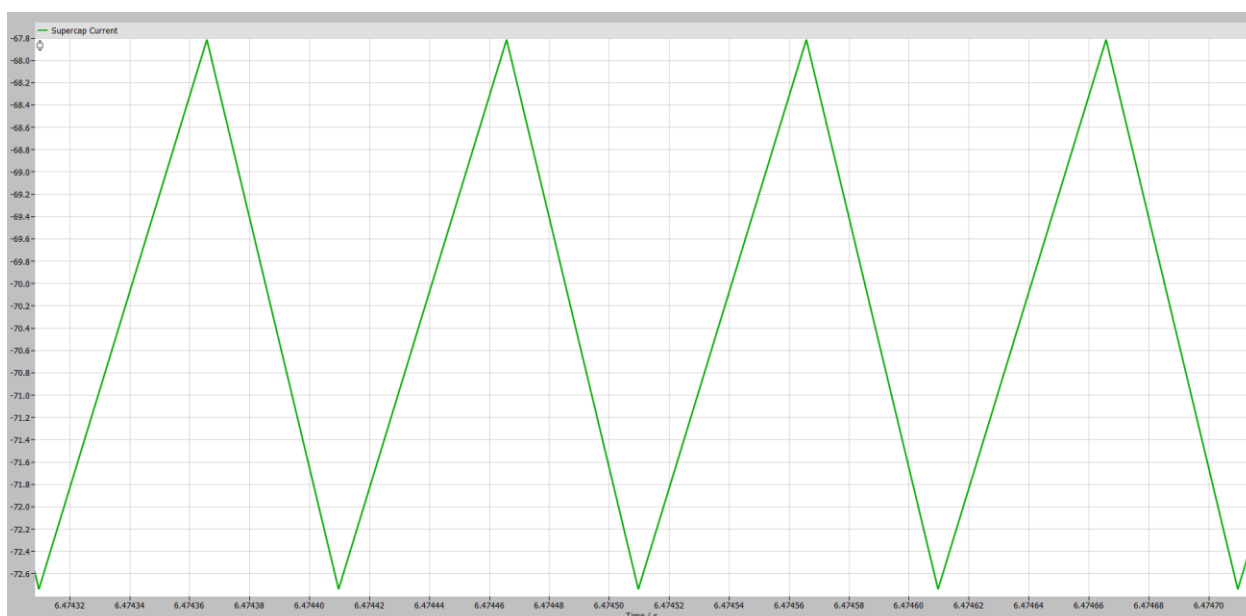


Figura 12.5: Cicli del ripple di corrente del supercondensatore

Corrente della batteria

Il grafico in Figura 12.6 mostra l'andamento della corrente di batteria, che risulta decisamente più lenta e di minore ampiezza rispetto a quella del supercondensatore. La corrente si stabilizza su valori prossimi a -1 A, indicando che la batteria opera prevalentemente in scarica a bassa dinamica, con un contributo costante alla potenza complessiva del sistema. Il comportamento più "filtrato" della corrente è dovuto alla maggiore costante di tempo elettrochimica del dispositivo, che impedisce variazioni rapide e consente di preservare la vita utile della batteria. Nel punto di variazione del carico ($t \approx 20$ s) si osserva un piccolo transitorio, caratterizzato da un breve impulso negativo seguito da un rapido ritorno al valore di regime. Dunque, poiché in quell'istante la sorgente fotovoltaica è sufficiente a soddisfare la richiesta del carico, la corrente di batteria aumenta (va a valori meno negativi) per compensare le variazioni di potenza. Ciò conferma che la batteria non è coinvolta nei rapidi transitori di potenza, ma interviene solo per fornire o assorbire energia nel medio periodo, lasciando al supercondensatore la gestione dei picchi di potenza istantanei.

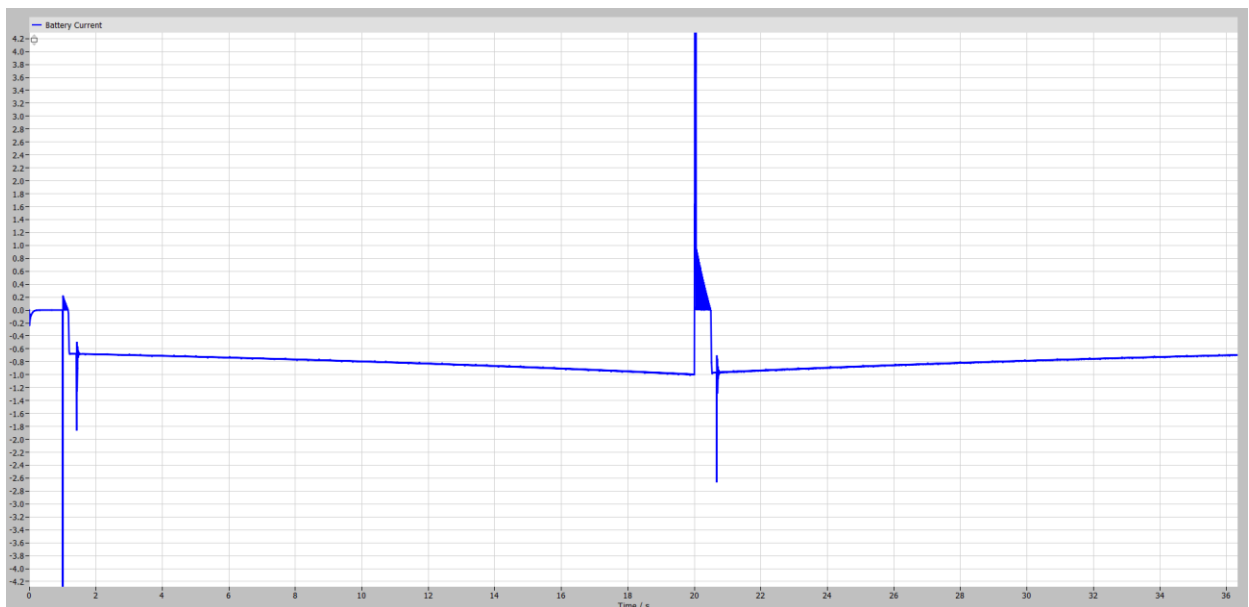


Figura 12.6: Profilo temporale della corrente di batteria

Facendo uno zoom sul profilo di corrente della batteria, in Figura 12.7 si può osservare l'andamento del ripple.

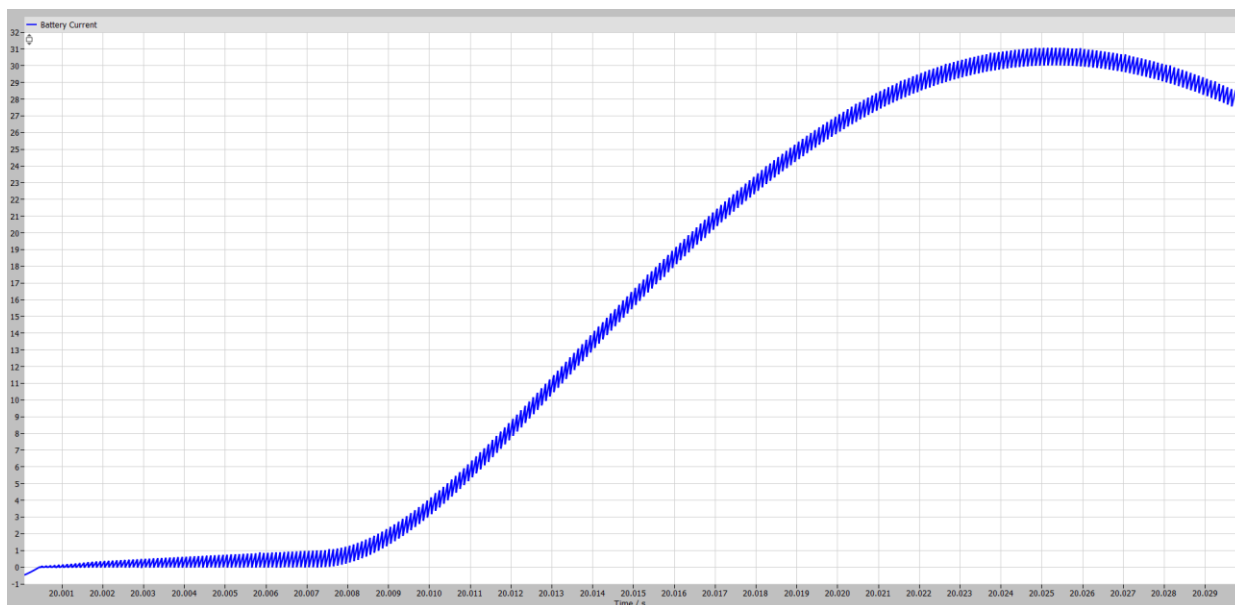


Figura 12.7: Zoom profilo temporale della corrente di batteria

Il confronto tra i due profili di corrente mette in evidenza la corretta ripartizione funzionale dei ruoli all'interno del sistema HESS:

- il supercondensatore gestisce i transitori, assorbendo o erogando potenza in modo rapido;
- la batteria fornisce un contributo più stabile, compensando il bilancio energetico nel lungo periodo.

Questa architettura permette di ridurre significativamente lo stress elettrochimico sulla batteria e di garantire una migliore efficienza complessiva del sistema. La presenza di correnti di batteria di piccola entità e di supercondensatore con ampiezza elevata ma limitata nel tempo dimostra la corretta sinergia tra i due dispositivi di accumulo e la validità della logica di controllo implementata nel modello PLECS.

Analisi delle tensioni del bus DC e del supercondensatore

In Figura 12.8 è riportato l'andamento della tensione del bus DC, in Figura 12.10 la tensione del supercondensatore. L'analisi congiunta di queste due grandezze consente di valutare l'efficacia del controllo di tensione e la capacità del sistema ibrido di accumulo di mantenere la stabilità del bus in presenza di variazioni di carico.

Tensione del bus DC

La tensione del bus DC, in Figura 12.8, si stabilizza rapidamente intorno al valore nominale di 100 V, con oscillazioni iniziali trascurabili e transitori di brevissima durata. L'assenza di deviazioni significative e la capacità di mantenere la tensione costante durante l'intero intervallo di simulazione confermano la robustezza dell'anello di controllo in tensione implementato sul convertitore associato alla batteria. In particolare, il regolatore PI di tensione interviene per compensare le variazioni di potenza dovute al carico e alle fluttuazioni di generazione fotovoltaica, modulando opportunamente il riferimento di corrente della batteria. È interessante notare che attorno a $t \approx 20$ s, momento in cui avviene la riduzione del carico, la tensione di bus mostra un piccolo disturbo transitorio: un rapido innalzamento seguito da una lieve sotto compensazione. Tuttavia, il sistema ritorna in regime velocemente, dimostrando un'elevata rapidità di risposta e capacità di smorzamento del controllo.

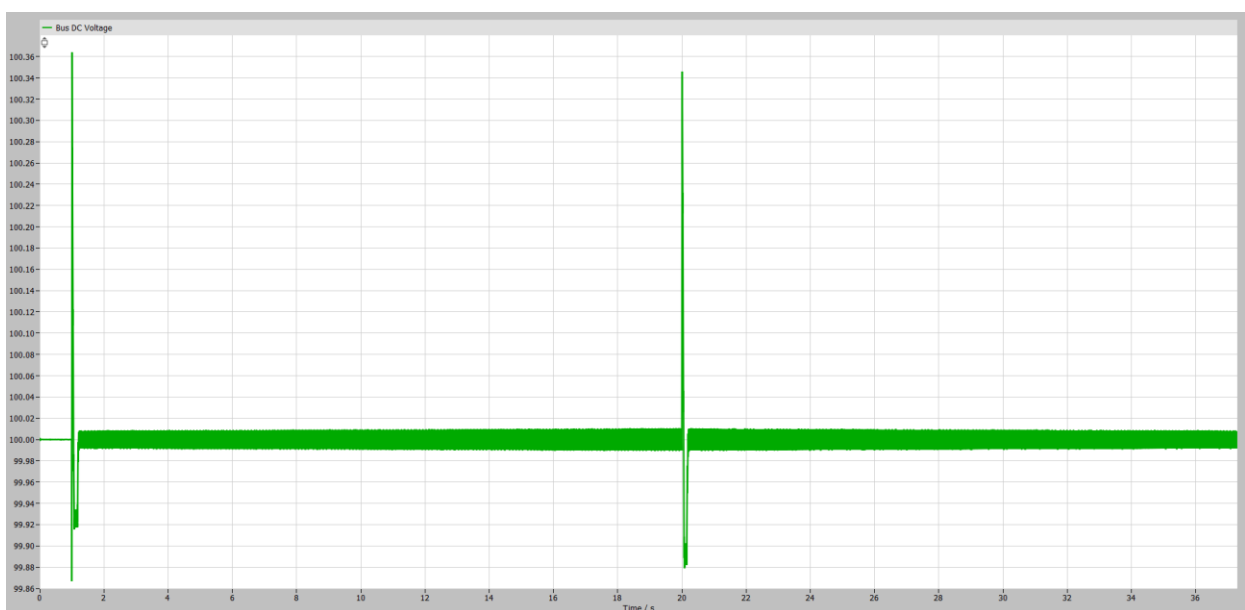


Figura 12.8: Profilo temporale della tensione del bus DC

La Figura 12.9 mostra che, allargando la scala dello scope, le oscillazioni sono rese trascurabili, poiché si manifestano, appunto, rispetto ad un intervallo molto piccolo.

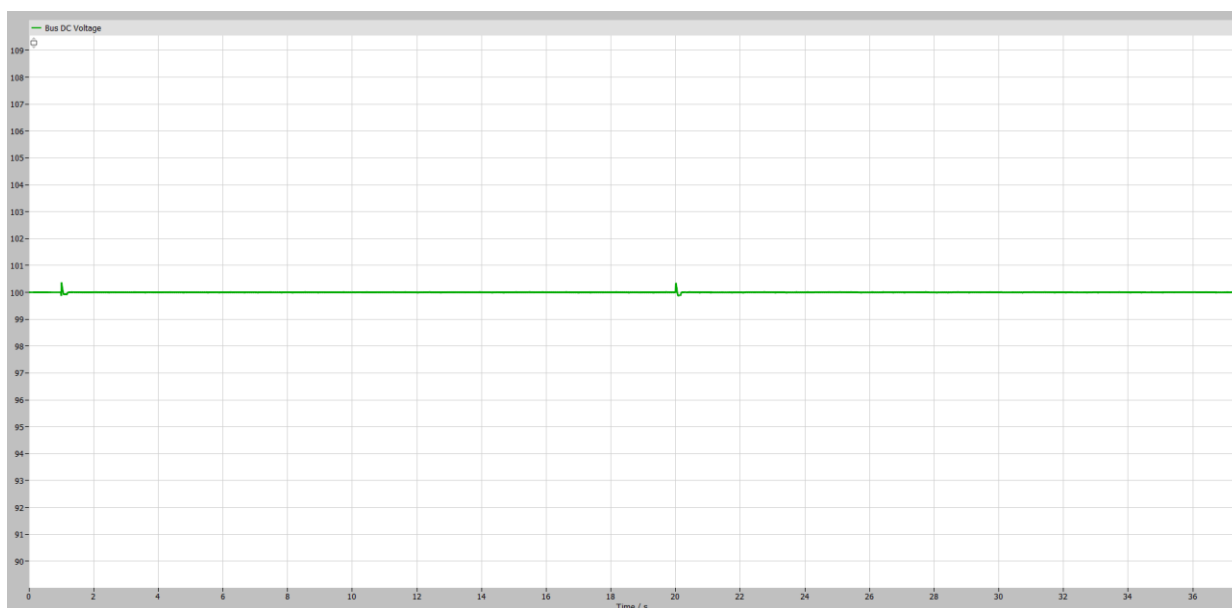


Figura 12.9: Profilo della tensione del bus DC a larga scala

Tensione del supercondensatore

L'andamento della tensione del supercondensatore, in Figura 12.10, mostra una progressiva diminuzione lineare da 60 V fino a circa 50 V nella prima metà della simulazione, coerente con la fase di scarica. Durante questa fase, il supercondensatore fornisce energia per sostenere la potenza richiesta dal carico, compensando il deficit della sorgente fotovoltaica. La discesa lineare della tensione evidenzia la tipica relazione tra carica, corrente e capacità del dispositivo, secondo l'equazione $i = C \frac{dv}{dt}$, e conferma l'assenza di fenomeni oscillatori indesiderati. Dopo $t \approx 20$ s, quando il carico si riduce, la tensione del supercondensatore inverte la propria pendenza, inizia a risalire e torna gradualmente verso il valore nominale. Ciò corrisponde alla fase di ricarica del dispositivo, durante la quale l'energia in eccesso, generata dal fotovoltaico e non più richiesta dal carico, viene immagazzinata nel supercondensatore. Questa simmetria tra fase di scarica e ricarica testimonia il corretto funzionamento della logica di gestione bidirezionale del convertitore DC/DC dedicato, capace di invertire la direzione del flusso di corrente e di mantenere la tensione del supercondensatore entro i limiti di sicurezza (tra 30 e 60 V).



Figura 12.10: Profilo temporale della tensione del supercondensatore

Il confronto tra le due grandezze mette in evidenza la stabilità complessiva del sistema e l'efficace coordinamento tra i due anelli di controllo principali:

- Controllo di tensione sul bus DC attraverso la batteria, che assicura la regolazione del punto di lavoro globale;
- Controllo di corrente sul supercondensatore, che interviene per smorzare i transitori e stabilizzare la potenza istantanea.

12.3. Modello Interleaved a doppio ramo

Il modello riportato in Figura 12.11 rappresenta la versione interleaved del sistema ibrido di accumulo, in cui sia il supercondensatore che la batteria sono collegati al bus DC attraverso due convertitori DC/DC bidirezionali operanti in parallelo. Questa architettura, rispetto al precedente modello a singolo ramo, consente di suddividere il flusso di corrente tra due percorsi di conversione identici ma sfasati temporalmente, migliorando le prestazioni dinamiche e riducendo le sollecitazioni elettriche sui componenti.

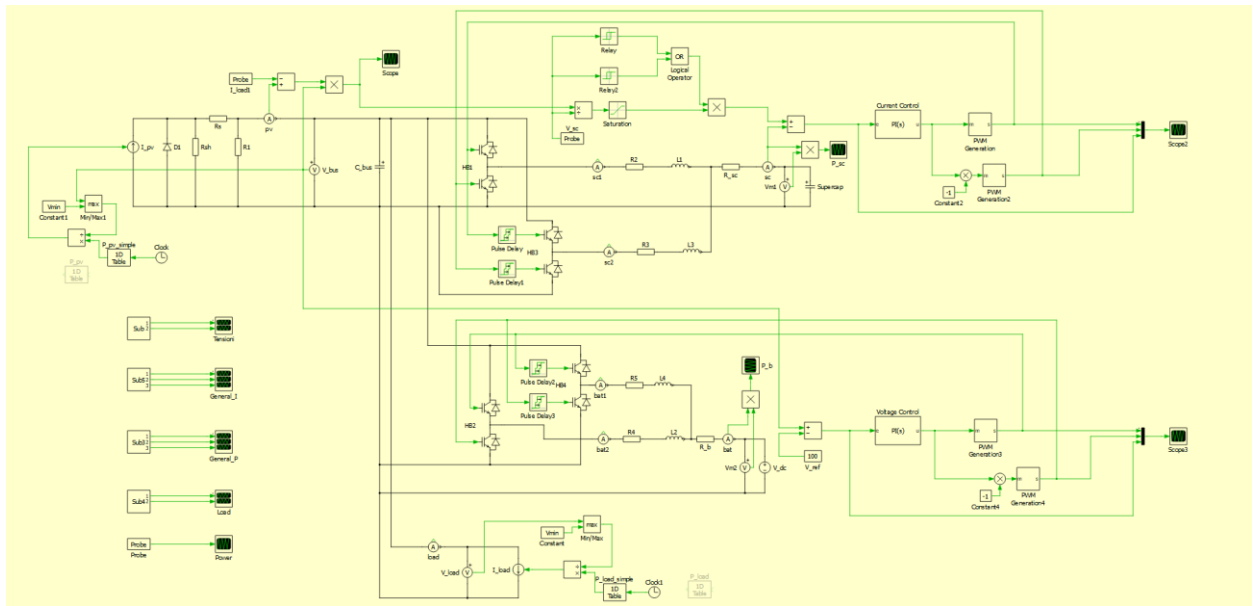


Figura 12.11: Modello interleaved a doppio ramo

Nel ramo del supercondensatore, i due convertitori lavorano in modo interleaved, ossia con segnali PWM sfasati di 180° . Tale strategia permette di:

- dimezzare la corrente RMS per ciascun induttore e transistor di potenza;
- ridurre il ripple di corrente complessivo sul supercondensatore;
- migliorare la qualità della tensione ai capi del bus DC grazie alla parziale cancellazione armonica tra i due rami.

Analogamente, anche il ramo della batteria è realizzato con una topologia duale, dotata di due convertitori bidirezionali che operano in parallelo e in controfase. Il controllo mantiene la stessa logica del modello precedente, basata su un anello di tensione, ma la potenza complessiva viene ripartita tra i due rami, riducendo la corrente media su ciascun dispositivo e migliorando l'efficienza complessiva. Dal punto di vista funzionale, la presenza del doppio ramo comporta una risposta dinamica più fluida: il sistema è in grado di gestire variazioni di carico più rapide con minore ripple sia sulle correnti degli accumulatori che sulla tensione di bus. Rispetto al modello a singolo ramo, il supercondensatore eroga correnti complessivamente maggiori ma distribuite sui due canali, garantendo una migliore ripartizione della potenza e una maggiore stabilità del sistema.

Analisi delle correnti del generatore fotovoltaico e del carico

La Figura 12.12 riporta l'evoluzione temporale della corrente erogata dal generatore fotovoltaico (curva nera) e della corrente assorbita dal carico (curva rossa).



Figura 12.12: Profilo temporale delle correnti del generatore fotovoltaico e del carico

Gli andamenti riportati in Figura 12.12, sono gli stessi a quelli visti nel modello a singolo ramo, poiché la sorgente fotovoltaica modellizzata e il carico non variano il loro comportamento temporale. All'avvio della simulazione si osserva una rapida salita della corrente del carico, che si stabilizza intorno a 50 A, mentre la corrente erogata dal generatore fotovoltaico si attesta su un valore di circa 10 A. Questo andamento riflette una condizione in cui la potenza fotovoltaica disponibile non è sufficiente a coprire interamente la richiesta del carico. La differenza viene compensata dunque dal sistema di accumulo ibrido, i cui convertitori bidirezionali garantiscono l'equilibrio energetico sul bus DC. A $t \approx 20$ s, il grafico mostra una variazione del profilo di carico, con una riduzione della potenza assorbita: la corrente del carico passa da circa 50 a 10 A.

Analisi delle correnti di supercondensatore e batteria

La Figura 12.14 rappresenta l'andamento temporale della corrente complessiva del supercap, mentre la Figura 12.18 riporta la corrente complessiva di batteria. Queste grandezze consentono di valutare la ripartizione dinamica della potenza all'interno del sistema e di confrontare l'efficacia della configurazione interleaved rispetto a quella a singolo ramo.

Correnti nei due rami del supercondensatore

In Figura 12.13 sono riportati gli andamenti temporali delle correnti nei due rami del supercondensatore. Risultano sfasati di 180° , grazie alla logica interleaving implementata. Si osserva, inoltre, il ripple triangolare delle due correnti.

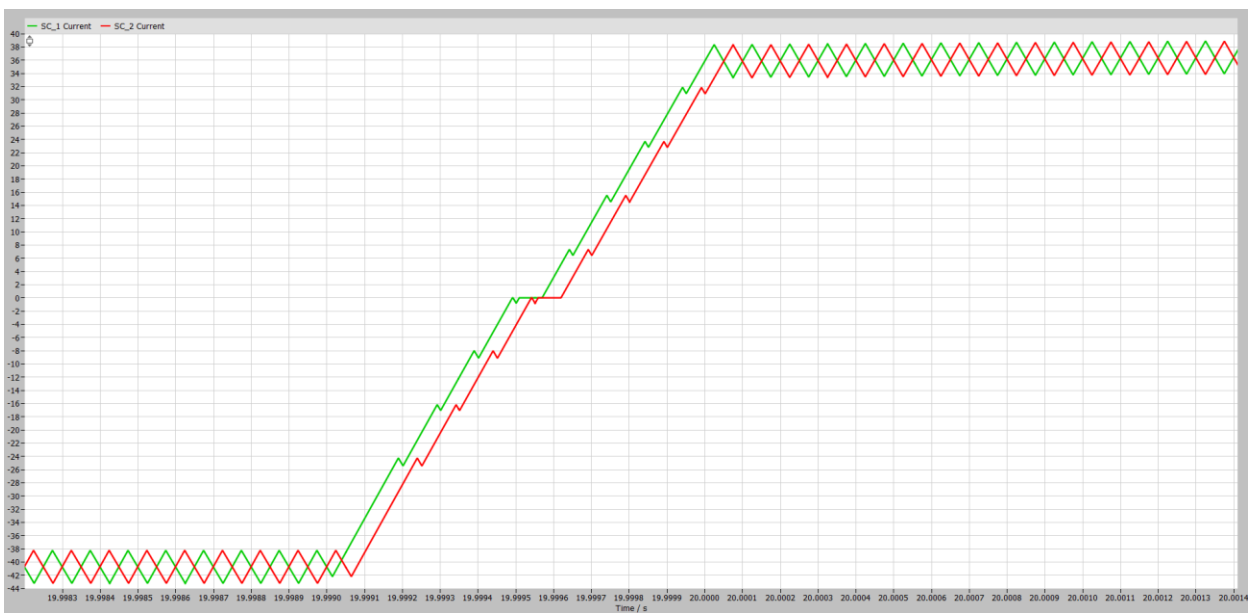


Figura 12.13: Profilo temporale delle correnti nei due rami del supercondensatore

Corrente complessiva del supercondensatore

L'andamento della corrente complessiva del supercondensatore, in Figura 12.14, rimane identico a quello visto nel modello a singolo ramo, con la differenza che nel sistema interleaved risulta più regolare e con ripple sensibilmente ridotto. Ciò è attribuibile al fatto che i due convertitori bidirezionali operano sfasati di 180° , determinando una parziale cancellazione delle componenti armoniche di commutazione. Il risultato è una maggior linearità del profilo di corrente e una riduzione delle sollecitazioni elettriche sul componente, con effetti positivi sulla sua efficienza e durata.

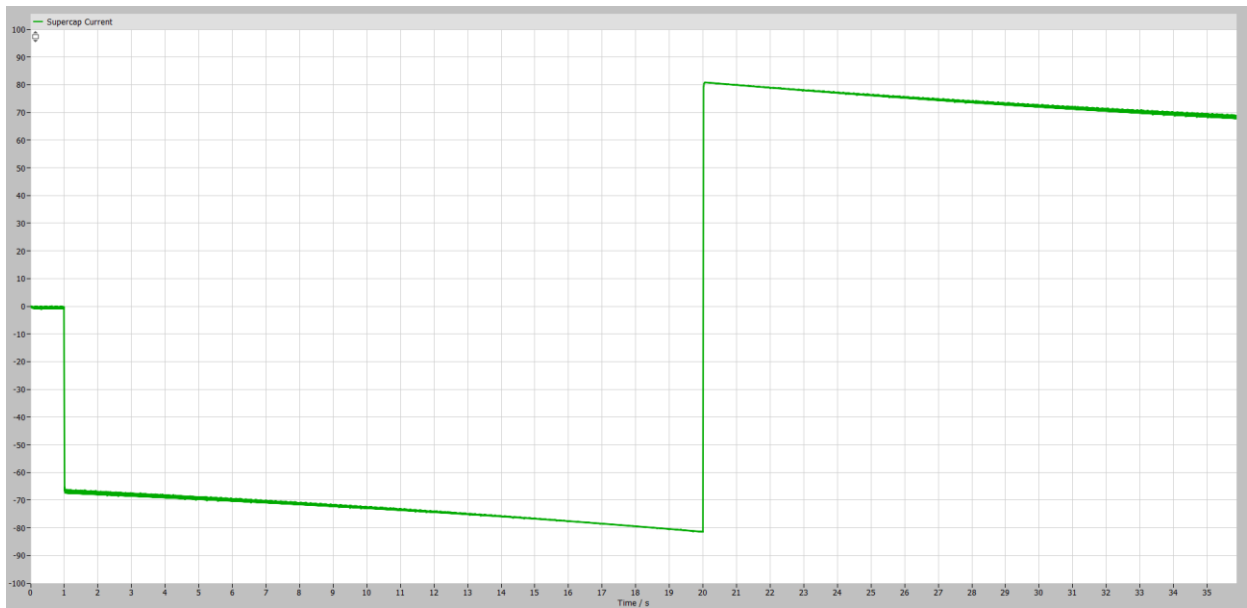


Figura 12.14: Profilo temporale della corrente complessiva del supercondensatore

Facendo uno zoom sul profilo di corrente complessiva del supercondensatore, in Figura 12.15 si può osservare l'andamento del ripple. Rispetto al modello a singolo ramo, il ripple risulta attenuato grazie proprio alla logica interleaving implementata e quindi allo sfasamento di 180° dei convertitori bidirezionali dei due sistemi di accumulo.

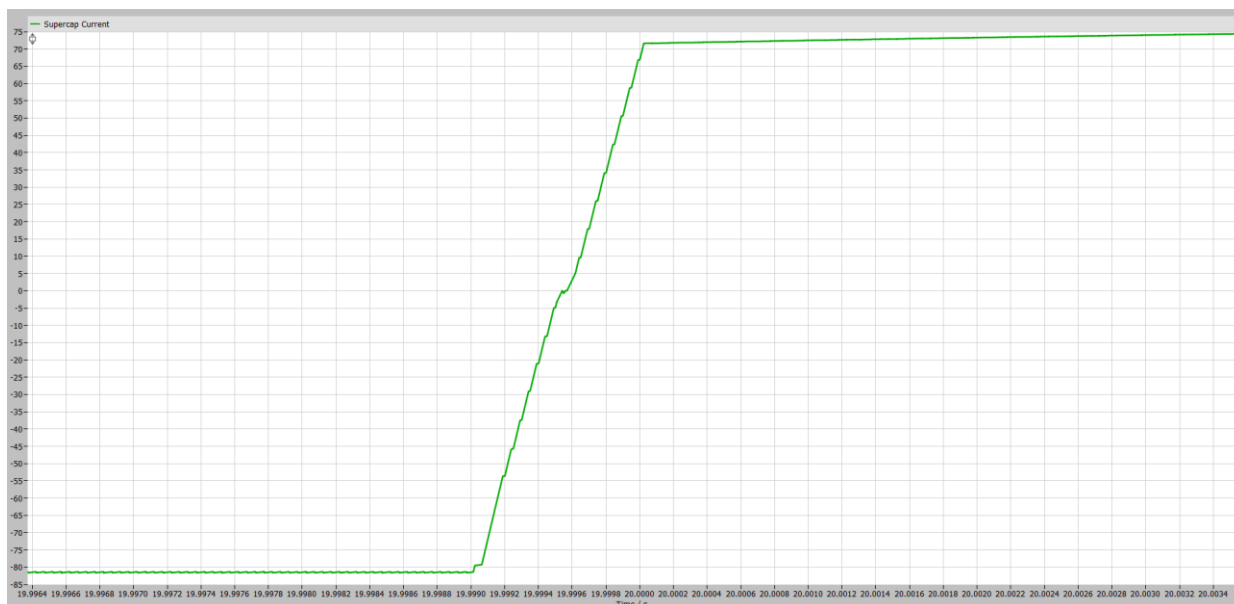


Figura 12.15: Zoom profilo temporale della corrente complessiva del supercondensatore

In Figura 12.16 si osservano i cicli del ripple triangolare della corrente complessiva del supercondensatore. Si nota chiaramente il miglioramento dovuto alla tecnica interleaving.

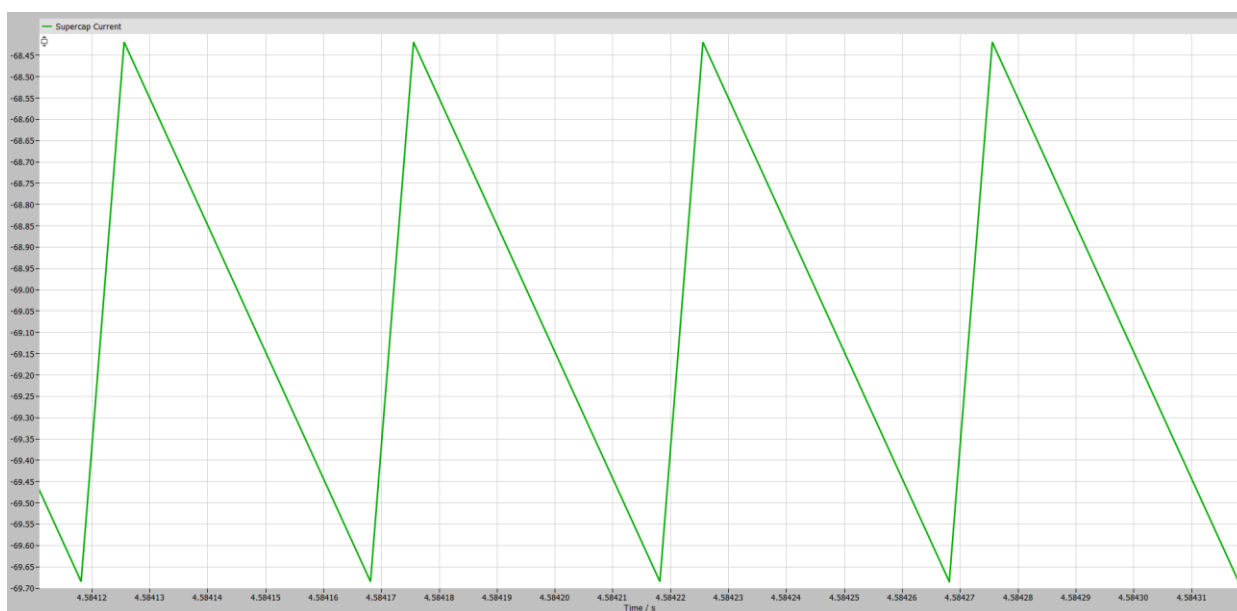


Figura 12.16: Cicli del ripple di corrente complessiva del supercondensatore

Correnti nei due rami della batteria

In Figura 12.17 sono riportati gli andamenti temporali delle correnti nei due rami della batteria. Risultano sfasati di 180° , grazie alla logica interleaving implementata.

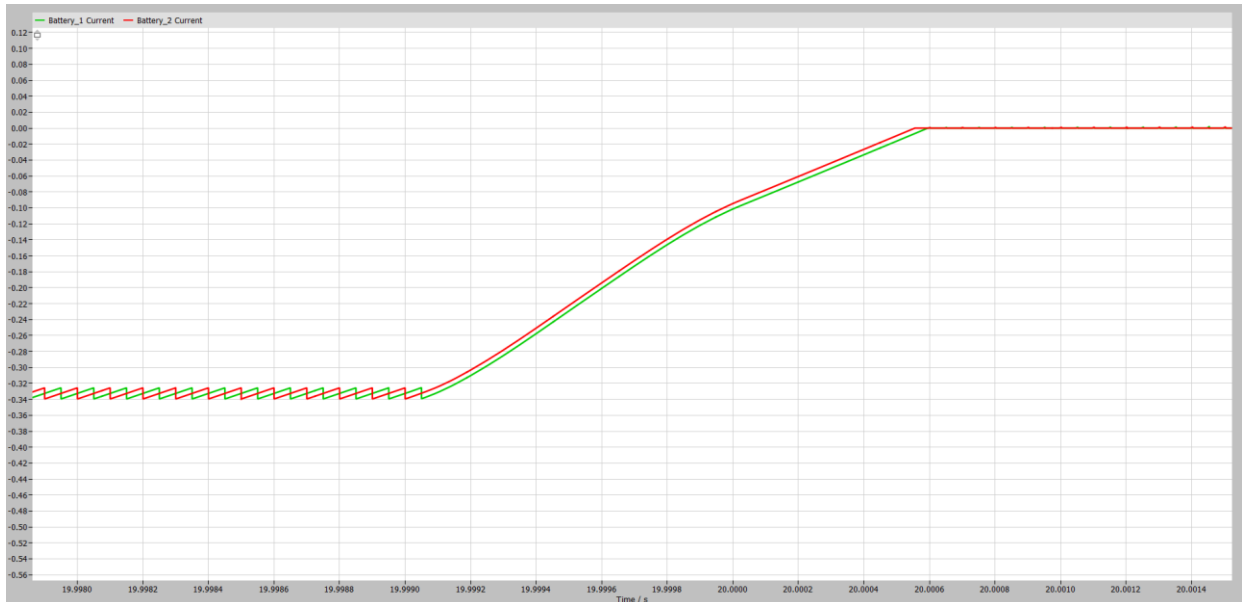


Figura 12.17: Profilo temporale delle correnti nei due rami della batteria

Corrente complessiva della batteria

Il profilo della corrente complessiva di batteria, in Figura 12.18, rimane identico a quello visto nel modello a singolo ramo. Con la logica interleaving, la corrente di batteria risulta più filtrata e priva di ripple residuo, evidenziando la capacità di compensazione, la quale riduce la componente pulsante della corrente di batteria migliorandone l'efficienza e la vita utile.

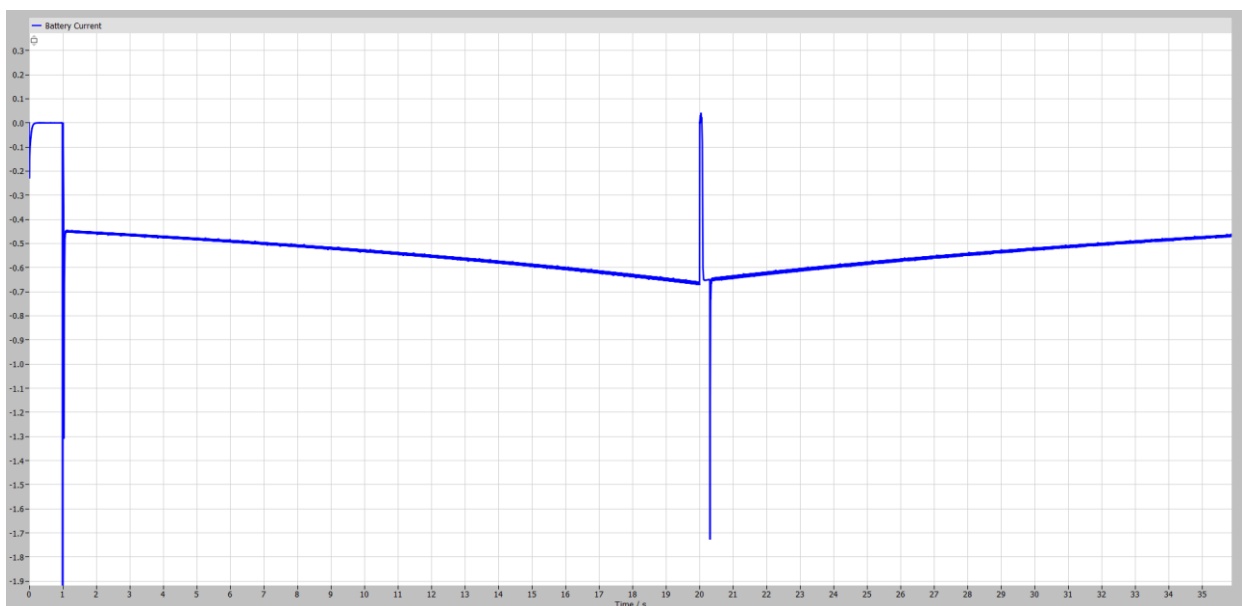


Figura 12.18: Profilo temporale della corrente complessiva di batteria

Facendo uno zoom sul profilo di corrente complessiva di batteria, in Figura 12.19 si può osservare l'andamento del ripple. Rispetto al modello a singolo ramo, il ripple risulta attenuato grazie sempre alla logica interleaving implementata e quindi allo sfasamento di 180° dei convertitori bidirezionali dei due sistemi di accumulo.

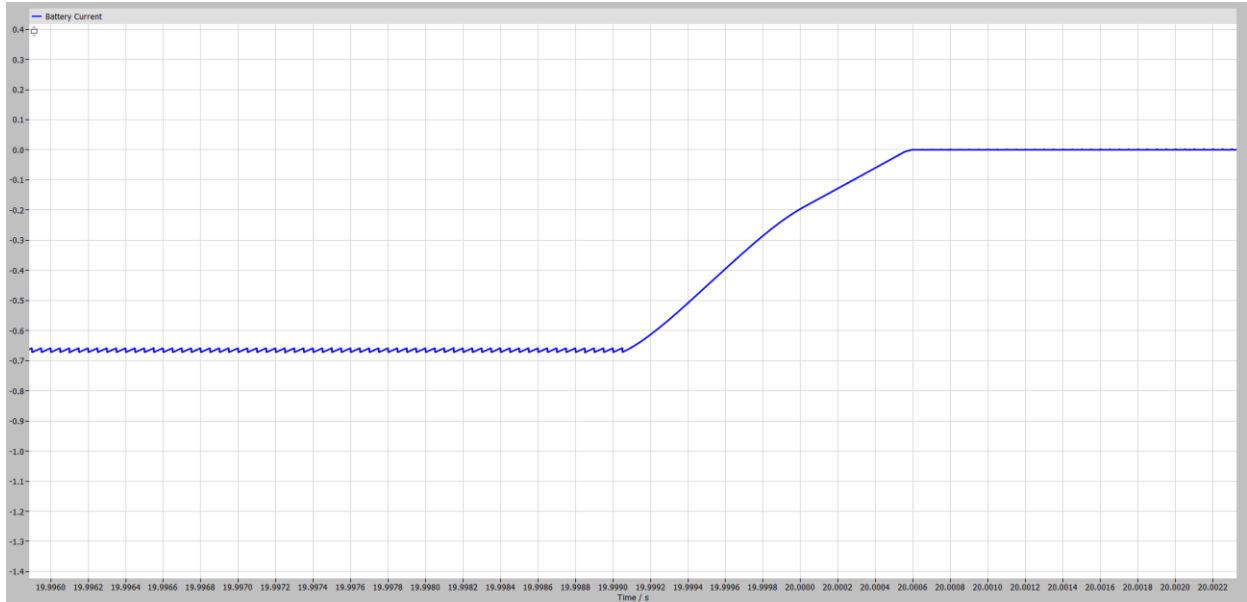


Figura 12.19: Zoom profilo temporale della corrente complessiva di batteria

Nel complesso, il confronto tra le due architetture mette in luce alcuni aspetti significativi:

- Il sistema interleaved presenta un ripple di corrente sensibilmente inferiore sia sul supercondensatore che sulla batteria, grazie allo sfasamento delle fasi di commutazione;
- L'efficienza della gestione energetica risulta migliorata, poiché le correnti medie si distribuiscono su due percorsi paralleli, riducendo le perdite per conduzione e commutazione;
- Le sollecitazioni dinamiche sul bus DC e sui componenti passivi (induttori e condensatori) risultano inferiori, migliorando la qualità della tensione di bus e la stabilità complessiva del sistema.

Analisi delle tensioni del bus DC e del supercondensatore

In Figura 12.20 è riportato l'andamento della tensione del bus DC, in Figura 12.22 la tensione del supercondensatore. L'osservazione congiunta di queste grandezze consente di valutare la capacità del sistema interleaved di mantenere la stabilità del bus e di gestire in modo coordinato le fasi di carica e scarica dell'accumulo rapido.

Tensione del bus DC

La tensione del bus DC, in Figura 12.20, si mantiene stabile attorno al valore nominale di 100 V, come visto nel modello a singolo ramo. Durante l'intero intervallo temporale, la tensione mostra piccole deviazioni, anche in corrispondenza dei transitori di carico a $t \approx 20$ s, dove si osserva soltanto un piccolo impulso di brevissima durata. Questo comportamento conferma la robustezza dell'anello di controllo in tensione, realizzato mediante il regolatore PI e implementato in configurazione interleaved. L'utilizzo di due rami in parallelo, pilotati in sfasamento di 180° , consente infatti di ridurre notevolmente le componenti armoniche che si riflettono sul bus DC, garantendo una tensione pressoché continua e priva di ripple significativo. Rispetto al modello a singolo ramo, si nota un miglioramento evidente nella qualità della regolazione di tensione: i disturbi transitori sono di ampiezza minore e la frequenza di ripple risulta raddoppiata, producendo un effetto di filtraggio dovuto allo sfasamento dei due canali di conversione.



Figura 12.20: Profilo temporale della tensione del bus DC

Anche in questo caso, allargando la scala dello scope, le oscillazioni sono rese trascurabili, poiché si manifestano, appunto, in un intervallo molto piccolo (Figura 12.21).

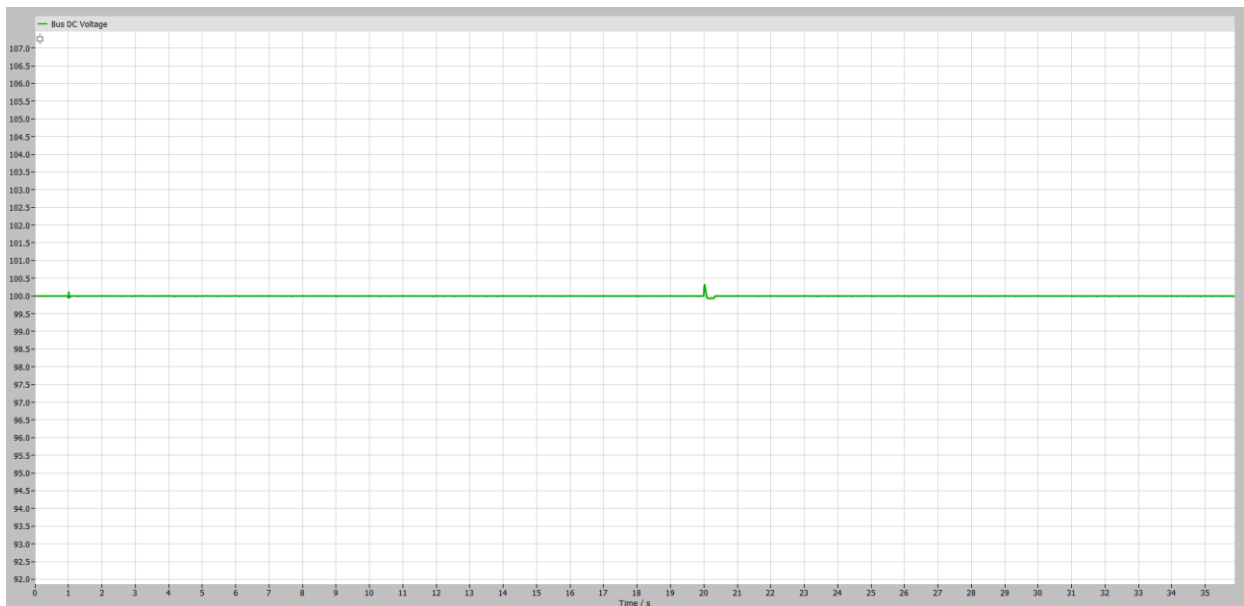


Figura 12.21: Profilo temporale della tensione del bus DC a larga scala

Tensione del supercondensatore

L'andamento della tensione del supercondensatore, in Figura 12.22, rimane identico a quello visto nel modello a singolo ramo, con la differenza che, grazie al funzionamento interleaved, risulta più lineare e privo di picchi locali, segno di una riduzione del ripple di tensione. L'effetto combinato dei due convertitori consente infatti di suddividere la corrente di carica/scarica e di distribuire in modo più uniforme le variazioni di potenza, migliorando la stabilità del supercondensatore e riducendo le perdite per commutazione.

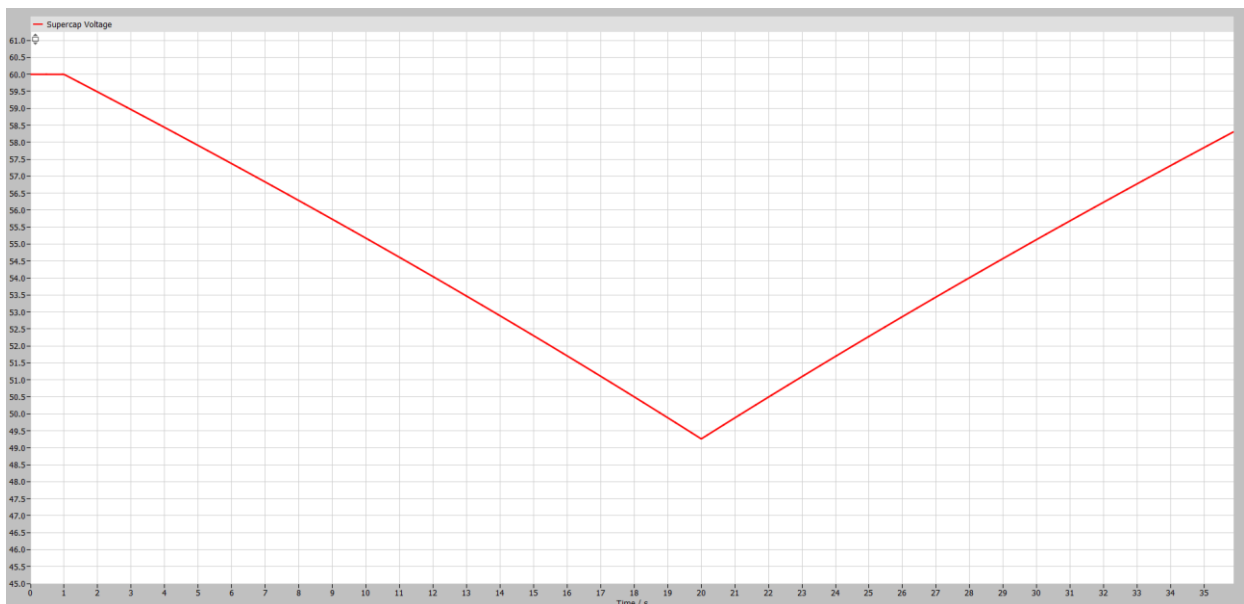


Figura 12.22: Profilo temporale della tensione del supercondensatore

Il confronto tra i due modelli evidenzia in modo chiaro i benefici dell'architettura interleaved:

- La tensione del bus DC presenta un ripple più contenuto e una risposta più rapida ai disturbi di carico;
- La tensione del supercondensatore mantiene un andamento regolare e continuo, evitando brusche variazioni e riducendo le sollecitazioni elettriche sul dispositivo;
- L'efficienza del controllo PI risulta migliorata, in quanto i due rami agiscono in parallelo, fornendo un contributo distribuito che riduce il tempo di risposta e limita le oscillazioni residue.

Il comportamento del sistema interleaved dimostra, dunque, un miglior equilibrio dinamico tra i rami di accumulo e un livello di ripple significativamente ridotto su tutte le principali grandezze elettriche. In conclusione, si vuole ricordare che, nell'applicazione in esame, sono stati utilizzati solamente due rami associati a batteria e supercondensatore; ma, al fine di migliorare la dinamica del sistema e ridurre ulteriormente il ripple, è possibile aumentare il numero di convertitori, ricordando di rispettare la logica interleaved e quindi di sfasare i segnali PWM dei vari rami di un angolo φ , definito come segue:

$$\varphi = \frac{360^\circ}{n} \quad (12.1)$$

dove n è il numero di rami in parallelo. Così facendo, quei benefici osservati nell'interleaving a due rami, saranno migliori in funzione del numero di rami impiegati. Nel presente lavoro, non è stata eseguita questa analisi poiché non rientrava tra gli obiettivi del progetto.

13. VERIFICA DELLA STRATEGIA DI CONTROLLO IN UN SISTEMA REALE

Per verificare le prestazioni della strategia di controllo, vengono eseguite differenti simulazioni del sistema di accumulo di energia ibrido. L'obiettivo è quello di verificare che, il controllo implementato su PLECS, analizzato nel capitolo precedente, possa funzionare per una generica applicazione reale. Dunque, in questa sezione, sarà riportata un'applicazione reale, proveniente dalla letteratura scientifica ed in seguito, sarà riprodotta in simulazione, utilizzando il sistema implementato precedentemente su PLECS, al fine di convalidare la strategia di controllo. Saranno confrontati i profili delle principali grandezze elettriche.

13.1. Descrizione dell'applicazione reale

In questa applicazione, la struttura del sistema solare-batteria-supercondensatore è mostrata in Figura 13.1. È composta da un modulo solare, un modulo HESS batteria/supercondensatore, moduli di controllo e di carico. La parte elettrica è collegata tramite il bus DC. Lo scopo principale del sistema è sfruttare appieno l'energia generata dal sole e fornirla al carico. Quando l'energia è eccessiva o insufficiente, il sistema di accumulo viene utilizzato per regolare l'alimentazione al fine di garantire il funzionamento stabile del carico. I dettagli di ciascun modulo sono discussi di seguito.

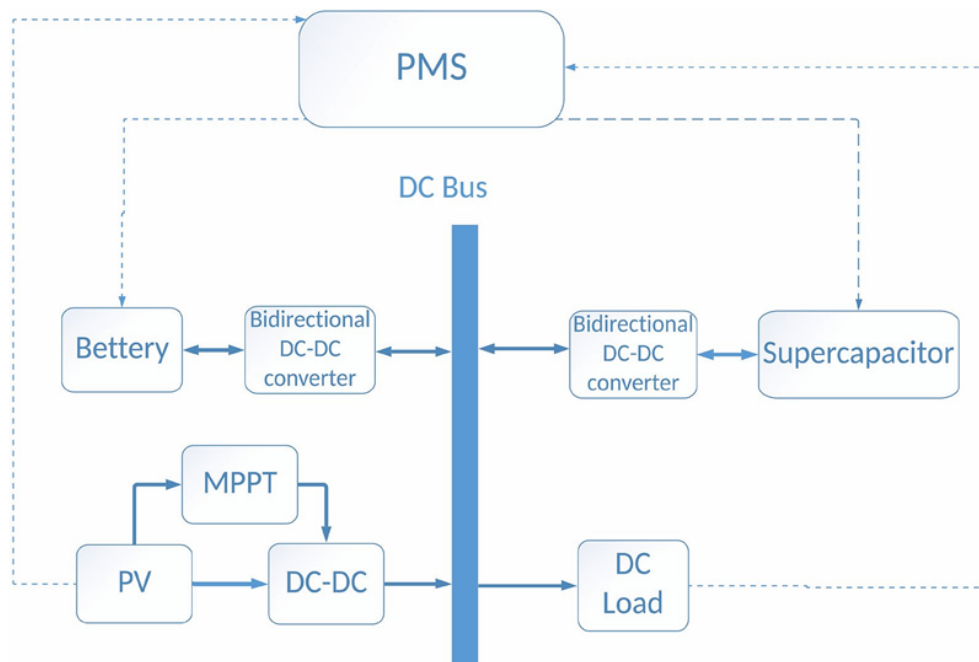


Figura 13.1: Struttura del sistema [26]

Il convertitore DC-DC è un interruttore on-off che converte ripetutamente una tensione o corrente continua in una tensione o corrente ad onda quadra ad alta frequenza e poi la converte in un'uscita di tensione continua. Il convertitore DC-DC è generalmente composto da un induttore, un diodo, un MOSFET/IGBT e un condensatore. Il convertitore DC-DC è un convertitore di tensione che

fornisce effettivamente in uscita una tensione fissa dopo aver convertito la tensione di ingresso. Questa applicazione utilizza un convertitore DC-DC boost PWM. Lo schema elettrico dell'HESS adottato in questo lavoro è costituito da un pacco batteria, un pacco SC, due convertitori DC-DC bidirezionali e un controller. La funzione principale del modulo batteria è quella di immagazzinare l'energia residua dopo che la produzione di energia solare ha soddisfatto il consumo energetico del carico e di fornire energia al carico quando l'alimentazione del modulo solare è insufficiente.

La potenza di carica/scarica dell'HESS soddisfa la seguente formula:

$$P_b + P_{sc} = P_L - P_{pv} \quad (13.1)$$

dove

P_b , P_{sc} , P_L e P_{pv} sono rispettivamente la potenza della batteria, del supercondensatore, la richiesta del carico e la potenza della sorgente fotovoltaica.

Il SC è un elemento di accumulo di energia tra un condensatore e una batteria. Presenta sia le caratteristiche di carica/scarica rapida di un condensatore sia le caratteristiche di accumulo di energia di una batteria. Inoltre, il SC presenta i vantaggi di un'elevata densità di potenza e di un'elevata efficienza dell'amplificatore di potenza. Pertanto, viene spesso scelto come unità di accumulo di energia ausiliaria. Il SC, in generale, è composto da condensatori e resistori che rappresentano le unità di carica o scarica.

Il cosiddetto convertitore DC-DC bidirezionale in corrente è il funzionamento a due quadranti del convertitore DC-DC. La polarità della tensione di ingresso e di uscita rimane invariata, ma la direzione della corrente di ingresso e di uscita può essere modificata. Lo stato di uscita del convertitore può essere modificato in uno o due quadranti del piano V-I. Le porte di ingresso e di uscita del convertitore possono comunque completare la funzione di conversione della tensione. La potenza può fluire non solo dal terminale di ingresso al terminale di uscita, ma anche al contrario.

Lo scopo principale è utilizzare il controller basato sui dati (DDC) per ottenere le grandezze di controllo di riferimento della batteria e del supercondensatore, quindi utilizzare il generatore PWM per generare segnali di controllo al fine di gestire la carica e la scarica della batteria e del supercondensatore. Il metodo DDC proposto è un'alternativa al controller PI tradizionale. Quest'ultimo è un approccio classico e deterministico: regola la tensione del bus DC tramite un errore tra valore misurato e riferimento, generando una corrente totale di riferimento. Poi, divide questa corrente tra batteria e supercondensatore: la batteria gestisce le variazioni lente e il supercap quelle rapide. È semplice, robusto, facilmente implementabile in PLECS, ma richiede un tuning manuale e non si adatta automaticamente ai cambiamenti del sistema (ad esempio variazioni di carico o invecchiamento delle celle). Il controller basato sui dati (DDC), invece, non usa un modello matematico esplicito: impara il comportamento del sistema dai dati (misure, simulazioni, esperimenti) e determina direttamente i riferimenti di corrente ottimali per batteria e supercap. Può tener conto di vincoli (SoC, tensione, temperatura) e ottimizzare le prestazioni (ridurre il ripple o migliorare l'efficienza). È però più complesso da sviluppare, richiede una fase di addestramento e maggiore potenza di calcolo, ma può adattarsi meglio a condizioni variabili.

La sorgente del sistema sperimentale è data da un pannello fotovoltaico e viene considerata in un giorno a ciel sereno. I dati di temperatura media giornaliera e irraggiamento, riportati in Figura 13.2, vengono utilizzati nella simulazione.

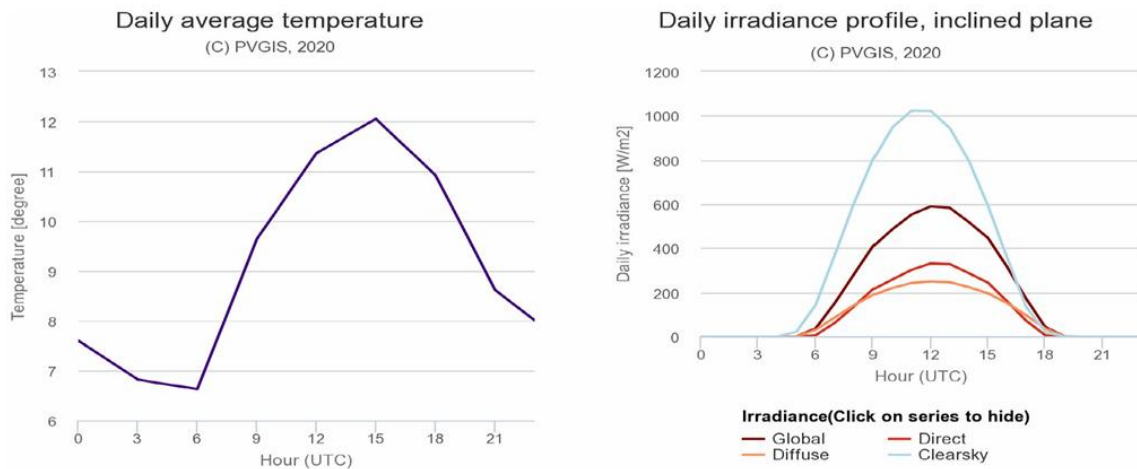


Figura 13.2: Temperatura media giornaliera e irraggiamento [26]

L'applicazione reale ha delle caratteristiche ben precise. In particolare, il supercondensatore ha una capacità di 29 F, una tensione iniziale di 50 V e una resistenza equivalente serie di 0.003 Ω ; la batteria ha una tensione di 44 V e una resistenza interna di 0.031429 Ω . Il condensatore del bus DC ha una tensione di 100 V. La commutazione periodica del carico nel tempo simula il consumo di energia di diversi carichi: un motore CC industriale da 200 W, una lampada LED CC da 100 W e un riscaldatore CC da 600 W vengono utilizzati per simulare lo stato di funzionamento di un carico CC. Gli orari di funzionamento sono i seguenti: il motore funziona dalle 8:00 alle 18:00 durante il giorno; le luci funzionano dalle 18:00 di sera alle 18:00 del giorno successivo; il riscaldatore elettrico funziona un'ora ogni quattro ore da zero. Le Figure 13.3 e 13.4 mostrano la tensione e la potenza del carico. Si può osservare che, in condizioni di commutazione dei carichi, il metodo proposto può mantenere stabile la tensione del carico e non causerà grandi fluttuazioni nella sua potenza. Dalla Figura 13.5, si nota che il sistema raggiunge lo scopo di utilizzo e accumulo dell'energia solare e fornisce energia al carico in modo continuo. Nel caso di carichi a commutazione non periodica, le frequenti commutazioni dei carichi causeranno fluttuazioni nella generazione di energia solare in corrente continua.

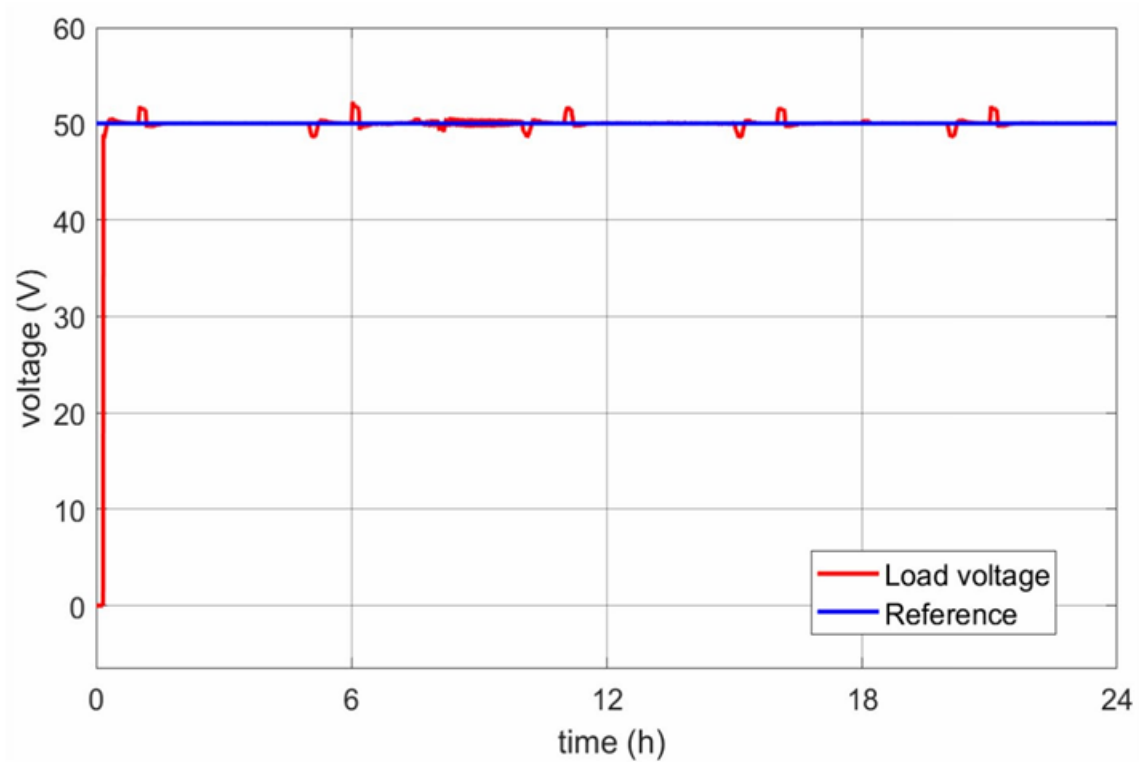


Figura 13.3: Tensione del carico nell'arco di un giorno [26]

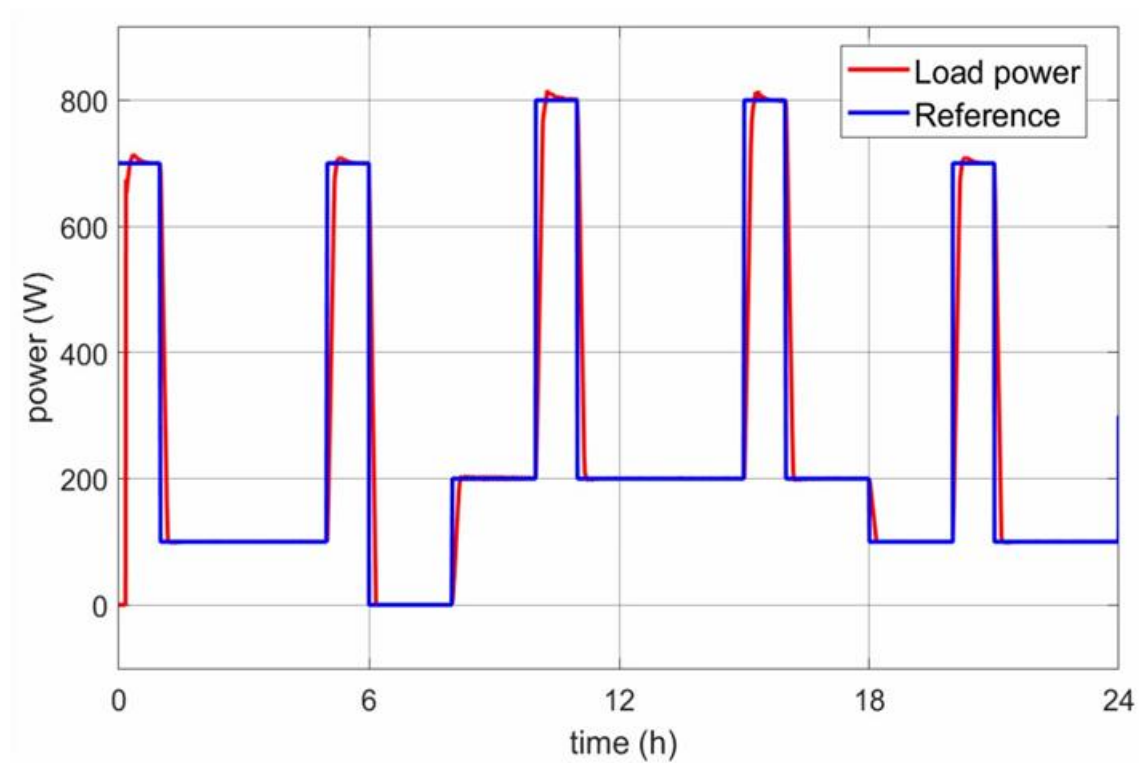


Figura 13.4: Potenza del carico nell'arco di un giorno [26]

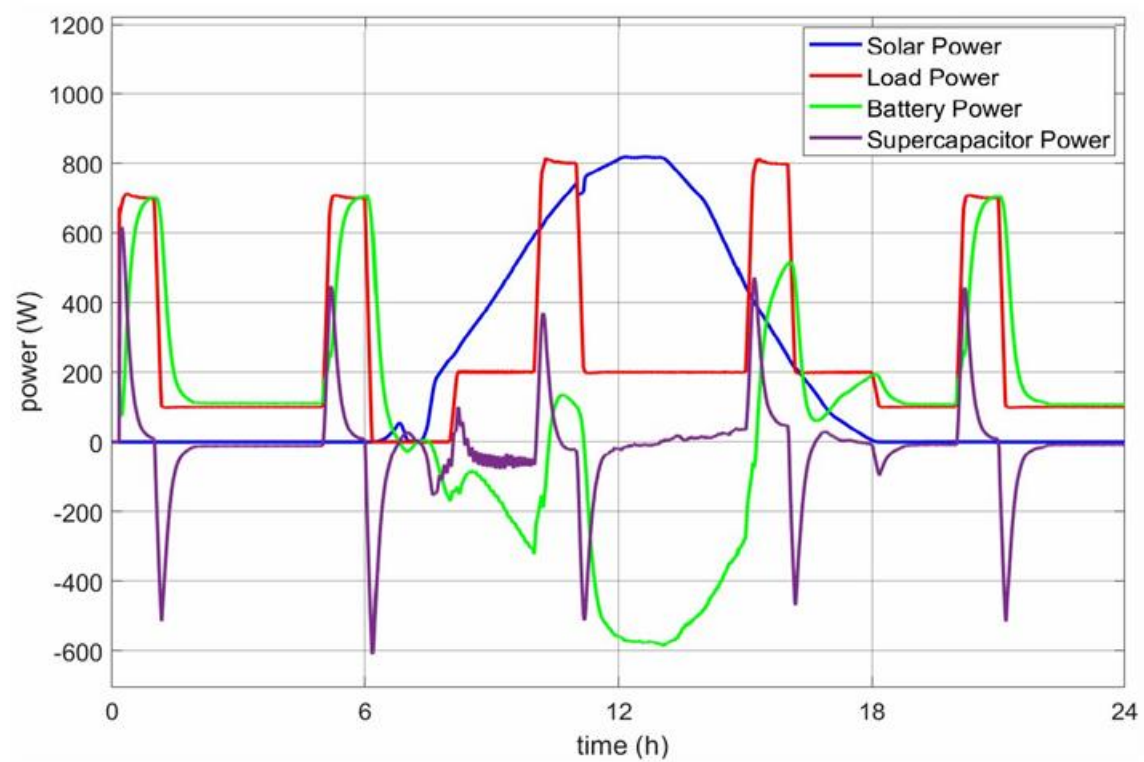


Figura 13.5: Potenza dei componenti nell'arco di un giorno [26]

13.2. Simulazione dell'applicazione reale

Utilizzando il sistema di controllo a singolo ramo (Figura 13.6), implementato precedentemente su PLECS, si riportano le caratteristiche dell'applicazione reale e si confrontano i profili ottenuti. La sorgente del sistema è data da una cella fotovoltaica, la quale serve a capire cosa accade quando l'energia generata è più o meno sufficiente a soddisfare le richieste del carico e osservare di conseguenza la risposta dei sistemi di accumulo. Come visto nell'applicazione, si riproduce il profilo tipico della sorgente in un giorno a ciel sereno, senza tener conto di un possibile abbassamento della resa della cella, dovuto a delle condizioni meteorologiche poco favorevoli. Questo aspetto non è stato trattato, poiché non rientra tra le finalità della tesi. Inoltre, è bene ricordare che l'applicazione reale prevede una durata di funzionamento di un giorno, ma la simulazione è stata sviluppata per circa 24 s. Nelle simulazioni eseguite, l'asse temporale copre l'intero ciclo giornaliero.

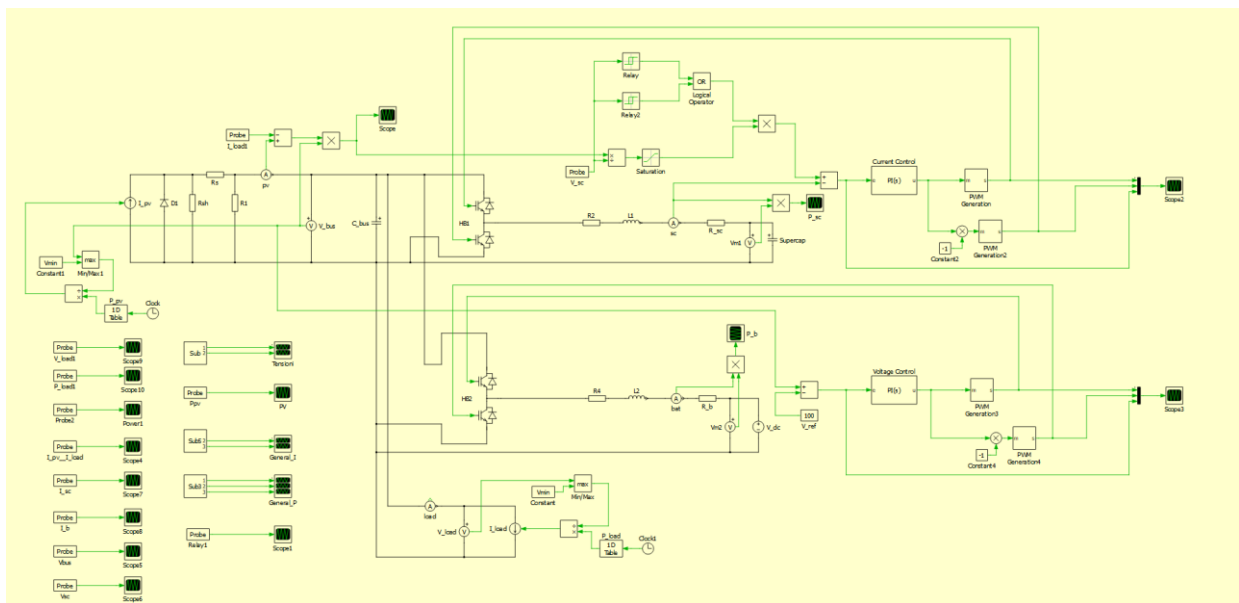


Figura 13.6: Modello del sistema a singolo ramo per l'applicazione reale

In Figura 13.7 si riporta l'andamento tipico di una sorgente fotovoltaica in un giorno a ciel sereno, espresso in termini di potenza. Confrontando il profilo con quello visto nell'applicazione, si nota una buona riproduzione.

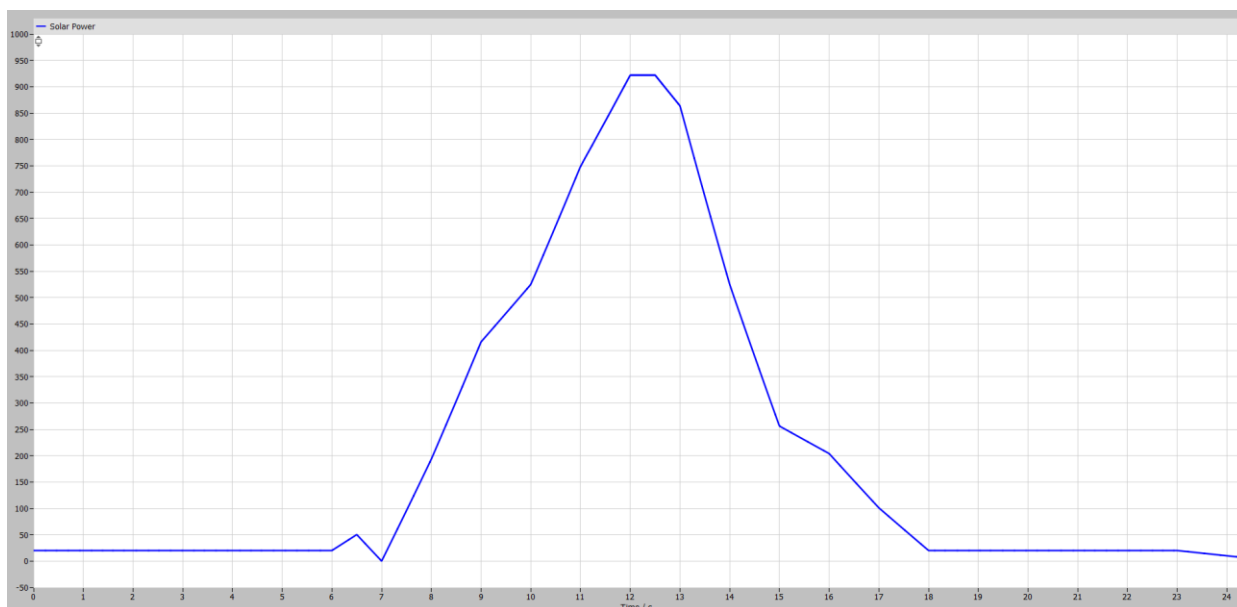


Figura 13.7: Profilo temporale della potenza del generatore fotovoltaico

In Figura 13.8 si osserva il profilo del carico a commutazione periodica, sempre espresso in termini di potenza e definito dalle caratteristiche dell'applicazione reale.

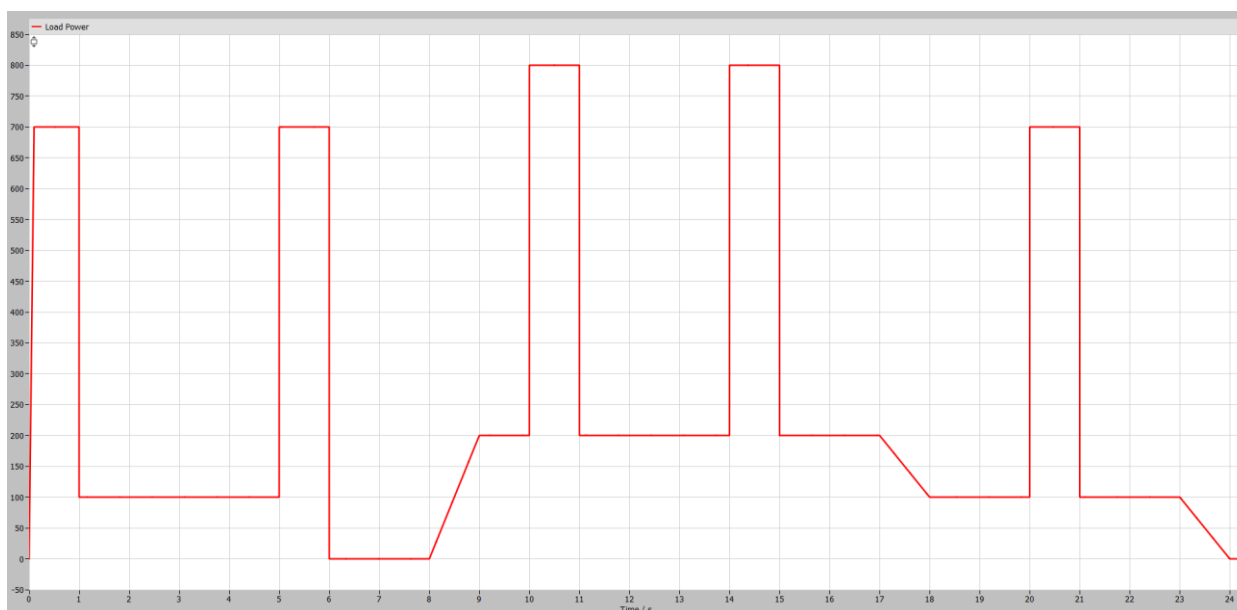


Figura 13.8: Profilo temporale della potenza del carico

La Figura 13.9 mostra l'andamento temporale della tensione del carico, la quale si mantiene prossima ai 100 V, con oscillazioni poco significative durante i transitori di potenza, come visto anche nel profilo dell'applicazione reale. Questo evidenzia l'efficacia del controllo implementato e la buona distribuzione dei flussi di potenza tra i componenti.

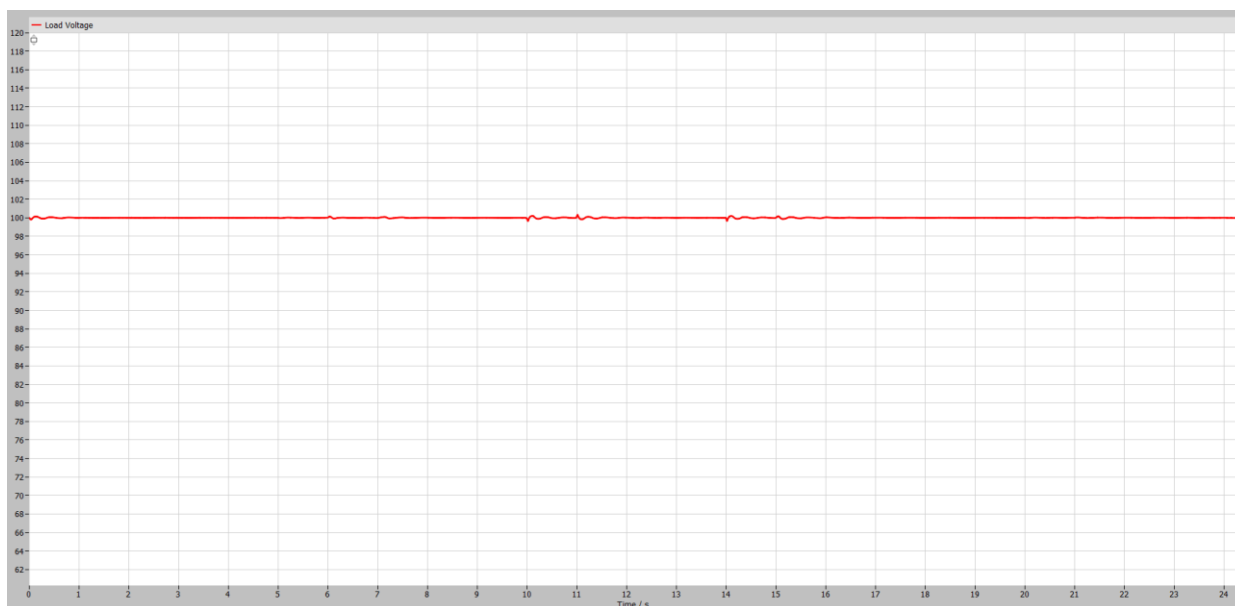


Figura 13.9: Profilo temporale della tensione del carico

In Figura 13.10 è riportato il profilo temporale della tensione ai capi del supercondensatore, la quale varia intorno ai 50 V (valore iniziale), riflettendo le fasi di carica e scarica del dispositivo.

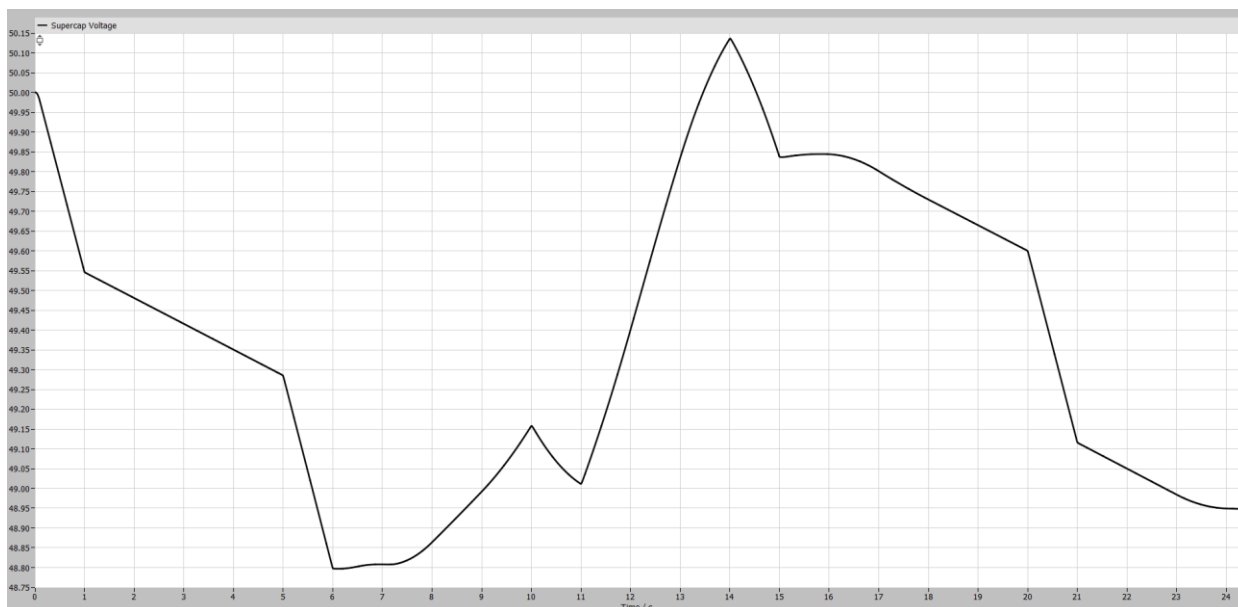


Figura 13.10: Profilo temporale della tensione del supercondensatore

In Figura 13.11 si osserva il profilo della potenza del supercondensatore, in Figura 13.12 quello della batteria. Si possono osservare i cicli di carica e scarica dei due sistemi di accumulo, in funzione del comportamento della sorgente fotovoltaica rispetto al carico. Quando la sorgente non soddisfa la richiesta, si manifesta il processo di scarica dei due dispositivi (valori negativi); quando invece la sorgente è sufficiente, avviene il processo di carica (valori positivi). In particolare, si nota che, rispetto al supercondensatore, la batteria agisce molto meno, in accordo al nostro obiettivo. Si vuole infatti dimostrare che, durante i processi di carica e scarica, il supercondensatore interviene finché raggiunge il massimo delle sue possibilità, il resto lo mette a disposizione la batteria. In questo modo, si riduce lo stress e si prolunga la durata di vita delle batterie. In realtà, in questo caso è stato scelto un carico limitato nel tempo, rispetto al quale il supercondensatore risulta sempre disponibile. Se fosse stato scelto un carico costante, ad esempio un'illuminazione pubblica, si sarebbe osservata una maggiore azione da parte della batteria.

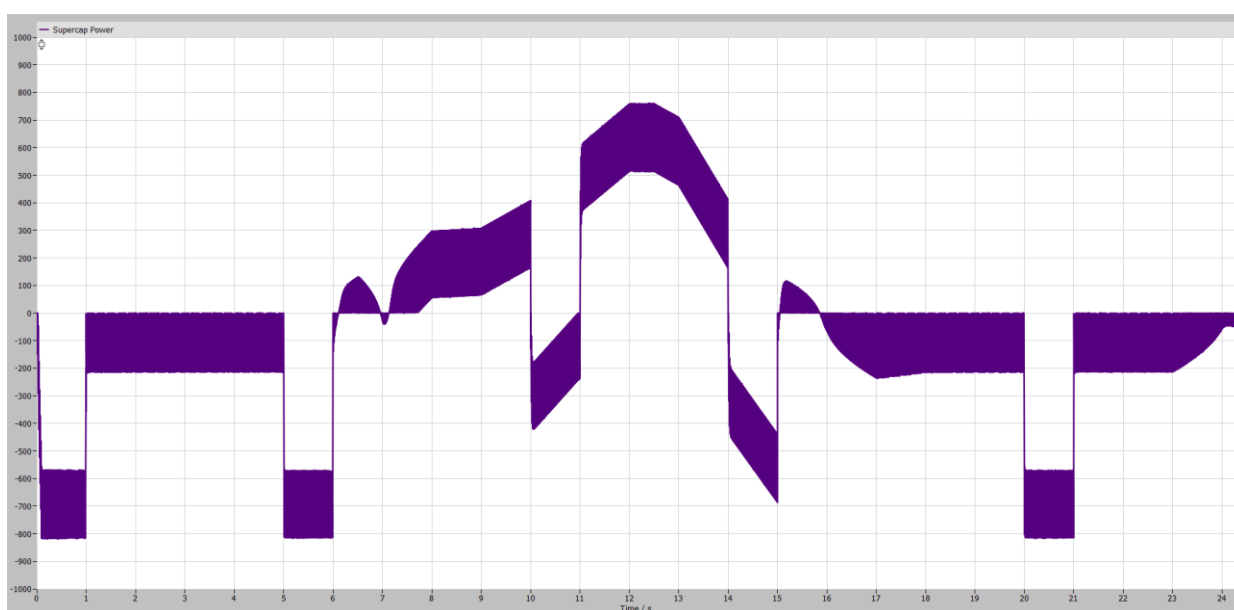


Figura 13.11: Profilo temporale della potenza del supercondensatore

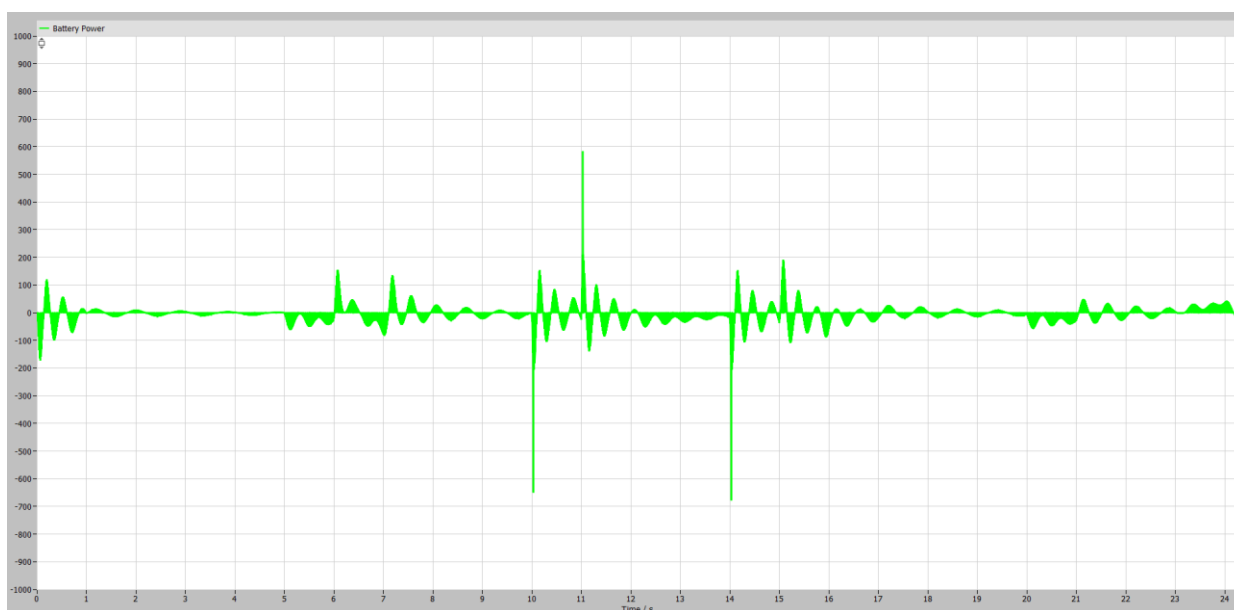


Figura 13.12: Profilo temporale della potenza di batteria

Infine, in Figura 13.13 si riportano, in termini di potenza, gli andamenti complessivi dei vari componenti del sistema: potenza della sorgente solare (in blu), potenza del carico (in rosso), potenza della batteria (in verde) e potenza del supercondensatore (in viola). Si sta considerando sempre il modello del sistema a singolo ramo.

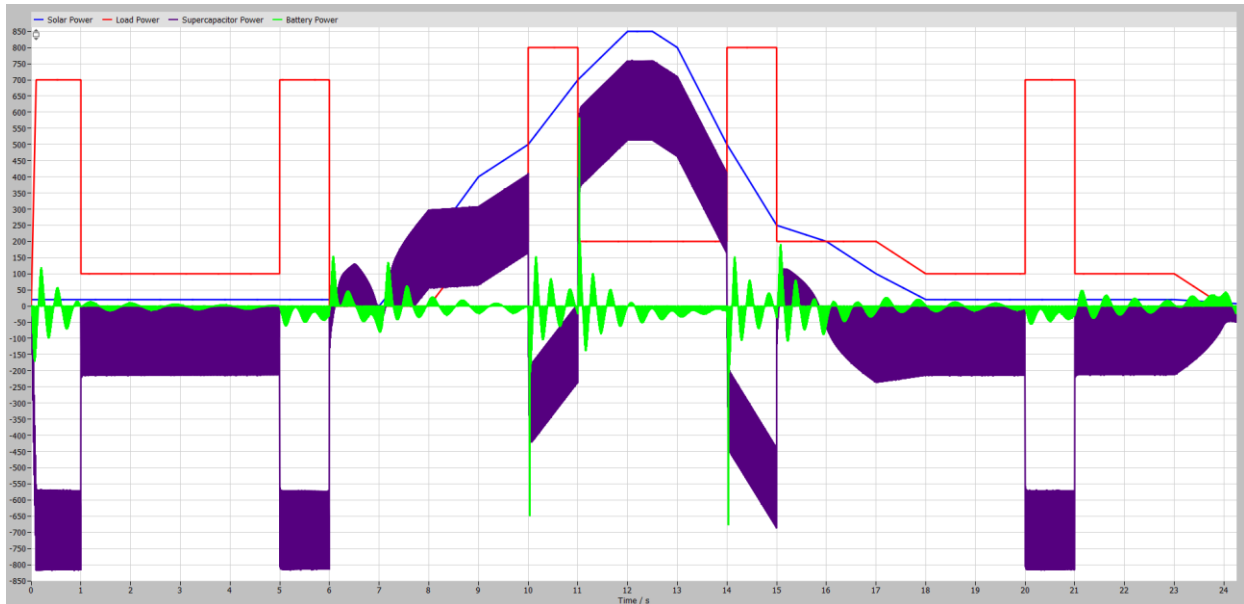


Figura 13.13: Potenza dei componenti del sistema a singolo ramo

Confrontando la simulazione con il profilo di potenza reale, tratto dalla letteratura scientifica, si possono fare delle considerazioni. Entrambi i grafici rappresentano l'andamento temporale delle potenze associate ai diversi componenti del sistema ibrido di accumulo composto da generatore fotovoltaico, batteria, supercondensatore e carico. L'asse temporale copre l'intero ciclo giornaliero, consentendo di valutare la capacità del modello di riprodurre correttamente i flussi energetici e la strategia di power management tipica delle applicazioni reali.

Andamento generale e coerenza del comportamento dinamico

In entrambe le rappresentazioni si osserva un comportamento qualitativamente analogo: la potenza fotovoltaica segue l'andamento tipico dell'irraggiamento solare, con un picco nelle ore centrali e valori prossimi allo zero nelle prime ore del mattino e in serata. La potenza del carico mostra invece un profilo discontinuo, caratterizzato da diversi intervalli di assorbimento, rappresentativi delle condizioni di variabilità tipiche dei carichi residenziali considerati. Durante le fasi in cui la potenza fotovoltaica risulta inferiore a quella del carico, il sistema di accumulo interviene in scarica: la batteria fornisce il contributo principale di potenza, mentre il supercondensatore compensa i transitori e le variazioni rapide di carico. Viceversa, nelle ore centrali della giornata, quando la potenza solare eccede la domanda, i due dispositivi di accumulo assorbono energia: la batteria viene ricaricata con una potenza positiva moderata, mentre il supercondensatore interviene con picchi brevi e di maggiore intensità, garantendo la stabilità del bus DC. Si nota che gli andamenti delle potenze di batteria e supercondensatore dell'applicazione sperimentale sono invertiti rispetto a quelli della simulazione. Questo è dovuto alla diversa convenzione di segni delle correnti, presa in considerazione su PLECS.

Analisi comparativa dei flussi di potenza

Il grafico sperimentale dell'applicazione evidenzia una gestione energetica bilanciata, nella quale la batteria fornisce potenze comprese tra ± 400 W e il supercondensatore gestisce picchi di potenza fino a ± 600 W. Tale comportamento è coerente con il controllo, dove al supercondensatore è attribuita la compensazione ad alta dinamica e alla batteria la regolazione energetica a bassa frequenza. Il modello simulativo riproduce fedelmente la stessa logica: anche qui la potenza del supercondensatore presenta picchi istantanei di entità elevata (fino a ± 800 W) in corrispondenza dei fronti di variazione del carico, mentre la batteria mostra un andamento più smorzato e regolare, con potenze inferiori. Il profilo di potenza fotovoltaica simulato rispetta la curva giornaliera della fonte solare, confermando la correttezza del modello adottato. La potenza del carico segue gli stessi intervalli del riferimento reale, consentendo un confronto diretto delle fasi di scambio energetico.

Con la logica interleaving, si osserva un miglioramento nella qualità dei profili ottenuti (Figura 13.14). In particolare, per i motivi già visti in precedenza, la potenza del supercondensatore risulta avere un ripple nettamente inferiore, grazie allo sfasamento di 180° dei due convertitori bidirezionali di batteria e supercondensatore.

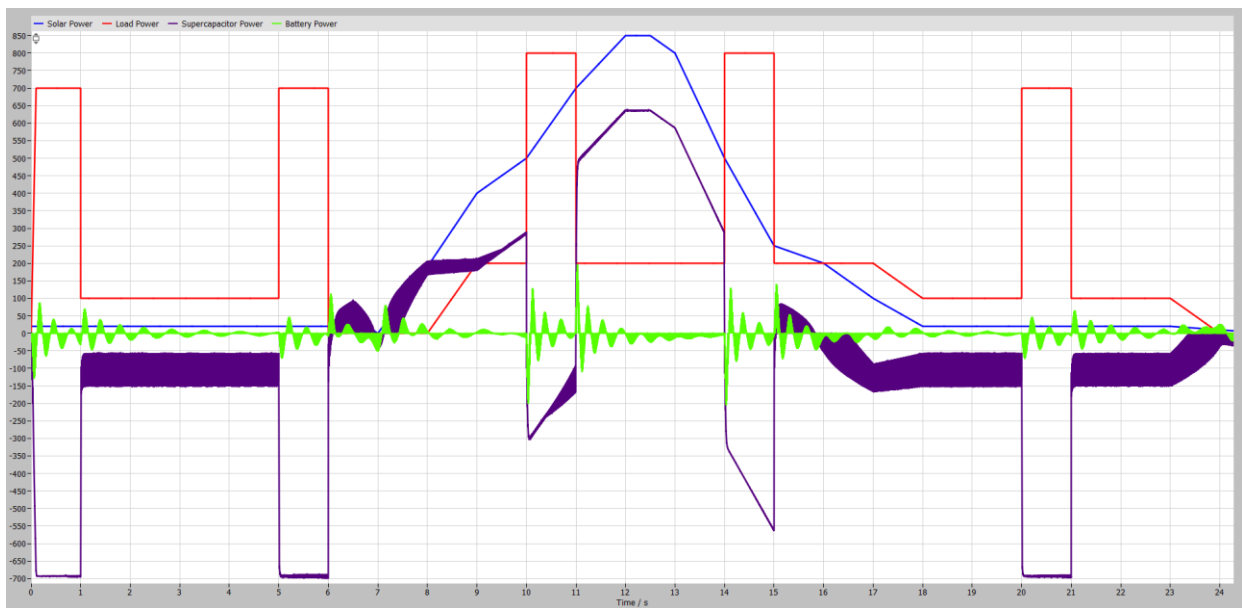


Figura 13.14: Potenza dei componenti del sistema interleaving a doppio ramo

In conclusione, il confronto dimostra che il modello sviluppato in PLECS è in grado di replicare in modo realistico e coerente il comportamento energetico di un sistema ibrido batteria–supercondensatore alimentato da sorgente fotovoltaica. La similitudine tra i due profili di potenza conferma la correttezza della strategia di gestione energetica, sia nelle fasi di carica che di scarica, e la capacità del sistema di mantenere un bilancio di potenza stabile in presenza di carichi variabili. In particolare, l'accordo tra simulazione e dati sperimentali evidenzia che il supercondensatore assorbe o fornisce potenza per compensare i transitori rapidi, la batteria contribuisce al bilancio medio giornaliero, il bus DC rimane regolato senza oscillazioni significative. Dunque, la simulazione riprodotta rappresenta una valida replica del comportamento reale documentato in letteratura, e costituisce una base affidabile per ulteriori ottimizzazioni di controllo o validazioni sperimentali su prototipi HESS.

14. CONCLUSIONI

L'attività di modellazione e simulazione condotta ha permesso di approfondire il comportamento dinamico di un sistema ibrido di accumulo HESS costituito da batteria e supercondensatore, connesso a una sorgente fotovoltaica e a un carico variabile. Si possono trarre le seguenti conclusioni:

- Nel modello a singolo ramo, il sistema ha mostrato un comportamento stabile e coerente con la strategia di controllo implementata: la tensione del bus DC si mantiene pressoché costante e la potenza fornita dai dispositivi di accumulo risulta ben bilanciata rispetto a quella prodotta dal fotovoltaico e assorbita dal carico. Tuttavia, le analisi delle correnti hanno evidenziato la presenza di un ripple più pronunciato sia nelle correnti del supercondensatore sia, in misura minore, in quelle della batteria. Questo fenomeno è dovuto all'unicità del ramo di conversione, che concentra le componenti armoniche di commutazione su un solo canale e determina maggiori sollecitazioni elettriche sui dispositivi di accumulo, con un impatto potenzialmente negativo sull'efficienza complessiva e sulla durata del sistema.
- La transizione al modello interleaved a due rami, nel quale i convertitori operano in sfasamento di 180° , ha permesso di superare tali limitazioni. I risultati ottenuti evidenziano una riduzione significativa del ripple di corrente e di tensione, una migliore qualità del bus DC e una maggiore efficienza energetica complessiva. Il funzionamento interleaved consente infatti una distribuzione più uniforme dei flussi di potenza tra i due canali, riducendo le perdite per commutazione e migliorando la risposta del sistema ai transitori di carico. In questa configurazione, il supercondensatore mantiene il ruolo di accumulo rapido, gestendo le variazioni di potenza a breve termine, mentre la batteria opera come sorgente lenta e stabile, garantendo il bilancio energetico nel medio-lungo periodo e subendo sollecitazioni più contenute. Le tensioni del bus DC e del supercondensatore confermano ulteriormente la validità dell'architettura proposta: la tensione del bus rimane perfettamente regolata intorno al valore nominale, con oscillazioni trascurabili anche in presenza di improvvise variazioni di carico, mentre la tensione del supercondensatore mostra un andamento lineare e regolare, privo di picchi indesiderati.
- Il confronto finale con i profili di potenza tratti dalla letteratura scientifica di un'applicazione reale ha consentito di validare il modello sviluppato: la simulazione riproduce in modo coerente le stesse dinamiche energetiche osservate sperimentalmente, mostrando corrispondenza nei regimi di carica e scarica della batteria e del supercondensatore, nonché nella risposta del sistema ai transitori di potenza. Le differenze quantitative riscontrate principalmente nei picchi istantanei di potenza, sono attribuibili alle semplificazioni del modello simulativo e non compromettono la fedeltà funzionale del comportamento riprodotto.

Il modello sviluppato costituisce pertanto una base solida per futuri studi sperimentali e ottimizzazioni del controllo, nonché un valido strumento per l'analisi e la progettazione di sistemi HESS destinati all'integrazione con fonti rinnovabili e applicazioni ad alta efficienza energetica. Tra gli obiettivi futuri si evidenzia l'applicazione della logica interleaved con un numero superiore di rami e l'introduzione di strategie di controllo più sofisticate.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Akshay Chandekar, J. J. (2018). *Design and Simulation of Two Phase Interleaved Bidirectional DC to DC Converter*. Vashi, NaviMumbai, (India): IJARSE.
- [2] Andriyets, I. (2016-2017). *PRESENTE E FUTURO DEI SISTEMI DI RICARICA DELLE AUTOVETTURE ELETTRICHE*. Cagliari: Università degli studi di Cagliari.
- [3] Ankit Kumar SINGH, A. K. (2022). *High Voltage Gain Bidirectional DC-DC Converters for Supercapacitor Assisted Electric Vehicles: A Review*. CPSS TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS AND APPLICATIONS.
- [4] Bavia, A. (2022-2023). *Sviluppo di un sistema di accumulo ibrido per applicazioni automotive a bassa tensione*. Torino: Politecnico di Torino.
- [5] Carletti, E. (2017-2018). *Applicazione di un sistema di accumulo ibrido batterie-supercondensatori per il trasporto di persone*. Padova: Università degli studi di Padova.
- [6] Chaouki Melkia, S. G. (2022). *Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage Systems for Stand-Alone Photovoltaic*. IIETA.
- [7] Compagnoni, M. (2009-2010). *Studio di un sistema di accumulo integrato batteria ioni di litio – supercapacità per un sistema ibrido bimodale*. Milano: Politecnico di Milano.
- [8] Dalei Wang, F. H. (2023). *Research on Energy Storage Technology of Sodium-ion Batteries & Supercapacitors for Low Speed New Energy Vehicles*. IEEE.
- [9] Deepak Ravi, B. M. (2018). *Bidirectional dc to dc Converters: An Overview of Various Topologies, Switching Schemes and Control Techniques*. Chandigarh, Allahabad (India): International Journal of Engineering & Technology.
- [10] EPM 23IND04 MetSuperCap. (s.d.). *M9 General Meeting: WP3*. POLITO, CRF, INRIM, Pleione, RISE, UTwente.
- [11] F. Alessandrini, G. B. (2010). *Studio di fattibilità tecnica sull'applicabilità delle batterie al litio nelle reti elettriche – Stato dell'arte e limiti scientifici e tecnologici*. ENEA.
- [12] Ferrari, L. E. (2011-2012). *Circuito di pilotaggio per convertitori a commutazione interleaved*. Padova: Università degli studi di Padova.
- [13] J.M.A Curti, X. R. (2012). *A Simplified Power Management Strategy for a Supercapacitor/Battery Hybrid Energy Storage System using the Half-Controlled Converter*. Tokyo, Japan: IEEE.
- [14] Jessica C. A. Sousa, T. M. (2025). *Design of a Controller for Supercapacitor's Bidirectional High-Gain Interleaved Converter*. Parà, Brazil; Tegucigalpa, Honduras; Brasilia, Brazil: Energies.
- [15] JIAO, Y. (2022). *Hybrid energy storage systems*. Stockholm, Sweden: KTH School of Electrical Engineering and Computer Science.
- [16] Kaspars Kroics, G. S. (2022). *Bidirectional Interleaved DC–DC Converter for Supercapacitor Energy Storage Integration with Reduced Capacitance*. Riga, Latvia: Electronics Bor-Ren Lin.
- [17] Khalife, M. (2024). *Development of a Low-Voltage Hybrid Storage System with GaN FET Converter*. Torino: Politecnico di Torino.

- [18] Kursad Gokce, A. O. (2016). *A Rule Based Power Split Strategy for Battery/Ultracapacitor Energy Storage Systems in Hybrid Electric Vehicles*. Sakarya, Turkey: International Journal of ELECTROCHEMICAL SCIENCE.
- [19] Massimino, S. (2020-2021). *DC-DC Converter per applicazioni automotive*. Torino: Politecnico di Torino.
- [20] Mastragostino, M. A. (2025). *Lo sviluppo delle batterie al litio dagli anni ottanta ad oggi*. Bologna: Alma Mater Studiorum - Università di Bologna.
- [21] Migliorini, R. (2010-2011). *Gestione e controllo di un sistema di accumulo misto batterie-supercondensatori per la propulsione elettrica*. Padova: Università degli studi di Padova.
- [22] Mikael Appelberg, A. P. (2004). *I convertitori DC/DC sono sempre più strategici per garantire la qualità dei sistemi elettronici*. ELETTRONICA OGGI.
- [23] Mocci, A. (2014-2015). *MODELLISTICA E PROGETTAZIONE DI CONVERTITORI ELETTRONICI DI POTENZA DC-DC*. Cagliari: Università degli studi di Cagliari.
- [24] Nutricato, R. (2021-2022). *Modelli elettrici e stima dei parametri di Batterie al litio*. Marche: Università Politecnica delle Marche.
- [25] Prashant Singh, J. S. (2021). *Power management and control of a grid-independent DC microgrid with hybrid energy storage system*. Kurukshetra, Haryana, India: ELSEVIER.
- [26] Qin Hu, S. X. (2024). *Data-based power management control for battery supercapacitor hybrid energy storage system in solar DC-microgrid*. Scientific Reports.
- [27] S. Devi Vidhya, M. B. (2019). *Modelling, design and control of a light electric vehicle with hybrid energy storage system for Indian driving cycle*. Measurement and Control.
- [28] Siriwat Sakulchotrungdet, S. K.-o. (2016). *Three-Phase Interleaved Boost Converter with Fault Tolerant Control Strategy for Renewable Energy System Applications*. Nakhon Ratchasima, Thailand: School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand.
- [29] Ujjal Manandhar, N. R. (2018). *Validation of Faster Joint Control Strategy for Battery- and Supercapacitor-Based Energy Storage System*. Singapore: IEEE.
- [30] Yaya Kamagaté, H. A. (2024). *Effective dynamic energy management algorithm for grid-interactive microgrid with hybrid energy storage system*. Vadodara, India: Electrical Engineering Department, Parul University, Vadodara, India.
- [31] Yildirim, B. (2022). *Design and Control of Bidirectional DC-DC Converters for Modular Battery Energy Storage Systems*. Newcastle, United Kingdom : Newcastle University.
- [32] Yu Zhang, Z. J. (2008). *Small-Signal Modeling and Analysis of Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage Systems* . IEEE.
- [33] Yu Zhang, Z. J. (2008). *Control Strategies for Battery/Supercapacitor Hybrid Energy Storage Systems* . Miami: IEEE.
- [34] Zappoli, G. (2018-2019). *Conversione di Potenza DC-DC in Media Tensione*. Torino: Politecnico di Torino.
- [35] Zhe Zhang, M. A. (2013). *Interleaved Boost-Half-Bridge Dual-Input DC-DC Converter with a PWM plus Phase-Shift Control for Fuel Cell Applications*. Danimarca: DTU Library.

RINGRAZIAMENTI