



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Università degli Studi di Padova

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

**Applicazione di un sistema di accumulo ibrido
batterie-supercondensatori per il trasporto di persone**

Relatore:

Prof. Mauro Andriollo

Candidato:

Enrico Carletti

Matricola 1134122

Anno Accademico 2017–2018

Indice

Sommario	1
1 Introduzione	3
2 Batterie	7
2.1 Introduzione alle batterie	7
2.2 Parametri delle batterie	9
2.3 Batterie piombo-acido	16
2.3.1 Principio di funzionamento	17
2.3.2 Classificazione delle batterie piombo-acido	19
3 Supercondensatori	23
3.1 Tecnologia dei supercondensatori	23
3.1.1 Classificazione	24
3.1.2 Caratteristiche costruttive	26
3.2 Parametri elettrici	27
3.3 Confronto con le batterie	29
4 Descrizione dell'applicazione	33
4.1 Generalità sugli APM	33
4.2 La funicolare Vadinstanbul	35
4.3 Descrizione del sistema di alimentazione dei carichi di bordo	36
4.3.1 Funzionamento del sistema di alimentazione	39
5 Analisi dei carichi e potenza limite di dimensionamento	43
5.1 Considerazioni preliminari	43
5.2 Analisi dei carichi	44
6 Dimensionamento del sistema ibrido di accumulo	51
6.1 Scelta dell'architettura	51
6.2 Dimensionamento	52
6.2.1 Dimensionamento delle batterie	52
6.2.2 Dimensionamento dei supercondensatori	59

INDICE

7	Simulazioni e analisi dei costi e dei pesi	63
7.1	Simulazioni	63
7.2	Analisi dei costi e dei pesi	71
7.2.1	Costi	71
7.2.2	Pesi	73
	Conclusioni	75
	Bibliografia	85

Elenco delle figure

- 1.1 Incremento della domanda di energia elettrica in vari paesi stimato al 2040 4
- 1.2 Tasso di crescita medio annuo stimato al 2024 del mercato dei supercondensatori 5

- 2.1 Scarica e carica di una cella elettrochimica 9
- 2.2 Curva di scarica 11
- 2.3 Curve di scarica tipiche di batterie piombo-acido in funzione del C-rate 12
- 2.4 Effetto della temperatura sulle prestazioni di una batteria 14
- 2.5 Vita ciclica in relazione alla profondità di scarica per una batteria piombo-acido 15
- 2.6 Configurazioni degli elettrodi nelle batterie al piombo 16
- 2.7 Batteria al piombo a piastre piane distribuita commercialmente 18

- 3.1 Modello di Helmolz (a) e di Gouy - Chapman (b) del doppio strato elettrico 24
- 3.2 Rappresentazione schematica di un EDLC 26
- 3.3 Scarica di un supercondensatore a corrente costante 28
- 3.4 Diagramma di Ragone per diverse tecnologie di accumulo 30
- 3.5 Differenza tra le curve di scarica di un supercondensatore e di una batteria 31

- 4.1 La funicolare Vadinstanbul 36
- 4.2 Illuminazione interna ed esterna 40
- 4.3 Rappresentazione del sistema di alimentazione di bordo 40

- 5.1 Diagrammi di carico massimo 48
- 5.2 Diagramma di carico minimo 49
- 5.3 Diagramma di carico medio 50

ELENCO DELLE FIGURE

- 5.4 Confronto tra il diagramma di carico medio e la potenza limite stabilita 50
- 6.1 Possibili configurazioni di un sistema ibrido 51
- 6.2 Variazione della capacità nominale delle batterie della famiglia XL in relazione alla velocità di scarica 55
- 7.1 Modello Simulink® del sistema di alimentazione 64
- 7.2 Andamenti di corrente durante le due corse simulate del mezzo 67
- 7.3 Modello Simulink® del sistema di alimentazione per la valutazione della scarica delle batterie 68
- 7.4 Andamenti di corrente e stato di carica per i profili di carico individuati nel capitolo 5 69
- 7.5 Andamento tipico del numero di cicli in funzione della profondità di scarica per batterie piombo-acido VRLA al gel 70

Elenco delle tabelle

- 2.1 Confronto tra batterie piombo-acido e batterie agli ioni di litio 22
- 3.1 Confronto fra i principali parametri 30
- 3.2 Confronto tra batterie e supercondensatori 32
- 4.1 Caratteristiche dell'impianto 36
- 4.2 Caratteristiche principali supercondensatori 37
- 4.3 Batterie FIAMM "Endurlite" 37
- 4.4 Lista dei carichi e rispettivi assorbimenti 38
- 4.5 Modalità di alimentazione in caso di emergenza 41
- 5.1 Assorbimenti effettivi misurati 45
- 5.2 Assorbimenti giornate di carico massimo 47
- 5.3 Assorbimenti giornata di carico minimo 48
- 5.4 Assorbimenti medi calcolati 49
- 6.1 Potenza assorbita e durata delle varie modalità nel caso peggiore 53
- 7.1 Valori dei parametri utilizzati nel modello 65
- 7.2 Valori di tipici di durata ciclica in relazione alla profondità di scarica per batterie piombo-acido VRLA 70
- 7.3 Pesi di batterie e supercondensatori 73

Sommario

Con il presente lavoro di tesi si è voluto studiare un sistema di accumulo ibrido per l'alimentazione dei carichi elettrici di bordo di un APM (Automated People Mover). L'obiettivo è stato quello di ridurre la taglia dei supercondensatori a bordo del mezzo impiegati per l'alimentazione trasferendo parte della potenza assorbita dai carichi durante la corsa alle batterie di backup, rendendole parte attiva del sistema di alimentazione. Dopo aver ricavato i profili di carico tipici del mezzo mediante un'analisi del funzionamento dei carichi di bordo in relazione alle condizioni operative, si è determinato il valore di potenza da trasferire alle batterie ed in base a questo si sono quindi dimensionati i nuovi valori delle taglie delle batterie e dei supercondensatori. Infine sono state condotte delle simulazioni al computer del nuovo sistema di alimentazione e si è eseguito un confronto in termini di costi e pesi con il sistema di alimentazione originale.

Introduzione

La preoccupazione per il riscaldamento globale, i problemi di inquinamento dell'aria e il progressivo esaurimento delle fonti fossili spingono sempre di più verso un'elettificazione dei consumi. Secondo l'ultimo "World Energy Outlook" pubblicato nel 2017 dall'Agenzia Internazionale dell'Energia, l'elettricità sta assistendo alla crescita maggiore tra le forme di energia nelle applicazioni end-use. Citando il rapporto, circa un terzo dell'incremento dei consumi è dovuto all'impiego dei motori elettrici nel settore industriale nell'ottica dell'automazione dei processi produttivi; incrementi significativi sono attesi anche nel settore degli edifici con l'utilizzo sempre più spinto di utenze di tipo elettrico anche per il riscaldamento ed il raffrescamento e nel settore dei trasporti. Nella Figura 1.1 è riportato l'incremento della domanda di energia elettrica stimato dal 2016 al 2040 tratto dal World Energy Outlook prima citato.

Parlando in particolare dell'elettificazione dei trasporti, si assiste in questo senso ad un aumento degli sforzi tecnici ed economici volti a da un lato ad incrementare l'utilizzo di servizi e tecnologie esistenti come i trasporti su rotaia o a fune e dall'altro a far progredire nuove soluzioni come ad esempio i veicoli elettrici per la mobilità pubblica e privata.

Nel contesto descritto la ricerca per sistemi di accumulo dell'energia elettrica innovativi recita un ruolo chiave nel favorire la transizione verso un tipo di trasporto sostenibile. Risulta infatti chiaro il bisogno di tecnologie che consentano di colmare quel gap in termini di praticità e costi ancora esistente tra i mezzi a combustibili fossili e quelli elettrici; si pensi infatti ai limiti in termini di autonomia e tempi di ricarica per i veicoli stradali o alle infrastrutture necessarie per l'alimentazione dei veicoli su rotaia o a fune. Le batterie, che costituiscono storicamente la

1. INTRODUZIONE

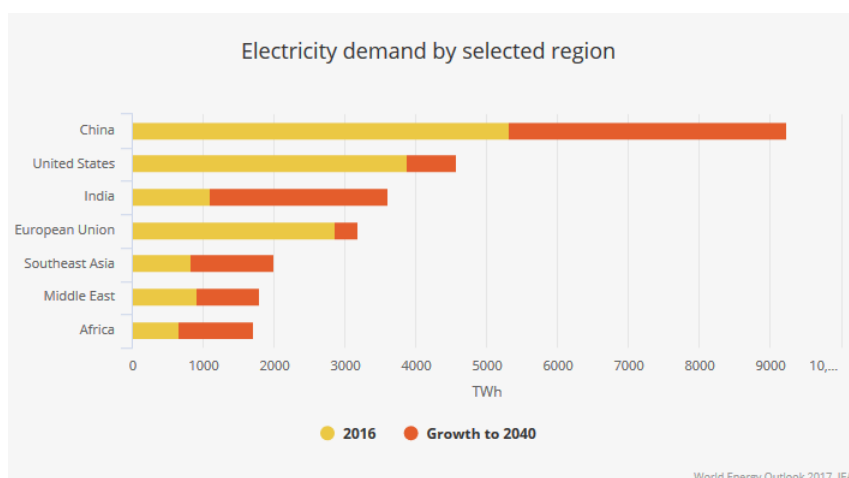


Figura 1.1: Incremento della domanda di energia elettrica in vari paesi stimato al 2040 (fonte: *World Energy Outlook 2017*)

tecnologia principale di accumulo in questo settore, stanno vivendo a ragione di ciò un incredibile sviluppo, ma soffrono ancora di alcuni limiti in termini di densità di potenza che frenano lo diffusione della mobilità elettrica per i motivi prima citati. Altre tecnologie per l'accumulo stanno allora emergendo, rivelandosi spesso complementari o addirittura migliori per certe applicazioni in termini di prestazioni alle batterie. Tra queste spiccano i supercondensatori, una tecnologia di certo molto più giovane delle batterie ma che sta vivendo un notevole sviluppo a livello tecnico e commerciale; in Figura 1.2 è riportato il CAGR¹ del mercato dei supercondensatori in dollari americani stimato al 2024 dalla Variant Market Research, compagnia che si occupa di indagini di mercato in vari settori tra cui quello dell'energia.

Per le loro caratteristiche di alta densità di potenza, questi dispositivi sono sempre più utilizzati nell'ambito dei trasporti in sistemi per il recupero dell'energia, o dove è possibile ricorrere a ricariche rapide e frequenti, o ancora in sistemi ibridi assieme alle batterie per poter sfruttare al meglio le caratteristiche peculiari dei due sistemi.

Questo lavoro di tesi si concentra sullo studio di un sistema di accumulo ibrido batterie-supercondensatori, sviluppato dalla Nidec-ASI di Montebello Vicentino, volto all'alimentazione dei carichi elettrici di bordo

¹Il Compounded Average Growth Rate, o tasso annuo di crescita composto, è un indice che rappresenta la percentuale di crescita media di una grandezza in un certo intervallo di tempo.

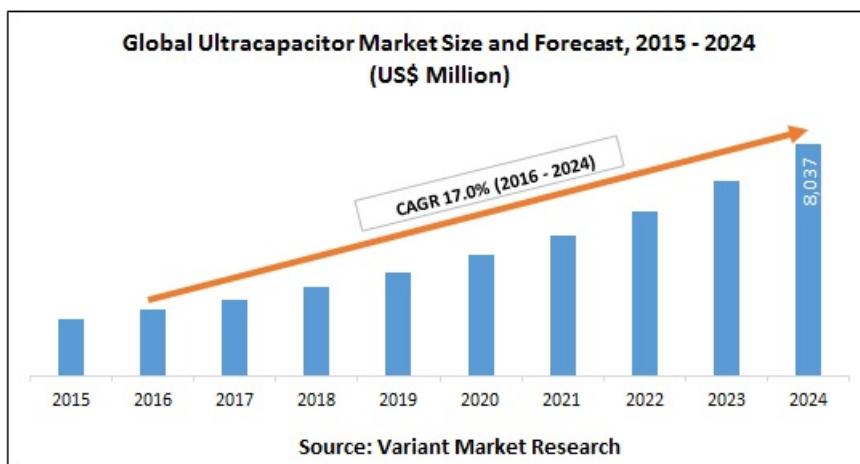


Figura 1.2: Tasso di crescita medio annuo stimato al 2024 del mercato dei supercondensatori

di un People Mover, più precisamente una funicolare, di recente realizzazione presso il quartiere Vadinstanbul di Istanbul, in Turchia. Con la definizione di People Mover (o Automated People Mover) si intendono quei sistemi di trasporto urbano di ridotta estensione, automatizzati e dotati di sede propria, cioè il cui tracciato è separato da quello impiegato dagli altri sistemi di trasporto. Lo studio del sistema di accumulo è volto alla riduzione della taglia dei supercondensatori a bordo del veicolo, impiegati per l'alimentazione dei carichi e ricaricati ogni volta che il mezzo si ferma in stazione, mediante il trasferimento di parte della domanda di potenza alle batterie di backup, che saranno perciò utilizzate come parte attiva del sistema di alimentazione. Lo scopo è quello di ridurre i costi del sistema, riducendo i componenti più costosi rappresentati dai supercondensatori e dal relativo convertitore, cercando al contempo di contenere il peso totale.

Nei capitoli due e tre sono descritte le tecnologie d'accumulo oggetto dell'applicazione, quindi le batterie (ed in particolare le batterie piombo-acido) ed i condensatori elettrochimici. I capitoli hanno lo scopo di offrire una introduzione a questi sistemi per l'accumulo dell'energia elettrica e di fornire nozioni ritenute necessarie per il loro dimensionamento.

Nel capitolo quattro, dopo una breve introduzione agli Automated People Mover, è presentata la funicolare oggetto dell'applicazione ed è descritto in dettaglio il funzionamento del sistema di alimentazione.

Nel capitolo cinque è invece condotta un'analisi dei carichi in relazione alle condizioni lavorative dell'applicazione. L'analisi è stata neces-

1. INTRODUZIONE

saria per individuare i profili di carico tipici del mezzo necessari per la determinazione della quota di potenza ottimale da trasferire alle batterie.

Nel capitolo sei è descritto il dimensionamento delle batterie e dei supercondensatori in relazione alle nuove quote di energia e potenza che sono state determinate sulla base dell'analisi eseguita nel capitolo quattro.

Nel capitolo sette sono condotte delle simulazioni del sistema di accumulo in ambiente Simulink[®]. Innanzitutto è stato simulato il sistema di alimentazione durante le singole corse del mezzo per mostrare il funzionamento del sistema di alimentazione nella nuova configurazione e quindi sono state simulate diverse giornate lavorative della funicolare con il fine di determinare la corrente di scarica a cui sono sottoposte le batterie e fornire una stima della durata delle stesse. Sempre nello stesso capitolo sono quindi confrontati i costi ed il peso del sistema con quello originale.

Nelle conclusioni sono infine presentati e quindi discussi i risultati raggiunti.

Batterie

In questo capitolo sono fornite delle nozioni generali riguardanti le batterie e le batterie piombo-acido in particolare le quali, assieme ai supercondensatori, sono state oggetto di indagine per il dimensionamento del sistema di accumulo.

2.1 Introduzione alle batterie

Una batteria è un dispositivo elettrochimico che trasforma l'energia chimica conservata nel materiale attivo (cioè quello che reagisce) che la costituisce direttamente in energia elettrica attraverso una reazione di ossidoriduzione. Nel caso di un sistema ricaricabile, la ricarica avviene invertendo il processo menzionato. Una reazione di ossidoriduzione è caratterizzata da un trasferimento di elettroni da una sostanza che si ossida ad una che si riduce. Questo trasferimento può avvenire per via chimica tramite contatto diretto delle sostanze e produzione di solo calore, come nella combustione, o per via elettrochimica quando la sostanza che si ossida è tenuta separata da quella che si riduce e il trasferimento di elettroni si ha da una specie all'altra sotto forma di corrente elettrica attraverso un conduttore metallico, come nel caso delle batterie.

Nonostante questo termine sia molte volte usato come sinonimo nel linguaggio comune, in realtà l'unità elettrochimica fondamentale in cui avviene il processo di conversione dell'energia descritto è la *cella elettrochimica*. Poiché una singola cella raramente è sufficiente a soddisfare i requisiti di tensione e corrente della maggior parte delle applicazioni, più celle sono connesse elettricamente in serie e/o in parallelo. Batteria è il termine che individua questi sistemi di celle.

2. BATTERIE

Sebbene negli anni siano state realizzate molteplici celle differenti tra loro e altre soluzioni sono tuttora in fase di ricerca, in generale si possono individuare tre componenti principali che costituiscono una cella:

- L'*anodo* o terminale negativo. Questo è un conduttore di prima specie (anche detto elettrodo, cioè che conduce elettroni) che si ossida e cede elettroni ad un circuito esterno alla cella durante la reazione elettrochimica.
- Il *catodo* o terminale positivo, anch'esso conduttore di prima specie, che si riduce accettando elettroni dal circuito esterno durante la medesima reazione.
- L'*elettrolita*, che è invece un conduttore ionico o di seconda specie e costituisce il mezzo in cui avviene il trasferimento degli ioni negativi e positivi. L'elettrolita può essere liquido, costituito da un solvente (come l'acqua ad esempio) dove è disciolto un sale, un acido o una base, oppure solido.

Dal punto di vista costruttivo nella cella l'anodo ed il catodo solitamente sono immersi nell'elettrolita. Si usano allora dei separatori dielettrici per impedire che i due si tocchino causando un cortocircuito interno. Il separatore deve rimanere tuttavia permeabile all'elettrolita per mantenere la conduttività ionica desiderata. Completano poi la cella (o la batteria) altri elementi ausiliari: i contatti o collettori di corrente, che costituiscono l'interfaccia tra gli elettrodi ed il circuito esterno, l'involucro, dispositivi di sicurezza e altri componenti ancora che variano in base alla chimica della cella.

Celle elettrochimiche e batterie sono classificate in *primarie* o non ricaricabili e *secondarie* o ricaricabili in base al fatto che la reazione di ossidoriduzione tra i materiali di cui sono costituite sia reversibile o meno. Celle del primo tipo sono anche dette *celle galvaniche* o *pile*, celle del secondo tipo *accumulatori*. Una rappresentazione schematica dei processi di scarica e carica di una cella elettrochimica è riportata in Figura 2.1.

Nel momento in cui un carico elettrico è collegato ai terminali, l'anodo, che ha maggior tendenza ad ossidarsi¹, cede elettroni al catodo

¹Cioè ha minor potenziale standard di riduzione rispetto al catodo; il potenziale standard di riduzione è la differenza di potenziale misurata ai capi di una cella galvanica costituita da un elettrodo standard ad idrogeno usato come riferimento e dall'elettrodo di cui si vuole misurare il potenziale. La differenza tra il potenziale standard del catodo e quello dell'anodo fornisce il potenziale della cella a vuoto.

2.2. PARAMETRI DELLE BATTERIE

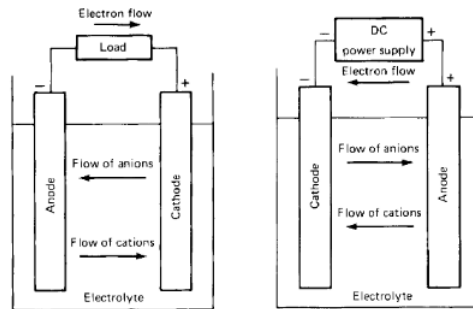


Figura 2.1: Scarica e carica di una cella elettrochimica [1]

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 quello negativo è il catodo. [1]

2.2 Parametri delle batterie

In questa sezione sono descritti i parametri la cui conoscenza è stata ritenuta necessaria per un dimensionamento razionale del sistema di accumulo. [1, 2, 3]

Tensione nominale

La tensione nominale è la tensione a cui una batteria è progettata per lavorare. La tensione nominale è puramente indicativa, infatti la differenza di potenziale ai morsetti di una batteria varia con le condizioni operative. Si possono distinguere allora:

- la *tensione a circuito aperto*, quando la batteria non è collegata a nessun carico, solitamente maggiore della tensione nominale;
- la *tensione di esercizio*, che rappresenta la tensione istantanea della batteria durante l'esercizio ed è minore della tensione di circuito aperto;

2. BATTERIE

- la *tensione di "cut-off"* o di *fine scarica* per la quale una batteria è considerata scarica. La tensione di fine scarica può variare in base ai requisiti dell'applicazione.

Durante la scarica, la tensione ai morsetti è minore della tensione a circuito aperto e cala progressivamente fino alla tensione di cut-off; durante la carica si ha invece una tensione maggiore della tensione a circuito aperto. Il fenomeno si esprime in termini di "resistenza interna" della batteria, che comprende le perdite ohmiche, le perdite dovute alla cinetica della reazione elettrochimica e quelle dovute ai processi di diffusione. Una rappresentazione può essere data considerando la batteria un generatore di tensione, secondo la

$$V = E - RI \quad (2.1)$$

Si noti che se la corrente è zero, la tensione ai morsetti V è uguale ad E , per cui si è soliti considerare E la tensione a circuito aperto. Generalmente la 2.1 descrive con buona approssimazione le condizioni operative di una batteria quando le dinamiche in gioco sono "lente"; tuttavia, la tensione E e la resistenza R non sono costanti, ma entrambe dipendono dall'evoluzione di altri parametri come lo stato di carica della batteria, la corrente di scarica, la temperatura, ecc.. Per rappresentare con maggior precisione questi comportamenti sono stati sviluppati modelli più complessi, più adatti ad una descrizione del comportamento reale di una batteria per dinamiche elevate. In Figura 2.2 è rappresentata la curva di scarica di una batteria, dove la tensione ai morsetti è espressa in funzione della profondità di scarica² percentuale, con evidenziate le cadute di tensione rispetto alla tensione di circuito aperto dovute alle differenti componenti delle resistenza interna.

Capacità

La capacità di una batteria è la quantità di carica elettrica che è in grado di fornire (o accumulare) e viene espressa in ampere-ora [Ah]³. Ad esempio, supponendo che la capacità di una batteria sia di 10 Ah questa potrebbe

²Una definizione di questo parametro è fornita più avanti nel testo.

³L'unità di misura della carica elettrica nel SI è il coulomb [C]. Poiché la corrente elettrica è definita come il flusso della quantità di carica, gli ampere-ora sono allora un'unità di misura equivalente della carica elettrica. Sono stati scelti gli ampere-ora perché il coulomb, essendo molto piccola come unità di misura per la carica, era poco pratica. Dal momento che 1 C corrisponde ad 1 A s, 1 Ah equivale a 3600 C.

2.2. PARAMETRI DELLE BATTERIE

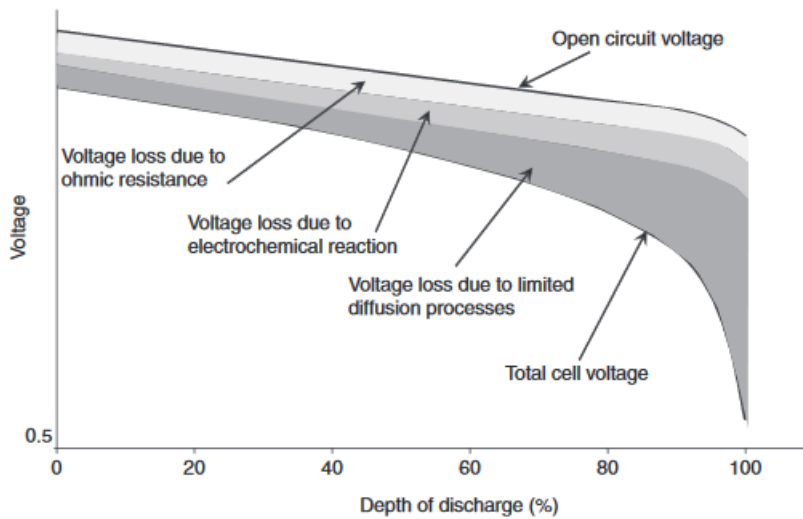


Figura 2.2: Curva di scarica [3]

fornire 10 A per un'ora o 1 A per dieci ore. Alla realtà dei fatti il discorso è più complesso. Infatti è molto più probabile che la batteria di cui sopra sia in grado di fornire 1 A per dieci ore, ma se scaricata a 10 A duri molto meno di un'ora. La variazione della capacità in relazione alla corrente di scarica non è lineare ed è dovuta alle perdite che si hanno sulla resistenza interna della batteria che incrementano all'aumentare della velocità di scarica (in prima approssimazione descritte dalla relazione $P = RI^2$).

Il fenomeno appena descritto ha portato nell'ambiente tecnico ad assumere una particolare notazione per indicare la *capacità nominale*. Questa viene infatti espressa in riferimento ad un preciso intervallo di tempo con la notazione C_n , dove n fornisce l'intervallo di tempo in ore. Allora una batteria la cui capacità nominale è indicata come $C_{10} = 100 \text{ A h}$ vuol dire che tale capacità è riferita ad un intervallo di scarica di 10 h.

Un metodo comunemente adottato per indicare la corrente di scarica o carica di una batteria prevede che questa sia espressa in riferimento alla capacità nominale per mezzo di una particolare notazione definita "C-rate" e scritta come segue:

$$I = M \times C_n \quad (2.2)$$

dove I è la corrente di scarica o carica ed M un multiplo o una frazione della capacità che assume le dimensioni di una velocità [h^{-1}]. Ad esempio, una corrente di 25 A usata per caricare una batteria di capacità nominale $C_{10} = 100 \text{ A h}$ può venire espressa con la notazione $0,25C_{10}\text{A}$. In Figura

2. BATTERIE

2.3 sono rappresentate curve di scarica tipiche per batterie piombo-acido in funzione del C-rate; si noti come all'aumentare di questo diminuiscano il tempo di scarica e la tensione di fine scarica.

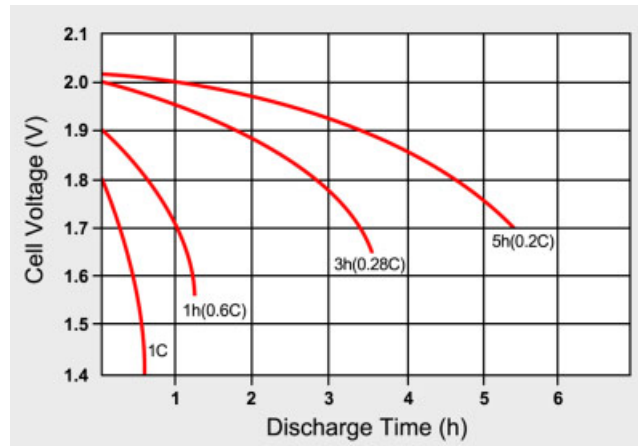


Figura 2.3: Curve di scarica tipiche di batterie piombo-acido in funzione del C-rate (fonte: www.batteryuniversity.com)

Energia immagazzinata o capacità energetica

L'energia immagazzinata in una batteria dipende dalla tensione e dalla carica accumulata. L'energia E è espressa in [Wh] e si ricava moltiplicando la tensione per la capacità in ampere-ora:

$$E = (\text{volt}) \times (\text{ampere} - \text{ora}) = V \times C \quad (2.3)$$

Sebbene molto utile per determinare la capacità necessaria di una batteria in base ai requisiti energetici di una data applicazione, la 2.3 deve essere usata con molta cautela per i motivi prima esposti riguardo alla variabilità della tensione e della capacità in base alle condizioni di esercizio. Solitamente per il suo calcolo ci si riferisce ai valori di capacità e tensione nominali forniti.

Densità di energia

La densità energetica di una batteria può essere espressa sia in riferimento alla massa che al volume. Si parla allora di densità di massa di energia (o energia specifica) [Wh kg^{-1}] oppure di densità volumica di energia [Wh l^{-1}]. Tali parametri dipendono dal tipo di materiali attivi utilizzati

2.2. PARAMETRI DELLE BATTERIE

e dai componenti aggiuntivi (separatori, involucri, dispositivi di sicurezza, ecc.) necessari. Una volta definita la richiesta energetica del carico in Wh, questa può essere divisa per i valori di densità di energia per una stima del peso e/o del volume occupato per un dato tipo di batteria.

Densità di potenza

Anche la potenza come l'energia può essere espressa in rapporto alla massa oppure in rapporto al volume. Si distinguono quindi la potenza specifica, in termini di $[W\ kg^{-1}]$, e la densità volumica di potenza, espressa in $[Wl^{-1}]$. Tali parametri, assieme a quelli che definiscono la densità energetica, assumono notevole importanza nel dimensionamento di sistemi di accumulo per applicazioni mobili come nei veicoli elettrici, dove il peso del sistema a bordo è uno degli aspetti principali di cui tenere conto.

Efficienza energetica o rendimento

L'efficienza energetica di una batteria è espressa come il rapporto tra l'energia restituita nella scarica e l'energia fornita per la carica. Tale rapporto è sempre minore di uno e varia in relazione al tipo di batteria e alle condizioni di lavoro.

Parametri operativi

I parametri operativi sono quelli che caratterizzano il funzionamento di una batteria e sono importanti per una gestione ottimale dell'energia a disposizione; i principali sono due: lo stato di carica "SoC" ("State of Charge") e la profondità di scarica "DoD" ("Depth of Discharge"). Lo stato di carica esprime il rapporto tra la capacità rimanente e la capacità nominale della batteria mentre la profondità di scarica è il suo complemento, ovvero

$$DoD = 1 - SoC \quad (2.4)$$

Per la stima dell'SoC di una batteria esistono diverse tecniche, tra cui la misura della tensione ai morsetti. La precisione di questo metodo varia molto con il tipo di batteria: ad esempio si dimostra efficace per le batterie piombo-acido, nelle quali la tensione è strettamente legata alla carica erogata, mentre per altri tipi di batterie sono preferite tecniche differenti.

2. BATTERIE

Autoscarica

L'autoscarica indica la perdita di capacità che si verifica nel tempo per l'effetto di reazioni chimiche parassite quando la batteria rimane inutilizzata. L'autoscarica dipende da molteplici fattori: tra i principali si distinguono il tipo di batteria, la temperatura, lo stato di carica. In particolare l'autoscarica aumenta con la temperatura che favorisce l'attività chimica interna alla cella. I costruttori sono soliti fornire indicazioni sull'autoscarica di una batteria in termini percentuali della capacità nominale su un certo intervallo di tempo ad una data temperatura. L'autoscarica è un parametro molto importante nella valutazione di batterie per usi stazionari dove i periodi di inutilizzo possono essere prolungati.

Temperatura

La temperatura ha notevole influenza sulla scarica di una batteria. A basse temperature l'attività chimica è ridotta e la resistenza interna aumenta causando un calo sensibile della capacità e del tasso di decrescita della tensione di scarica; a temperature elevate l'attività chimica è favorita, ma come riportato nel punto precedente anche la velocità di autoscarica aumenta. Solitamente la capacità nominale è riferita ad una precisa temperatura. In Figura 2.4 è riportato l'effetto della temperatura sulle prestazioni di una batteria, con il 100% posto in corrispondenza della temperatura ambiente ("room temperature", RT) o nominale.

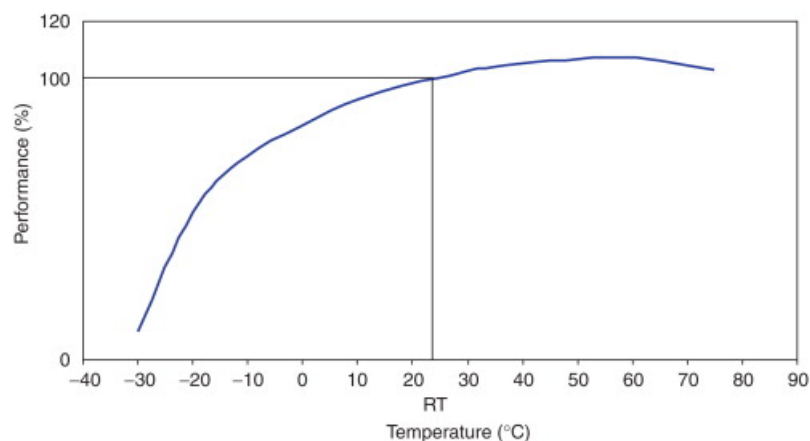


Figura 2.4: Effetto della temperatura sulle prestazioni di una batteria [3]

2.2. PARAMETRI DELLE BATTERIE

Durata di vita, numero di cicli

La durata di una batteria è solitamente espressa in numero di cicli di carica-scarica che questa può sopportare prima che la sua capacità scenda al di sotto di una determinata percentuale (ad es. 80 % della capacità nominale). Ogni ciclo completo comporta infatti un deterioramento interno delle celle. L'entità di tale deterioramento dipende in gran parte dalle condizioni di utilizzo della batteria, ed in particolare da:

- profondità di scarica;
- modalità di carica;
- temperatura ambientale.

Molto spesso nei datasheet forniti dai costruttori la vita utile è espressa in relazione a questi fattori. Nella scelta (prima) e nell'esercizio (poi) di una batteria è perciò importante prestare attenzione a questi parametri onde evitarne una fine prematura e conseguenti perdite economiche. In Figura 2.5 è riportato un grafico che descrive la relazione tra vita ciclica e profondità di scarica per una batteria piombo-acido.

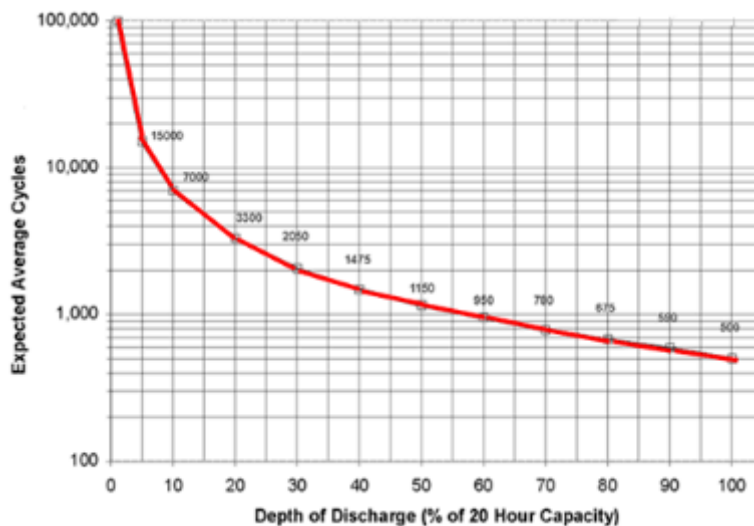


Figura 2.5: Vita ciclica in relazione alla profondità di scarica per una batteria piombo-acido (fonte: www.electropedia.org)

2. BATTERIE

Costo

Il costo di una batteria è un altro parametro particolarmente importante da valutare nella fase di dimensionamento di un sistema di accumulo. Esso deve essere valutato in relazione alla durata di vita e alle prestazioni della batteria per poter operare una scelta oculata. Per delle valutazioni comparative, solitamente il costo viene espresso in termini unitari in rapporto alla capacità espressa in termini energetici.

2.3 Batterie piombo-acido

L'accumulatore al piombo-acido, inventato nel 1859 dal fisico francese Gaston Planté, è stato il primo tipo di batteria ricaricabile disponibile commercialmente. Inizialmente l'utilità dell'accumulatore non fu subito recepita, soprattutto in virtù del fatto che non esistendo metodi di produzione non chimica dell'elettricità, l'accumulatore poteva essere ricaricato solo da altre pile. Il suo utilizzo si estese molto con l'invenzione della dinamo nel 1869. Oggi, dopo più di un secolo e mezzo dalla loro invenzione, le batterie piombo-acido rappresentano la tipologia di batteria secondaria più diffusa sul mercato grazie all'affidabilità ed ai costi contenuti che contraddistinguono questi accumulatori. Gli ambiti di impiego tipici sono nel settore automotive, per l'avviamento del veicolo e l'alimentazione dei carichi elettrici di bordo, e a livello industriale in applicazioni UPS per sistemi dove la continuità di esercizio è un requisito fondamentale.

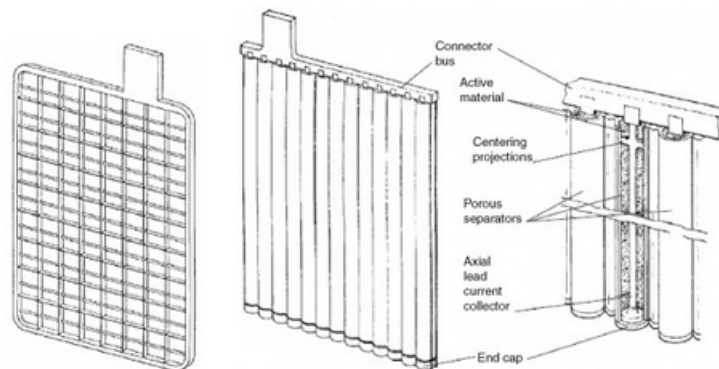


Figura 2.6: Configurazioni degli elettrodi nelle batterie al piombo [4]

Dal punto di vista costruttivo, negli anni sono state sviluppate diverse soluzioni per gli accumulatori al piombo, ognuna votata maggiormente

2.3. BATTERIE PIOMBO-ACIDO

ad una specifica applicazione. La configurazione tipica degli elettrodi è in forma di piastre piane, in cui una griglia conduttiva, che ha lo scopo di rendere più resistente la struttura, è rivestita con una pasta del materiale elettrodico. Una configurazione alternativa prevede un griglia con piastre tubolari in cui dei supporti centrali sostenuti da una barra trasversale sono circondati dal materiale attivo e racchiusi all'interno di tubi di materiale plastico poroso immersi nell'elettrolita; in Figura 2.6 sono illustrate le due configurazioni descritte. In base allo stato fisico dell'elettrolita, come sarà chiarito più avanti, si possono poi distinguere accumulatori al piombo con elettrolita allo stato liquido, oppure batterie sigillate dove invece l'elettrolita può presentarsi in forma di gel o essere adsorbito su un substrato solido.

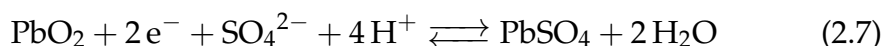
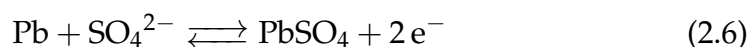
Per concludere questa introduzione alle batterie piombo-acido, si riporta il loro alto tasso di riciclabilità. Infatti, nonostante questi accumulatori contengano materiali nocivi per l'ambiente, primo fra tutti il piombo, la filiera del riciclo ha raggiunto negli anni percentuali molto elevate, prossime al 100% nei paesi occidentali. [1, 2, 5]

2.3.1 Principio di funzionamento

Una cella al piombo-acido è costituita nella sua forma base da un anodo in piombo spugnoso e da un catodo di diossido di piombo immersi in una soluzione acquosa di acido solforico come elettrolita. La reazione reversibile di ossidoriduzione che avviene nella cella è la seguente:



La reazione può essere scomposta nelle due semireazioni:



La dissociazione dell'acido solforico in acqua gioca un ruolo chiave nella chimica della cella. Nel processo di scarica gli ioni dell'acido si combinano con gli elettrodi e si ha produzione di solfato di piombo ed acqua e una conseguente diminuzione della concentrazione dell'acido e della massa degli elettrodi. Durante la carica l'energia elettrica fornita attiva il processo inverso ed il solfato di piombo va a ricostituire la massa degli elettrodi e l'acido solforico scomponendosi nuovamente. Il potenziale

2. BATTERIE



Figura 2.7: Batteria al piombo a piastre piane distribuita commercialmente [4]

di cella a vuoto è pari a circa 2 V. A livello commerciale molto diffuse sono le batterie da tre, sei o dodici celle in serie per valori nominali di tensione rispettivamente di 6 V, 12 V o 24 V. In figura 2.7 è riportata una classica batteria al piombo-acido con elettrolita liquido a piastre piane.

Nella *fase di carica* è bene fornire una tensione per singola cella non superiore a circa 2,4 V. Oltre questo valore è facile che si inneschi l'elettrolisi dell'acqua che va in ebollizione con sviluppo di H_2 e O_2 . Questo comporta, oltre ad un aumento della concentrazione dell'acido nella soluzione per via della diminuzione dell'acqua, il deterioramento degli elettrodi dell'accumulatore per l'azione dei gas; inoltre l'idrogeno, essendo un gas esplosivo, potrebbe costituire fonte di pericolo. In realtà, la produzione di idrogeno e ossigeno è presente in misura minore per ogni ciclo di carica e, almeno per alcuni tipi di batterie al piombo-acido, questo costringe a periodici rabbocchi con acqua distillata dell'elettrolita⁴.

Nella *fase di scarica* è invece opportuno non scaricare la batteria oltre un tensione di cut-off troppo inferiore a quella della cella a vuoto, un limite individuato in genere attorno a 1,8 V. Oltre tale soglia minima si avrebbe infatti un'accelerazione del naturale processo di solfatazione della cella con una conseguente riduzione della vita utile. Questo avviene perché il solfato di piombo che si forma durante il processo di scarica è un sale poco solubile e aderisce agli elettrodi sotto forma di granuli molto piccoli; se la cella è scaricata troppo in profondità si formano granuli troppo grandi che non riescono più a ricombinarsi nelle successive cariche. [1, 2, 5]

⁴Come sarà descritto più avanti, nuove tecniche costruttive e l'aggiunta di leghe particolari hanno permesso la realizzazione di accumulatori al piombo che non necessitano di tale accorgimento.

2.3.2 Classificazione delle batterie piombo-acido

Le batterie piombo-acido, dalla loro invenzione, hanno vissuto un processo continuo di ricerca e sviluppo, accelerato negli ultimi anni dalla diffusione di tecnologie concorrenti come le celle al litio e dalle nuove possibilità di mercato offerte dall'evoluzione dei consumi elettrici. Tutto ciò ha portato ad un generale miglioramento delle loro caratteristiche e ad una diversificazione delle soluzioni realizzative.

Comunemente gli accumulatori al piombo sono classificati in tre categorie in base all'impiego per cui sono destinate:

- Batterie *SLI* (Starting, Lighting and Ignition) o d'*avviamento*;
- Batterie per *trazione*;
- Batterie *stazionarie*.

Le batterie SLI sono impiegate in ambito automobilistico per l'avviamento del motore. Sono quindi progettate per erogare picchi di corrente elevati per brevi periodi, generalmente un secondo o meno, affinché possano azionare il motorino d'avviamento fino all'accensione del motore del veicolo. Successivamente sono mantenute cariche per mezzo di un alternatore. Per garantire l'erogazione di correnti elevate le batterie da avviamento sono costruite con elettrodi a piastre dallo spessore ridotto ed in numero maggiore rispetto ad accumulatori al piombo di altro tipo. In questo modo è massimizzata la superficie disponibile e ridotta la resistenza interna della batteria. La quantità di materia attiva è però minore rispetto agli altri accumulatori al piombo, a discapito della densità di energia. Questo tuttavia non rappresenta un problema perché la scarica richiesta alle batterie SLI è breve e la ricarica immediata una volta avvenuto l'avviamento.

Le batterie per trazione sono utilizzate per fornire alimentazione continua a veicoli elettrici come golf car, sedie a rotelle, carrelli elevatori ed altro ancora. Queste batterie sono in genere sottoposte a scariche profonde, devono tollerare ripetuti cicli di carica-scarica, essere in grado di erogare correnti mediamente elevate e possedere elevate densità di energia. Per soddisfare questi requisiti gli elettrodi delle batterie al piombo per trazione sono costruiti con spessori maggiori e rivestiti di paste al piombo più dense. Inoltre l'elettrodo può presentarsi nella forma tubulare prima descritta, in grado di garantire un maggiore resistenza alla corrosione dell'acido e prolungarne la vita ciclica (ad un costo iniziale maggiore tuttavia).

2. BATTERIE

Infine, le batterie stazionarie sono utilizzate in gruppi di continuità per l'alimentazione di emergenza e per lo stoccaggio di energia prodotta da fonti energetiche non programmabili (eolico e solare). Requisiti principali per questo tipo di accumulatori sono bassi livelli di autoscarica anche dopo lunghi periodi di inattività e alti valori di densità energetica. Per via delle frequenti condizioni di sovraccarica a cui sono sottoposte, che spesso comporta un aumento di volume delle piastre positive per via della corrosione da parte dei gas prodotti, sono dimensionate in modo da garantire che questa possa espandersi di circa il 10 % prima che la capacità della batteria risulti limitata e debba quindi essere sostituita. [1, 5]

Un altro modo per classificare le batterie piombo-acido è in base alla manutenzione che queste richiedono. Si distinguono allora:

- batterie a *manutenzione ordinaria*; si tratta delle batterie al piombo tradizionali, dove al piombo è aggiunto in piccola percentuale dell'antimonio per migliorarne la resistenza alla corrosione. In queste batterie, che vengono definite anche ad acido libero o "flooded" (letteralmente: "allagate"), l'elettrolita è allo stato liquido e necessitano di una verifica periodica del suo livello con eventuale rabbocco mediante acqua distillata.
- Batterie a *manutenzione ridotta*; sono costruite con leghe di piombo-antimonio per l'elettrodo positivo e leghe piombo-calcio per quello negativo, che limita la produzione di gas in fase di carica. In queste batterie il consumo di acqua è ridotto rispetto a quelle a manutenzione ordinaria.
- Batterie *senza manutenzione*, dette anche batterie sigillate. In questo tipo di accumulatori al piombo le piastre positive e negative sono prodotte con speciali leghe di piombo-calcio-stagno (ed eventualmente argento) e piombo-calcio rispettivamente. Queste leghe agiscono da catalizzatori per la ricombinazione dell'idrogeno e dell'ossigeno in modo tale da rallentare il consumo dell'acqua elettrolitica. Sono inoltre dotati di valvole tarate per esercitare una determinata pressione positiva all'interno della cella atta a favorire la ricombinazione e permettere l'espulsione del gas qualora la pressione superi i valori prestabiliti. Per la presenza di tali valvole questo tipo di batterie al piombo sono anche nominate VRLA ("Valve Regulated Lead-Acid").

Gli accumulatori VRLA si dividono a loro volta in accumulatori al gel e AGM. Negli accumulatori al gel l'elettrolita è immobilizzato in un gel

2.3. BATTERIE PIOMBO-ACIDO

ottenuto con l'aggiunta di un agente gelificante al silicio; nella versione AGM ("Adsorbent Glass Mat") l'elettrolita allo stato liquido è adsorbito su un substrato di sottili fibre di vetro.

Entrambe le tipologie presentano tempi di ricarica minori e possono essere posizionate con ogni orientazione per via dell'assenza di elettrolita allo stato liquido. Sono però più sensibili alle sovraccariche e hanno costi di produzione maggiori.

Le batterie AGM presentano una bassa resistenza interna e quindi raggiungono valori di potenza specifica maggiori rispetto agli accumulatori ad acido libero. Hanno inoltre una durata di vita maggiore e sono più resistenti alle vibrazioni. Queste caratteristiche le hanno rese molto adatte per applicazioni SLI a bordo di veicoli (soprattutto di fascia high-end). Altre applicazioni tipiche sono quelle in gruppi di continuità, sia per uso stazionario che a scarica profonda.

Le batterie al gel presentano in genere una durata di vita ed un numero di cicli carica-scarica maggiore delle AGM e senz'altro rispetto le batterie ad acido libero. Sono inoltre più adatte a lavorare in ambienti a temperature elevate. Uno svantaggio è che possiedono una maggiore resistenza interna che ne limita la potenza specifica e quindi l'intensità della corrente erogabile. [1, 5]

In conclusione del capitolo nella tabella 2.1 si propone un confronto tra i principali parametri tecnici e non delle batterie piombo-acido e le più recenti batterie agli ioni di litio.

2. BATTERIE

Tabella 2.1: Confronto tra batterie piombo-acido e batterie agli ioni di litio [5]

Parametri	Piombo-acido	Li-ion
Densità di energia [Wh kg ⁻¹]	35-40	150-180
Densità di potenza [W kg ⁻¹]	250	800
Temperatura [°C]	Da -30 a 40	Da -20 a 50
Numero di cicli	1500-5000	1000-5000
Durata di vita	>12 anni	10-15 anni
Affidabilità	Provata	Da verificare su periodi lunghi
Sostenibilità	Eccellente	Recupero costo- so
Sicurezza	Eccellente	Problemi da ri- solvere
Costo [\$/kWh]	150-200	600-800

Supercondensatori

Nel presente capitolo sono introdotti i condensatori elettrochimici, meglio conosciuti come supercondensatori o ultracondensatori, ed è proposto un confronto con le batterie in modo da evidenziare i benefici di un loro utilizzo in accoppiamento a queste in un sistema di accumulo ibrido. Si completa in questo modo la parte del lavoro di tesi dedicata alla descrizione delle tecnologie di accumulo oggetto dell'applicazione.

3.1 Tecnologia dei supercondensatori

I condensatori elettrochimici sono dei dispositivi elettrici in grado di accumulare molta più energia rispetto ai comuni condensatori. I principali benefici che si hanno dal loro utilizzo sono le correnti ed il numero di cicli di carica-scarica estremamente elevati rispetto alle batterie. Grazie a queste proprietà i supercondensatori vanno a colmare quel gap esistente nei sistemi di accumulo tra le batterie ed i condensatori normali.

Lo sviluppo dei supercondensatori ebbe inizio negli anni Cinquanta del ventesimo secolo. I primi esperimenti su questa tecnologia furono condotti tra gli anni '50 e '70 dalle compagnie americane General Electric (GE) e Standard Oil of Ohio (SOHIO). Questi primi dispositivi avevano una capacità di circa 1 F. Oggi i supercondensatori disponibili sul mercato raggiungono capacità dell'ordine dei migliaia di farad e possono fornire correnti di carica-scarica di migliaia di ampere. L'elevata potenza specifica unita ad una vita ciclica molto lunga rende i supercondensatori particolarmente interessanti per applicazioni dove grandi quantità di energia devono essere stoccate o rilasciate in un breve intervallo di tempo: nel settore dei trasporti e delle macchine da lavoro, in quello delle fonti rinnovabili, come

3. SUPERCONDENSATORI

backup di energia in UPS e per memorie di computer, in sistemi di energy harvesting. [6]

3.1.1 Classificazione

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

La prima di queste 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. Negli anni sono stati sviluppati diversi modelli e teorie di crescente complessità che descrivono questa particolare struttura. In Figura 3.1 sono illustrati i modelli di Helmholtz e di Gouy - Chapman, dove ψ è il potenziale, ψ_0 è il potenziale dell'elettrodo e d la distanza delle cariche ioniche dalla superficie.

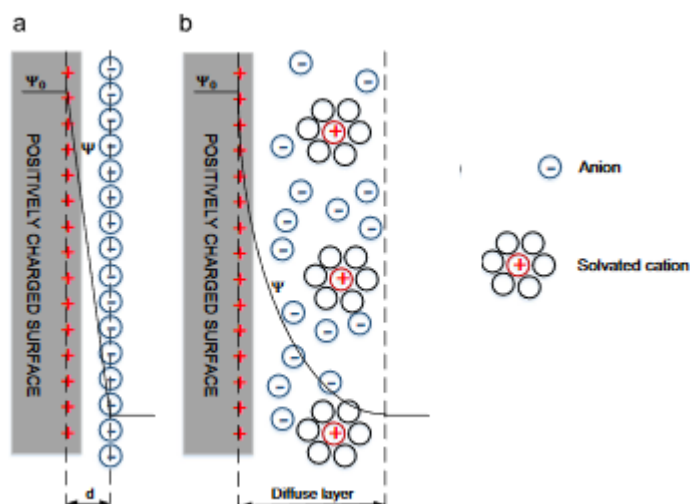


Figura 3.1: Modello di Helmholtz (a) e di Gouy - Chapman (b) del doppio strato elettrico [7]

Supercondensatori di questo tipo sono detti condensatori elettrochimici a doppio strato ("Electrochemical Double-Layer Capacitors", EDLCs) e sono al momento i più diffusi sul mercato. Quando un EDLC viene caricato, gli elettroni sono strappati dall'elettrodo positivo e forzati a muoversi attraverso un circuito esterno verso quello negativo. Come conseguenza gli ioni positivi nell'elettrolita si concentrano sulla superficie dell'elettrodo negativo e quelli positivi sull'elettrodo di carica opposta formando così il doppio strato elettrico che compensa lo squilibrio di

3.1. TECNOLOGIA DEI SUPERCONDENSATORI

carica agli elettrodi. Il punto chiave per ottenere alti valori di capacità è incrementare la superficie disponibile dell'elettrodo e ridurre la distanza tra le cariche di segno opposto del doppio strato elettrico. Un materiale largamente usato per gli elettrodi degli EDLCs è quindi il carbone attivo, per la sua elevata superficie specifica.

La seconda categoria rappresenta i cosiddetti pseudo-condensatori o supercondensatori faradici. Questo tipo di condensatori elettrochimici è molto meno diffuso degli EDLCs e solo pochi costruttori si occupano della loro commercializzazione. Il principio di funzionamento è molto più simile a quello di una batteria che non a quello di un condensatore. La pseudocapacità è un fenomeno che si verifica quando hanno luogo reazioni di ossidoriduzione alla superficie degli elettrodi, sui quali di conseguenza si forma un sottile strato di ossido. In questo caso l'energia elettrica non è accumulata sotto forma di energia elettrostatica, ma è conservata nei legami tra le molecole all'interfaccia. A fronte di densità energetica più alte, lo svantaggio di questi sistemi è il maggior stress a cui sono sottoposti gli elettrodi nei processi di carica-scarica che ne accelerano il processo di degradazione.

La terza ed ultima categoria è quella dei supercondensatori ibridi. Come suggerisce il nome, questi sono una combinazione delle due categorie precedenti. I vantaggi che offre questa configurazione sono le elevate densità di energia e gli alti valori di corrente. L'elettrodo negativo dei supercondensatori ibridi è solitamente costituito da un materiale pseudocapacitivo che conferisce l'alta densità energetica, mentre quello positivo è tipicamente un carbone attivo che accumula energia nel doppio strato elettrico consentendo il rilascio di correnti elevate.

Anche l'elettrolita gioca un ruolo importante sulle prestazioni dei condensatori elettrochimici. La sua concentrazione deve essere elevata onde evitarne una eccessiva diminuzione a seguito di cicli di carica ripetuti. Una concentrazione troppo bassa dell'elettrolita rispetto alla superficie elettrodica disponibile ridurrebbe la capacità del supercondensatore. Un'altra importante proprietà è la conduttività dell'elettrolita. Questa infatti determina la resistenza interna e quindi la potenza specifica del dispositivo. Dal tipo di elettrolita dipende inoltre la tensione tra gli elettrodi. Gli elettroliti utilizzati nei supercondensatori possono essere classificati in acquosi e organici. Gli elettroliti a base di acqua limitano la tensione tipicamente ad un valore di circa 1 V, mentre per elettroliti organici si possono raggiungere tensioni di 2,7 V e superiori. Tuttavia gli elettroliti organici presentano conduttività minori rispetto a quelli acquosi di almeno

3. SUPERCONDENSATORI

20 volte e tipicamente in rapporto 1/50. [6, 7]

3.1.2 Caratteristiche costruttive

Una cella di un supercondensatore è costituita da due elettrodi con un setto separatore tra di essi immersi nel liquido elettrolita. Gli elettrodi sono detti simmetrici se la loro composizione è uguale come avviene per gli EDLCs oppure asimmetrici nel caso dei supercondensatori ibridi. Il separatore ha il compito di impedire il contatto tra gli elettrodi ed il materiale di cui è costituito deve essere permeabile agli ioni e avere elevata resistenza elettrica. Per ottenere elevate prestazioni è richiesto inoltre che abbia un'alta conduttività ionica ed uno spessore ridotto. [7]

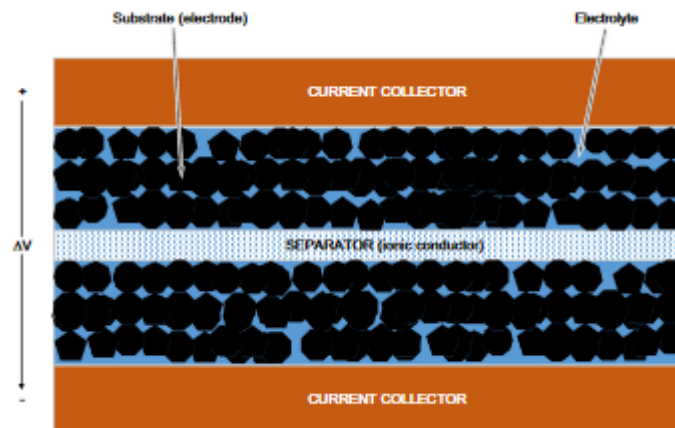


Figura 3.2: Rappresentazione schematica di un EDLC [7]

In Figura 3.2 è riportata la rappresentazione schematica di un condensatore elettrochimico a doppio strato con elettrodi in carboni attivi immersi in un elettrolita acquoso. Poiché la tensione di una singola cella come quella rappresentata è limitata, per le applicazioni che richiedono energie e potenze elevate è frequente porre un gran numero di celle in serie ed in parallelo per formare quello che è chiamato un "modulo". Le tensioni ai terminali di ciascuna cella del modulo potrebbero differire l'una dall'altra per via delle differenze intrinseche tra i parametri delle singole celle. Questo squilibrio nelle tensioni può portare a conseguenze anche gravi; ad esempio, celle con valori di capacità minori potrebbero essere caricate o scaricate eccessivamente durante i processi di carica-scarica e quindi usurarsi precocemente se non addirittura esplodere. Per scongiurare questi rischi sono utilizzati specifici circuiti di bilanciamento delle tensioni.

3.2. PARAMETRI ELETTRICI

In linea di massima si distinguono due tipi di circuiti di bilanciamento, passivi ed attivi. In un circuito di bilanciamento passivo dei resistori sono collegati in parallelo a ciascuna cella per dissipare l'energia in eccesso. Questi circuiti sono semplici ed economici da realizzare ma hanno scarsa efficienza dovuta alle perdite sui resistori e sono quindi impiegati solo per applicazioni di bassa potenza. I circuiti di bilanciamento attivo utilizzano invece dei convertitori di potenza per distribuire l'energia equamente tra un cella e l'altra e consentono perciò di raggiungere efficienze maggiori. [8]

3.2 Parametri elettrici

In questa sezione si esaminano i principali parametri elettrici dei supercondensatori utili per l'analisi delle schede tecniche fornite dai costruttori.

Poiché a livello macroscopico questi dispositivi si comportano come dei normali condensatori, in prima approssimazione la capacità dipenderà dalla costante dell'elettrolita, ϵ_r , dallo spessore effettivo del doppio strato, d (separazione tra le cariche), e dalla superficie disponibile, A , come segue:

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} \quad (3.1)$$

dove ϵ_0 è la costante dielettrica del vuoto. La capacità di un condensatore elettrochimico del tipo a doppio strato a carboni attivi varia solitamente tra i 5 e i 20 $\mu\text{F cm}^{-2}$ in base all'elettrolita.

L'energia E immagazzinata in un supercondensatore è pari ad

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (3.2)$$

dove V è la tensione della cella. L'espressione 3.2 mostra come l'energia immagazzinata sia proporzionale alla capacità e al quadrato della tensione. Per incrementare la densità energetica della cella si deve allora agire su uno o entrambi di questi parametri.

La potenza massima istantanea P_{max} che un supercondensatore può erogare è un altro parametro elettrico solitamente riportato nei datasheet. Questo dipende dalla tensione e dalla resistenza interna R secondo la seguente espressione:

$$P_{max} = \frac{V^2}{4R} \quad (3.3)$$

3. SUPERCONDENSATORI

La corrente che scorre nel supercondensatore è invece data dalla

$$I = C \frac{dV}{dt} \quad (3.4)$$

Per determinare i principali parametri elettrici a livello industriale sono condotti dei test di carica-scarica con correnti costanti. Un esempio è riportato in Figura 3.3.

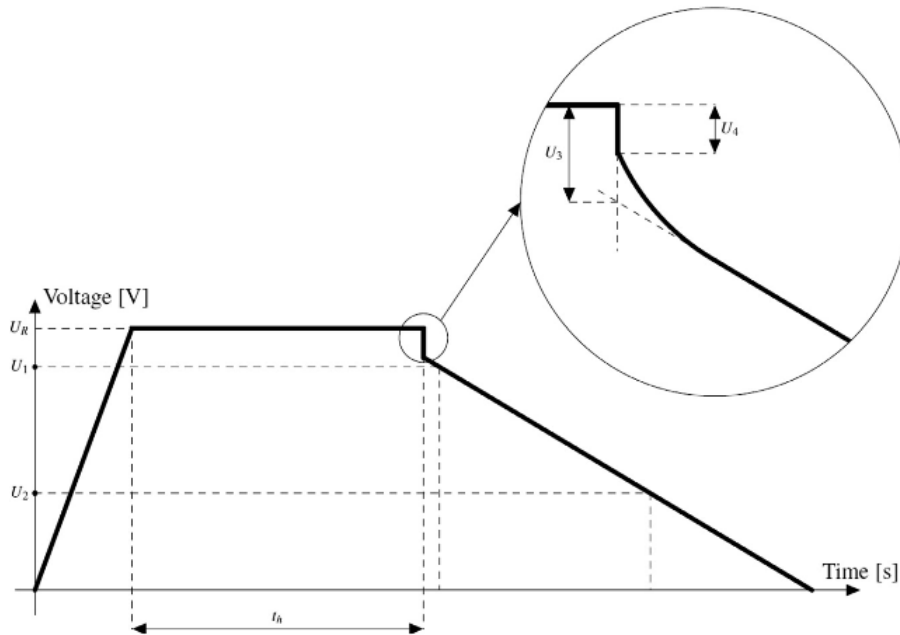


Figura 3.3: Scarica di un supercondensatore a corrente costante [7]

La capacità è calcolata come l'integrale dell'area compresa fra la tensione di inizio scarica U_1 e quella di fine scarica U_2 secondo l'espressione

$$C = \frac{I_{scarica} t_{scarica}}{U_1 - U_2} \quad (3.5)$$

La *resistenza serie equivalente ESR* è ottenuta invece dalla

$$ESR = \frac{U_4}{I_{scarica}} \quad (3.6)$$

dove la tensione U_4 rappresenta la caduta di tensione iniziale dovuta alla resistenza.

3.3. CONFRONTO CON LE BATTERIE

Infine la *resistenza distribuita equivalente EDR*, che rappresenta la *ESR* e la resistenza nei pori degli elettrodi (la parte curva della scarica) è calcolata come

$$EDR = \frac{U_3}{I_{scarica}} \quad (3.7)$$

[7]

3.3 Confronto con le batterie

I supercondensatori sono dispositivi in grado di fornire correnti molto elevate se confrontati con le batterie. Tuttavia, sebbene abbiano densità di potenza decisamente maggiori, non possono accumulare le stesse quantità di energia, che solitamente si attestano su valori dalle 3 alle 30 volte minori. La potenza in uscita dei supercondensatori è invece inferiore a quella dei condensatori normali, ma può raggiungere anche i 10 kW kg^{-1} . Come accennato nell'introduzione della sezione precedente, questi dispositivi sono interessanti perché le loro caratteristiche li pongono a metà in quanto a prestazioni tra i condensatori e le batterie, che possono accumulare grandi quantità di energia ma non offrono densità di potenza molto elevate ($<1 \text{ kW kg}^{-1}$). Quanto appena espresso è illustrato in Figura 3.4 per mezzo di un diagramma di Ragone, che confronta tecnologie di accumulo differenti in base alla densità di energia, riportata sull'asse delle ascisse, e alla densità di potenza, riportata sull'asse delle ordinate.

Il diagramma di Ragone non considera però molti altri parametri importanti come il costo, la sicurezza, il numero di cicli. Questi devono essere menzionati per farsi un'idea chiara dei vantaggi e dei limiti di un particolare sistema di accumulo. È utile riportare a riguardo che i supercondensatori possono non solo scaricarsi in pochi secondi, ma anche essere caricati nel medesimo breve intervallo di tempo. Questo rende i supercondensatori ideali per sistemi di recupero dell'energia, come quello utilizzati nei trasporti per il recupero dell'energia in frenata; non solo, la possibilità di essere ricaricati velocemente consente ad esempio di alimentare sistemi di trazione urbana tra una fermata e la successiva dove vengono poi ricaricati durante la sosta. La Tabella 3.1 offre un confronto tra batterie, condensatori e supercondensatori sui principali parametri finora menzionati.

Dalla tabella si evince come un altro grande vantaggio dei supercondensatori è la loro durata di vita. I condensatori elettrochimici possono

3. SUPERCONDENSATORI

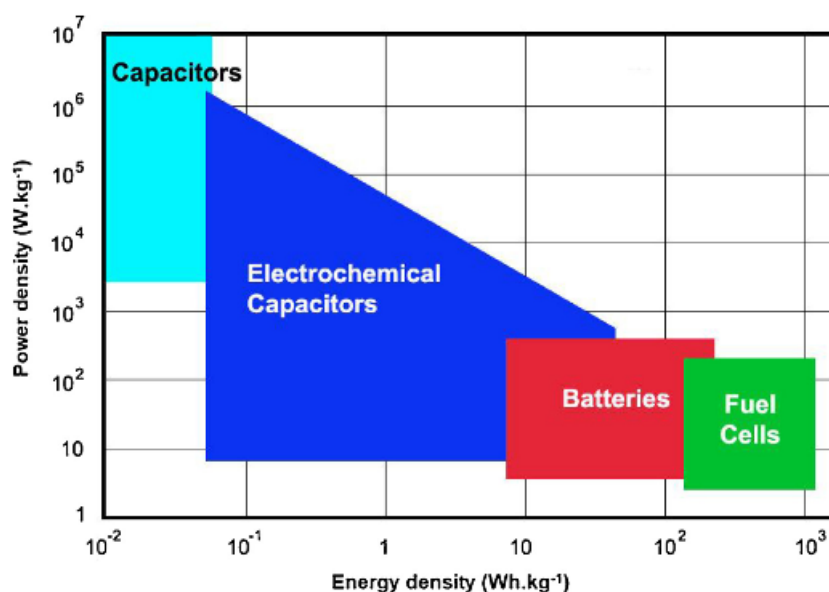


Figura 3.4: Diagramma di Ragone per diverse tecnologie di accumulo [6]

Tabella 3.1: Confronto fra i principali parametri [7]

Parametri	Condensatori	Supercondensatori	Batterie
Energia specifica [Wh 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 do 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

soportare migliaia di cicli di carica-scarica perché il meccanismo di accumulo della carica elettrica all'interfaccia del doppio strato elettrico è di tipo elettrostatico. Questo permette di superare la vita ciclica delle batterie, che al più sopportano poche migliaia di cicli. L'accumulo altamente reversibile di tipo elettrostatico non produce nei supercondensatori variazioni nel volume degli elettrodi, evitando i rigonfiamenti tipici delle reazioni redox che occorrono nei materiali attivi delle batterie durante i processi di carica e scarica. Un altro vantaggio dell'accumulo elettrostatico è che questo non pone gli stessi limiti alla corrente di quelli imposti dalla cinetica delle reazioni redox, consentendo di raggiungere quella densità di potenza di cui si è ampiamente discusso. [7]

3.3. CONFRONTO CON LE BATTERIE

Sempre come conseguenza del diverso meccanismo chimico-fisico di accumulo, si noti la differenza tra le curve di scarica a corrente costante di una batteria e di un supercondensatore, riportate in Figura 3.5.

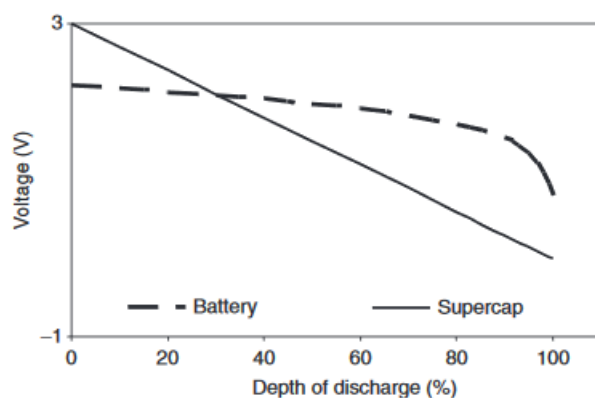


Figura 3.5: Differenza tra le curve di scarica di un supercondensatore e di una batteria [3]

La tensione ai morsetti di una batteria, legata alla tensione di equilibrio elettrochimico delle celle (cioè la tensione a circuito aperto), rimane molto più costante durante la scarica rispetto a quella di un supercondensatore, per il quale invece la tensione decresce in pratica linearmente con la scarica. Per questo motivo quando la scarica è regolata da convertitori elettronici, solitamente si preferisce operare i supercondensatori in un range di tensione ridotto (detto "voltage window") evitando di avere una tensione troppo bassa (se la scarica avviene a corrente costante) o livelli di corrente troppo elevati (se la scarica avviene a potenza costante) come input del convertitore. Una conseguenza di ciò è la riduzione dell'energia immagazzinabile nel sistema, in accordo con la 3.5 e qui riscritta alla luce di quanto affermato:

$$E = \frac{1}{2}C(V_{MAX}^2 - V_{min}^2) \quad (3.8)$$

dove V_{MAX} e V_{min} sono i limiti di tensione entro cui si è deciso di operare il supercondensatore. [3]

Nella Tabella 3.2 sono riassunte le differenze fin qui riportate tra batterie e supercondensatori.

Il range delle temperature a cui un supercondensatore può lavorare è un'altra caratteristica degna di essere menzionata. I supercondensatori possono raggiungere temperature di -40°C mantenendo ottime performance, un risultato attualmente impossibile per le batterie disponibili in

3. SUPERCONDENSATORI

Tabella 3.2: Confronto tra batterie e supercondensatori [7]

Parametro di confronto	Batterie	Supercondensatori
Meccanismo di accumulo	Chimico	Fisico
Limiti di potenza	Cinetica delle reazioni, trasporto di massa	Conduttività dell'elettrolita
Accumulo dell'energia	Elevato (quantità di materia attiva)	Limitato (superficie disponibile)
Velocità di carica	Limitata dalla cinetica	Alta, stessa della scarica
Limiti al numero di cicli	Stabilità meccanica, reversibilità chimica	Reazioni parassite

commercio. Inoltre, i condensatori elettrochimici sono in genere più sicuri delle batterie quando sono caricati o scaricati velocemente. Gli EDLCs in particolare, che non si basano su reazioni chimiche che coinvolgono metalli, non corrono il rischio del *metal plating*, che è un importante meccanismo di degradazione e di guasto delle batterie che può innescare corto circuiti e reazioni chimiche altamente energetiche e non controllabili. [7]

Tutte le caratteristiche fin qui elencate rendono evidente come i supercondensatori siano particolarmente adatti in generale per tutte quelle applicazioni caratterizzate da elevati picchi di potenza e/o un numero elevato di cicli di carica e scarica.

Descrizione dell'applicazione

In questo capitolo è presentato l'impianto a fune oggetto della tesi ed è descritto il sistema di alimentazione dei carichi di bordo.

4.1 Generalità sugli APM

Prima di addentrarsi nella descrizione dell'impianto si è ritenuto necessario riportare una breve introduzione agli "Automated People Mover" (APM). Gli APM fanno parte della grande famiglia dei sistemi innovativi per il trasporto urbano. Questi sistemi, detti anche "non convenzionali", devono il loro nome al fatto che si differenziano in parte o del tutto dai sistemi tradizionali per il trasporto di persone basati su tecnologie consolidate di derivazione ferroviaria o stradale. Una definizione comunemente accettata allo scopo di identificare univocamente i sistemi innovativi di trasporto urbano è la seguente: *modalità di trasporto integralmente automatica in sede completamente protetta*. Questa definizione necessariamente generale abbraccia un consistente numero di tipologie di impianti, classificabili in questo modo:

1. tappeti mobili a velocità variabile, con trazione mediante cinghie o catene e motorizzazione su una estremità dell'impianto;
2. sistemi su gomma, con motorizzazione a bordo;
3. sistemi su ferro, con motorizzazione a bordo;
4. sistemi a fune, con motorizzazione in stazione;
5. sistemi con monorotaia, con motorizzazione a bordo;

4. DESCRIZIONE DELL'APPLICAZIONE

6. sistemi con motore lineare, a sostentamento magnetico, con motorizzazione a bordo e sulla linea.

L'automazione integrale implica, in particolare, che questi impianti siano in grado di funzionare correttamente senza personale a bordo e/o in stazione. Essa aggiunge rispetto ai sistemi tradizionali importanti vantaggi: diminuzione dei costi d'esercizio legati al personale di bordo, miglioramento della qualità del servizio grazie alla possibilità di adeguare in tempo reale l'offerta del trasporto alla domanda, elevata disponibilità ed affidabilità, aumento della portata della linea mediante la riduzione dell'intervallo fra i passaggi e aumento degli standard di sicurezza. La guida automatica necessita tuttavia di una via di corsa dedicata e protetta che richiede un investimento iniziale superiore.

All'interno della famiglia dei trasporti innovativi gli Automated People Mover sono ideali per soddisfare una domanda di trasporto variabile all'incirca fra 2000 e 8000 passeggeri all'ora per verso di marcia. La definizione che meglio inquadra i people mover è: *sistemi di trasporto leggeri a breve e media distanza*. Al momento gli APM già in esercizio operano nelle città come mezzo di trasporto pubblico ed in contesti particolari (ad es. aeroporti, fiere, centri turistici e ricreativi) al servizio di visitatori o clienti.

Tra le varie realizzazioni di people mover quella che interessa alla luce del lavoro di tesi è del tipo a fune. La trazione a fune è stata una delle prime forme di propulsione non animale o umana ad essere utilizzate in ambito urbano; in Italia, a Genova, nel 1901 furono realizzate due funicolari, tuttora funzionanti. In tale tipologia di impianti i veicoli sono trainati da una o più funi e viaggiano vincolati ad una guida solitamente costituita da un binario. La fune poggia su dei rulli posti in successione al centro del binario. Nel caso che il tracciato non sia rettilineo, i rulli sono montati con una certa inclinazione per garantire che la guida della fune sia sempre corretta. I veicoli sono agganciati alla fune per mezzo di morse; l'ammorsamento¹ può essere del tipo fisso oppure mobile con apertura e chiusura automatica. In impianti con cabine o veicoli come i people mover le cui portate sono di alcune migliaia di persone all'ora per senso di marcia, in stazione è necessario che il veicolo si fermi o proceda a velocità ridotta per consentirne la discesa o la salita e perciò l'ammorsamento di tipo automatico è quello adottato.

La fune offre diversi vantaggi quando è utilizzata in abbinamento ad un impianto automatico, come un'efficace controllo della velocità e la

¹Il serraggio delle morse alla fune.

4.2. LA FUNICOLARE VADINSTANBUL

garanzia del distanziamento dei veicoli in linea. Inoltre il fatto che il motore non sia a bordo ma in stazione permette una riduzione notevole del peso delle vetture e una utilizzo più razionale ed efficiente dell'energia.

In generale si possono distinguere tre livelli di complessità nella trazione a fune: sistemi a navetta, sistemi multistazione, sistemi semi-continui. I sistemi a navetta sono i più semplici e prevedono un veicolo agganciato alla fune che fa la spola tra le due stazioni d'estremità. Per aumentare la potenzialità e ridurre i tempi di attesa si possono affiancare due moduli paralleli ed indipendenti, oppure mantenere la via di corsa singola e utilizzare due veicoli che si incrociano a metà percorso. Nei sistemi multistazione il servizio è assicurato da un unico veicolo per tratta e per senso di marcia. Nel tratto compreso tra due stazioni il veicolo è agganciato alla fune mentre durante la sosta in stazione si ha lo sganciamento ed il passaggio all'anello successivo. Il vantaggio di questa configurazione è la modularità che consente di estendere la linea introducendo semplicemente nuove tratte. Al fine di aumentare la potenzialità si possono poi mettere in linea più veicoli per tratta e per senso di marcia, come avviene nei sistemi semi-continui. Questi impianti si ispirano alle telecabine delle stazioni sciistiche e permettono di introdurre in linea un numero di veicoli adatto a soddisfare la domanda di trasporto in tempo reale e di avere un distanziamento ridotto fra i veicoli (anche solo di 20-30 secondi). [9]

4.2 La funicolare Vadinstantbul

L'APM oggetto della tesi si tratta di una funicolare del tipo a navetta con due veicoli che si incrociano a metà tracciato. La funicolare è stata progettata e realizzata dalla Bartholet Maschinenbau AG (BMF), impresa nel settore degli impianti meccanici di risalita la cui sede principale è a Flums, in Svizzera; la Nidec-ASI si è occupata invece dell'azionamento del sistema di trazione e del sistema di alimentazione dei carichi elettrici a bordo. L'impianto è stato realizzato nel nuovo quartiere Vadinstantbul della città di Istanbul, in Turchia. Il quartiere, che sorge vicino allo stadio del Galatasaray, è un grande complesso di uffici, negozi, condomini e alberghi. La funicolare collega la stazione della metropolitana di Seyrantep con il Centro Commerciale Vadinstantbul; in Figura 4.1 sono riportate una foto ed il profilo del tracciato dell'impianto.

Le corse dell'impianto sono 80 al giorno; la prima corsa è prevista per le ore 07.00 mentre l'ultima corsa alle ore 22.00. Tra una corsa e l'altra non

4. DESCRIZIONE DELL'APPLICAZIONE

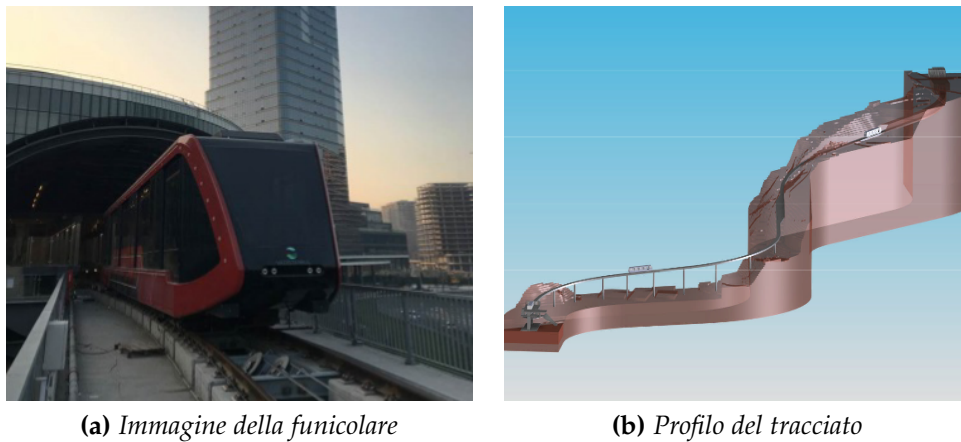


Figura 4.1: La funicolare Vadinstanbul (per gentile concessione di Nidec-ASI S.p.A)

c'è un intervallo programmato, ma la partenza è decisa dal manovratore in base all'affluenza delle persone. Nella Tabella 4.1 sono forniti alcuni dati tecnici.

Tabella 4.1: Caratteristiche dell'impianto (per gentile concessione di Nidec-ASI S.p.A)

Tipo di impianto:	Funicolare
Lunghezza inclinata:	750 m
Dislivello:	40 m
Numero di veicoli:	2, capienza 250 persone cadauno
Velocità di marcia:	0 - 7 m s ⁻¹
Portata:	3500 passeggeri ogni ora
Durata tratta:	2 min 29 s
Controllo:	Nidec-ASI

4.3 Descrizione del sistema di alimentazione dei carichi di bordo

Il sistema di alimentazione consta di due tecnologie di accumulo diverse: batterie e supercondensatori.

I supercondensatori, denominati "Heavy Transportation Module" e prodotti dalla Maxwell Technologies, sono del tipo a doppio strato elettrico

4.3. DESCRIZIONE DEL SISTEMA DI ALIMENTAZIONE DEI CARICHI DI BORDO

Tabella 4.2: Caratteristiche principali supercondensatori

Capacità nominale	63 F
<i>ESR</i>	18 mΩ
Tensione nominale	125 V
Corrente massima continuativa (+15 °C)	140 A
Massa	61 kg
Con ventole di raffreddamento	63,4 kg
Potenza specifica	1700 W kg ⁻¹
Energia specifica	2,3 Wh kg ⁻¹
Numero di cicli (25 °C; 100 A)	1 × 10 ⁶

Tabella 4.3: Batterie FIAMM "Endurlite"

Modello	Capacità [Ah] (10 h; 20 °C)	<i>ESR</i> [mΩ]	Massa [kg]
12 XL 60	60	8,88	25,5
12 XL 105	100	6,78	36,0
12 XL 125	120	5,82	44,9
12 XL 155	150	4,97	54,8
12 XL 175	170	3,62	62,4
12 XI 205	200	3,44	73,9

e consistono di tre moduli da 63 farad l'uno collegati in parallelo per un totale di 189 farad. Ogni modulo è composto da 48 celle poste in serie di capacità pari a 5000 F l'una e dotato di un sistema di bilanciamento delle tensioni di tipo attivo. I dati tecnici principali sono riportati in Tabella 4.2.

Le batterie sono 4 moduli di 12 volt nominali l'una prodotte dalla FIAMM (Fabbrica Italiana Accumulatori Motocarri Montecchio) e sono connesse a due in serie a formare due gruppi con una tensione di 24 volt totali. Le batterie al piombo sono del tipo gel VRLA e fanno parte della linea FIAMM XL 12V "Endurlite" prodotta in varie taglie che garantisce una lunga vita ciclica ed elevate profondità di scarica. I dati tecnici principali per le batterie di questa famiglia sono riportati in Tabella 4.3. Le schede tecniche complete per le due tecnologie di accumulo sono invece riportate in Appendice alla tesi.

I carichi a bordo del veicolo, con i relativi assorbimenti nominali sono riportati in Tabella 4.4.

Per ogni tipologia di utenza è fornita una descrizione:

4. DESCRIZIONE DELL'APPLICAZIONE

Tabella 4.4: Lista dei carichi e rispettivi assorbimenti (*per gentile concessione di Nidec-ASI S.p.A*)

Carichi	In stazione [W]	Durante corsa (7 m s^{-1}) [W]
1. Luci decorative ext. laterali	0	653
2. Luci decorative ext. frontali	0	24
3. Fari frontali	0	140
4. Luci interne	840	840
5. Freno idraulico d'emergenza	1000	1000
6. Sistema porte automatiche	400	130
7. PLC di bordo	500	500
8. Ventole PLC	500	500
9. CCTV e interfono	150	150
10. Ventilatori laterali	0	440
11. Unità HVAC	6600	0
12. Ventilatori radiali unità HVAC	0	1340
Totale	9990	5717

- *luci decorative esterne, fari frontali e luci interne.* Le luci decorative sono costituite da strisce e punti di leds posti lungo i fianchi della vettura. Queste non sono sempre accese, ma l'accensione è regolata manualmente dal manovratore in base alla luce esterna ed alle condizioni ambientali; lo stesso vale per i fari frontali e le luci interne. In Figura 4.2 sono illustrati l'interno del veicolo illuminato e le luci esterne.
- *Freno idraulico.* Il freno non è praticamente mai azionato ed interviene solo in caso di estrema emergenza per bloccare il veicolo, ad esempio quando si ha un'avaria nei freni in stazione agenti sulla fune o per la rottura della stessa. Il freno è attivato azionando delle elettrovalvole che scaricano dell'olio in pressione che mantiene il freno aperto; venendo a mancare la pressione il freno si chiude e blocca il veicolo. Il freno può essere riaperto per mezzo di una pompa elettrica (a cui è riferito l'assorbimento riportato in tabella) alimentata dalle batterie del veicolo che ripristina la pressione dell'olio prelevandolo da un serbatoio. La durata dell'operazione è di circa 30 secondi.
- *PLC e relative ventole.* Il PLC (Controllore Logico Programmabile) è sempre attivo e gestisce i carichi e ed il sistema di accumulo

4.3. DESCRIZIONE DEL SISTEMA DI ALIMENTAZIONE DEI CARICHI DI BORDO

comunicando con essi per mezzo di un bus di campo tipo CAN².

- *Intercommunication System: CCTV e interfono.* Entrambi sono sempre attivi; il CCTV ("Closed Circuit Television") è un sistema di 6 telecamere a circuito chiuso interne/esterne che registrano su una scheda di memoria SSD interna mentre l'interfono è un semplice citofono che lavora a chiamata da parte dei passeggeri verso il manovratore. Hanno il compito di garantire la sicurezza (safety & security).
- *Sistema porte automatiche.* Come si evince dalla tabella, il sistema di porte automatiche durante la corsa è in stand-by e le porte rimangono chiuse; ovviamente i consumi sono maggiori all'apertura delle porte in stazione, ma non gravano in questo caso sul sistema di accumulo a bordo.
- *Unità HVAC e ventilatori.* Le unità HVAC ("Heat Ventilation Air Conditioning") di condizionamento dell'aria, in quantità pari a 5, possono essere attivate solo con la vettura in stazione (e quindi connessa al pantografo). I relativi ventilatori invece possono essere attivati in qualsiasi occasione (e quindi anche durante le corse) a discrezione del manovratore. Anche i ventilatori laterali, in quantità pari a 8, possono essere attivati in qualsiasi occasione sempre a discrezione del manovratore. I 13 ventilatori difficilmente lavorano mai contemporaneamente.

4.3.1 Funzionamento del sistema di alimentazione

Durante la corsa del veicolo i supercondensatori alimentano i carichi per mezzo di un convertitore DC/DC collegato ad un bus DC alla tensione di circa 26 V. Nel caso l'alimentazione dei supercondensatori venisse meno, le batterie si sostituiscono immediatamente a questi per alimentare i carichi alla tensione di 24 V. In stazione, un pantografo si collega all'alternata delle rete che da 230 Vac è regolata a 26,4 Vdc da un convertitore apposito e va ad alimentare i carichi, ricarica i supercondensatori (tramite il convertitore DC/DC) e mantiene in carica le batterie. Il tutto è gestito elettronicamente dal PLC di bordo; in Figura 4.3 sono rappresentati i componenti del sistema di alimentazione.

²Il "Controller Area Network", noto anche come CAN-bus, è uno standard di comunicazione seriale per bus di campo (principalmente in ambiente automotive) impiegato per la trasmissione dei dati in una rete costituita da controllori, sensori e attuatori.

4. DESCRIZIONE DELL'APPLICAZIONE



Figura 4.2: Illuminazione interna ed esterna (per gentile concessione di Nidec-ASI S.p.A)

In situazioni di emergenza sono previste diverse modalità di alimentazione dei carichi in modo da prolungare l'autonomia del sistema di accumulo. Tali modalità sono riassunte in Tabella 4.5.

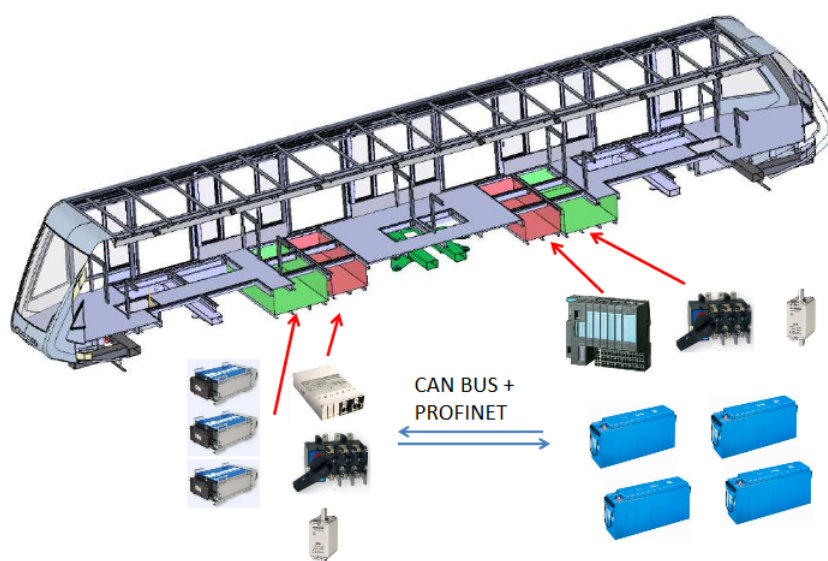


Figura 4.3: Rappresentazione del sistema di alimentazione di bordo (per gentile concessione di Nidec-ASI S.p.A)

Nella tabella si distinguono tre modalità: *eco-modus 1*, *eco-modus 2* ed *evacuation trip*. Queste sono attivate in occasione dei seguenti scenari qui di seguito descritti:

4.3. DESCRIZIONE DEL SISTEMA DI ALIMENTAZIONE DEI CARICHI DI BORDO

Tabella 4.5: Modalità di alimentazione in caso di emergenza (per gentile concessione di Niidec-ASI S.p.A)

Carichi	"Eco-modus 1"	"Eco-modus 2"	"Evacuation trip"
Luci decorative ext. laterali	0	0	0
Luci decorative ext. frontali	0	0	0
Fari frontali	140	0	70*
Luci interne	252**	252	252
Freno idraulico	1000	0	1000
Sistema porte automatiche	130	130	130
PLC di bordo	500	500	500
Ventole PLC	500	500	500
CCTV e interfono	150	150	150
Ventilatori laterali	270***	270	270
Ventilatori radiali	1340	1340	1340
Totale con freno idraulico	4282		3340
Totale senza freno idraulico	3282	3142	3212

*Luci dimmerate al 30 %
 **Un solo faro frontale acceso per il recupero di notte
 ***Ventilatori in uso ridotti a metà

4. DESCRIZIONE DELL'APPLICAZIONE

- veicolo fermo lungo il percorso (il veicolo potrebbe ripartire); si attiva la modalità 1, le luci esterne si spengono, quelle interne sono ridotte del 30% e sono dimezzati i ventilatori operativi. Per tale modalità è prevista una autonomia di circa 900 secondi. Dopo questo intervallo di tempo, se il veicolo fosse ancora fermo, si attiva automaticamente la modalità 2, per cui è prevista una autonomia di circa 30 minuti. In questa modalità sono spenti i fari frontali.
- Recupero di un veicolo bloccato lungo il percorso; il manovratore deve passare il prima possibile dalla modalità 1 alla 2 fino a che il sistema non è pronto per l'operazione di recupero (massimo 30 minuti). Una volta che il recupero può cominciare, il freno (se intervenuto) viene disattivato e c'è il passaggio alla modalità tre, valutata durare nel caso peggiore, con il veicolo bloccato a metà percorso, pari a 438 secondi.
- Livello delle batterie critico con il veicolo bloccato; i passeggeri a bordo sono avvertiti pochi minuti prima del blackout dell'arrivo di una squadra di soccorso e viene consigliato di aprire le finestre del veicolo nell'attesa.

Nel caso peggiore, considerando l'intervallo più lungo per ogni modalità, il tempo totale è pari a

$$\Delta T = 900 \text{ s} + 1800 \text{ s} + 438 \text{ s} = 3138 \text{ s} \quad (4.1)$$

L'autonomia delle batterie può essere prolungata se il manovratore dispone manualmente il passaggio anticipato dalla modalità Eco-modus 1 alla Eco-modus 2.

Analisi dei carichi e potenza limite di dimensionamento

Oggetto del capitolo è l'analisi dei carichi a bordo della funicolare allo scopo di determinare un profilo di carico medio necessario ad identificare la potenza in riferimento alla quale saranno dimensionati le batterie e i supercondensatori, come sarà spiegato meglio nel corso del capitolo.

5.1 Considerazioni preliminari

Nelle applicazioni per l'alimentazione dei veicoli elettrici, settore dove i sistemi di accumulo ibridi batterie-supercondensatori sono i più studiati e dove le escursioni della potenza assorbita dal motore possono essere notevoli per via delle fasi di accelerazione e di decelerazione del mezzo, i benefici di un tale abbinamento sono quelli di poter disporre di due "fonti", una di energia (le batterie) ed una di potenza (i supercondensatori). Si è visto infatti che l'entità delle correnti erogate o assorbite da una batteria (il "C-rate") riducano notevolmente la capacità disponibile e la vita utile. Allora, per poter assicurare autonomie elevate, le batterie nei veicoli elettrici attuali sono in genere sovradimensionate rispetto alla capacità reale che sarebbe necessaria per profili di carico più costanti. Affiancando i supercondensatori, le richieste di energia e potenza del mezzo possono essere "disaccoppiate" demandando così ai supercondensatori la gestione dei picchi di corrente nelle fasi di accelerazione e decelerazione, che in termini energetici coprono una piccola parte della capacità richiesta, e potendo così dimensionare le batterie ad un *valore ottimale di potenza*,

5. ANALISI DEI CARICHI E POTENZA LIMITE DI DIMENSIONAMENTO

determinata in base ad un profilo di carico tipico del mezzo, che ne minimizzi il peso e massimizzi il loro utilizzo. [10]

L'applicazione considerata si presenta in parte diversa: in questo caso le caratteristiche di elevata potenza specifica e lunga vita ciclica dei supercondensatori sono sfruttate più in termini energetici che di potenza. Infatti, disponendo della possibilità di ricaricarli rapidamente ogni volta che il mezzo ferma in stazione, senza in questo modo danneggiarli per le caratteristiche sopra citate, si supera il problema della scarsa densità energetica che li distingue e si guadagna invece in ingombro e peso rispetto ad un sistema di alimentazione costituito da batterie, la cui impossibilità di essere caricate così velocemente e frequentemente impone invece una valutazione degli assorbimenti dei carichi *su base giornaliera*, implicando ben altri ingombri e pesi.

L'obiettivo nell'ibridazione del sistema di accumulo che ci si è posti è stato allora quello di ridurre la taglia richiesta ai supercondensatori, che nella funicolare coprono per intero il fabbisogno energetico dei carichi tra una stazione e l'altra, trasferendo parte della potenza assorbita da questi durante il tragitto alle batterie e rendendole parte attiva del sistema di alimentazione. In questo modo si spera di ridurre i costi, essendo i supercondensatori l'elemento più costoso, senza tuttavia aumentare troppo il peso totale richiesto al sistema per alimentare i carichi.

5.2 Analisi dei carichi

Avendo a disposizione i consumi effettivi dei carichi misurati a bordo della vettura forniti dalla Nidec-ASI, *in primis* sono stati rivalutati i singoli assorbimenti e la potenza totale impegnata. I dati sono riportati in Tabella 5.1; gli assorbimenti, indicati in watt, sono stati calcolati moltiplicando le misure in ampere per la tensione rilevata ai morsetti delle utenze, pari a 25,98 V. Per ogni tipologia di utenza si è allora corretto rispetto ai valori nominali, riportati nel capitolo precedente, il valore di potenza assorbita per il computo della potenza totale dei carichi, arrotondando per eccesso in modo da assicurare comunque un certo margine di sicurezza.

Il nuovo valore di potenza totale dei carichi ottenuto è riportato nella quarta colonna della tabella. Non disponendo di una misura dell'assorbimento della pompa del freno idraulico si è scelto di considerare il suo valore nominale.

5.2. ANALISI DEI CARICHI

Tabella 5.1: Assorbimenti effettivi misurati (per gentile concessione di Nidec-ASI S.p.A)

Carichi	Misura [A]	Misura [W a 25,98 V]	Valore assunto
Luci decorative ext. laterali	25	649,5	650
Luci decorative ext. frontali	0,48	12,4704	13
Fari frontali	3	77,94	78
Luci interne	29	753,42	754
Freno idraulico d'emergenza	0*	0*	1000
Sistema porte automatiche	3,2	83,136	84
PLC di bordo	3,1	80,538	81
Ventole PLC	5,1	132,498	133
CCTV e interfono	1	25,98	26
Ventilatori laterali	12	311,76	312
Ventilatori radiali unità HVAC	52	1350,96	1351
Totale senza freno idraulico	133,88	3478,2024	3482
Totale con freno idraulico			4482

*Misura non disponibile

Poiché non si dispone di un diagramma di carico tipico per i carichi di bordo della funicolare, necessario per determinare la potenza limite o ottimale da attribuire alle batterie, il secondo step è stato quello di definirne uno sulla base di alcune ipotesi avanzate in relazione alle condizioni di lavoro della funicolare e alle indicazioni sul funzionamento degli stessi fornite dalla Nidec-ASI. Si è cercato allora di individuare due diagrammi di carico, uno massimo ed uno minimo, e la media tra questi è stata usata per determinare un diagramma di carico di riferimento.

Per far questo, sono stati individuati i fattori che influenzano il funzionamento dei carichi, ed in base a questi si sono divisi i carichi in tre gruppi qui di seguito descritti:

1. *Sistema di alimentazione porte automatiche, plc di bordo e relativa ventola, CCTV e interfono, metà dei ventilatori laterali.* Questi carichi sono quelli che costituiscono il carico base, ovvero che rimangono sempre accesi indipendentemente da fattori esterni. Poiché è possibile operare i ventilatori laterali anche a metà (cioè quattro su otto unità) sono stati considerati quattro sempre accesi per assicurare la ventilazione all'interno del mezzo. La somma delle loro potenze costituisce la

5. ANALISI DEI CARICHI E POTENZA LIMITE DI DIMENSIONAMENTO

potenza base assorbita dal sistema:

$$P_{base} = 84 + 81 + 133 + 26 + \frac{312}{2} = 480 \text{ W} \quad (5.1)$$

2. *Luci esterne, luci interne e fari frontali.* Le luci sono dipendenti ovviamente dalla luce esterna e quindi soprattutto dall'ora della giornata.
3. *Ventilatori laterali e ventilatori radiali delle unità HVAC.* Il sistema di ventilazione dipende invece dalla temperatura ambientale e dalla concentrazione di persone a bordo. Per questi sono state previste tre modalità di utilizzo. La prima prevede solo quattro degli otto ventilatori laterali attivi, come specificato prima. In caso di un'elevata concentrazione di persone a bordo, è invece prevista l'attivazione di tutte le otto unità. Infine, se oltre alla densità dei passeggeri si aggiunge una temperatura elevata esterna, è prevista l'attivazione delle ben più potenti unità legate al sistema di condizionamento dell'aria, e la disattivazione delle altre.

Diagramma di carico massimo

Per il diagramma di carico massimo si è deciso di valutare due giornate e di considerare poi la più gravosa in termini di potenza media assorbita. La prima è riferita ad una giornata feriale invernale, precisamente il 21 dicembre, giorno più breve dell'anno in cui le luci rimangono per più tempo accese e la concentrazione delle persone che si reca al lavoro negli uffici del quartiere servito dalla funicolare è più alta nelle ore mattutine ed in quelle di fine giornata lavorativa. La seconda è invece riferita ad una domenica estiva, precisamente la domenica prima di ferragosto, dove invece è il sistema di ventilazione ad essere più sfruttato e quando la concentrazione maggiore delle persone a bordo è dovuta alle visite al centro commerciale servito dalla funicolare.

Dalle combinazioni dei vari gruppi di carichi valutati ora per ora per tutta la giornata lavorativa della funicolare si sono ricavati gli assorbimenti riportati nella Tabella 5.2.

Da questi sono stati ricavati i profili di carico rappresentati in Figura 5.1.

Per determinare l'intervallo in cui le luci sono accese ci si è riferiti agli orari di alba e tramonto ad Istanbul reperiti sul sito "www.sunrise-and-sunset.com", relativi al 21 dicembre 2017 per la giornata invernale e al 13

5.2. ANALISI DEI CARICHI

Tabella 5.2: Assorbimenti giornate di carico massimo

Ore	Giornata invernale [W]	Giornata estiva [W]
7.00-8.00	2221	480
8.00-9.00	952,2	480
9.00-10.00	796,2	726
10.00-11.00	796,2	726
11.00-12.00	796,2	726
12.00-13.00	796,2	726
13.00-14.00	796,2	726
14.00-15.00	796,2	1675
15.00-16.00	796,2	1675
16.00-17.00	796,2	1675
17.00-18.00	2221	726
18.00-19.00	2221	726
19.00-20.00	2065	480
20.00-21.00	2065	2065
21.00-22.00	2065	2065

agosto 2017 per la giornata estiva; per la giornata invernale, mettendosi nel caso peggiore di una giornata nuvolosa, si è considerato che anche nelle ore di luce le luci interne rimanessero accese ma dimmerate al 30%.

Per gli orari di concentrazione delle persone a bordo, per quanto riguarda la giornata lavorativa invernale si sono considerati gli intervalli 7.00-9.00 e 17.00-19.00; durante questi intervalli si sono considerati lavorare tutti ed otto i ventilatori laterali a bordo. Per quanto riguarda la giornata feriale estiva, l'intervallo considerato di maggiore concentrazione è stato 15.00-19.00, in accordo con gli orari di maggior numero di visite del centro commerciale indicati dal servizio google "google maps"; in relazione a questo dato e all'andamento delle temperature nella giornata, reperito dal sito "www.eurometeo.com", si sono considerati attivi i ventilatori delle unità HVAC nell'intervallo 14.00-17.00 mentre si sono considerati lavorare tutte ed otto le unità di ventilazione laterale negli intervalli 10.00-15.00 e 17.00-19.00. Per le restanti ore della giornata sono stati considerati attivi solo le quattro unità di base.

Una volta determinati i due profili di carico, da un confronto tra le potenze medie calcolate per entrambi si è scelto di fare riferimento, per il diagramma di carico massimo, a quello invernale, che risulta avere il valore medio di potenza più alto.

5. ANALISI DEI CARICHI E POTENZA LIMITE DI DIMENSIONAMENTO

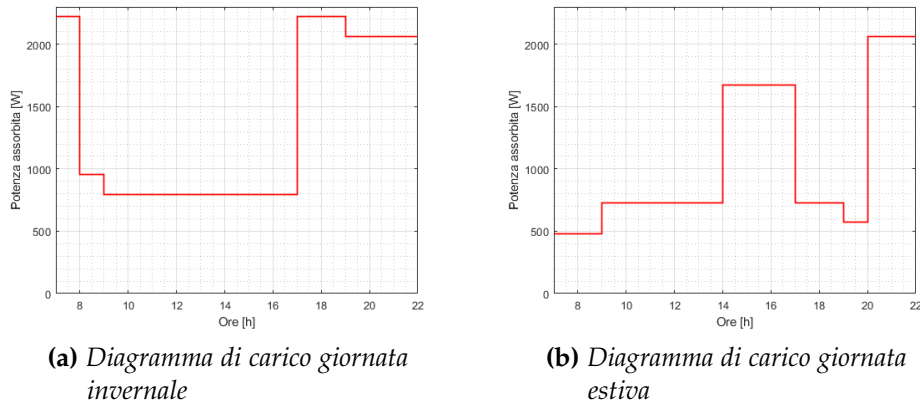


Figura 5.1: Diagrammi di carico massimo

Diagramma di carico minimo

Per il diagramma di carico minimo si è considerata l'ultima domenica di aprile, quando ancora le temperature non sono troppo elevate e le giornate si allungano. Il computo delle potenze ora per ora è riportato in Tabella 5.3.

Tabella 5.3: Assorbimenti giornata di carico minimo

Ore	Assorbimento [W]	Ore	Assorbimento [W]
7-8	480	15-16	726
8-9	480	16-17	726
9-10	480	17-18	726
10-11	480	18-19	726
11-12	480	19-20	480
12-13	480	20-21	2065
13-14	480	21-22	2065
14-15	480		

Per ricavarlo sono state seguite le stesse considerazioni illustrate nel caso precedente. In questo caso per le luci si è considerato l'intervallo 20.00-22.00, in accordo con gli orari di alba e tramonto registrati nell'ultima domenica di aprile relativi all'anno in corso. Per l'impianto di ventilazione, si è considerato esercito al suo massimo, con tutti ed otto i ventilatori accesi, per l'intervallo 15.00-19.00, in accordo con gli orari di visita di

5.2. ANALISI DEI CARICHI

punta del centro commerciale. Una rappresentazione grafica del profilo di carico è riportata in Figura 5.2.

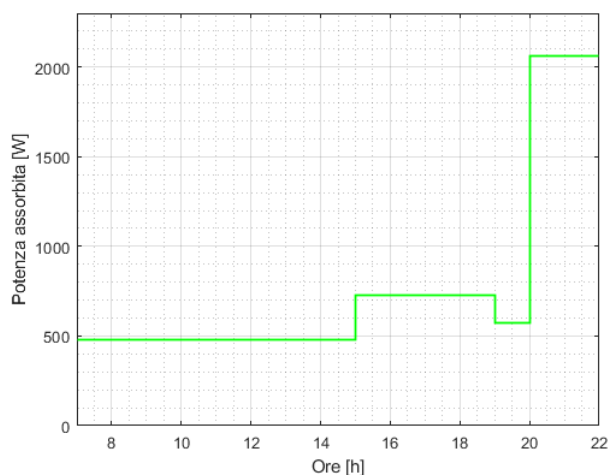


Figura 5.2: Diagramma di carico minimo

Diagramma di carico medio

Si è infine determinato il diagramma di carico medio usato come riferimento per individuare la potenza da trasferire alle batterie. Il calcolo è stato eseguito facendo la media degli assorbimenti di carico massimo e di carico minimo su ogni ora. I valori ottenuti sono riportati in Tabella 5.4, mentre il diagramma è rappresentato in Figura 5.3

Tabella 5.4: Assorbimenti medi calcolati

Ore	Assorbimento [W]	Ore	Assorbimento [W]
7-8	1395,5	15-16	761,1
8-9	761,1	16-17	761,1
9-10	683,1	17-18	1473,5
10-11	683,1	18-19	1473,5
11-12	683,1	19-20	1317,5
12-13	683,1	20-21	2065
13-14	683,1	21-22	2065
14-15	683,1		

5. ANALISI DEI CARICHI E POTENZA LIMITE DI DIMENSIONAMENTO

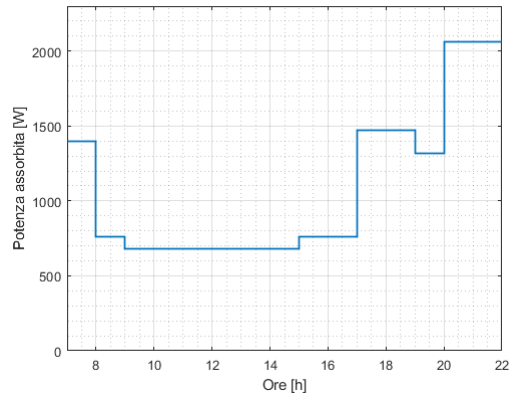


Figura 5.3: Diagramma di carico medio

Dal diagramma di carico medio si è infine determinato il valore di potenza limite per il quale saranno dimensionate le batterie, pari a

$$P_{lim} = 762 \text{ W} \quad (5.2)$$

Il valore è stato scelto tra i valori degli assorbimenti riportati in Tabella 5.4 e arrotondato alla prima cifra decimale. Si è effettuata tale scelta perché rappresenta il valore di potenza massima per la quale si ha meno escursione rispetto al proprio valore medio durante la giornata tipica di lavoro, come si può notare meglio dal confronto riportato in Figura 5.4.

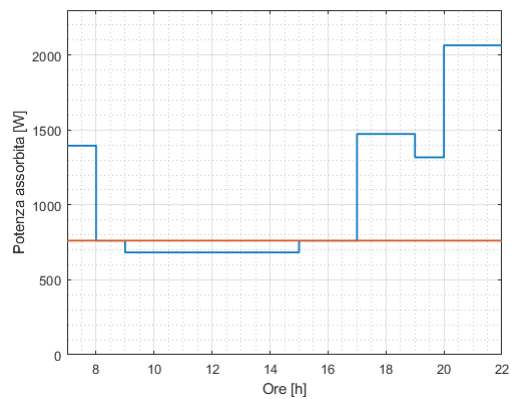


Figura 5.4: Confronto tra il diagramma di carico medio e la potenza limite stabilita

Dimensionamento del sistema ibrido di accumulo

In questo capitolo è descritto il dimensionamento del sistema ibrido di accumulo. Nella prima sezione sono illustrate le considerazioni che hanno portato alla scelta dell'architettura del sistema, mentre nella seconda sezione è descritto il dimensionamento vero e proprio.

6.1 Scelta dell'architettura

In letteratura sono state analizzate numerose soluzioni per l'integrazione delle batterie e dei supercondensatori in sistemi di accumulo ibridi a bordo di veicoli. Tra le tante, in Figura 6.1 sono riportate tre delle più utilizzate.

La prima architettura da sinistra, dove batterie e supercondensatori sono direttamente connessi al bus DC in parallelo senza alcun tipo di convertitore, costituisce il metodo più semplice di combinare assieme i due elementi. In questo modo si ha che batterie e supercondensatori

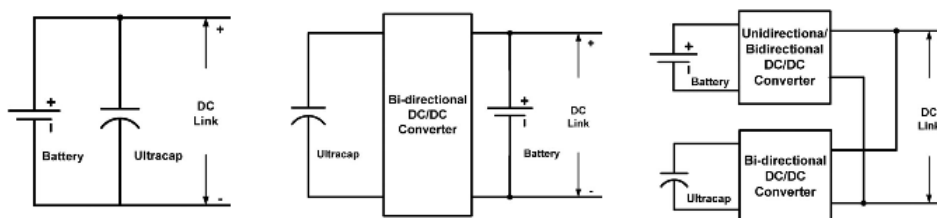


Figura 6.1: Possibili configurazioni di un sistema ibrido [11]

operano alla stessa tensione e questi ultimi in pratica si comportano come un filtro passa-basso. I vantaggi di questo metodo includono la facilità di implementazione e l'economicità dovute al fatto che non sono richiesti particolari algoritmi di controllo o costosi convertitori. Il maggior problema risulta invece l'impossibilità di sfruttare proficuamente l'energia accumulata nei supercondensatori, legata come si è visto nel capitolo 2 all'escursione della tensione ai loro capi, in quanto la tensione è imposta dalle batterie e non può variare molto.

La topologia al centro è chiamata *UC/Battery Configuration* ed è una delle più studiate. Per mezzo dell'utilizzo di un convertitore DC/DC bidirezionale che interfaccia i supercondensatori con il bus DC è possibile variare molto il range di tensione di questi senza alterare quello sul bus e così sfruttare l'energia accumulata. Lo svantaggio rispetto alla configurazione prima illustrata è il maggior costo richiesto dal convertitore.

L'ultima architettura illustrata prevede batterie e supercondensatori collegati in parallelo ognuno con il proprio convertitore. Questa configurazione è quella che offre maggior versatilità nel controllo delle due tecnologie di accumulo, ma risulta essere anche la meno economica. [11]

Poiché l'obiettivo della tesi è quello di far interagire batterie e supercondensatori al fine di ridurre i costi del sistema di alimentazione e considerando che questo risulta già essere configurato come nella seconda topologia presentata, con le batterie direttamente collegate al bus ed un convertitore che regola la carica-scarica dei supercondensatori, si è optato per lasciare invariata questa configurazione. Essa risulta infatti già sufficientemente versatile senza il bisogno di aggiungere altri costosi convertitori.

6.2 Dimensionamento

In questa sezione è illustrato il dimensionamento degli elementi di accumulo in base alla potenza limite determinata nella capitolo precedente. Il dimensionamento è stato diviso in due parti, la prima dedicata alle batterie e la seconda ai supercondensatori.

6.2.1 Dimensionamento delle batterie

Una volta determinata la potenza limite P_{lim} , si deve determinare la quantità di energia richiesta alle batterie. Questa è stata valutata sull'intera giornata lavorativa della funicolare, considerando il numero di

6.2. DIMENSIONAMENTO

corse dell'impianto, pari ad 80, e la durata della scarica per ognuna, pari a $\Delta t_{scarica} = 190$ s così come indicato dalla Nidec-ASI. L'energia totale richiesta alle batterie, espressa in watt-ora, è allora stata calcolata come segue¹:

$$E_{batt} = P_{lim} \cdot \frac{\Delta t_{scarica}}{3600 \text{ s h}^{-1}} \cdot 80 = 762 \text{ W} \cdot \frac{190 \text{ s}}{3600 \text{ s h}^{-1}} \cdot 80 \simeq 3218 \text{ Wh} \quad (6.1)$$

A questa quantità è stata aggiunta l'energia richiesta in caso di emergenza, che deve essere garantita in qualunque momento della giornata. Si sono allora determinate le potenze massime impegnate da ogni modalità ("eco-modus 1", "eco-modus 2" ed "evacuation trip") descritte nel capitolo 4, alla luce degli assorbimenti effettivi riportati in Tabella 5.1 del capitolo 5. Per il calcolo si è fatto riferimento alla situazione più sfavorevole, con i ventilatori delle unità HVAC attivi in tutte e tre le modalità e la durata massima per ognuna di esse. I valori ricavati sono riportati in Tabella 6.1.

Tabella 6.1: Potenza assorbita e durata delle varie modalità nel caso peggiore

Modalità	Potenza P_{mod}	Durata Δt
Eco-modus 1	1979,2 W	900 s
Eco-modus 2	1901,2 W	1800 s
Evacuation trip	1940,2 W	438 s

L'energia richiesta, E_{em} , è allora:

¹Si noti che applicando la 6.1 si è considerato che le batterie si scarichino alla potenza costante P_{lim} calcolata; alla realtà dei fatti così non è, ma si è ritenuta comunque una valida assunzione per due motivi principali:

1. la potenza media di scarica non si discosta molto da quella limite;
2. essendo la potenza media di scarica, per quanto di poco, minore di quella limite, questo va a favore della sicurezza.

6. DIMENSIONAMENTO DEL SISTEMA IBRIDO DI ACCUMULO

$$\begin{aligned}
 E_{em} &= \frac{P_{mod1} \cdot \Delta t_1 + P_{mod2} \cdot \Delta t_2 + P_{mod3} \cdot \Delta t_3}{3600 \text{ s h}^{-1}} = \\
 &= \frac{1979,2 \text{ W} \cdot 900 \text{ s} + 1901,2 \text{ W} \cdot 1800 \text{ s}}{3600 \text{ s h}^{-1}} + \\
 &\quad + \frac{1940,2 \text{ W} \cdot 438 \text{ s}}{3600 \text{ s h}^{-1}} \simeq 1470 \text{ W h} \quad (6.2)
 \end{aligned}$$

In aggiunta si è anche considerato l'assorbimento della pompa idraulica per disattivare il freno in caso di un suo intervento. Questa è attivata durante la modalità 2 prima del passaggio alla modalità 3 per sbloccare la vettura e consentirne il recupero. L'assorbimento considerato è di 1000 W per 30 s. L'energia totale richiesta nell'esercizio di tutte e tre le modalità nel caso peggiore sarà quindi:

$$E_{em,tot} = 1470 \text{ W h} + 1000 \text{ W} \cdot \frac{30 \text{ s}}{3600 \text{ s h}^{-1}} \simeq 1480 \text{ W h} \quad (6.3)$$

Si è infine determinata la potenza media assorbita dai carichi durante l'esercizio di queste modalità, che sarà impiegata per valutare la velocità di scarica a cui saranno sottoposte le batterie scelte durante il dimensionamento:

$$\begin{aligned}
 \bar{P}_{em} &= \frac{P_{mod1} \cdot \Delta t_1 + P_{mod2} \cdot \Delta t_2 + P_{freno} \Delta t_{freno} + P_{mod3} \cdot \Delta t_3}{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_{freno} + \Delta t_3} = \\
 &= \frac{1979,2 \text{ W} \cdot 900 \text{ s} + 1901,2 \text{ W} \cdot 1800 \text{ s}}{3168 \text{ s}} + \\
 &\quad + \frac{1000 \text{ W} \cdot 30 \text{ s} + 1940,2 \text{ W} \cdot 438 \text{ s}}{3168 \text{ s}} \simeq 1675 \text{ W} \quad (6.4)
 \end{aligned}$$

Come si può notare questa risulta essere molto più elevata rispetto al valore massimo richiesto alle batterie durante il normale esercizio. Di questo si dovrà tener conto nella scelta della capacità nominale.

Una volta che si dispone di questi valori è possibile ottenere la capacità richiesta alle batterie in ampere-ora. Prima si calcola l'energia totale richiesta in watt-ora:

$$E_{batt,tot} = E_{batt} + E_{em,tot} = 3218 \text{ W h} + 1480 \text{ W h} = 4698 \text{ W h} \quad (6.5)$$

6.2. DIMENSIONAMENTO

Dividendo questo valore per la tensione al bus DC si ottengono gli ampere-ora totali necessari:

$$C_{tot} = \frac{E_{batt,tot}}{24\text{ V}} = 195,75\text{ A h} \quad (6.6)$$

Si sono inoltre ricavati gli ampere-ora richiesti nel solo esercizio normale delle batterie e nella situazione di emergenza:

$$C_{norm} = \frac{E_{batt}}{24\text{ V}} = \frac{3218\text{ W h}}{24\text{ V}} \simeq 134,08\text{ A h} \quad (6.7)$$

$$C_{em} = \frac{E_{em,tot}}{24\text{ V}} = \frac{1480\text{ W h}}{24\text{ V}} \simeq 61,67\text{ A h} \quad (6.8)$$

Si è giunti quindi al dimensionamento della taglia delle batterie; queste sono state scelte tra la famiglia della serie XL già montata a bordo del mezzo. Per determinarne la taglia necessaria si è proceduto per tentativi, valutando di volta in volta la variazione della capacità nominale in relazione alla velocità di scarica cui sono sottoposte per mezzo di un "derating factor", f_d , ottenuto dal grafico messo a disposizione dal costruttore e riportato per comodità in Figura 6.2.

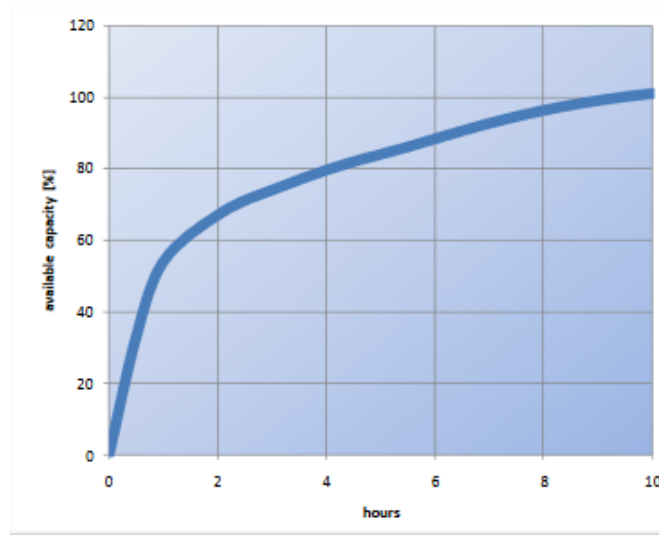


Figura 6.2: Variazione della capacità nominale delle batterie della famiglia XL in relazione alla velocità di scarica

6. DIMENSIONAMENTO DEL SISTEMA IBRIDO DI ACCUMULO

Primo tentativo: modulo da 100 A h

Si è cominciato considerando il modello da 100 A h, con due moduli posti in serie per raggiungere i 24 V del bus DC e divisi in due gruppi in parallelo per assicurare la continuità dell'alimentazione in caso di guasto di una linea come nella configurazione già montata a bordo del veicolo. La capacità totale, valutata alla velocità di scarica nominale che si ricorda essere relativa a 10 h, è pari a

$$C_{10}^{tot} = C_{10}^{modulo} \cdot n_p = 100 \text{ A h} \cdot 2 = 200 \text{ A h} \quad (6.9)$$

dove n_p è il numero dei gruppi in parallelo.

Gli ampere-ora sembrano sufficienti a coprire il fabbisogno energetico totale prima calcolato di 195,75 A h. Tuttavia, come affermato in precedenza, si deve valutare la reale capacità delle batterie in relazione alla velocità di scarica a cui sono sottoposte. Poiché come si è visto le batterie sono soggette a due velocità di scarica diverse, relative una alla giornata lavorativa normale ed una alla situazione di emergenza, questo sarà fatto determinando di volta in volta per ogni soluzione proposta due derating factor diversi con l'ausilio del grafico di Figura 6.2 partendo dai valori della potenza a cui avviene la scarica, P_{lim} e \bar{P}_{em} , relativi alle due situazioni. La procedura descritta è riassunta come segue:

$$\begin{aligned} I_{scarica} = \frac{P_{scarica}}{24 \text{ V} \cdot n_p} &\Rightarrow \Delta t_{scarica} = \frac{C_{10}^{modulo}}{I_{scarica}} \Rightarrow \\ &\Rightarrow f_d \Rightarrow C_{\Delta t_{scarica}}^{tot} = f_d \cdot C_{10}^{tot} \quad (6.10) \end{aligned}$$

Nel caso in questione, nell'esercizio normale delle batterie si ha:

$$\begin{aligned} I_{scarica} = \frac{P_{lim}}{24 \text{ V} \cdot 2} = \frac{720 \text{ W}}{24 \text{ V} \cdot 2} = 15 \text{ A} &\Rightarrow \\ \Rightarrow \Delta t_{scarica} = \frac{100 \text{ A h}}{15 \text{ A}} \simeq 6,7 \text{ h} &\Rightarrow f_d \simeq 0,9 \Rightarrow \\ \Rightarrow C_{6,7}^{tot} = 0,9 \cdot C_{10}^{tot} = 0,9 \cdot 200 \text{ A h} &\simeq 180 \text{ A h} \quad (6.11) \end{aligned}$$

Il valore ottenuto è minore della capacità richiesta totale C_{tot} , pertanto si è scartata tale soluzione.

6.2. DIMENSIONAMENTO

Secondo tentativo: moduli da 120 A h

Anche per questi moduli si è adottata la stessa configurazione precedente, disposti a due in serie ed in due gruppi in parallelo.

La capacità totale alla corrente di scarica nominale è pari a:

$$C_{10}^{tot} = C_{10}^{modulo} \cdot n_p = 120 \text{ A h} \cdot 2 = 240 \text{ A h} \quad (6.12)$$

Considerando il derating, nell'esercizio normale, si ottiene

$$\begin{aligned} I_{scarica} &= \frac{P_{lim}}{24 \text{ V} \cdot 2} = \frac{720 \text{ W}}{24 \text{ V} \cdot 2} = 15 \text{ A} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \Delta t_{scarica} = \frac{120 \text{ A h}}{15 \text{ A}} \simeq 8 \text{ h} \Rightarrow f_d = 0,95 \Rightarrow \\ &\Rightarrow C_8^{tot} = 0,95 \cdot C_8^{tot} = 0,95 \cdot 240 \text{ A h} \simeq 228 \text{ A h} \quad (6.13) \end{aligned}$$

maggiore della C_{tot} richiesta.

Rimane da valutare se la taglia scelta è sufficiente anche nella situazione di emergenza. Per far questo, si calcola prima la capacità totale disponibile in relazione alla velocità di scarica nella situazione di emergenza:

$$\begin{aligned} I_{scarica} &= \frac{\bar{P}_{em}}{24 \text{ V} \cdot 2} = \frac{1675 \text{ W}}{24 \text{ V} \cdot 2} \simeq 35 \text{ A} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \Delta t_{scarica} = \frac{120 \text{ A h}}{35 \text{ A}} \simeq 3,4 \text{ h} \Rightarrow f_d \simeq 0,75 \Rightarrow \\ &\Rightarrow C_{3,4}^{tot} = 0,75 \cdot C_{10}^{tot} = 0,75 \cdot 240 \text{ A h} \simeq 180 \text{ A h} \quad (6.14) \end{aligned}$$

A questa si deve poi sottrarre la capacità consumata fino all'incorrere della situazione di emergenza. Considerando, a favore di sicurezza, che questa avvenga a circa fine giornata, si è assunto che il 95% della carica richiesta nell'esercizio della modalità normale sia già stato consumato. Si ottiene allora il seguente valore:

$$C_{consumata} = 0,95 \cdot C_{norm} = 0,95 \cdot 134,08 \text{ A h} \simeq 128 \text{ A h} \quad (6.15)$$

La capacità residua in relazione alla velocità di scarica della situazione di emergenza è pertanto:

$$C_{residua} = C_{3,4}^{tot} - C_{consumata} = 180 \text{ A h} - 128 \text{ A h} = 52 \text{ A h} \quad (6.16)$$

6. DIMENSIONAMENTO DEL SISTEMA IBRIDO DI ACCUMULO

Questa risulta minore della capacità C_{em} richiesta nella situazione di emergenza nel caso peggiore, pertanto anche questa soluzione è stata scartata.

Terzo tentativo: moduli da 150 A h

Mantenendo la disposizione dei moduli dei casi precedenti, la capacità totale alla corrente di scarica nominale è pari a:

$$C_{10}^{tot} = C_{10}^{modulo} \cdot n_p = 150 \text{ A h} \cdot 2 = 300 \text{ A h} \quad (6.17)$$

Considerando il derating, nell'esercizio normale, si ottiene:

$$\begin{aligned} I_{scarica} &= \frac{P_{lim}}{24 \text{ V} \cdot 2} = \frac{720 \text{ W}}{24 \text{ V} \cdot 2} = 15 \text{ A} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \Delta t_{scarica} = \frac{150 \text{ A h}}{15 \text{ A}} \simeq 10 \text{ h} \Rightarrow f_d = 1 \quad (6.18) \end{aligned}$$

Si vede come la velocità di scarica alla potenza limite nell'esercizio normale coincida precisamente con quella nominale.

Rimane da valutare se la taglia scelta è sufficiente anche in modalità di emergenza:

$$\begin{aligned} I_{scarica} &= \frac{\bar{P}_{em}}{24 \text{ V} \cdot 2} = \frac{1675 \text{ W}}{24 \text{ V} \cdot 2} \simeq 35 \text{ A} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \Delta t_{scarica} = \frac{150 \text{ A h}}{35 \text{ A}} \simeq 4,3 \text{ h} \Rightarrow f_d \simeq 0,8 \Rightarrow \\ &\Rightarrow C_{4,3}^{tot} = 0,8 \cdot C_{10}^{tot} = 0,8 \cdot 300 \text{ A h} \simeq 240 \text{ A h} \quad (6.19) \end{aligned}$$

In base alle considerazioni svolte prima, la capacità residua a fine giornata valutata alla velocità di scarica della situazione di emergenza è allora:

$$C_{residua} = C_{4,3}^{tot} - C_{consumata} = 240 \text{ A h} - 128 \text{ A h} = 112 \text{ A h} \quad (6.20)$$

stavolta sufficiente a soddisfare la richiesta energetica nella situazione di emergenza ; si è pertanto scelta questa configurazione.

6.2.2 Dimensionamento dei supercondensatori

Anche per i supercondensatori il primo passo è quello di determinare la richiesta energetica, che stavolta sarà però valutata sull'intervallo di una sola corsa del mezzo e non sull'intera giornata. Si calcola prima la potenza, P_{sc} , che questi devono essere in grado di fornire dalla differenza tra la potenza massima, P_{MAX} , richiesta dai carichi e la potenza limite determinata in precedenza. Per la potenza massima si è considerato la potenza totale dei carichi di bordo calcolata in Tabella 5.1 e qui riportata:

$$P_{MAX} = 3482 \text{ W} \quad (6.21)$$

La potenza di riferimento per il dimensionamento dei supercondensatori è allora:

$$P_{sc} = P_{MAX} - P_{lim} = 3482 \text{ W} - 720 \text{ W} = 2762 \text{ W} \quad (6.22)$$

La quantità di energia richiesta, E_{sc} , è quindi:

$$E_{sc} = P_{sc} \cdot \frac{\Delta t_{scarica}}{3600 \text{ s h}^{-1}} = 2762 \text{ W} \cdot \frac{190 \text{ s}}{3600 \text{ s h}^{-1}} \simeq 146 \text{ Wh} \quad (6.23)$$

Rimane ora da determinare la capacità necessaria equivalente per sopperire alla richiesta energetica calcolata, ma prima sono introdotti alcuni concetti utili per il dimensionamento dei supercondensatori.

Nozioni per il dimensionamento dei supercondensatori

I condensatori elettrochimici devono essere dimensionati per una quantità di energia maggiore di quella richiesta dall'applicazione a causa di tre fattori principali, già discussi nel capitolo 3:

1. l'effetto "voltage window";
2. le perdite sulla resistenza serie equivalente;
3. le perdite dovute alla diffusione delle cariche nella struttura porosa degli elettrodi.

Per determinare la capacità necessaria per una determinata richiesta energetica tenendo conto di questi tre fattori è possibile ricorrere a metodi analitici.

6. DIMENSIONAMENTO DEL SISTEMA IBRIDO DI ACCUMULO

Un metodo molto semplice è quello di modellizzare il supercondensatore come un circuito RC serie. Gli effetti dovuti alla "finestra di tensione" sono allora direttamente considerati nel computo dell'energia immagazzinabile mentre quelli dovuti alla resistenza serie equivalente e alla diffusione delle cariche sono indirettamente inclusi attraverso i valori di R e di C. L'accuratezza di questo approccio è tanto più elevata tanto più la costante di tempo $\tau = R \cdot C$ del modello è piccola rispetto ai tempi di carica e scarica richiesti dall'applicazione. Considerando il modulo utilizzato a bordo del mezzo, la costante di tempo si è ottenuta moltiplicando la resistenza serie equivalente e la capacità nominale riportate in Tabella 4.2:

$$\tau = ESR \cdot C = 18 \text{ m}\Omega \cdot 63 \text{ F} = 1,134 \text{ s} \quad (6.24)$$

Questa risulta essere circa lo 0,6% della durata della scarica (che si ricorda essere di 190 s), per cui si è considerato valido il modello RC presentato.

Si può allora stimare la capacità necessaria in questo modo. Si stabiliscono prima i valori massimi e minimi di tensione, V_{MAX} e V_{min} , entro cui si vuole operare il supercondensatore sulla base delle considerazioni espresse nel capitolo 3. Successivamente si calcolano gli effetti della resistenza serie sull'energia fornita dal supercondensatore. Si determina allora la massima corrente erogata, che in una scarica a potenza costante come quella dell'applicazione si ha ovviamente a fine scarica quando la tensione del supercondensatore ha raggiunto il suo minimo:

$$I_{MAX} = \frac{P_{sc}}{V_{min}} \quad (6.25)$$

Si calcola quindi la caduta di tensione sulla resistenza serie equivalente:

$$\Delta V = I_{MAX} \cdot ESR \quad (6.26)$$

La capacità necessaria sarà allora data dalla formula dell'energia del supercondensatore presentata nel capitolo 3 così riscritta:

$$C = \frac{2 \cdot E_{sc}}{V_{MAX}^2 - (V_{min} + \Delta V)^2} \quad (6.27)$$

Una volta stabilita la capacità, si determina il numero di moduli in parallelo necessari. Un'ulteriore verifica potrebbe essere quella di ricalcolare la caduta di tensione alla luce della nuova corrente massima a fine scarica, che ovviamente diminuisce col numero di moduli posti in parallelo; tuttavia le variazioni, a meno di un numero rilevante di moduli necessari, sono minime e quindi la verifica può essere trascurata. [12]

6.2. DIMENSIONAMENTO

Dimensionamento

Si affronta infine il dimensionamento vero e proprio. Il range di tensione stabilito per operare i supercondensatori è quello utilizzato dalla Nidec-ASI e pari a $V_{MAX} = 110\text{ V}$ e $V_{min} = 35\text{ V}$. Si è allora ottenuto un valore di corrente massima a fine scarica pari a

$$I_{MAX} = \frac{2762\text{ W}}{35\text{ V}} \simeq 79\text{ A} \quad (6.28)$$

La caduta di tensione sulla resistenza serie equivalente sarà pari allora a

$$\Delta V = 79\text{ A} \cdot 18 \times 10^{-3}\ \Omega \simeq 1,4\text{ V} \quad (6.29)$$

La capacità richiesta è infine:

$$C = \frac{2 \cdot 146\text{ Wh} \cdot 3600\text{ s h}^{-1}}{0,96 \cdot [(110\text{ V})^2 - (35\text{ V} + 1,4\text{ V})^2]} \simeq 102\text{ F} \quad (6.30)$$

dove si è voluto tener conto anche del rendimento del convertitore posto pari a 0,96 come indicato dalla Nidec-ASI. Poiché la capacità nominale di un singolo modulo dei supercondensatori della Maxwell Technologies è pari a 63 F, sono necessari due moduli in parallelo.

Si vuole fare notare per concludere come si è riusciti a ridurre la taglia necessaria dei supercondensatori (e del convertitore, in quanto anche la potenza massima transitante in esso è ridotta di conseguenza). Considerazioni sul costo ed il peso della nuova configurazione del sistema di accumulo ricavata, assieme a simulazioni dello stesso per i vari profili di carico determinati nel capitolo 5, saranno condotte nel capitolo finale della tesi.

Simulazioni e analisi dei costi e dei pesi

In questo capitolo finale sono eseguite delle simulazioni del sistema di alimentazione al fine di mostrarne il funzionamento e fornire un stima della durata delle batterie nella nuova configurazione, essendo l'elemento più soggetto a degradazione in un utilizzo ciclico. Infine è condotta un analisi dei costi e dei pesi per un confronto con il sistema originale.

7.1 Simulazioni

Inizialmente sono state eseguite delle simulazioni per ricavare le correnti di scarica delle due tecnologie di accumulo impiegate e mostrare il funzionamento del sistema di alimentazione durante la singola corsa del mezzo. Il modello, realizzato in Simulink[®] con la libreria Simscape Power Systems messa a disposizione dal programma per la simulazione dei sistemi di potenza, è riportato in Figura 7.3.

Il principio che regola il funzionamento del sistema di alimentazione, come descritto nel capitolo precedente, è quello di limitare la potenza e quindi la corrente in uscita dalle batterie fornendo il surplus necessario richiesto dai carichi regolando opportunamente la scarica dei supercondensatori. Il controllo del sistema è allora un controllo in corrente, che limita la corrente uscente dalle batterie ad un valore di 32 A relativo alla potenza limite erogabile da queste stabilita nel capitolo 5. Il riferimento di corrente per il controllo del convertitore DC/DC è generato nel blocco "Genera i_rif" dal confronto della corrente uscente dalle batterie, limitata per mezzo di un blocco di saturazione, con la corrente richiesta dai carichi

7. SIMULAZIONI E ANALISI DEI COSTI E DEI PESI

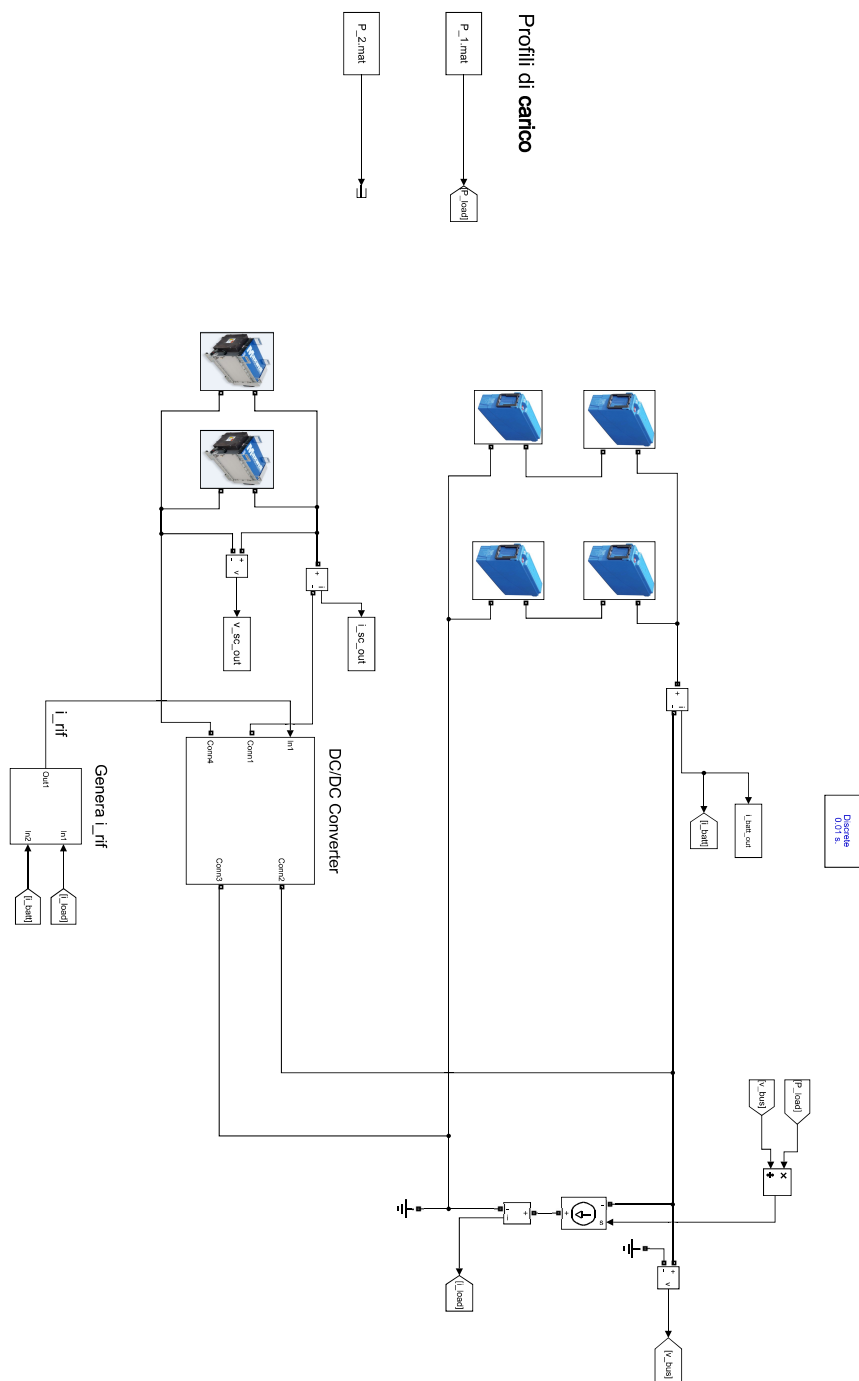


Figura 7.1: Modello Simulink® del sistema di alimentazione

7.1. SIMULAZIONI

"i_load"; il convertitore regola allora la scarica dei supercondensatori, che avviene a potenza costante, fornendo in uscita la corrente indicata dal segnale di riferimento generato.

Alla sinistra dello schema si possono notare i profili di carico che sono stati utilizzati per le simulazioni. Questi sono stati definiti nel workspace di MATLAB® sotto forma di matrici definendo i valori di potenza e i relativi intervalli di tempo e sono poi stati importati nella simulazione una volta salvati in formato ".mat" con il blocco "from File" del programma. Le simulazioni eseguite sono state due, entrambe della durata di 190 s (il tempo della corsa del mezzo). Nella prima sono stati simulati l'accensione e lo spegnimento ripetuto delle ventole relative alle unità HVAC; nella seconda è invece stata simulata l'accensione successiva delle luci e delle ventole delle unità HVAC, raggiungendo così il massimo assorbimento dei carichi. I profili di carico espressi in termini di potenza sono stati divisi per la tensione al bus DC e dati come input al generatore di corrente controllato all'estrema destra della Figura 7.3 che simula l'assorbimento dei carichi.

Infine, i supercondensatori e le batterie sono stati simulati utilizzando i modelli messi a disposizione dalla libreria del programma, inserendo i parametri relativi ai moduli utilizzati reperiti dai rispettivi datasheet e riportati in Tabella 7.1;

Tabella 7.1: Valori dei parametri utilizzati nel modello

Supercondensatori	
Tensione nominale	125 V
Tensione nominale	110 V
Capacità nominale	150 A h
Equivalent Series Resistance	$18 \times 10^{-3} \Omega$
Batterie	
Tensione nominale	12 V
Capacità nominale	150 A h
Cut-off Voltage	10,8 V
Corrente di scarica nominale	14,2 A
Resistenza interna	$4,97 \times 10^{-3} \Omega$

Dalle sue simulazioni eseguite per le due corse prima descritte, denominate "Corsa 1" e "Corsa 2", si sono ottenuti gli andamenti delle

7. SIMULAZIONI E ANALISI DEI COSTI E DEI PESI

correnti erogate dalle batterie e dai supercondensatori riportati in Figura 7.2, rispettivamente tracciati in blu per le batterie ed in rosso per i supercondensatori.

Dai grafici si può notare l'intervento dei supercondensatori nel caso che la corrente limite fissata per le batterie sia superata durante la corsa: nel primo grafico è illustrato il caso in cui sono attivate e poi disattivate ripetutamente le ventole del sistema HVAC, mentre nel secondo l'attivazione successiva delle luci e poi delle ventole suddette. Si vuole inoltre far notare l'azione del convertitore che regola la scarica a potenza costante dei supercondensatori, con la corrente erogata da questi che aumenta con la scarica e quindi con il diminuire della tensione ai morsetti.

Successivamente sono state eseguite tre simulazioni relative all'intera giornata lavorativa della funicolare, una per ogni profilo di carico ricavato nel capitolo 5: i due di carico massimo delle giornate invernale ed estiva e quello di carico minimo. Si sono quindi ottenuti i valori di profondità di scarica raggiunti dalle batterie alla fine delle tre giornate; in questo modo si è potuta stimare la durata ciclica delle stesse. Il modello utilizzato per queste simulazioni è quello riportato in Figura 7.3: si noti come in questo caso l'intervento dei supercondensatori è stato simulato impiegando solamente un generatore di corrente controllato che eroga il riferimento di corrente generato per alleggerire la simulazione in quanto l'obiettivo è stavolta quello di valutare il solo comportamento delle batterie sull'intera giornata.

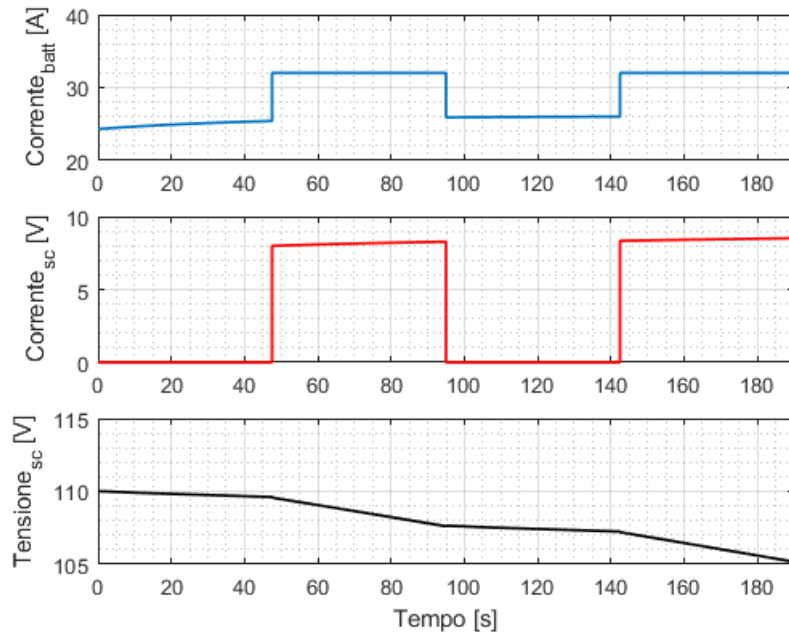
I profili di carico sono stati ricavati tenendo conto delle 80 corse totali del mezzo distribuite sulle 15 ore della giornata lavorativa e considerando una concentrazione delle stesse nelle ore di maggiore affluenza.

Essendo 80 le corse e la durata di ogni scarica pari a 190 s, la durata di ogni simulazione è pari a 15200 s; è stato perciò scelto un passo di simulazione fisso pari a 1×10^{-1} s in modo da rendere accettabili i tempi della stessa.

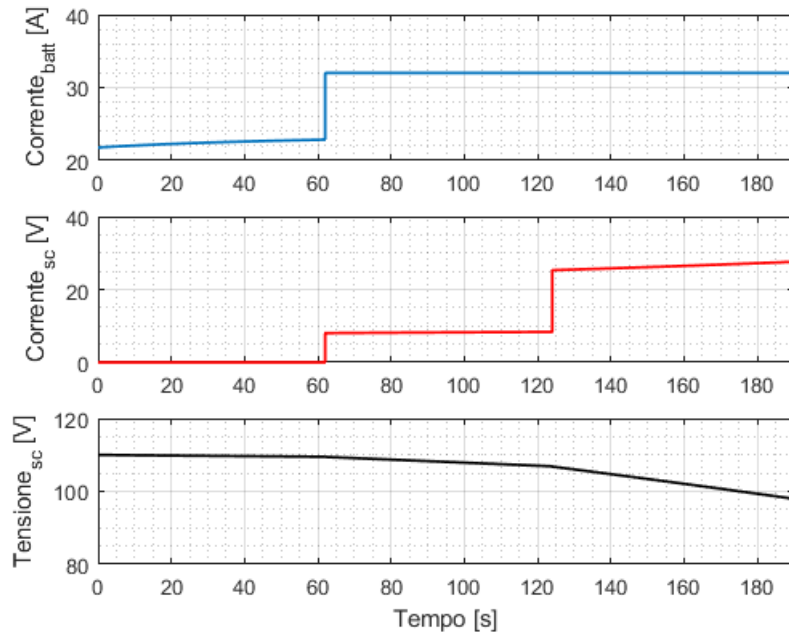
Sono quindi stati tracciati gli andamenti della corrente e dello stato di carica relativi ad un modulo ottenuti per i tre profili esaminati, riportati in Figura 7.4.

Si vuole far notare prima di tutto come, in accordo con il controllo descritto precedentemente, la corrente erogata da ogni batteria non ecceda mai troppo oltre il valore di scarica nominale di 14,2 A, mantenendosi in un range compreso tra i 12 A ed i 16 A. Per quanto riguarda lo stato di carica finale, anche questo non varia molto in relazione al profilo di carico cui le batterie sono sottoposte, attestandosi in un intorno molto

7.1. SIMULAZIONI



(a) *Corsa 1*



(b) *Corsa 2*

Figura 7.2: Andamenti di corrente durante le due corse simulate del mezzo

7. SIMULAZIONI E ANALISI DEI COSTI E DEI PESI

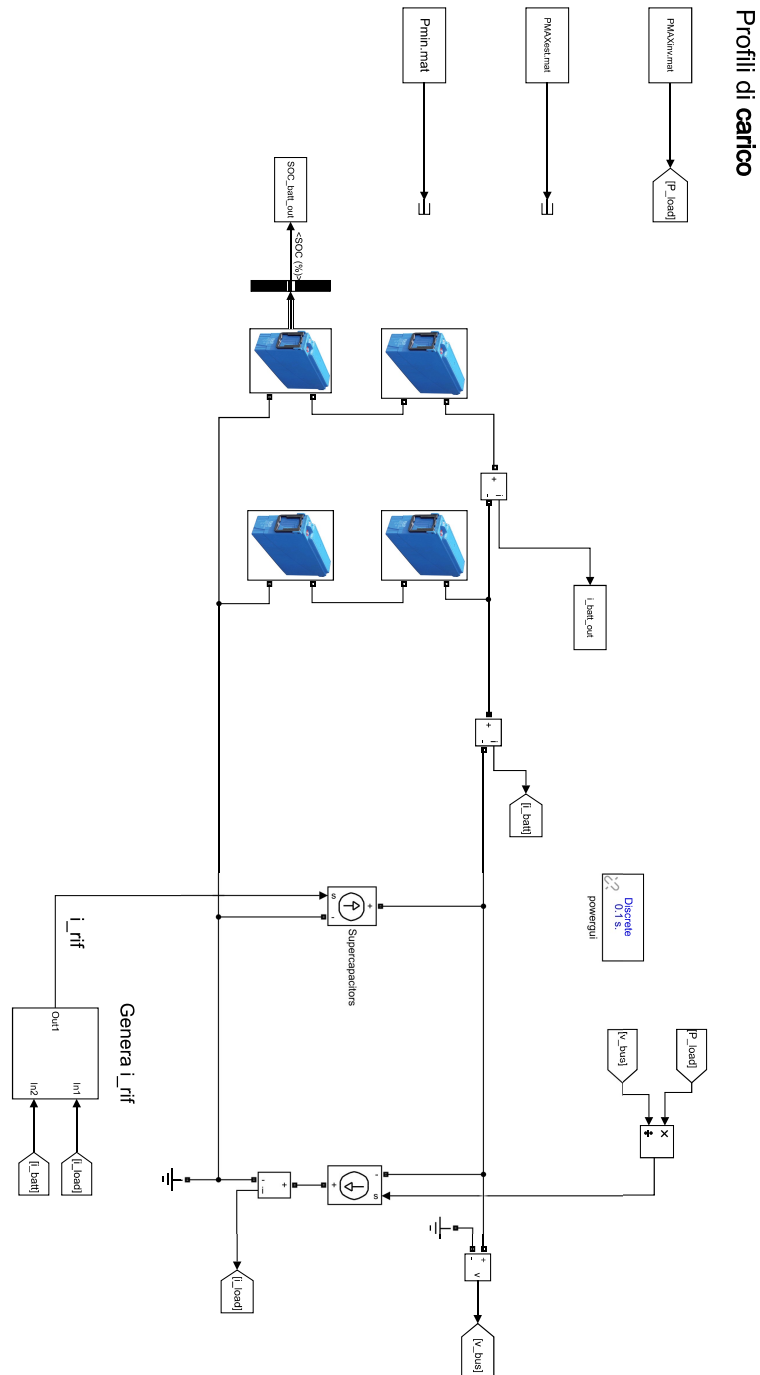


Figura 7.3: Modello Simulink® del sistema di alimentazione per la valutazione della scarica delle batterie

7.1. SIMULAZIONI

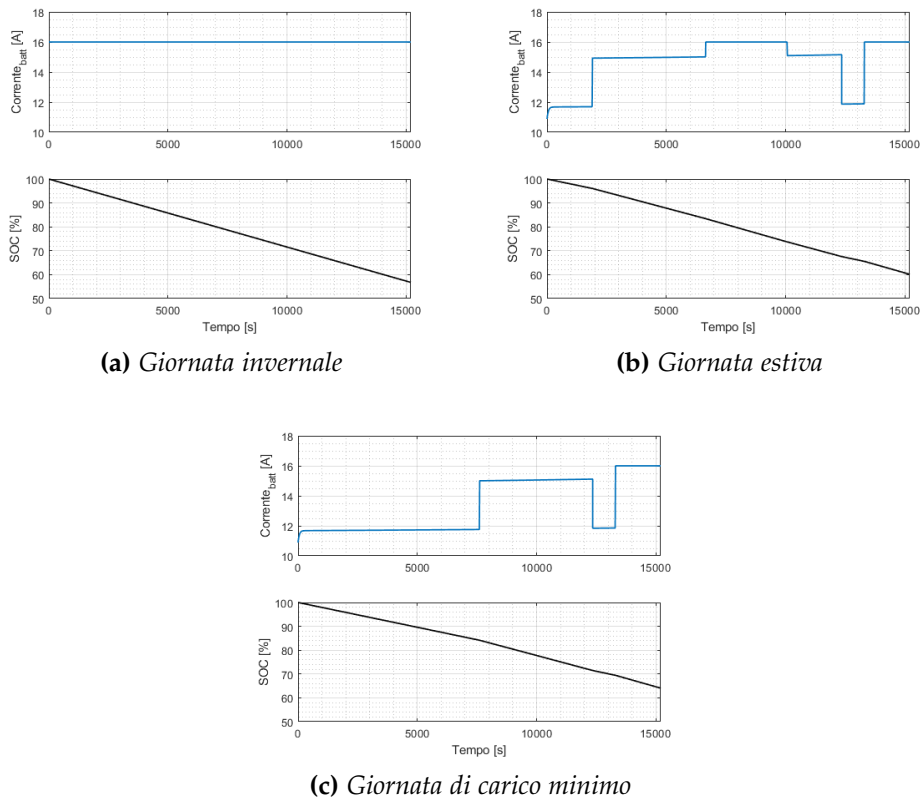


Figura 7.4: Andamenti di corrente e stato di carica per i profili di carico individuati nel capitolo 5

stretto di circa il 60% della piena carica. In accordo con la definizione di profondità di scarica introdotta nel capitolo 2, questa risulta allora in termini percentuali pari a

$$DoD = 100 - SoC = 100 - 60 = 40 \% \quad (7.1)$$

Si può quindi stimare la durata ciclica delle batterie. Per far questo, non essendo disponibili i dati da parte del costruttore relativi al modello considerato sulla durata ciclica in funzione della profondità di scarica, si è fatto riferimento a valori tipici per batterie piombo-acido di tipo VRLA gel ed AGM, riportati in Tabella 7.2 e reperiti dal sito "www.civicsolar.com".

Dai valori per le batterie al gel, per mezzo della funzione "fit" messa a disposizione dalla libreria "curve fitting" di MATLAB[®] si è eseguita un' interpolazione di tipo esponenziale dei dati disponibili ottenendo l'anda-

7. SIMULAZIONI E ANALISI DEI COSTI E DEI PESI

Tabella 7.2: Valori di tipici di durata ciclica in relazione alla profondità di scarica per batterie piombo-acido VRLA (fonte: www.civicsolar.com)

DoD %	Numero di cicli	
	Gel	AGM
100	450	200
80	600	250
50	1000	500
25	2100	1200
10	5700	3200

mento della vita ciclica in relazione alla profondità di scarica riportato in Figura 7.5.

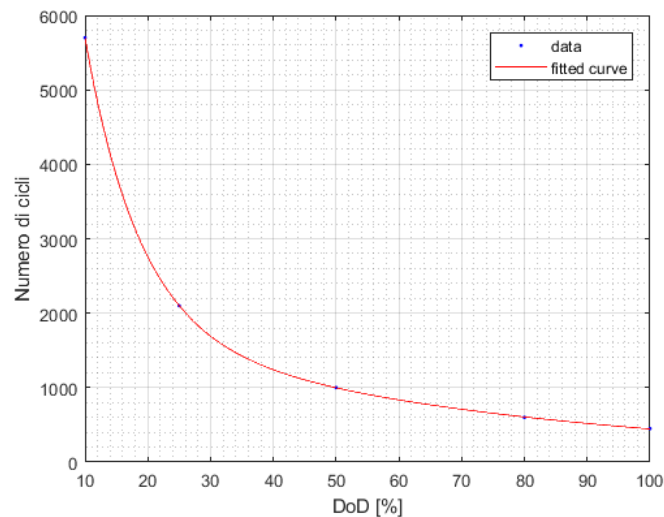


Figura 7.5: Andamento tipico del numero di cicli in funzione della profondità di scarica per batterie piombo-acido VRLA al gel

Si è quindi potuto valutare il numero di cicli in corrispondenza alla profondità di scarica (40 %) ottenuta dalle simulazioni per il sistema di alimentazione, che è risultato essere pari a circa 1240. La durata delle batterie, che si ricorda essere l'intervallo di utilizzo prima che la loro capacità non si riduca all'80% della nominale, è perciò stata stimata, in anni e considerando che la funicolare lavori ogni giorno dell'anno, pari a

7.2. ANALISI DEI COSTI E DEI PESI

$$\Delta T_{vita} = \frac{1240}{365} \simeq 3,4 \quad (7.2)$$

7.2 Analisi dei costi e dei pesi

7.2.1 Costi

Per la stima dei costi ci si è basati sui prezzi degli elementi del sistema di accumulo originale forniti dalla Nidec-ASI e qui riportati:

- Batterie FIAMM 12 XL 105: 350 € ad elemento;
- Supercondensatori Maxwell 125 Volt Transportation Module: 5000 € ad elemento;
- Convertitore bidirezionale DC/DC: 12000 €;

Il costo totale originale, considerando il numero di batterie e supercondensatori impiegati, è perciò di

$$C_{tot} = 350 \text{ €} \cdot 4 + 5000 \text{ €} \cdot 3 + 12000 \text{ €} = 28400 \text{ €} \quad (7.3)$$

Da questi valori si sono allora determinati i costi in relazione alla taglia dei nuovi elementi impiegati, con le procedure descritte qui di seguito.

Batterie

Per le batterie, si è ricavato prima il costo unitario dividendo il costo di un modulo per i watt-ora nominali pari a $100 \text{ A h} \cdot 12 \text{ V} = 1,2 \text{ kWh}$. Si è ottenuto un costo unitario, c_b , di

$$c_b = \frac{350 \text{ €}}{1,2 \text{ kWh}} \simeq 292 \text{ €kWh}^{-1} \quad (7.4)$$

Il modello utilizzato per le batterie si ricorda essere il 12 XL 155 da 150 A h , che corrispondono a $150 \text{ A h} \cdot 12 \text{ V} = 1,8 \text{ kWh}$. Il costo della singola batteria è quindi pari a

$$C_{batt} = c_b \cdot 1,8 \text{ kWh} = 292 \text{ €} \cdot 1,8 \text{ kWh} \simeq 525 \text{ €} \quad (7.5)$$

7. SIMULAZIONI E ANALISI DEI COSTI E DEI PESI

Convertitore

Poiché il numero di supercondensatori del nuovo sistema di accumulo è stato ridimensionato, allora anche la potenza transitante nel convertitore sarà ridotta e quindi il suo costo. Per il calcolo si è seguita la stessa procedura delle batterie. Partendo dalla potenza massima transitante nel convertitore nella configurazione originale, che si ha in corrispondenza della *carica* dei supercondensatori in stazione in quanto l'intervallo di tempo è minore (pari a 140 s) di quello della scarica, si è stimato il costo unitario per unità di potenza. La potenza in questione, ricavata dai dati forniti dalla Nidec-ASI, è pari a 7688 W. Allora il costo unitario del convertitore, c_c , risulta essere di

$$c_c = \frac{12\,000\ \text{€}}{7,688\ \text{kW}} \simeq 1560\ \text{€kW}^{-1} \quad (7.6)$$

Si è quindi calcolata la potenza massima transitante nel convertitore nella nuova configurazione. Per la sua determinazione si è considerata l'energia massima che questi forniscono durante la scarica, che si ricorda essere pari a $E_{sc} = 146\ \text{Wh}$. Questa è stata divisa per la durata della carica e per il rendimento del convertitore riportato nel capitolo precedente ($\eta_{chopper} = 0.96$) in modo da ricavare la nuova potenza massima, $P_{chopper}^{MAX}$, transitante in esso

$$P_{chopper}^{MAX} = \frac{146\ \text{Wh}}{0.96 \cdot 140\ \text{s}} \cdot \frac{3600}{\text{s.h}^{-1}} \simeq 3910\ \text{W} \quad (7.7)$$

Il costo stimato per il nuovo convertitore sarà allora di

$$C_{chopper} = P_{chopper}^{MAX} \cdot c_c = 3,910\ \text{kW} \cdot 1560\ \text{€kW}^{-1} \simeq 6100\ \text{€} \quad (7.8)$$

Si è infine calcolato il costo totale del nuovo sistema di accumulo, considerando il numero di batterie impiegate, pari a 4, e quello ridotto dei supercondensatori, pari a 2:

$$C_{tot}^{new} = 525\ \text{€} \cdot 4 + 5000\ \text{€} \cdot 2 + 6100\ \text{€} = 18\,200\ \text{€} \quad (7.9)$$

La differenza con il costo iniziale del sistema originale è perciò pari a

$$C_{tot} - C_{tot}^{new} = 28\,400\ \text{€} - 18\,200\ \text{€} = 10\,200\ \text{€} \quad (7.10)$$

7.2. ANALISI DEI COSTI E DEI PESI

7.2.2 Pesi

Per quanto riguarda i pesi si è fatto riferimento ai soli elementi di accumulo essendo la parte preponderante del peso totale del sistema di alimentazione.

Si riportano nella Tabella 7.3 il peso dei supercondensatori e delle batterie impiegate nella configurazione originale ed in quella nuova.

Tabella 7.3: Pesi di batterie e supercondensatori

FIAMM XL 105	36,0 kg
FIAMM XL 155	54,8 kg
Supercondensatori	63,4 kg

Il peso totale nella configurazione originale sarà allora di

$$P_{tot} = 36,0 \text{ kg} \cdot 4 + 63,4 \text{ kg} \cdot 3 = 334,2 \text{ kg} \quad (7.11)$$

Nella nuova configurazione si ha invece

$$P_{tot}^{new} = 54,8 \text{ kg} \cdot 4 + 63,4 \text{ kg} \cdot 2 = 346 \text{ kg} \quad (7.12)$$

Si registra perciò un incremento di peso pari a

$$P_{tot}^{new} - P_{tot} = 346 \text{ kg} - 334,2 \text{ kg} = 11,8 \text{ kg} \quad (7.13)$$

Conclusioni

In questo lavoro di tesi si è studiato un sistema di accumulo ibrido per l'alimentazione dei carichi elettrici a bordo di un Automated People Mover. Lo scopo era quello di ridurre la taglia dei supercondensatori attribuendo parte della potenza fornita da questi alle batterie di backup. Si è quindi condotta una analisi ricavando dei profili di scarica tipici e da questi è stata dedotta la potenza più idonea da trasferire alle batterie per un loro impiego ottimale. Dalle simulazioni eseguite per i differenti profili si è visto come la corrente che queste erogano non ecceda mai troppo la corrente nominale e si attesti in un range abbastanza ristretto nell'intorno di questa. Si può quindi dedurre che l'obiettivo di sfruttare le batterie in modo ottimale è stato raggiunto. Per quanto riguarda costi e pesi del nuovo sistema di alimentazione, si vede come una riduzione nella taglia dei supercondensatori abbia portato una notevole riduzione dei costi del sistema di accumulo, stimata del valore di 10 200 €, ed un incremento del peso dovuto all'aumento della taglia delle batterie invece contenuto, pari a 11,8 kg; bisogna però ricordare che questo è stato possibile anche alla luce della revisione dei consumi dei carichi operata grazie ai valori effettivi degli assorbimenti a bordo del mezzo, risultati minori rispetto ai valori di progetto.

Per concludere, sebbene la convenienza del sistema sia evidente in termini di costi iniziali, l'utilizzo ciclico delle batterie invece che tampone porta ad una degradazione delle stesse più rapida, che è stata stimata insorgere in un intervallo di circa tre anni e mezzo (sebbene in un utilizzo continuo). Per le stesse batterie, nei datasheet si riporta un vita attesa massima in utilizzo tampone di circa 12 anni, il che significherebbe una sostituzione pari a circa 3 volte del pacco batterie nello stesso intervallo di tempo e ad un decremento del risparmio stimato in precedenza sul lungo periodo di 6300 €. Tuttavia per una valutazione più attenta di questo aspetto si dovrebbe disporre di dati sull'effettivo utilizzo delle batterie nella configurazione originale, le quali quando sono chiamate ad intervenire devono soddisfare la totale potenza richiesta dai carichi e quindi sopportare velocità di scarica ben maggiori di quella nominale, al contrario della nuova configurazione studiata.

Appendice



7. SIMULAZIONI E ANALISI DEI COSTI E DEI PESI

❖ OPERATING FEATURES

◆ Capacity

The battery capacity is rated in ampere hours (Ah) and is the quantity of electricity which it can supply during discharge. The capacity depends on the quantity of the active materials contained in the battery (thus on dimensions and weight) as well as the discharge rate, and temperature, and minimum voltage. The nominal capacity of FIAMM batteries refers to the 10 hrs discharge rate (indicated with C_{10}) with constant current at 20°C to 1.80 volt per cell.

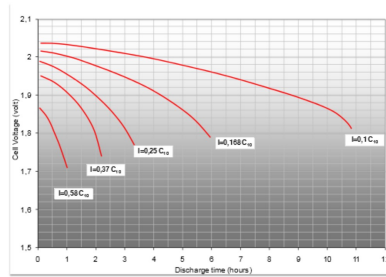


Fig. 1: Typical discharge curves for FIAMM Gel Batteries

◆ Discharge Voltage

Although the discharge tables show end voltage down to 1.60 volt per cell, the following voltage values versus discharge time are suggested; in fact, there are negligible advantages in discharge time if discharge continues below these voltages.

Discharge Time	End cell Voltage (*)
10 hours	1.80 Volt
8 hours	1.75 Volt
3 hours	1.70 Volt
1 hour	1.60 Volt

(*) values recommended also in EN 60896-21/22 Standard

◆ Capacity in relation to discharge rate

The available capacity of all lead acid batteries depend on discharge rate (discharge current); this is due to internal electrochemical process and type of construction (i.e. type of positive plate).

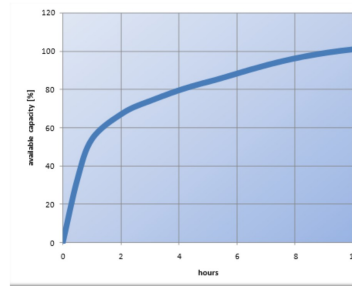


Fig. 2: Average available capacity versus discharge rates for FIAMM Gel batteries

◆ Capacity range of FIAMM Gel Lead Acid Batteries

FIAMM Battery range	Capacity range [Ah]
SMG	from 100 to 3350
XL	from 60 to 200

◆ Capacity in relation to the temperature

The capacity available from a battery, at any particular discharge rate, varies with temperature. Batteries which have to operate at temperatures different from the nominal (20°C) need a higher or lower capacity as per the factor indicated in the following graph (required capacity has to be multiply by the correction factor stated in the graph).

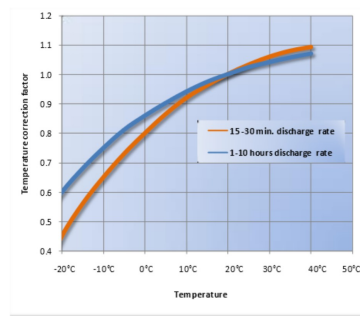


Fig. 3: Capacity Correction factor versus temperature for a 10 hours discharge rate for FIAMM Gel batteries

7.2. ANALISI DEI COSTI E DEI PESI

XL



Applicazioni e Principali Vantaggi

- + Monoblocchi da 12 Volt con attacchi frontali e superiori
- + Piastre piane immerse in un elettrolita gelificato (gel) garantiscono una lunga vita ciclica
Ideali per:
 - applicazioni nelle telecomunicazioni (BTS)
 - applicazioni in aree con rete elettrica instabile
 - accumulo di energia da fonti rinnovabili per applicazioni residenziali connesse in rete
- + Vita di progetto oltre 12 anni
- + Idonei per scariche profonde
- + Terminali frontali progettati per ridurre i tempi di installazione e facilitare la manutenzione (escluso 12XL60)
- + Adeguati per installazioni su scaffali e armadi da 23" (esclusi 12XL60 e 12XL205)
- + Permettono layout batteria molto compatti
- + Previsto sistema di convogliamento dei gas all'esterno (RVS)
- + Nessuna fuoriuscita di elettrolita
- + Minima emanazione di gas e nessuna manutenzione; nessun rabbocco
- + Completamente Riciclabili



Normative di Riferimento

- DIN 43539T5 - scarica profonda
- IEC 60896 Parte 21 - metodi di test per accumulatori regolati da valvola (VRLA)
- IEC 60896 Parte 22 - requisiti delle VRLA
- BS 6290 Parte 4 - specifiche per la classificazione VRLA
- Eurobat "Long Life" - oltre 12 anni
- Certificate UL

Certificazioni FIAMM

- ISO 9001 - Sistema di Gestione della Qualità
- ISO 14001 - Sistema di Gestione dell'Ambiente
- OHSAS 18001 - Sicurezza sul lavoro e salute

Caratteristiche Tecniche

- Piastre piane impastate ad elevato spessore realizzate con una lega di piombo calcio stagno di elevata qualità, per una bassa corrosione ed alte prestazioni in scarica rapida
- Elettrolita immobilizzato in una struttura gel, che riempie lo spazio tra le piastre coprendole interamente
- Separatori ad elevatissima microporosità e bassa resistenza interna
- Plastiche in ABS ritardante la fiamma secondo le normative IEC 707 FV0
- Contenitore e coperchio progettati per una elevata resistenza meccanica (es: nervature)
- Terminali M8 femmina garantiscono alta conduttività, tempi di installazione minimi e massima resistenza a torsione
- I terminali frontali riducono l'ingombro di installazione, consentono un layout batteria compatto con una elevata densità energetica
- Passaggi polari ideati per prevenire le infiltrazioni di acido e la corrosione dei terminali
- Dispositivo antifiamma che previene l'ingresso di scintille o fiamme all'interno della batteria
- Valvole di sicurezza che operano a bassa pressione interna e garantiscono l'espulsione dei gas in eccesso
- RVS, sistema che raccoglie e convoglia i gas verso l'esterno, disponibile per applicazioni che richiedono l'assenza di gas nel vano batterie
- Autoscarica < 2% al mese a 20°C, che consente 6 mesi di stoccaggio senza ricarica

Caratteristiche Elettriche

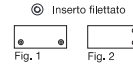
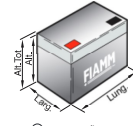
- Tensione di mantenimento a 20°C: 2.25 V/el
- Tensione di ricarica: max 2.35 V/el
- Compensazione per la temperatura: -2.5 mV/el/°C

7. SIMULAZIONI E ANALISI DEI COSTI E DEI PESI

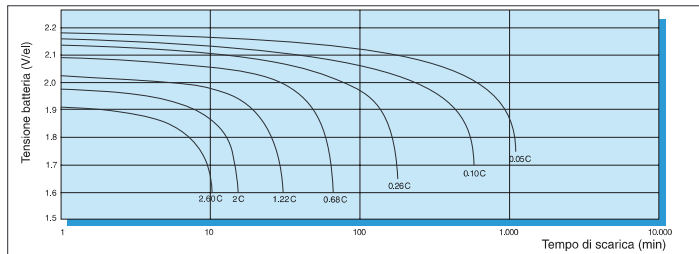
XL

Modello	Tensione Nominale (V)	Capacità (Ah) a 20°C 1,80 V/el in 10 ore	Corrente di Corto Circuito (A) IEC 60896 21-22	Resistenza interna (mΩ) IEC 60896 21-22	Peso (kg)	Dimensioni (mm)			Tipi di Terminali	DT*
						Lung.	Larg.	Al.		
12 XL 60	12	60	1423	8,88	25,5	259	168	228	Femmina M8	1
12 XL 105	12	100	1895	6,78	36,0	126	560	230	Femmina M8	2
12 XL 125	12	120	2144	5,82	44,9	126	560	270	Femmina M8	2
12 XL 155	12	150	2519	4,97	54,8	126	560	320	Femmina M8	2
12 XL 175	12	170	3437	3,62	62,4	226	500	235	Femmina M8	2
12 XL 205	12	200	3611	3,44	73,9	260	500	235	Femmina M8	2

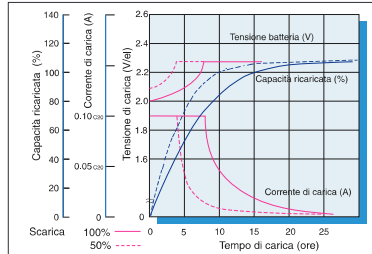
DT*: Disposizione Terminali



Curve di scarica a differenti correnti / tensioni finali (at 20°C)



Tensioni e tempi di ricarica per uso standby (a 20°C)



Capacità residua durante lo stoccaggio a differenti temperature

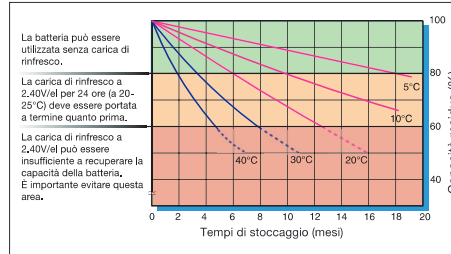


Tabella di scarica a Corrente Costante (Ampere)

Tensione finale: 1,80 V/el - Temperatura: 20°C

Modello	5 min	10 min	15 min	20 min	30 min	45 min	1 ora	2 ore	3 ore	5 ore	10 ore	20 ore
12 XL 60	243	181	143	119	89,8	65,4	51,5	28,7	20,4	13,3	7,58	4,05
12 XL 105	309	230	184	152	113	81,6	64,5	35,9	25,5	16,7	9,45	5,07
12 XL 125	389	284	224	185	135	98,1	77,3	43,1	30,6	20,1	11,4	6,08
12 XL 155	455	334	267	221	165	121	96,4	53,8	38,3	25,1	14,2	7,60
12 XL 175	617	454	358	296	220	162	129	73,6	52,2	34,1	19,3	10,3
12 XL 205	723	532	419	347	258	190	151	86,2	61,1	39,9	22,6	12,1

Tabella di scarica a Potenza Costante (Watt per blocco)

Tensione finale: 1,80 V/el - Temperatura: 20°C

Modello	5 min	10 min	15 min	20 min	30 min	45 min	1 ora	2 ore	3 ore	5 ore	10 ore	20 ore
12 XL 60	2552	1935	1553	1295	988	725	575	324	231	152	87,1	46,8
12 XL 105	3240	2462	1988	1657	1240	906	718	405	289	190	109	58,5
12 XL 125	4085	3045	2422	2011	1494	1087	862	486	347	229	131	70,2
12 XL 155	4772	3586	2900	2408	1820	1346	1075	607	434	286	163	87,7

7.2. ANALISI DEI COSTI E DEI PESI

DATASHEET
125V HEAVY TRANSPORTATION MODULE

FEATURES AND BENEFITS*

- Up to 1,000,000 duty cycles or 10 year DC life
- 125V DC working voltage
- Active cell balancing
- Temperature and voltage monitoring
- CAN bus digital monitoring and communications
- High power density

TYPICAL APPLICATIONS

- Buses
- Electric trains and trolleys
- Heavy duty transportation
- Cranes, RTGS
- Utility vehicles
- Mining equipment



PRODUCT SPECIFICATIONS

ELECTRICAL	BMOD0063 P125 B08
Rated Capacitance ¹	63 F
Minimum Capacitance, initial ¹	63 F
Maximum Capacitance, initial ¹	76 F
Maximum ESR _{DC} initial ¹	18 mΩ
Test Current for Capacitance and ESR _{DC} ¹	100 A
Rated Voltage	125 V
Absolute Maximum Voltage ²	136 V
Absolute Maximum Current	1900 A
Leakage Current at 25°C, maximum ³	10 mA
Maximum Series Voltage	1500 V
Capacitance of Individual Cells ¹¹	3000 F
Maximum Stored Energy, Individual Cell ¹¹	3.0 Wh
Number of Cells	48
TEMPERATURE	
Operating temperature range (Cell case temperature)	
Minimum	-40°C
Maximum	65°C
Storage temperature range (Stored uncharged)	
Minimum	-40°C
Maximum	70°C

*Results may vary. Additional terms and conditions, including the limited warranty, apply at the time of purchase. See the warranty details and enclosed information for applicable operating and use requirements.

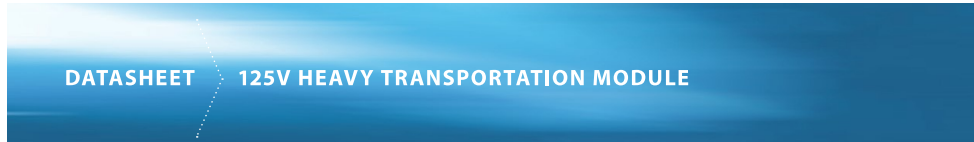
7. SIMULAZIONI E ANALISI DEI COSTI E DEI PESI

DATASHEET 125V HEAVY TRANSPORTATION MODULE

PRODUCT SPECIFICATIONS (Cont'd)

PHYSICAL		BMOD0063 P125 B08
Mass, typical ¹³		61 kg
Power Terminals		Radsok®
Recommended Torque - Terminal		N/A
Vibration Specification		ISO16750-3 Table 14
Shock Specification		SAE J2464
Environmental Protection		IP65
Cooling		Forced Air
MONITORING / CELL VOLTAGE MANAGEMENT		
Temperature Interface		Serial Data (CAN)
Cell Voltage Monitoring		Group Voltage (CAN)
Connector		Deutsch DTM
Cell Voltage Management		VMS 2.0
POWER & ENERGY		
Usable Specific Power, P_d ⁴		1,700 W/kg
Impedance Match Specific Power, P_{max} ⁵		3,600 W/kg
Specific Energy, E_{max} ⁶		2.3 Wh/kg
Stored Energy, E_{stored} ⁷		140 Wh
SAFETY		
Short Circuit Current, typical (Current possible with short circuit from rated voltage. Do not use as an operating current.)		6,900 A
Certifications		RoHS, eMark
High-Pot Capability ¹²		4,000 VAC

7.2. ANALISI DEI COSTI E DEI PESI



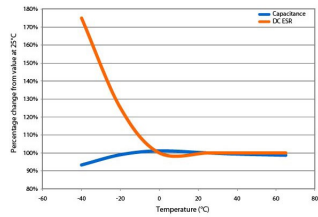
TYPICAL CHARACTERISTICS

THERMAL CHARACTERISTICS		BMOD0063 P125 B08
Thermal Resistance (R_{ca} , Case to Ambient), typical ⁸		0.04°C/W
Thermal Capacitance (C_{th}), typical		33,000 J/°C
Maximum Continuous Current ($\Delta T = 15^\circ\text{C}$) ⁸		140 A _{RMS}
Maximum Continuous Current ($\Delta T = 40^\circ\text{C}$) ⁸		240 A _{RMS}
LIFE		
DC Life at High Temperature ¹ (at Rated Voltage & Maximum Operating Temperature)		1,500 hours
Capacitance Change (% decrease from minimum initial value)		20%
ESR Change (% increase from maximum initial value)		100%
Projected DC Life at 25°C ¹ (held continuously at Rated Voltage)		10 years
Capacitance Change (% decrease from minimum initial value)		20%
ESR Change (% increase from maximum initial value)		100%
Projected Cycle Life at 25°C ^{1,9,10}		1,000,000 cycles
Capacitance Change (% decrease from minimum initial value)		20%
ESR Change (% increase from maximum initial value)		100%
Test Current		100 A
Shelf Life (Stored uncharged at 25°C)		4 years

7. SIMULAZIONI E ANALISI DEI COSTI E DEI PESI

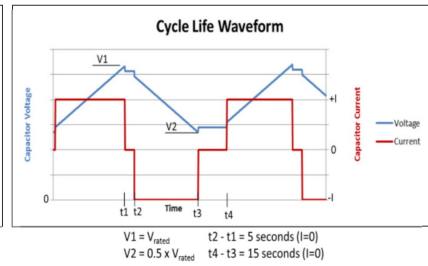
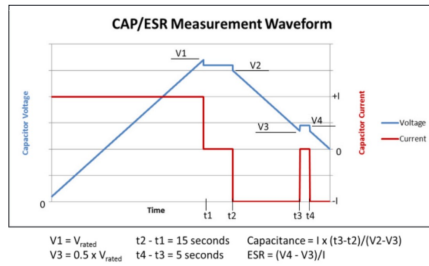
DATASHEET 125V HEAVY TRANSPORTATION MODULE

ESR AND CAPACITANCE VS TEMPERATURE



NOTES

1. Capacitance and ESR_{DC} measured at 25°C using specified test current per waveform below.
2. Absolute maximum voltage, non-repeated. Not to exceed 1 second.
3. After 72 hours at rated voltage. Initial leakage current can be higher.
4. Per IEC 62391-2, $P_d = \frac{0.12V^2}{ESR_{DC} \times \text{mass}}$
5. $P_{\text{max}} = \frac{V^2}{4 \times ESR_{DC} \times \text{mass}}$
6. $E_{\text{max}} = \frac{\frac{1}{2} CV^2}{3,600 \times \text{mass}}$
7. $E_{\text{stored}} = \frac{\frac{1}{2} CV^2}{3,600}$
8. $\Delta T = I_{\text{RMS}}^2 \times ESR \times R_{\theta}$
9. Cycle using specified test current per waveform below.
10. Cycle life varies depending upon application-specific characteristics. Actual results will vary.
11. Per United Nations material classification UN3499, all Maxwell ultracapacitors have less than 10 Wh capacity to meet the requirements of Special Provisions 361. Both individual ultracapacitors and modules composed of those ultracapacitors shipped by Maxwell can be transported without being treated as dangerous goods (hazardous materials) under transportation regulations.
12. Duration = 60 seconds. Not intended as an operating parameter.
13. Without fan. With fan, mass is 63.4 kg.



Bibliografia

- [1] Linden D. - Reddy T. B., *Handbook of Battery*, Mc-Graw Hill, 2001.
- [2] Larminie J., Lowry J., *Electric Vehicle Technology Explained*, John Wiley & Sons, 2003.
- [3] Sauer D. U., "Charge-Discharge Curves", *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, Elsevier, 2009, pp. 413–423.
- [4] Jörisen L., Frey H., "Energy Storage", *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, Elsevier, 2009, pp. 215-231.
- [5] May G. J. - Davidson A. - Monahov B., "Lead batteries for utility energy storage: A review", *Journal of Energy Storage*, 15 (2018), pp. 145-147.
- [6] Libich J. - Máca J. - Vondrák J. - Čech O. - Sedlaříková M., "Supercapacitors: Properties and applications", *Journal of Energy Storage*, 17 (2018), pp. 224-227.
- [7] González A. - Goikolea E.- Barrena J. A. - Mysyk R., "Review on supercapacitors: Technologies and materials", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58 (2016), pp. 1189-1206.
- [8] Huang Z. - Li H. - Li L. - Peng J., "A rapid cell voltage balancing scheme for supercapacitor based energy storage systems for urban rail vehicles", *Journal of Energy Storage*, 142 (2017), pp. 329-340.
- [9] Dalla Chiara B., Degiovanni P., "Un Automated People Mover (APM) con trazione a fune e struttura a rete", *Ingegneria Ferroviaria*, Vol. I.XII, 4 (2007), pp. 325-334.
- [10] Dusmez S., Khaligh A., Shen J., "Optimization of Sizing and Battery Cycle Life in Battery/Ultracapacitor Hybrid Energy Storage

BIBLIOGRAFIA

Systems for Electric Vehicle Applications", *IEEE TRANSACTION ON INDUSTRIAL INFORMATICS*, 10 (2014), pp. 2112-2121.

- [11] Cao J., Emadi A., "A New Battery/Ultracapacitor Hybrid Energy Storage System for Electric, Hybrid, Plug-in Hybrid Electric Vehicles", *IEEE TRANSACTION ON POWER ELECTRONICS*, 27 (2012), pp. 122-132.
- [12] Miller R. J., "Engineering electrochemical capacitor applications", *Journal of Power Sources*, 326 (2016), pp. 726-735.