

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI INDUSTRIALI

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA MECCATRONICA

Applicazione di Accumulatori Flywheel nei Sistemi di Trazione Elettrica

Relatore:

PROF. FABIO TINAZZI

Laureando:

MARCO GABARDO

Correlatore:

PROF. TOMMASO CALDOGNETTO

Matricola:

2044629

ANNO ACCADEMICO 2022/2023

Abstract

Questo elaborato riguarda lo sviluppo di una strategia di gestione e l'analisi delle diverse modalità di stoccaggio dell'energia rigenerativa per un sistema di trazione elettrico in cui siano presenti accumulatori basati su flywheel (FESS-*Flywheel Energy Storage System*). In particolare vengono proposti un metodo di dimensionamento per gli *High Speed*-FESS, accumulatori che operano ad elevate velocità e presentano un volano costituito da materiali compositi, e uno schema di controllo per il sistema complessivo che sia implementabile sia nelle applicazioni con accumulo a bordo che a terra.

Grazie ad un'analisi simulativa in *Matlab-Simulink* della linea 2 della metropolitana di Milano è stato possibile valutare la potenza nominale e la capacità che gli accumulatori dovrebbero avere per recuperare tutta l'energia rigenerativa, in entrambe le modalità di stoccaggio. Dopo aver verificato che gli ingombri geometrici e di massa richiesti sono compatibili con le due modalità di accumulo, è stata svolta un'analisi degli effetti dell'applicazione dei FESS in un sistema reale, in termini di energia consumata e di potenza di picco richiesta alle sottostazioni di alimentazione, per diverse condizioni operative.

Indice

Introduzione	1
1 Sistemi di Accumulo dell'Energia	3
1.1 Modalità di Accumulo	4
1.1.1 On-Board	5
1.1.2 Wayside	6
1.2 Tipologie di Accumulatori	8
1.2.1 Scelta della Tecnologia	11
2 Flywheel	15
2.1 Struttura	16
2.1.1 Rotore	17
2.1.2 Cuscinetti	20
2.1.3 Convertitore di Energia	21
2.1.4 Componenti Ausiliari	22
2.2 Dimensionamento	23
2.3 Sicurezza	28
3 Sistema di Trasporto	29
3.1 Layout	29
3.1.1 Carico	29
3.1.2 Flywheel Energy Storage System	31
3.1.3 Bus di Alimentazione	32
3.1.4 Convertitore di Rete	33
3.1.5 Sorgente di Alimentazione	34
3.2 Principio di Funzionamento	35
3.2.1 Wayside	35
3.2.2 On-board	36
3.2.3 Considerazioni	38
4 Schema di Controllo	41
4.1 Carico	41
4.1.1 Dinamica Meccanica	41
4.1.2 Motore	44
4.1.3 Convertitore di potenza	45
4.1.4 Controllore	49
4.2 FESS	57
4.2.1 Dinamica Meccanica	57
4.2.2 Controllore	58

4.3	Convertitore di Rete	66
4.3.1	Convertitore di Potenza	66
4.3.2	Controllore	67
4.4	Sorgente di Alimentazione	72
4.4.1	Generatore di Potenza	72
4.4.2	Controllore	73
5	Simulazioni	75
5.1	Dati del sistema	75
5.2	Modello della rete	77
5.3	Riferimenti di comando	79
5.4	Dimensionamento	82
5.4.1	Sistema di controllo	82
5.4.2	Flywheel	82
5.5	Risultati	87
5.5.1	Energia consumata	87
5.5.2	Potenza estratta	91
	Conclusioni	97
	Bibliografia	101

Introduzione

Nei sistemi di trasporto con trazione elettrica indipendenti tra i principali problemi si identificano la limitata autonomia e il tempo di ricarica non trascurabili mentre, per quanto riguarda il trasporto centralizzato come ad esempio i mezzi su rotaia, grandi picchi di potenza vengono richiesti per poter accelerare i veicoli, andando a stressare notevolmente la rete di alimentazione. Per limitare questi problemi è necessario rendere più efficienti i mezzi ed il recupero l'energia in fase di frenata offre la possibilità di ridurre il consumo di energia.

Il rallentamento di un veicolo può essere effettuato con due modalità di frenata:

- meccanica
- dinamica

Con la prima l'energia cinetica viene convertita in calore attraverso l'attrito di componenti meccanici e, durante il processo, vengono emessi polveri, odori e rumori. Con la seconda invece l'energia cinetica viene convertita in energia elettrica sfruttando la capacità del motore elettrico di comportarsi da generatore e facendo affidamento su un'elettronica di potenza in grado di gestire flussi bidirezionali di energia, emettendo solamente una quantità limitata di calore legata alle perdite per effetto Joule causate dallo scorrere di corrente nei conduttori che formano gli avvolgimenti della macchina elettrica.

Spesso i sistemi di trasporto sono caratterizzati da frequenti cicli di accelerazioni e decelerazioni e, sfruttando la frenata rigenerativa, è possibile ottenere una riduzione del consumo di energia elettrica compresa tra 10% e il 45% [1]. L'energia recuperata può essere:

- dissipata sotto forma di calore
- utilizzata per alimentare le funzionalità ausiliarie del veicolo
- iniettata in rete per renderla disponibile agli altri mezzi (nei sistemi centralizzati)
- immagazzinata per alimentare la successiva accelerazione del veicolo.

La presente tesi si pone l'obiettivo di sviluppare una strategia di gestione dell'energia rigenerativa, soffermandosi in particolare sui sistemi di accumulo basati su flywheel, sia dal punto di vista del dimensionamento che da quello dello schema di controllo. Si articola in cinque capitoli, nei quali è presentata la strategia di sviluppo degli accumulatori e del modello simulativo grazie al quale è stato possibile valutare gli effetti dell'utilizzo di tali dispositivi in un sistema reale.

In particolare nel Capitolo 1 vengono analizzate le varie modalità di stoccaggio, vengono presentate le principali tecnologie di accumulatori adatte al recupero dell'energia rigenerativa nei mezzi di trazione e viene effettuato un confronto dettagliato tra le loro caratteristiche.

Nel Capitolo 2 sono presentate le componenti chiave dei *Flywheel Energy Storage System* (FESS) e viene fornita una possibile strategia di dimensionamento per gli *High Speed-FESS*, accumulatori che operano ad alte velocità e hanno il rotore costituito da materiali compositi.

Nel Capitolo 3 vengono analizzati i componenti costitutivi e il layout di un generico sistema di trasporto, sia nel caso di accumulo dell'energia a bordo che a terra. Viene presentato inoltre il principio di funzionamento di tale sistema, soffermandosi in particolare sugli scambi di potenza nelle varie fasi di funzionamento (accelerazione, decelerazione, a regime).

Nel Capitolo 4 viene illustrato lo schema di controllo proposto per la gestione dell'energia rigenerativa, analizzando nei dettagli ogni singolo regolatore e ogni scelta implementativa, partendo dall'analisi della dinamica di ogni componente del sistema di trasporto.

Nel Capitolo 5 viene analizzato il sistema reale (la linea 2 della metropolitana di Milano) nel quale, attraverso le simulazioni, si vogliono testare gli accumulatori e lo schema di controllo proposto. Viene presentato inoltre il setup simulativo, soffermandosi in modo particolare sul modello della rete sviluppato, che permette una rapida esecuzione della simulazione anche se si considerano molti treni. Infine viene svolta l'analisi simulativa per diverse frequenze di passaggio e strategie di sincronizzazione dei mezzi, permettendo quindi di valutare gli effetti dell'utilizzo dei FESS, sia nella modalità di accumulo a bordo che a terra, in un sistema di trasporto reale.

Capitolo 1

Sistemi di Accumulo dell'Energia

In questo capitolo verranno analizzate le diverse modalità di accumulo, evidenziandone i principali vantaggi e svantaggi, e le tipologie di sistemi di stoccaggio comunemente utilizzate nel settore.

Indipendentemente dal tipo e dalla modalità di accumulo, la struttura di un sistema di stoccaggio dell'energia si compone di tre unità principali: la fonte di accumulo (*storage device*), un convertitore di potenza elettrica (*power converter*) e un controllore (*power flow controller*), che regola il processo di carica e scarica del dispositivo, come illustrato in Figura 1.1.

Fonte di accumulo La scelta della tecnologia di accumulo dipende dalla specifica situazione e le principali caratteristiche da tenere in considerazione sono:

- quantità di energia
- massimo picco di potenza
- numero di cicli di lavoro
- tempo di risposta
- efficienza
- sicurezza
- massimo ingombro del sistema (massa e volume).

Convertitore di potenza Il convertitore di potenza interfaccia il bus di alimentazione con il sistema di accumulo e gestisce il flusso bidirezionale di energia seguendo i segnali generati dal controllore. Anche in questo caso la scelta della tipologia deve tener conto di:

- potenza media scambiata
- massimo picco di potenza
- tempo di risposta
- efficienza.

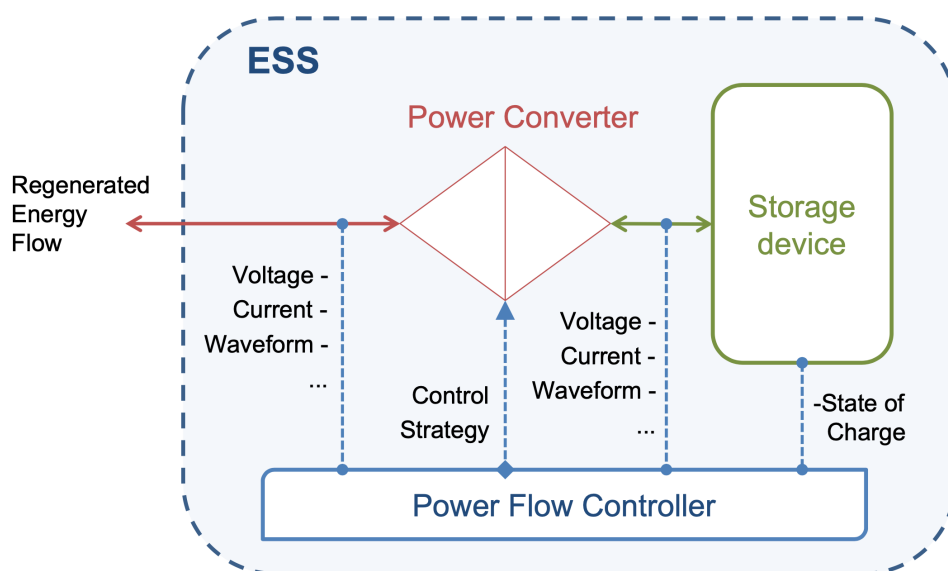


Figura 1.1: Struttura di un accumulatore di energia elettrica. [1]

Controllore Il controllore gestisce e ottimizza il funzionamento dell'intero sistema a partire da informazioni quali lo stato di carica dell'accumulatore, la tensione del bus di alimentazione e dal riferimento di energia richiesta dall'utilizzatore. La strategia di controllo dipenderà dall'applicazione, dalla modalità e tipologia di accumulo e dall'obiettivo che si mira a raggiungere grazie all'utilizzo del sistema di stoccaggio che può essere di diverse tipologie, quale ad esempio:

- recupero totale dell'energia di frenata
- regolazione della tensione del bus
- limitazione della potenza richiesta alla fonte di alimentazione principale
- ottimizzazione dell'energia richiesta alla fonte di alimentazione principale.

1.1 Modalità di Accumulo

In sistemi di trasporto indipendenti quali, per esempio, automobili, camion e autobus, l'unica possibilità è quella di accumulare l'energia in eccesso in sistemi di stoccaggio a bordo e rilasciarla alla successiva accelerazione mentre, nei sistemi centralizzati come metropolitane e tranvie, è inoltre possibile iniettarla nella rete comune per metterla a disposizione di altri convogli oppure accumularla in apposite stazioni di stoccaggio a terra. A tal proposito nei sistemi centralizzati una particolare attenzione dovrebbe essere posta nel massimizzare l'utilizzo condiviso dell'energia rigenerata, in modo tale da ridurre le dimensioni degli accumulatori da utilizzare. Tale obiettivo può essere raggiunto, nel caso ad esempio di una metropolitana, ottimizzando gli orari di partenza e arrivo dei treni, sincronizzando l'accelerazione di un treno con la frenata di un altro come presentato in Figura 1.2. Oltre a ridurre il consumo di energia totale, ciò rende possibile attenuare i picchi di potenza richiesta alla rete, diminuendo il costo dell'infrastruttura e i costi di gestione del sistema di trasporto [2]. Questa strategia è implementabile solo in alcuni sistemi ed influenzerà il dimensionamento degli accumulatori.

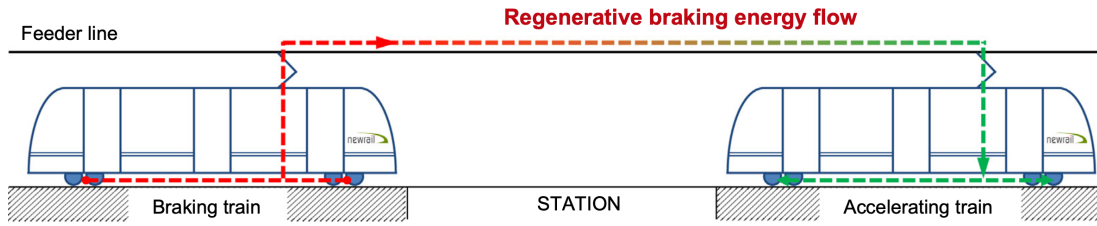


Figura 1.2: Condivisione dell'energia tra mezzi appartenenti allo stesso sistema di trasporto. [1]

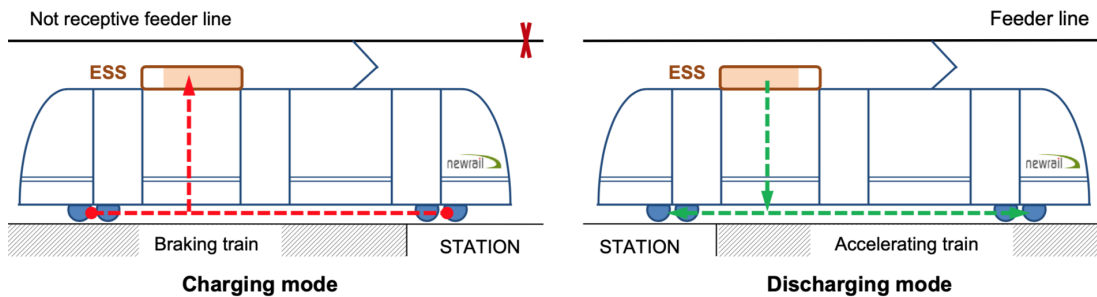


Figura 1.3: Principio di funzionamento di un accumulatore *on-board*. [1]

1.1.1 On-Board

Gli accumulatori *on-board* stoccano l'energia all'interno del mezzo di trasporto e permettono di utilizzare l'energia recuperata durante il processo di frenata per alimentare il veicolo stesso durante la successiva accelerazione, come presentato in Figura 1.3.

I vantaggi che si ottengono utilizzando ESS (Energy Storage System) *on-board* sono:

- **riduzione dei consumi:** nei sistemi indipendenti il recupero dell'energia permette un aumento dell'autonomia totale. Nei sistemi centralizzati la condivisione dell'energia tra i veicoli è limitata dai livelli massimi e minimi di tensione ammissibili sulla linea, perciò nel caso in cui il livello di tensione nel punto di contatto di un veicolo ecceda la soglia massima, l'energia in eccesso viene automaticamente trasformata in calore nei banchi di resistenze. L'utilizzo di accumulatori a bordo riduce la quantità di energia condivisa tra i convogli e evita il generarsi di situazioni come quella appena descritta. Numerosi studi infatti concordano nel dire che solamente il 15% dell'energia totale consumata riesce ad essere riutilizzata con la condivisione [3], mentre la restante parte viene eliminata nelle resistenze di frenatura. Considerando che con la frenata rigenerativa è possibile recuperare circa il 40% dell'energia totale consumata [3], risulta evidente che, senza l'utilizzo di un sistema di accumulo, la maggior parte dell'energia recuperata viene dissipata. In aggiunta una riduzione dei consumi del singolo veicolo porta ad una diminuzione delle perdite di linea. Infatti minori potenze richieste implicano minori correnti nella linea ed essendo in prima approssimazione le perdite ohmiche legate quadraticamente alla corrente, si evince che anche una piccola riduzione di questa porta a dei benefici significativi.
- **attenuazione dei picchi di potenza:** questo permette in generale una

semplificazione del controllo della fonte di alimentazione principale e una riduzione dei costi legati alla potenza dei generatori. Nei sistemi centralizzati inoltre consente una riduzione dei costi legati all'infrastruttura, infatti permette di limitare il numero di sottostazioni di alimentazione, ridurre la sezione dei cavi oppure permette il passaggio di un numero maggiore di veicoli sulla stessa linea, veicoli più potenti e le limitazioni sull'accelerazione si riducono [4].

- **forniscono una fonte di alimentazione secondaria:** permette in caso di malfunzionamento, totale o temporaneo, della fonte di alimentazione principale di raggiungere un luogo sicuro in cui far scendere i passeggeri senza pericoli. Nei sistemi centralizzati inoltre rende possibile il funzionamento anche in tratti di linea non elettrificati quali officine, depositi oppure zone di interesse in cui non è possibile, per motivi paesaggistici, costruire linee di alimentazione [4].
- **ridondanza degli accumulatori:** nei sistemi centralizzati permette un funzionamento della rete efficiente anche nel caso di malfunzionamento di alcuni ESS.

Tra gli svantaggi principali di questa configurazione si possono evidenziare:

- costo legato al numero di accumulatori necessari
- l'ingombro extra in termini di massa e volume che deve essere gestito in fase di progettazione del veicolo
- l'introduzione di una fonte di pericolo in caso di malfunzionamento del dispositivo stesso.

Negli accumulatori *on-board* particolare attenzione deve essere posta in fase di progettazione per ottimizzare il dimensionamento globale del sistema. Sovradimensionare potrebbe aumentare inutilmente la massa e il volume del sistema, mentre sottodimensionare potrebbe comportare uno spreco considerevole di energia. Il metodo di dimensionamento per gli ESS mobili varia in base alla loro principale funzione, così come la strategia di controllo. I requisiti di progettazione saranno differenti quando ci si focalizza sull'ottimizzazione del risparmio energetico, sulla riduzione delle cadute di tensione nella linea o sulla possibilità di funzionamento senza alimentazione principale. A titolo di esempio, un criterio generale per scopi di risparmio energetico è massimizzare l'assorbimento di energia di frenata recuperabile durante una frenata improvvisa, assumendo che nessuna energia possa essere restituita alla rete [4]. Tuttavia, data la variabilità delle velocità dei veicoli e dei tassi di occupazione, è necessaria un'attenta analisi che consideri i pesi e i costi per determinare la capacità ottimale [5]. In ogni caso questi accumulatori solitamente vengono installati parallelamente a dei sistemi di protezione che dissipano l'energia in caso di sovratensioni del bus di alimentazione.

1.1.2 Wayside

Gli accumulatori *wayside*, detti anche WESS (*Wayside Energy Storage System*), sono utilizzabili solo nelle reti dei sistemi di trasporto centralizzate. Posti nelle

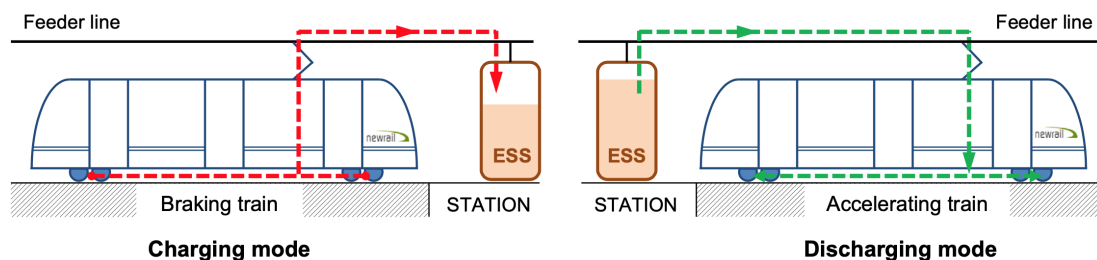


Figura 1.4: Principio di funzionamento di un accumulatore *wayside*. [1]

sottostazioni di alimentazione oppure in strutture dedicate, il loro compito è quello di accumulare l'energia rigenerativa che non viene sfruttata da altri veicoli, evitando l'utilizzo dei banchi di resistenze a bordo. L'energia accumulata viene utilizzata successivamente per alimentare mezzi che transitano nella tratta di competenza della sottostazione, come illustrato nella Figure 1.4. Solitamente la strategia di controllo di questi accumulatori opera in funzione della tensione della linea [6], andando ad assorbire energia quando si verifica una sovratensione ed erogandola nel caso contrario, cercando di mantenerla al valore di soglia.

I vantaggi che si ottengono utilizzando WESS sono:

- **riduzione dei consumi:** assorbendo l'energia rigenerativa in eccesso dalla rete essi permettono di evitare l'utilizzo di metodi dissipativi ed inoltre possono alimentare convogli diversi da quelli che hanno generato l'energia. Rispetto alla topologia con accumulatori *on-board*, questa risulta essere solitamente meno efficiente a cause delle perdite di trasmissione che sono in prima approssimazione proporzionali alla distanza del veicolo rispetto alla sottostazione di alimentazione.
- **stabilizzazione della tensione:** contribuiscono a stabilizzare la tensione dell'intera rete oppure di alcuni segmenti cruciali, evitando di costruire nuove sottostazioni. La stabilità delle rete è una qualità necessaria che garantisce una migliore operatività e la criticità maggiore si ha nei tratti distanti dalle stazioni di alimentazione [6].
- **riduzione dei picchi di potenza:** così facendo permettono una riduzione dei costi dell'energia in quanto le richieste di potenza sono limitate. Inoltre rende possibile la creazione nel futuro di sottostazioni più piccole che potrebbero essere progettate per massimizzare l'efficienza.
- **forniscono una fonte di alimentazione secondaria:** permettono il rientro nelle stazioni dei veicoli anche in caso di guasto alla rete di alimentazione, garantendo una maggiore sicurezza per i passeggeri.
- **possono essere aggiunti ad una rete già operativa.**

Inoltre, rispetto agli accumulatori *on-board*, non ci sono problemi legati al trasporto di dispositivi ingombranti e pesanti.

Tra gli svantaggi principali di questa configurazione si possono evidenziare:

- difficoltà di collocamento, soprattutto nei centri urbani altamente popolati

- presenza di un punto di fallimento unico che coinvolge tutto il segmento di linea gestito dall'accumulatore interessato
- limitazione dell'operatività della linea durante le fasi di manutenzione.

Rispetto agli accumulatori *on-board*, l'efficienza complessiva del sistema risulta essere inferiore, come specificato precedentemente, a causa delle perdite sulla linea, legate alla resistenza dei conduttori e alla gestione delle sovratensioni.

Nel progettare ESS stazionari, è molto importante tenere conto della variabilità delle condizioni del traffico infatti, poiché la ricettività della linea dipende fortemente dalla frequenza dei treni, la dimensione ottimale dell'ESS sarà diversa per ogni scenario. La soluzione di compromesso che ottimizza la capacità del WESS può essere raggiunta solamente a seguito di un'analisi accurata dell'applicazione.

1.2 Tipologie di Accumulatori

Le tipologie di accumulatori disponibili (supercondensatori, batterie, volani, magneti superconduttori) differiscono significativamente per quanto riguarda la loro capacità di immagazzinare energia e rilasciarla entro un certo periodo di tempo. Anche il meccanismo di base di stoccaggio è differente, infatti l'energia può essere immagazzinata in un campo elettrico (condensatori), in composti elettrochimici (batterie), meccanicamente, ad esempio mediante una massa rotante (flywheel), oppure in un campo magnetico (magneti superconduttori). Nella Tabella 1.1 sono riportate le caratteristiche delle principali tipologie di ESS.

Verranno di seguito analizzate le varie tipologie di accumulatori nei termini di:

- densità di energia: quantità di energia accumulabile nell'unità di massa o volume
- densità di potenza: quantità di potenza disponibile nell'unità di massa
- tempo di risposta: velocità di erogazione della potenza richiesta
- efficienza
- tasso di aut scarica: percentuale di energia dissipata in una giornata
- durabilità: numero di cicli di lavoro eseguibili.

Batterie Le batterie immagazzinano ed erogano energia mediante reazioni elettrochimiche reversibili che avvengono tra due diversi materiali (elettrodi) immersi in una soluzione elettrolitica. Queste reazioni avvengono all'interno delle celle, che sono le unità di base che compongono una batteria.

In generale presentano una densità di energia elevata mentre, al contrario, la loro densità di potenza è limitata [1]. Questo comporta la necessità di avere sistemi pesanti per ottenere le potenze richieste. Le batterie inoltre sono limitate dal punto di vista del tempo di risposta e in termini di durabilità, presentano però un basso tasso di aut scarica [1].

A seconda della tecnologia utilizzata, le batterie possono offrire una vasta gamma di caratteristiche operative. A titolo di esempio le batterie al piombo

Tipologia	Densità di Energia e Potenza		Tempo di Scarica	Efficienza	Tasso di Autoscarica	Durabilità	
	$\frac{W \cdot h}{kg}$	$\frac{kW \cdot h}{m^3}$					$\frac{kW}{kg}$
batterie al piombo	20-50	50-80	0.025-0.3	s-h	70-90	0.05-0.3	200-2000
batterie Li-ion	75-200	150-500	0.1-0.35	s-h	90-100	0.1-0.3	$10^3 - 10^4$
flywheel	5-100	20-80	1-5	ms-min	90-95	100	$< 10^7$
EDLC	2.5-15	10-30	0.5-5	ms-min	90-100	20-40	$< 10^6$
SMES	0.5-5	0.2-2.5	0.5-2	ms-s	95-100	10-15	$> 10^5$

Tabella 1.1: Caratteristiche delle principali tipologie di ESS. [1]

sono affidabili ma la loro densità energetica è bassa rispetto alle altre tipologie e sono molto sensibili alle condizioni ambientali. Le batterie al litio risultano essere molto efficienti e la loro densità energetica è molto elevata. Tra gli aspetti negativi spicca la necessità di utilizzo di un sistema di gestione complesso che mantenga temperatura, tensione e stato di carica entro un intervallo di funzionamento sicuro ed efficiente [7].

Flywheel I flywheel (FW) sono dispositivi di accumulo elettromeccanici che immagazzinano energia cinetica in una massa rotante chiamata rotore o volano. L'energia immagazzinata è proporzionale all'inerzia del rotore e al quadrato della sua velocità di rotazione. Mentre i primi sistemi utilizzavano grandi masse di acciaio in rotazione su cuscinetti meccanici, la nuova generazione è costituita da rotori in di fibra di carbonio sospesi su cuscinetti magnetici [8]. L'uso di materiali compositi leggeri riduce l'inerzia delle ruote volanti ma consente velocità di rotazione molto più elevate grazie alla loro maggiore resistenza a trazione [9]. I cuscinetti magnetici, a loro volta, offrono un attrito molto basso che consente una considerevole riduzione delle perdite interne durante l'accumulo a lungo termine [10].

Questa tecnologia presenta elevate densità di potenza ed energia e offre la possibilità di erogare grandi picchi di potenza. I flywheel hanno inoltre un rapido tempo di risposta, un'elevata efficienza e una durabilità, il loro stato di carica è facilmente ricavabile dalla misura della velocità di rotazione, ricavabile ad esempio attraverso l'utilizzo di tecniche *sensorless*, funzionano in una vasta gamma di temperature operative e hanno un impatto ambientale molto basso [1].

Tra gli svantaggi principali si hanno una rapida velocità di autoscarica e un ingombro elevato, soprattutto a causa dei sistemi di contenimento a barriere multiple che proteggono gli spazi limitrofi in caso di rottura del sistema. Utilizzando i nuovi accumulatori con rotore in materiale composito, al posto di quelli in acciaio, è possibile ridurre di molto il peso e il potenziale di rischio in caso di malfunzionamento. Alcuni test svolti per valutare i danni in caso di fallimento del sistema di depressurizzazione hanno dimostrato che nonostante un evento di questo tipo degradi strutturalmente il rotore e ne comporti la necessità di sostituirlo, ciò non costituisce un pericolo per cose o persone esterne [11].

Supercondensatori I condensatori a doppio strato elettrochimico (EDLC - *Electrochemical Double Layer Capacitors*), noti anche come supercondensatori o ultracapacitori, sono dispositivi di accumulo dell'energia che funzionano essenzialmente con lo stesso principio dei condensatori elettrolitici convenzionali. In altre parole, l'energia viene immagazzinata in un campo elettrostatico mediante una separazione delle cariche e senza la presenza di reazioni chimiche. Gli EDLC si caratterizzano per una superficie degli elettrodi estremamente ampia, un dielettrico ad alta permittività e una separazione delle cariche estremamente piccola, il che conferisce loro una notevole densità energetica rispetto ai condensatori convenzionali [1].

I supercondensatori presentano una densità di potenza elevata ma, al contrario, offrono una densità di energia relativamente bassa [12]. Questo comporta la necessità di avere sistemi pesanti e di dimensioni notevoli per ottenere le capacità richieste [1]. Inoltre gli EDLC consentono numerosi e rapidi processi di carica-

scarica [13] e presentano un'efficienza tipicamente elevata [14], ma il loro tasso di autoscarica non è trascurabile.

Magneti superconduttori Lo stoccaggio di energia magnetica a superconduttività (SMES - *Superconducting Magnetic Energy Storage*) consente di immagazzinare l'energia elettrica nel campo magnetico generato da una corrente continua che scorre attraverso una bobina raffreddata criogenicamente al di sotto della sua temperatura critica superconduttiva. La corrente circola indefinitamente nella bobina a causa della quasi totale assenza di resistenza dei cavi superconduttori.

Gli accumulatori a magneti superconduttori presentano una densità di potenza elevata ma, al contrario, offrono una bassa densità di energia.

I principali vantaggi dei sistemi SMES risiedono nella loro elevata efficienza di stoccaggio dell'energia, nelle risposte estremamente rapide e nella durata ciclica molto elevata. I loro principali svantaggi sono i costi elevati di investimento e di esercizio dovuti principalmente al sistema di refrigerazione.

Un altro problema riguarda la generazione di campi magnetici intensi da parte di questi sistemi, specialmente quando sono coinvolte capacità molto grandi [1].

1.2.1 Scelta della Tecnologia

Per valutare e confrontare l'idoneità delle varie tecnologie di accumulo energetico nelle diverse applicazioni possono essere presi in considerazione differenti caratteristiche, quali:

- maturità della tecnologia
- densità di energia e di potenza
- tempo di risposta
- efficienza
- tasso di autoscarica
- durabilità.

Valutando la maturità delle tecnologie disponibili le batterie al piombo emergono come una delle opzioni più consolidate, essendo state utilizzate in varie applicazioni per oltre un secolo. Le batterie al litio rappresentano un'altra tecnologia consolidata e ampiamente disponibile nel mercato, così come i volani e i supercondensatori. Per quanto riguarda i sistemi SMES, sebbene siano tecnicamente disponibili, non hanno ancora raggiunto una diffusione significativa nel mercato.

Un altro aspetto cruciale da considerare è la densità di energia e di potenza offerta da ciascuna tecnologia, specialmente nelle applicazioni in cui il peso e lo spazio sono limitati. Le batterie al litio spiccano per la loro elevata densità di energia, rendendole particolarmente adatte per i sistemi di accumulo on-board. Nonostante ciò le batterie, pur avendo una buona densità di energia, offrono una densità di potenza inferiore rispetto a volani, supercondensatori e sistemi SMES.

Il tempo di risposta è un aspetto critico per alcune applicazioni, come la gestione dei picchi di carico e la stabilizzazione della tensione. In questo caso,

Tipologia	Costo per capacità nominale	Costo per potenza nominale	Costo per capacità nominale per ciclo
	$\frac{\text{€}}{\text{kW} \cdot \text{h}}$	$\frac{\text{€}}{\text{kW}}$	$\frac{\text{€}}{\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{ciclo}}$
batterie al piombo	50-350	270-550	0.10-1
batterie Li-ion	450-2200	1100-3600	0.13-1.30
flywheel	900-4500	230-320	<0.01
EDLC	270-1800	90-270	<0.01
SMES	900-9000	180-270	0.50

Tabella 1.2: Costi delle principali tipologie di ESS. [1]

le batterie sono superate da volani, supercondensatori e SMES, che consentono risposte molto rapide. In particolare, i sistemi SMES si distinguono per i tempi di risposta estremamente brevi, poiché immagazzinano l'energia sotto forma di corrente elettrica.

L'efficienza insieme al tasso di autoscarica influiscono notevolmente sui costi complessivi del sistema. Le batterie al litio, i volani, i supercondensatori e i sistemi SMES si distinguono per le elevate efficienze, con valori che superano il 95% [1]. Per quanto riguarda il tasso di autoscarica, le batterie surclassano le altre tecnologie, presentando valori molto bassi, al contrario dei flywheel, che dissipano l'energia immagazzinata molto più velocemente. Tuttavia, sapendo che in questo tipo di applicazioni gli ESS svolgono una funzionalità di supporto lavorando con brevi periodi di accumulo (minuti), tassi di autoscarica elevati non comportano gravi limitazioni.

La durabilità degli ESS è un altro parametro essenziale da considerare, specialmente nelle applicazioni in cui si hanno un alto numero di cicli di carica e scarica. In questo contesto, le batterie presentano una durata di vita più breve rispetto a flywheel, supercondensatori e sistemi SMES, che possono lavorare per diverse centinaia di migliaia di cicli.

Infine, i costi non possono essere trascurati quando si confrontano diverse tecnologie di accumulo dell'energia. La Tabella 1.2 mostra i costi tipici delle varie tecnologie per unità di energia immagazzinata e per unità di potenza nominale, tenendo conto dell'efficienza. Va notato che in questo confronto non sono stati considerati i costi di esercizio, manutenzione e sostituzione. Le batterie, specialmente quelle al piombo, offrono i minori costi per kWh di energia immagazzinata tuttavia, se si considerano anche i costi per unità di potenza nominale, le batterie sono notevolmente più costose rispetto a volani, supercondensatori e sistemi SMES.

Per una valutazione più accurata dei costi degli ESS in applicazioni con frequenti cicli di carica-scarica come quelle dei sistemi di trazione, è interessante considerare anche la durabilità. In tal senso nella terza colonna della Tabella 1.2 vengono confrontati i costi per capacità per ciclo delle tecnologie di accumulo prese in considerazione e risulta evidente che le batterie sono le opzioni più costose

[1].

Capitolo 2

Flywheel

Grazie allo sviluppo di nuovi materiali e sistemi di supporto a basso attrito le caratteristiche dei sistemi meccanici di accumulo dell'energia sono diventate sempre più interessanti nell'ambito dei sistemi di trazione. L'elevata densità di potenza, l'efficienza e la durabilità sono qualità che sono sempre appartenute a questa tecnologia ma venivano oscurate da alcuni aspetti negativi quali massa e ingombro notevoli, oltre all'ingente tasso di autoscarica, che ne rendeva svantaggioso l'utilizzo.

Utilizzando volani costituiti da materiali compositi, rispetto a quelli in materiale metallico, si è riusciti a limitare il peso dei dispositivi ed a aumentarne la velocità operativa massima, consentendo quindi di aumentare l'energia immagazzinabile, proporzionale al momento d'inerzia ed al quadrato della velocità di rotazione, riducendo gli ingombri. L'utilizzo di materiali compositi permette inoltre una progettazione ed un dimensionamento più semplice e snello dell'involucro di protezione, dal momento che questi, a differenza di quelli metallici, si disintegrano in frammenti più piccoli [15].

Oltre all'utilizzo di materiali compositi, il raggiungimento di velocità elevate e la diminuzione del tasso di autoscarica sono stati possibili grazie all'introduzione di cuscinetti magnetici, i quali riducono l'attrito, non necessitano di lubrificazione e richiedono una manutenzione molto ridotta rispetto ai cuscinetti tradizionali [10].

Grazie a questi ed a ulteriori miglioramenti gli ESS ad accumulo meccanico potrebbero in futuro trovare sempre più spazio in applicazioni di trazione, soprattutto elettrica, dal momento che costituiscono un'alternativa a basso impatto ambientale che garantisce prestazioni ottimali, soprattutto nell'ambito della frenata rigenerativa, grazie all'elevata densità di potenza che li contraddistingue.

In base alla massima velocità operativa ω_{max} i FESS si dividono in [16]:

- *Low Speed Flywheel Energy Storage System (LS-FESS)*
per $\omega_{max} < 10^4$ [rpm]
- *High Speed Flywheel Energy Storage System (HS-FESS)*
per $10^4 \leq \omega_{max} \leq 10^5$ [rpm].

I primi sono solitamente impiegati in applicazioni a terra in cui il peso del dispositivo non è cruciale, mentre i secondi sono più adatti ad applicazioni *on-board* o quando serve un'elevata potenza di picco, ma richiedendo l'utilizzo di materiali compositi e tecnologie più sofisticate, risultando essere quindi più costosi.

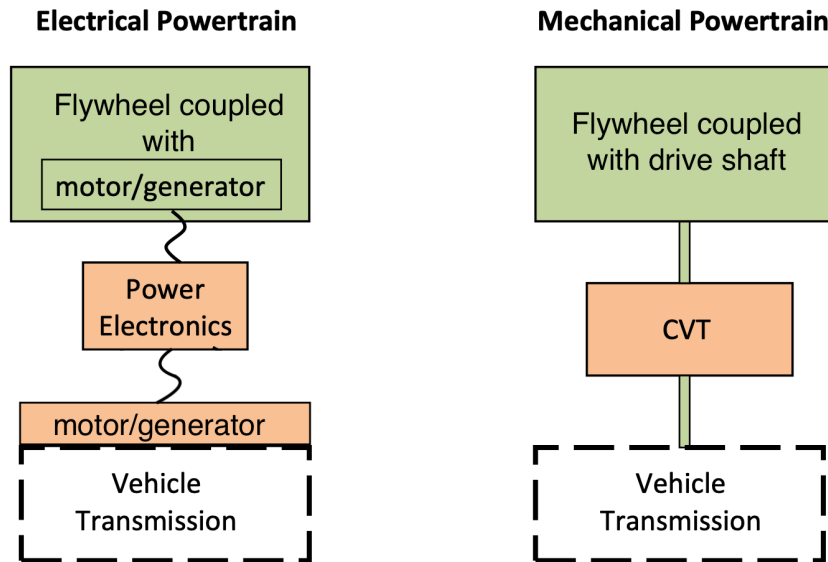


Figura 2.1: Confronto tra FESS elettromeccanico e meccanico. [18]

I FESS possono essere distinti in due tipologie, in base alla catena di conversione dell'energia:

- **elettromeccanici**: il volano è calettato ad un azionamento elettrico che agisce da motore durante la fase di assorbimento dell'energia, mentre agisce da generatore durante la fase di erogazione
- **puramente meccanici**: il volano è accoppiato al sistema di trazione mediante una trasmissione meccanica a variazione continua (CVT - *Continuously Variable Transmission*) e l'assorbimento/erogazione dell'energia è puramente meccanico [17].

La Figura 2.1 riportata un confronto schematico tra le due tipologie.

Il principale vantaggio dei sistemi puramente meccanici risiede nell'assenza di perdite legate alla conversione dell'energia nei circuiti di potenza, mentre tra gli svantaggi si ha una poca flessibilità di progettazione e l'impegnativa gestione della presenza della CVT, la quale risulta essere ingombrante e pesante.

Alla luce di quanto detto la tipologia elettromeccanica risulta essere più adatta ai sistemi di trazione elettrica infatti, nonostante le perdite addizionali di energia, semplifica il controllo del dispositivo e consente una migliore integrazione con il motore elettrico. Per questi motivi l'analisi successiva sarà incentrata su questa tipologia.

2.1 Struttura

Un ESS meccanico basato su flywheel (FESS) è composto dai seguenti componenti:

- **rotore (*flywheel rotor*)**: accumula l'energia cinetica
- **cuscinetti (*support bearings*)**: supportano il rotore

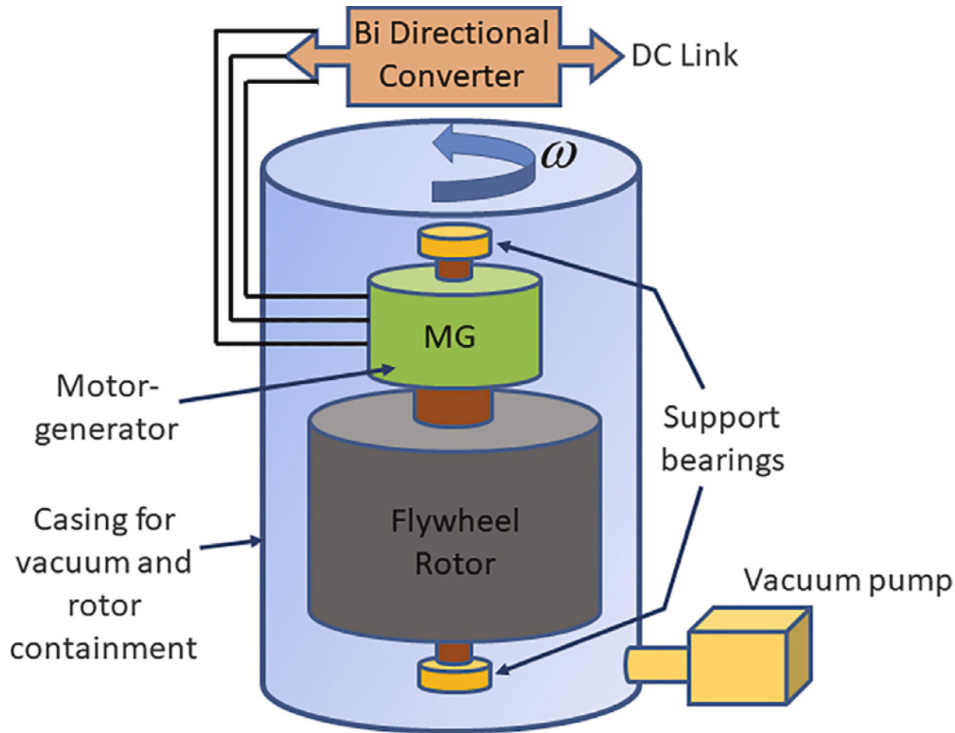


Figura 2.2: Schema della struttura tipica di un FESS. [19]

- **convertitore di energia:** composto da motore (*motor-generator*) e elettronica di potenza (*bi-directional converter*) converte l'energia cinetica in elettrica e viceversa
- **componenti ausiliari:** supportano il funzionamento del dispositivo.

La Figura 2.2 illustra una schematizzazione della struttura tipica di un FESS.

2.1.1 Rotore

Il rotore è la parte essenziale del FESS in quanto costituisce la parte del dispositivo che accumula l'energia. La massa in rotazione possiede una certa energia cinetica E che è proporzionale al momento d'inerzia J e al quadrato della velocità di rotazione ω calcolata segue:

$$E = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (2.1)$$

Per accumulare ulteriore energia il motore accelera il rotore mentre nell'estrarla questo viene rallentato.

L'energia specifica massima $E_{s,max}$, intesa come la quantità di energia per unità di massa, accumulabile dal rotore dipende dal materiale di cui esso è composto ed è esprimibile come [16]:

$$E_{s,max} = K \frac{\sigma_{\theta,max}}{\rho} \quad (2.2)$$

dove K è detto fattore di forma e dipende dalla sezione del rotore, come illustrato in Figura 2.3, $\sigma_{\theta,max}$ è la tensione circonferenziale massima e ρ è la densità del materiale.

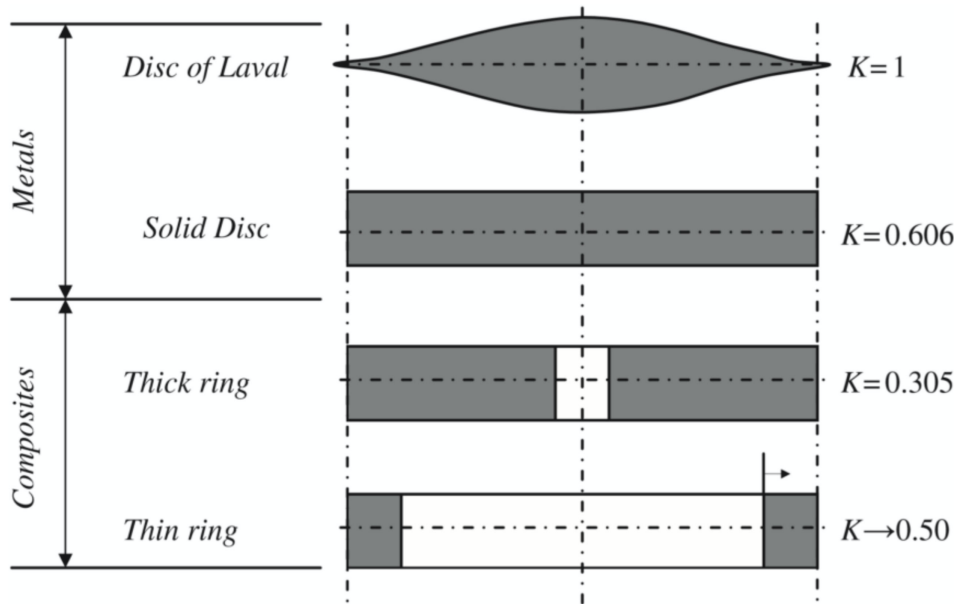


Figura 2.3: Fattore di forma K per varie sezioni del volano. [19]

Materiale	Densità	Tensione Circonferenziale Massima
	ρ [kg/m ³]	$\sigma_{\theta,max}$ [MPa]
alluminio	2800	469
titanio	4430	965
acciaio	7700	1500
fibra di vetro*	2150	1679
fibra di carbonio*	1610	2589

(*) composito: 65% materiale, 35% resina epossidica

Tabella 2.1: Caratteristiche materiali per la costruzione del volano. [18]

Nella Tabella 2.1 sono presentati i valori di densità e tensione circonferenziale massima di diversi materiali. Si nota che i materiali metallici presentano densità elevate e sollecitazioni meccaniche circonferenziali basse, mentre vale il contrario per i materiali compositi.

In accordo con la Figura 2.3, se si utilizzano materiali compositi, la forma del volano da considerare è quella del cilindro cavo, il quale sarà caratterizzato da un raggio interno r_i , un raggio esterno r_o e un'altezza h .

Il momento d'inerzia J di un cilindro cavo può essere ricavato come segue:

$$\begin{aligned}
 J &= \frac{1}{2}m(r_i^2 + r_o^2) \\
 &= \frac{1}{2}mr_o^2(1 + k_r^2)
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

dove k_r è il rapporto tra raggio interno ed esterno:

$$k_r = \frac{r_i}{r_o} \tag{2.4}$$

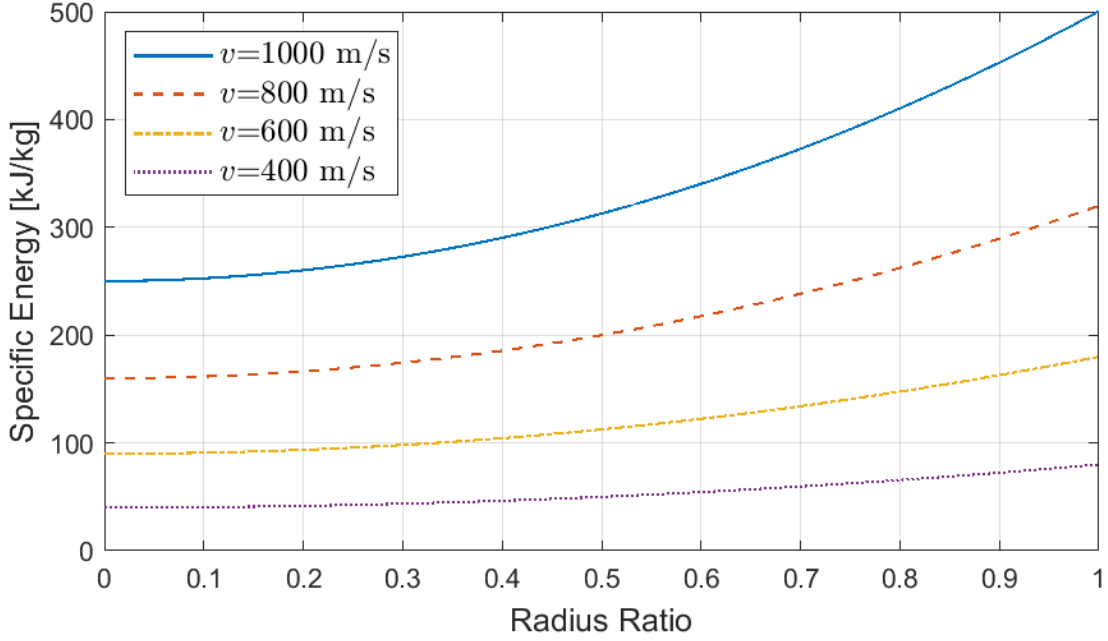


Figura 2.4: Energia specifica in funzione del rapporto tra i raggi k_r per diversi valori di velocità tangenziale.

L'energia specifica del volano risulterà esprimibile come:

$$\begin{aligned}
 E_s &= \frac{\frac{1}{2}J\omega^2}{m} \\
 &= \frac{1}{4}r_o^2(1 + k_r^2)\omega^2 \\
 &= \frac{v^2}{4}(1 + k_r^2)
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

dove $v = r_o\omega$ è la velocità tangenziale. Da questa si ottiene che all'aumentare di k_r , a parità di velocità tangenziale, l'energia specifica aumenta, come illustrato in Figura 2.4.

La densità di energia, valutata come il rapporto tra l'energia accumulata ed il volume esterno del volano è esprimibile come:

$$\begin{aligned}
 E_d &= \frac{\frac{1}{2}J\omega^2}{\pi r_o^2 h} \\
 &= \frac{\frac{1}{4}m(1 + k_r^2)\omega^2}{\pi h} \\
 &= \frac{\frac{1}{4}\rho\pi(r_o^2 - r_i^2)h(1 + k_r^2)\omega^2}{\pi h} \\
 &= \frac{\frac{1}{4}\rho\pi r_o^2(1 - k_r^2)h(1 + k_r^2)\omega^2}{\pi h} \\
 &= \frac{1}{4}\rho r_o^2(1 - k_r^4)\omega^2 \\
 &= \frac{v^2}{4}\rho(1 - k_r^4)
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

Da questa si ottiene che all'aumentare di k_r , a parità di velocità tangenziale, la densità di energia decresce, come illustrato in Figura 2.5.

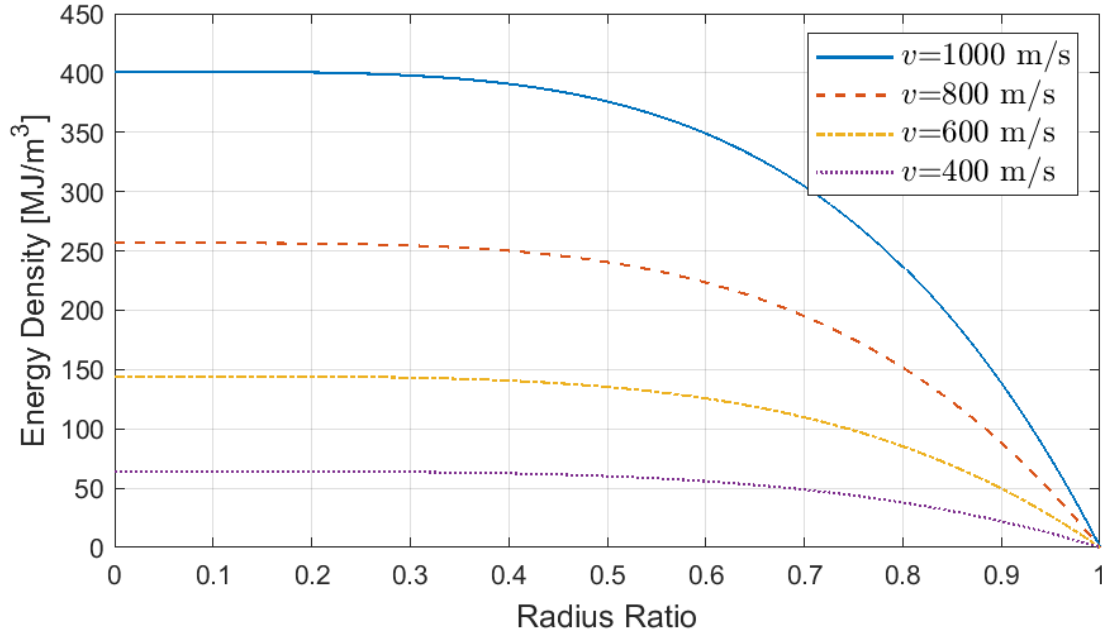


Figura 2.5: Densità di energia in funzione del rapporto tra i raggi k_r per diversi valori di velocità tangenziale, con $\rho = 1604 \text{ kg/m}^3$.

Per ricavare la velocità tangenziale massima ammissibile è possibile sfruttare la seguente uguaglianza:

$$E_s = E_{s,max}$$

$$\frac{v^2}{4}(1 + k_r^2) = K \frac{\sigma_{\theta,max}}{\rho}$$

da cui:

$$v_{max} = \sqrt{\frac{4K\sigma_{\theta,max}}{\rho(1 + k_r^2)}} \quad (2.7)$$

k_r sarà quindi un parametro di dimensionamento dal quale dipenderanno energia specifica, densità di energia e velocità tangenziale massima.

La scelta del materiale da utilizzare nella costruzione del rotore dipenderà da diversi fattori quali velocità operative, forma del volano, energia specifica e densità di energia. In linea di massima comunque nei LS-FESS si predilige l'utilizzo di materiali metallici in quanto la velocità tangenziale massima ammissibile non impone limiti restrittivi sul raggio del volano, mentre l'elevata densità permette di ridurre le dimensioni. Nei HS-FESS invece la velocità tangenziale massima ammissibile obbliga la scelta di utilizzo di materiali compositi.

2.1.2 Cuscinetti

I cuscinetti fungono da supporto per il rotore e il loro design ha l'obiettivo di ridurre le perdite e la necessità di manutenzione. Inizialmente venivano utilizzati cuscinetti meccanici, ma questi sviluppavano una coppia d'attrito eccessiva, aumentando il tasso di autoscarica, e ad alte velocità la loro durata era molto breve. Nel tempo sono state sviluppate altre tecnologie che sfruttano ad esempio un film d'olio oppure sistemi magnetici. A causa della complessità del sistema

di lubrificazione di cui necessitano per operare, l'utilizzo della tecnologia a film d'olio risulta essere molto limitato, perciò al momento ci si sta spostando sempre più verso i cuscinetti magnetici (MB - *Magnetic Bearings*). Questi permettono al rotore di ruotare senza alcun contatto fisico, eliminando le perdite dovute all'attrito, hanno capacità di carico elevate e possono lavorare ad alte velocità.

Gli MB possono essere attivi o passivi. Gli AMB (*Active Magnetic Bearing*) necessitano di un'alimentazione esterna e di un sistema di controllo, con il quale possono garantire la stabilità del supporto riducendo anche le vibrazioni del rotore. I PMB (*Passive Magnetic Bearing*) includono solamente magneti permanenti e, dal momento che sono instabili, devono essere necessariamente utilizzati in combinazione con altri tipi di cuscinetti.

Si stanno effettuando inoltre studi che mirano ad utilizzare magneti superconduttori che permettono performance superiori, ma al momento la loro applicazione è limitata dalla complessità del sistema di raffreddamento criogenico necessario al loro funzionamento [19]. Infine ulteriori tipologie sfruttano tecnologie ibride, ma questa tecnologia risulta essere ancora poco sviluppata [19].

2.1.3 Convertitore di Energia

Il convertitore di energia si interfaccia con il bus di alimentazione o la rete e trasforma l'energia elettrica in meccanica e viceversa. Esso è composto da un convertitore di potenza bidirezionale, molto spesso un inverter, che genera i segnali di tensione e corrente secondo i riferimenti forniti dal sistema di controllo, e da un'azionamento elettrico, che può agire da motore o da generatore.

La tecnologia di convertitore di potenza da utilizzare dipende direttamente dalla tipologia di macchina elettrica utilizzata tra le quali è possibile individuare:

- **PMSM** (*Permanent Magnet Synchronous Machine*): questa è la scelta più comune nell'ambito dei FESS grazie alla sua elevata efficienza [15]. Le PMSM hanno limitate perdite di rotore, dal momento che il flusso rotorico è generato dai magneti permanenti, hanno un grande densità di energia e sono adatte ad un funzionamento ad alte velocità. Di contro queste sono più costose rispetto ad altre tipologie e sono molto sensibili alla temperatura di esercizio.
- **IM** (*Induction Machine*): i punti di forza di queste macchine sono i costi ridotti e l'elevata robustezza e affidabilità. Rispetto alle PMSM però sono meno efficienti e presentano stringenti limitazioni di velocità [20].
- **SRM** (*Switched Reluctance Machine*): queste presentano caratteristiche simili alle macchine ad induzione ma possono lavorare anche ad alte velocità. Non vengono spesso utilizzate a causa della difficoltà di controllo a bassa velocità e la tecnologia non viene ancora considerata matura [19].
- **SynRM** (*Synchronous Reluctance Machine*): il principio di funzionamento è simile alle SRM ma in questo caso la distribuzione dei flussi è cosinusoidale. Il loro statore è identico a quello delle PMSM, ma il rotore è fortemente anisotropo e la presenza di magneti permanenti non è necessaria al funzionamento [16].

Tipologia	Vantaggi	Svantaggi
PMSM	elevata densità di potenza alta efficienza	costo elevato soggette a smagnetizzazione bassa robustezza elevate perdite a bassa velocità
IM	basso costo elevata robustezza struttura semplice	bassa densità di potenza bassa efficienza
SRM/SynRM	smagnetizzazione assente elevata robustezza struttura semplice	controllo complesso tecnologia non matura
BM	elevato livello di integrazione	costo elevato struttura complessa controllo complesso

Tabella 2.2: Caratteristiche principali delle principali tipologie di macchine elettriche. [19]

- **BM** (*Bearingless Machine*): queste uniscono la funzionalità di generazione della coppia con quella di supporto in una singola macchina, combinando motore e cuscinetti magnetici. Esse sono compatte e possono sfruttare i meccanismi di generazione della coppia delle tipologie precedentemente descritte [21].

Nella Tabella 2.2 è riportato in modo schematico un riassunto delle caratteristiche delle varie macchine elettriche.

La strategia di controllo generalmente utilizzata si basa su feedback dello stato di carica del dispositivo con la produzione di un riferimento di coppia da generare.

2.1.4 Componenti Ausiliari

I componenti ausiliari consentono al FESS di funzionare in modo efficiente e sicuro. Solitamente il dispositivo è inserito in un involucro che oltre a svolgere una funzione di protezione verso l'esterno in caso di malfunzionamento, permette il mantenimento di un ambiente depressurizzato grazie all'utilizzo di pompe a vuoto, riducendo le perdite dovute all'attrito con l'aria, e limita il trasferimento di eccessive vibrazioni dall'esterno all'interno, le quali potrebbero compromettere l'operatività dell'accumulatore.

Nella camera di protezione è presente anche un sistema di refrigerazione che consente una corretta evacuazione del calore generato dalla macchina elettrica.

Per questioni di sicurezza poi sono presenti dei cuscinetti meccanici che intervengono in caso di fallimento di quelli magnetici, evitando eventi potenzialmente pericolosi [19].

Nel caso le tensioni operative della macchina elettrica siano diverse da quelle del bus comune di alimentazione, è necessario l'impiego di un ulteriore converti-

tore bidirezionale di potenza che interfacci il bus con il convertitore che controlla il motore/generatore.

2.2 Dimensionamento

Come affermato nella Sezione 2.1.1 l'energia cinetica accumulata in un FESS è esprimibile come:

$$E = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (2.8)$$

dove J è il momento d'inerzia del volano e ω è la velocità angolare. L'energia massima accumulabile dipende dalla massima velocità che il rotore può raggiungere, quindi:

$$E_{max} = \frac{1}{2} J \omega_{max}^2 \quad (2.9)$$

mentre l'energia utilizzabile dipende dalla velocità minima di rotazione operativa:

$$E_a = \frac{1}{2} J (\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2) \quad (2.10)$$

Il rapporto tra l'energia utilizzabile e l'energia massima accumulabile dipende dal rapporto tra le velocità operative limite k_ω :

$$\begin{aligned} \frac{E_a}{E_{max}} &= \frac{\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2}{\omega_{max}^2} \\ &= 1 - k_\omega^2 \end{aligned} \quad (2.11)$$

dove:

$$k_\omega = \frac{\omega_{min}}{\omega_{max}} \quad (2.12)$$

Nella Figura 2.6 si nota come all'aumentare del rapporto k_ω il rapporto tra l'energia utilizzabile e l'energia massima decresce quadraticamente. Per rapporti $k_\omega = 1/3$ e $k_\omega = 1/2$ l'energia utilizzabile è rispettivamente pari all'89% e al 75% della totale.

Dal grafico si può vedere inoltre che la maggior parte dell'energia è accumulata alle alte velocità, infatti una variazione della velocità minima operativa a velocità basse crea una variazione del rapporto tra le energie meno significativa di una variazione della velocità minima operativa alle alte velocità.

La minima velocità operativa comunque è limitata principalmente dalla coppia sviluppabile dalla macchine elettrica infatti, essendo questa limitata, limita la potenza che il FESS può erogare/estrarre a basse velocità, infatti:

$$P = T \omega \quad (2.13)$$

dove T è la coppia generabile. Per garantire che il dispositivo riesca a assorbire/erogare una potenza desiderata alle basse velocità, è necessario imporre una velocità minima operativa secondo:

$$\omega_{min} = \frac{P_{max}(\omega_{min})}{T} \quad (2.14)$$

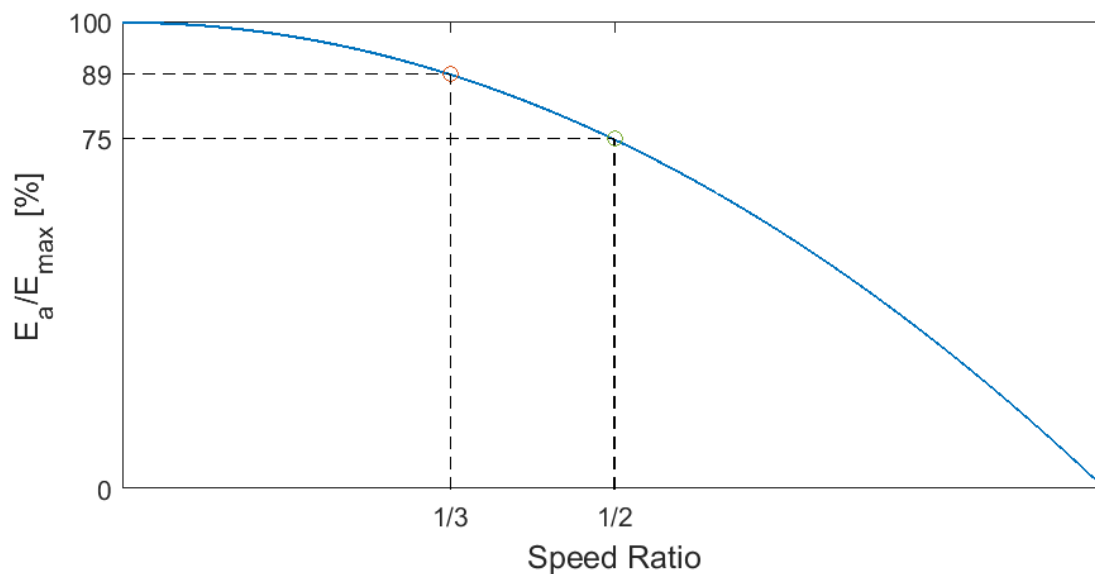


Figura 2.6: Rapporto tra l'energia utilizzabile e l'energia massima accumulabile al variare dal rapporto tra le velocità operative limite k_ω .

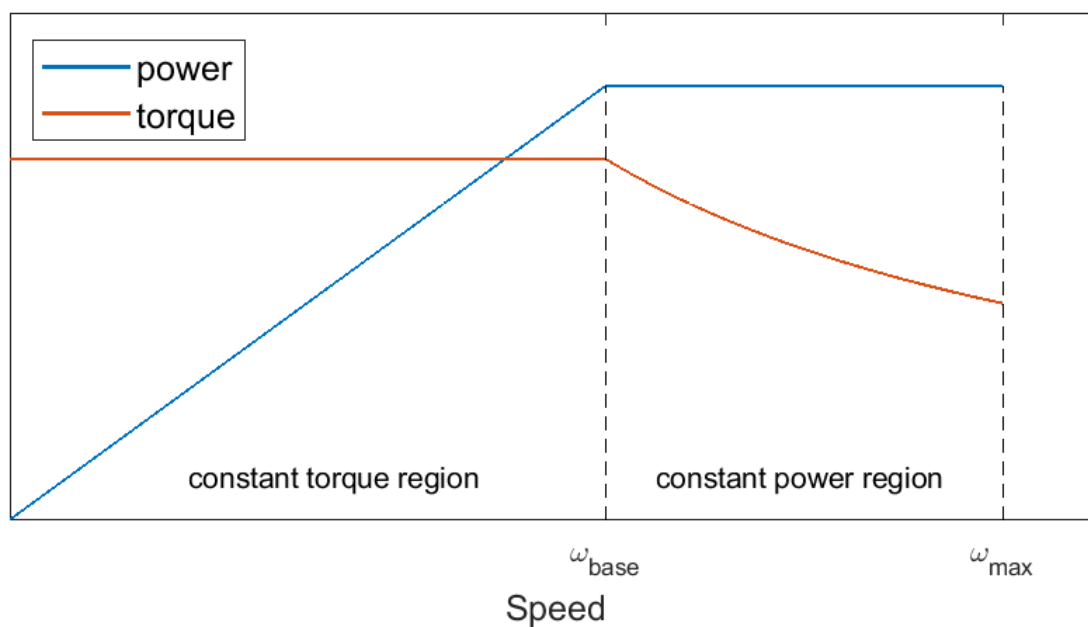


Figura 2.7: Curva di coppia e di potenza per un motore PMSM.

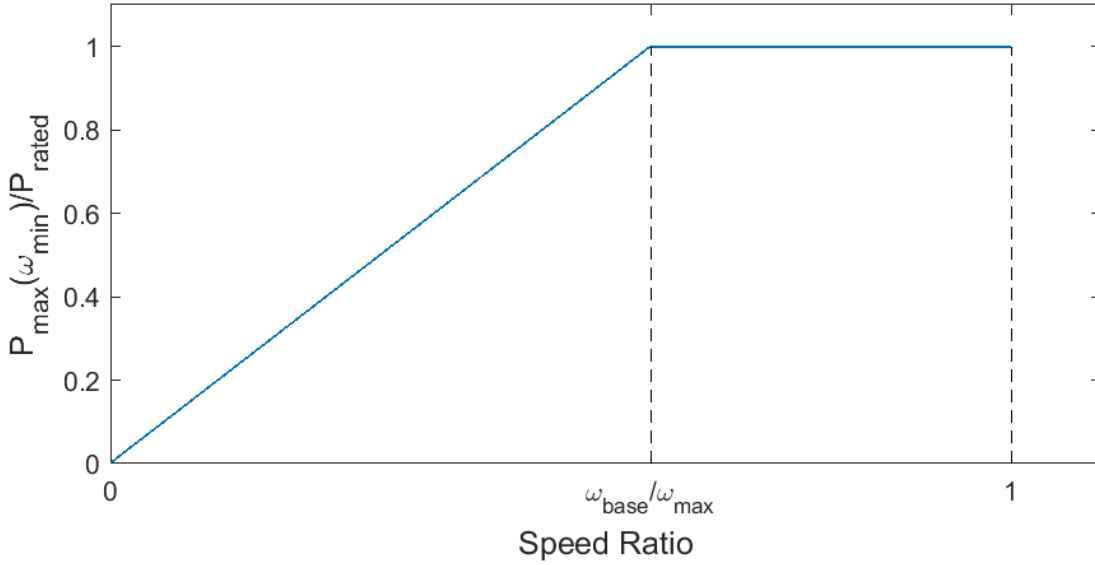


Figura 2.8: Rapporto tra la potenza massima assorbibile/erogabile alla velocità minima operativa e la potenza nominale del motore in funzione del rapporto k_ω .

Prendendo come esempio un motore PMSM, la coppia generabile è costante fino alla velocità nominale mentre, al di sopra di questa, decresce mantenendo costante la potenza assorbibile/erogabile fino al raggiungimento della velocità massima, come illustrato in Figura 2.7.

Conoscendo le velocità base ω_{base} e massima ω_{max} caratteristiche della macchina elettrica, è possibile esprimere il rapporto tra la potenza massima assorbibile/erogabile alla velocità minima operativa e la potenza nominale del motore in funzione del rapporto k_ω :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{P_{max}(\omega_{min})}{P_{rated}} = \frac{T\omega_{min}}{T\omega_{base}} = k_\omega \cdot \frac{\omega_{max}}{\omega_{base}} \quad \text{se } \omega_{min} < \omega_{base} \\ \frac{P_{max}(\omega_{min})}{P_{rated}} = 1 \quad \text{se } \omega_{min} \geq \omega_{base} \end{array} \right.$$

Nella Figura 2.8 è presentato graficamente l'andamento di questo rapporto per diversi rapporti tra ω_{max} e ω_{base} .

Questa curva caratteristica è valida in caso di cicli continuativi di sfruttamento della macchina elettrica ma in alcuni casi, soprattutto in applicazioni in cui i mezzi di trasporto seguono delle schedulazioni orarie precise è possibile, grazie al funzionamento intermittente, sfruttare la generazione di una extra-coppia senza compromettere la funzionalità del motore/generatore. Ciò porta quindi ad una potenza generabile a basse velocità maggiore di quella che ci si aspetterebbe dai valori nominali. In questi casi però il dimensionamento della macchina elettrica e delle velocità operative del FESS va effettuato conoscendo i parametri del ciclo di lavoro specifico.

Il parametro k_ω è legato inoltre alla resistenza a fatica del rotore, così come all'efficienza del convertitore di potenza e, come idea generale, in letteratura si consiglia di utilizzare un rapporto $k_\omega = 1/3$ per applicazioni a terra, mentre $k_\omega = 1/2$ per applicazioni *on-board* [19].

In sintesi conoscendo la quantità di energia necessaria e la potenza erogabile/assorbibile alla velocità minima, scegliendo k_ω si potrà ricavare la quantità l'energia totale che il volano dovrà accumulare come:

$$E_{max} = \frac{E_a}{1 - k_\omega^2} \quad (2.15)$$

e la potenza nominale richiesta per la macchina elettrica come:

$$P_{rated} = \frac{P_{max}(\omega_{min})}{k_\omega} \cdot \frac{\omega_{base}}{\omega_{max}} \quad \text{se } \omega_{min} < \omega_{base} \quad (2.16)$$

$$P_{rated} = P_{max}(\omega_{min}) \quad \text{se } \omega_{min} \geq \omega_{base} \quad (2.17)$$

Conoscendo queste quantità è possibile procedere con il dimensionamento del volano. Innanzitutto va scelto il valore ottimo del rapporto tra i raggi k_r , il quale può essere identificato, ad esempio, grazie ad una massimizzazione del rapporto dell'energia specifica e della densità di energia rispetto al caso del disco pieno ($k_r = 0$). Le quantità da massimizzare sono quindi:

$$\frac{E_s(k_r)}{E_s(0)} = (1 + k_r^2) \quad (2.18)$$

$$\frac{E_d(k_r)}{E_d(0)} = (1 - k_r^4) \quad (2.19)$$

Per massimizzare contemporaneamente questi due rapporti in funzione del parametro k_r va trovato il punto di massimo della seguente funzione obiettivo:

$$\begin{aligned} f(k_r) &= \frac{E_s(k_r)}{E_s(0)} + \frac{E_d(k_r)}{E_d(0)} \\ &= (1 + k_r^2) + (1 - k_r^4) \\ &= 2 + k_r^2 - k_r^4 \end{aligned} \quad (2.20)$$

Si calcola la derivata prima rispetto a k_r e la si eguaglia a zero:

$$\frac{d}{dk_r} f(k_r) = f'(k_r) = 2k_r - 4k_r^3 = 0 \quad (2.21)$$

da cui si ricavano le seguenti soluzioni:

$$\begin{aligned} k_{r,1} &= 0 \\ k_{r,2} &= \sqrt{\frac{1}{2}} \\ k_{r,3} &= -\sqrt{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

Considerando che $0 \leq k_r \leq 1$, la soluzione 3 non è accettabile. Si procede ora calcolando la derivata seconda della funzione per individuare la natura delle soluzioni 1 e 2:

$$\frac{d}{dk_r} f'(k_r) = f''(k_r) = 2 - 12k_r^2 \quad (2.22)$$

Il segno della derivata seconda in corrispondenza della soluzione 1 è positivo e ciò indica che si tratta di un punto di minimo locale; il segno nel caso della soluzione 2 è negativo, perciò si tratta di un punto di massimo locale. Il rapporto tra i raggi ottimale che massimizza il rapporto dell'energia specifica e della densità di energia rispetto al caso del disco pieno vale:

$$k_r = \sqrt{\frac{1}{2}} \simeq 0.707$$

Resta ora da scegliere il raggio esterno e l'altezza del volano, in modo tale da massimizzare l'energia specifica. Visto che quest'ultima dipende dalla velocità tangenziale, la quale dipende a sua volta da velocità angolare massima (già definita) e raggio esterno, è necessario ricavare la massima velocità trasversale ammissibile per la configurazione scelta in modo tale da ricavare il raggio massimo ammissibile. Per un cilindro cavo in rotazione la massima tensione circonferenziale si ha in corrispondenza del raggio interno e vale:

$$\sigma_{\theta,max} = \frac{r_{o,max}^2 \omega_{max}^2 \rho}{4} [(1 - \nu)k_r^2 + (3 + \nu)] \quad (2.23)$$

dove ν è il coefficiente di Poisson del materiale scelto. Da questa è possibile ricavare la massima velocità ammissibile:

$$v_{max} = \sqrt{r_{o,max}^2 \omega_{max}^2} = \sqrt{\frac{4\sigma_{\theta,max}}{\rho} \cdot \frac{1}{[(1 - \nu)k_r^2 + (3 + \nu)]}} \quad (2.24)$$

Conoscendo la velocità angolare massima ω_{max} è quindi ora possibile trovare il raggio r_o che massimizza l'energia specifica:

$$r_o = \zeta r_{o,max} = \zeta \frac{v_{max}}{\omega_{max}} \quad (2.25)$$

dove ζ è un coefficiente di sicurezza.

Ora dall'espressione dell'energia utilizzabile necessaria E_a :

$$\begin{aligned} E_a &= \frac{1}{2} J \omega_{max}^2 (1 - k_\omega^2) \\ &= \frac{1}{4} \rho V r_o^2 (1 + k_r^2) \omega_{max}^2 (1 - k_\omega^2) \end{aligned} \quad (2.26)$$

si ricavi il volume V del volano:

$$V = \frac{4E_{disp}}{\rho r_o^2 (1 + k_r^2) \omega_{max}^2 (1 - k_\omega^2)} \quad (2.27)$$

e sapendo che:

$$V = \pi r_o^2 (1 - k_r^2) h \quad (2.28)$$

si trova l'altezza che dovrà avere il volano:

$$h = \frac{V}{\pi r_o^2 (1 - k_r^2)} \quad (2.29)$$

2.3 Sicurezza

L'obiettivo di avere un sistema di contenimento leggero e ridotto che massimizzi l'energia specifica del FESS si scontra con la necessità che questo sia in grado di sopportare grandi pressioni radiali in caso di rottura del volano, rendendone la progettazione estremamente complessa.

La modalità di rottura dei rotori costituiti da materiali compositi è molto differente rispetto a quella dei volani formati da materiali metallici. Quest'ultimi infatti tendono a rompersi in grossi frammenti che possono penetrare la struttura di contenimento mentre gli altri, disintegrandosi in pezzi più piccoli, possono trasferire un'enorme quantità di energia in un breve periodo di tempo sulle pareti del contenitore. Le particelle generatisi a seguito di una rottura infatti tenderanno a ruotare all'interno della camera, comportandosi come un fluido che scorre su una superficie curva, sforzandola radialmente, circonferenzialmente e assialmente [18].

Il rischio, calcolato come la probabilità che un particolare problema si verifichi moltiplicato per l'entità della conseguenza, deve essere ridotto al minimo per poter far accettare l'utilizzo di questa tecnologia al pubblico. Chi progetta un FESS deve tenere conto di tutti i possibili malfunzionamenti, cercano di ridurre le possibilità che questi si verifichino e soprattutto limitare le conseguenze ad essi collegate. Alcuni approcci di progettazione sono presentati di seguito [18]:

- **operare lontani dagli stress massimi ammissibili:** questo approccio mira a sviluppare un design che implichi un considerevole margine di sicurezza tra gli stress operativi e gli stress massimi ammissibili (circa 1:4 [22]), tenendo in considerazione anche la rottura a fatica. Ampi margini portano ad una vita del rotore più lunga, riducendone al minimo le possibilità di rottura distruttiva. Alla luce di ciò è possibile progettare un sistema di contenimento resistente ad una parziale distruzione del volano invece che ad una completa, riuscendo a limitare pesi e volumi.
- **progettare un rotore che si distrugga incrementalmente:** questa strategia mira alla costruzione di un rotore che, in caso di rottura, si danneggi in modo progressivo. Così facendo il rilascio di energia avviene in modo progressivo e ciò permette la progettazione di un sistema di contenimento resistenti a sforzi minori.
- **utilizzare strumenti che controllino l'integrità del rotore:** l'utilizzo di sensori che monitorano costantemente il comportamento del volano rende possibile l'identificazione di un potenziale malfunzionamento prima che esso si verifichi in modo esplicito. Ciò apre la possibilità di fermare il dispositivo prima che si verifichino problemi di grave entità.

Se combinati opportunamente questi approcci permettono di ridurre i rischi legati ai FESS e possono portare ad un design che sia al contempo sicuro, leggero e poco ingombrante.

Capitolo 3

Sistema di Trasporto

In questo capitolo verrà presentato il layout del sistema nel quale si vuole implementare uno schema di controllo centralizzato. In seguito verrà analizzato il principio di funzionamento.

3.1 Layout

In linea generale il sistema è composto da 5 componenti principali:

- **carico** (*load*): rappresenta il sistema di trazione del mezzo di trasporto
- **accumulatore di energia** (*FESS*): dispositivo in cui viene accumulata l'energia rigenerativa sotto forma di energia cinetica
- **bus di alimentazione** (*power bus*): interfaccia carico e/o FESS con l'intero sistema
- **convertitore di rete** (*grid converter*): interfaccia la rete di alimentazione con il bus di alimentazione
- **sorgente di alimentazione** (*power source*): fornisce energia all'intero sistema.

Il layout varia leggermente per applicazioni con ESS *on-board* oppure *wayside*, ma i componenti costitutivi rimangono gli stessi. Nel primo caso carico e FESS sono interfacciati allo stesso bus di alimentazione che è situato a bordo del mezzo di trasporto, mentre nel secondo caso carico e FESS sono interfacciati a due differenti bus, il primo posto a bordo e l'altro a terra. Nelle Figure 3.1 e 3.2 è possibile sono evidenziate le relazioni bidirezionali di potenza tra i componenti, rispettivamente nella modalità di accumulo *on-board* e *wayside*.

3.1.1 Carico

Il carico rappresenta il sistema di trazione del mezzo di trasporto per cui, in prima approssimazione, include un motore, un convertitore di potenza, un sistema di controllo e una rappresentazione della dinamica del veicolo.

A partire da un riferimento di velocità, grazie ad un feedback basato sulla misura della velocità attuale, il controllore genera i riferimenti di tensione con

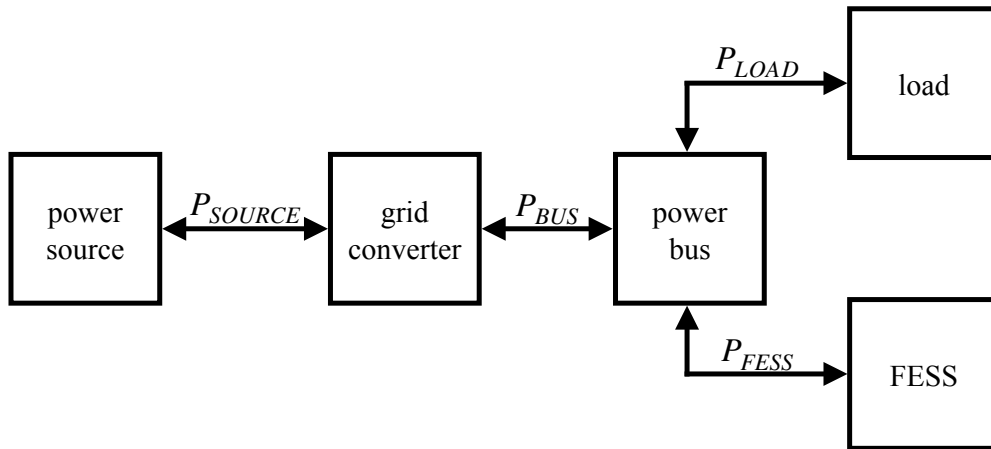


Figura 3.1: Layout del sistema con accumulo nella modalità *on-board*.

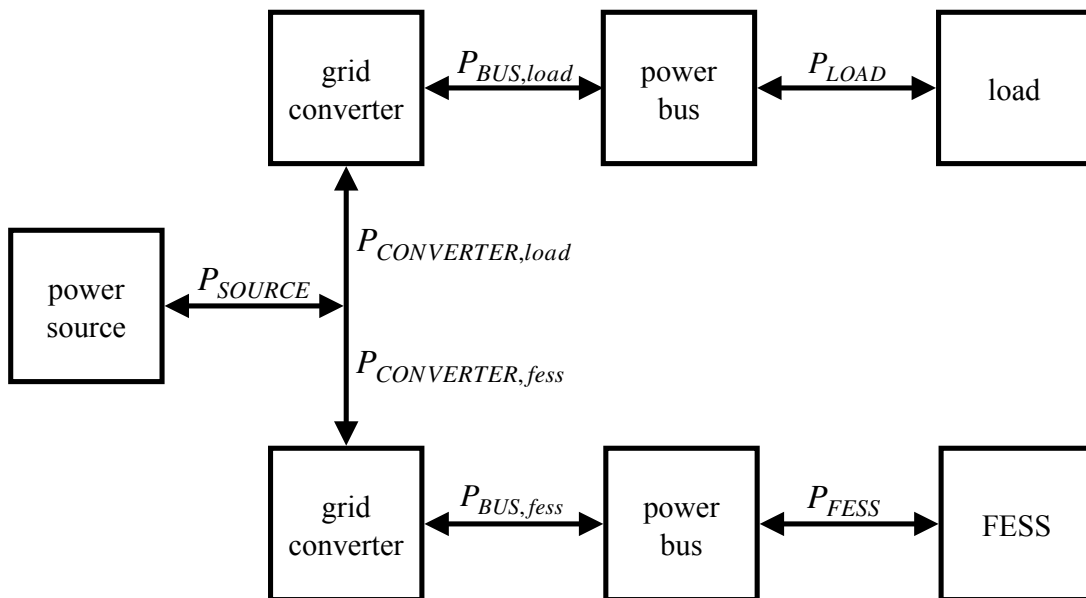


Figura 3.2: Layout del sistema con accumulo nella modalità *wayside*.

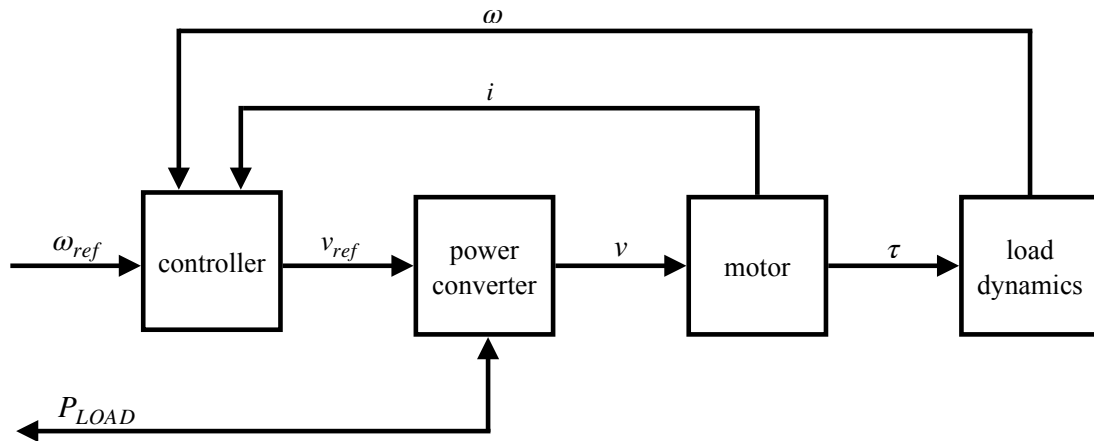


Figura 3.3: Layout del carico.

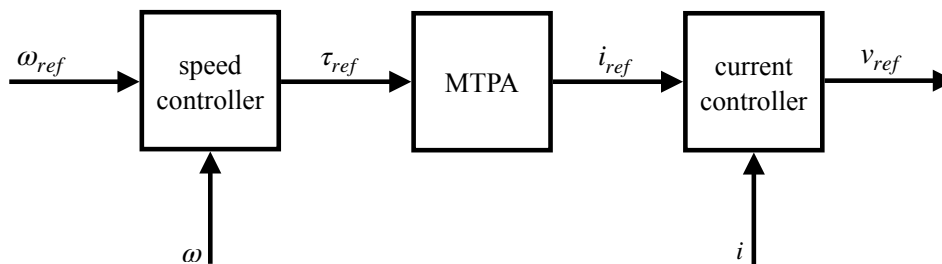


Figura 3.4: Layout del controllore del carico.

i quali alimentare il motore. Questi riferimenti vengono passati al convertitore di potenza che prelevando energia dal bus alimenta il motore. Il motore genera quindi una coppia che modifica la velocità del mezzo di trasporto in relazione alle sue caratteristiche dinamiche. In Figura 3.3 è illustrata una rappresentazione schematica del layout del carico.

Il controllore di Figura 3.4 ha lo scopo di regolare la velocità del mezzo di trasporto seguendo un profilo imposto dall'esterno ed è composto da due controllori annidati. Il primo si occupa, a partire dall'errore di velocità, di generare un riferimento di coppia. Questo viene trasformato in un riferimento di corrente grazie ad un algoritmo che permette di massimizzare la coppia generata dal motore a parità di corrente (MTPA - *Maximum Torque Per Ampere*), garantendo una maggiore efficienza energetica. Il secondo controllore, a partire dall'errore di corrente, genera un riferimento di tensione che viene inviato al convertitore di potenza.

3.1.2 Flywheel Energy Storage System

Il FESS, come si può vedere in Figura 3.5, ha un layout del tutto simile a quello del carico, ma si differenzia a livello di controllo.

Il controllore, il cui layout è illustrato in Figura 3.6, risulta essere più complesso, infatti esso è suddiviso in due componenti:

- **feedback:** si occupa di regolare lo stato di carica (SoC - *State of Charge*) del dispositivo, mantenendolo all'interno dei limiti operativi di progetto ed è composta da due regolatori annidati. Quello più esterno, basandosi su

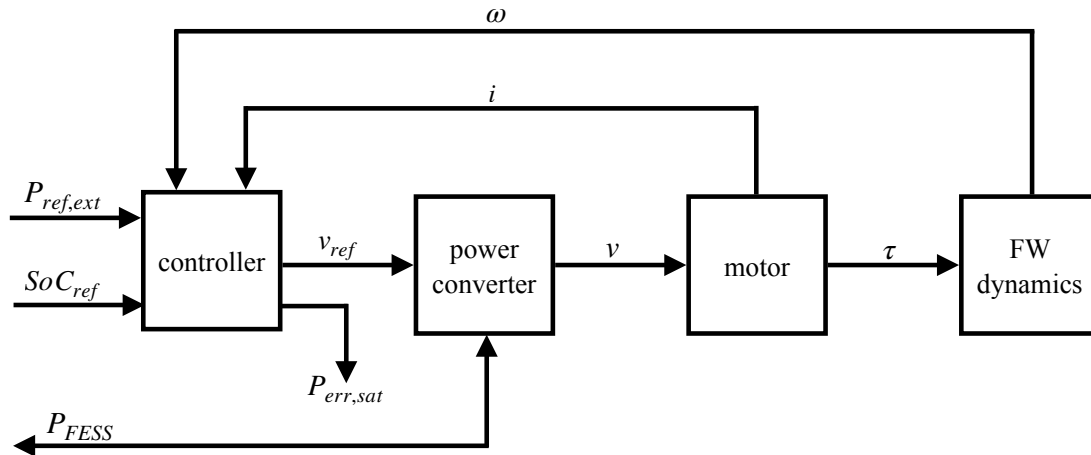


Figura 3.5: Layout del FESS.

una misura della velocità angolare, valuta lo stato di carica e, a seguito di un confronto con il riferimento, genera una richiesta di coppia.

- **feed-forward:** ha il compito di controllare i processi di carica e scarica e, sfruttando la conoscenza delle potenze richieste dagli altri dispositivi del sistema, genera un'ulteriore richiesta di coppia.

I due riferimenti di coppia vengono sommati e convertiti in un riferimento di corrente, il quale viene dato in ingresso al regolatore interno della catena in feedback, il quale genera un riferimento di tensione per il convertitore di potenza.

L'implementazione della componente in feed-forward del controllore è differente se l'accumulo avviene a bordo o a terra. Nel primo caso è possibile sfruttare il riferimento di potenza inviato al carico per far erogare/assorbire contemporaneamente la corrispondente potenza all'accumulatore. Nel secondo caso invece la gestione dei flussi di potenza è complicata dal fatto che ci sono molti utilizzatori/generatori, il cui coordinamento è talvolta aleatorio e quindi impossibile da prevedere. Si sfrutta perciò il riferimento di potenza in uscita dal controllore della sorgente di alimentazione principale, anche se questo non permette una compensazione istantanea tra le potenze di carico e FESS, in quanto questo è ricavato a partire da un errore di tensione che si verifica quando le potenze sono già sbilanciate.

A causa delle limitazioni sulla potenza che il FESS può erogare/assorbire, non sempre riesce a seguire perfettamente il riferimento imposto. La differenza tra il riferimento e la potenza che effettivamente viene fornita dall'accumulatore viene comunicata dal controllore al convertitore di rete oppure alla sorgente di alimentazione, rispettivamente se l'accumulo avviene *on-board* oppure *wayside*, e verrà usata come segnale di feed-forward per velocizzare le operazioni di controllo di questi dispositivi.

3.1.3 Bus di Alimentazione

Il bus di alimentazione è composto da un banco di condensatori che ha il compito di stabilizzare la tensione in ingresso al convertitore di potenza dei motori e viene dimensionato sulla base dell'ampiezza del massimo errore di tensione, che è direttamente legato ai tempi di risposta del FESS e del convertitore di rete.

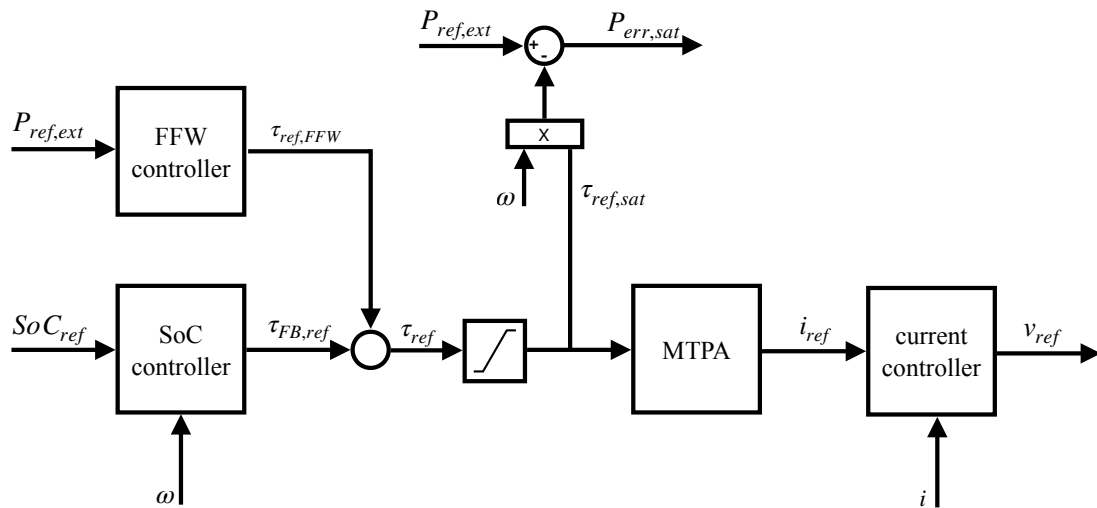


Figura 3.6: Layout del controllore del FESS.

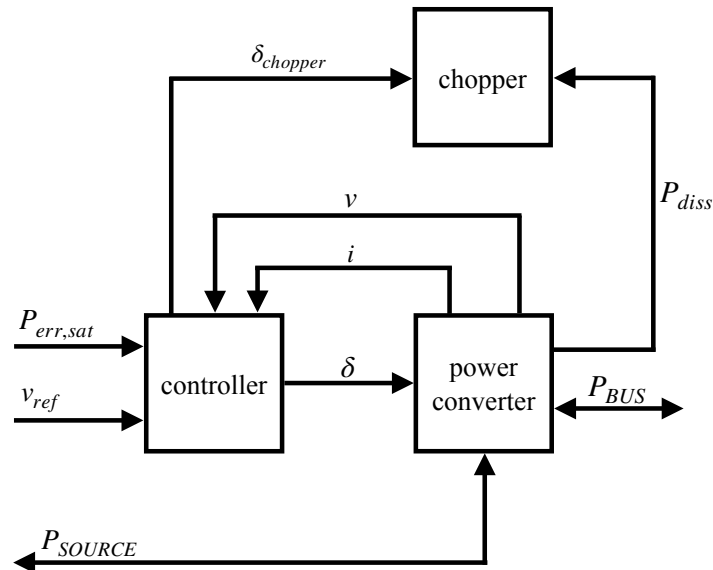


Figura 3.7: Layout del convertitore di rete.

La sua tensione può avere un valore diverso rispetto a quello della sorgente di alimentazione principale e viene mantenuta stabile dal convertitore di potenza di rete. Nel caso di accumulo dell'energia *on-board* il bus è comune e si interfaccia con i convertitori di potenza del carico e del FESS mentre, nel caso dell'accumulo *wayside* il bus del carico e quello del FESS sono diversi, perciò possono operare a tensioni differenti, ampliando le possibilità di scelta di convertitori e motori.

3.1.4 Convertitore di Rete

Il convertitore di rete interfaccia la rete con il bus di alimentazione e viene controllato in modo tale da mantenere la tensione di quest'ultimo pari ad un valore di riferimento. Esso è composto da un controllore e da un convertitore di potenza, come illustrato in Figura 3.7.

Il controllore, il cui layout è illustrato in Figura 3.8, a partire da un errore tra la tensione desiderata e quella del bus, genera un riferimento di corrente. Nel caso

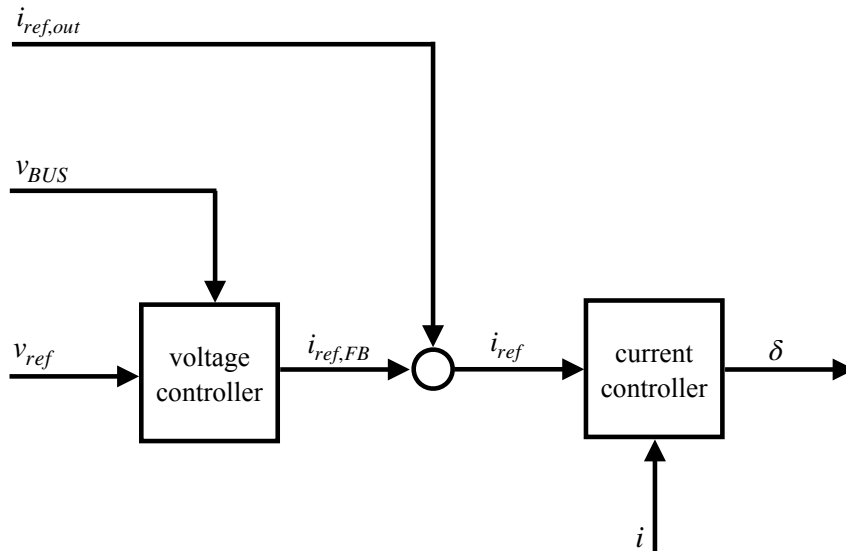


Figura 3.8: Layout del controllore del convertitore di rete.

di accumulo *on-board* il riferimento di corrente viene addizionato di un valore pari al rapporto tra l'errore di potenza dovuto alla saturazione del FESS e la tensione del bus, in modo tale che la somma tra la potenza erogata/assorbita da FESS e dal convertitore sia pari al riferimento che viene fornito in feed-forward al FESS. Il riferimento viene poi dato in ingresso ad un controllore che, a partire dall'errore di corrente, genera il segnale che controlla il convertitore di potenza.

Nel caso di accumulo *wayside* il riferimento di corrente viene addizionato di un valore pari al rapporto tra la potenza elettrica assorbita/erogata dal FESS e la tensione del bus. Il controllore si occupa inoltre di monitorare la tensione nel punto di collegamento del convertitore alla rete e, nel caso questa superasse un valore limite superiore, interrompe il flusso di energia rigenerativa verso la rete e attiva un sistema che la va a dissipare in un banco di resistenze (*chopper*). Questo consente di evitare che, in caso di rete poco ricettiva, si generi una sovratensione eccessiva in una zona, rischiando di danneggiare l'infrastruttura di distribuzione dell'energia.

3.1.5 Sorgente di Alimentazione

La sorgente di alimentazione fornisce energia all'intero sistema ed è composta da un generatore di energia, un banco di condensatori e da un controllore. Inoltre, principalmente nel caso di generatore unidirezionale, è presente un sistema di dissipazione dell'energia in eccesso che si attiva quando la tensione del banco di condensatori supera un valore di soglia massimo. La Figura 3.9 illustra schematicamente la struttura della sorgente di alimentazione.

Il controllore mira a mantenere costante la tensione sul banco di condensatori, regolando la potenza erogata dal generatore. A partire dall'errore tra la tensione desiderata e quella misurata viene generato un riferimento di corrente che viene inviato al generatore, al sistema di dissipazione oppure al FESS nel caso di accumulo *wayside*.

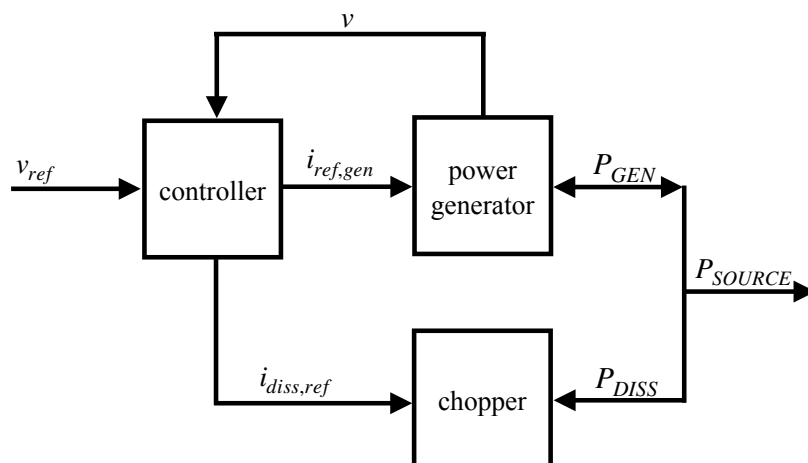


Figura 3.9: Layout della sorgente di alimentazione.

Dispositivo	On-board	Wayside
FESS	<ul style="list-style-type: none"> • controllo combinato con il carico • errore di potenza gestito dal convertitore di rete 	<ul style="list-style-type: none"> • controllo combinato con la sorgente • errore di potenza gestito dalla sorgente di alimentazione
Bus	<ul style="list-style-type: none"> • comune 	<ul style="list-style-type: none"> • due distinti
Sorgente	<ul style="list-style-type: none"> • controllo indipendente 	<ul style="list-style-type: none"> • controllo combinato con il FESS

Tabella 3.1: Differenze implementative del sistema per le diverse modalità di accumulo.

La Tabella 3.1 riporta un riassunto delle principali differenze implementative del sistema nel caso di accumulo *on-board* e *wayside*.

3.2 Principio di Funzionamento

3.2.1 Wayside

Nella modalità di accumulo *wayside* numerosi fattori incidono sul comportamento del sistema quali, ad esempio, la frequenza di passaggio ed il numero di mezzi. L'erogazione di potenza da parte del FESS e della sorgente dipende dalle caratteristiche operative specifiche del sistema di trasporto, perciò risulta complesso effettuare una trattazione analitica quantitativa delle grandezze in gioco. In ogni caso, sapendo che l'erogazione/assorbimento di energia da parte del FESS segue il riferimento generato dal controllore di tensione della sorgente di alimentazione, valutando:

$$P_{tot} = \sum_i [P_{CONVERTER,load_i}] + P_{trans} \quad (3.1)$$

dove $P_{CONVERTER,load_i}$ è la potenza assorbita dell'*i*-esimo mezzo e P_{trans} indica la sommatoria delle perdite di trasmissione, intese nel tratto di rete di competenza

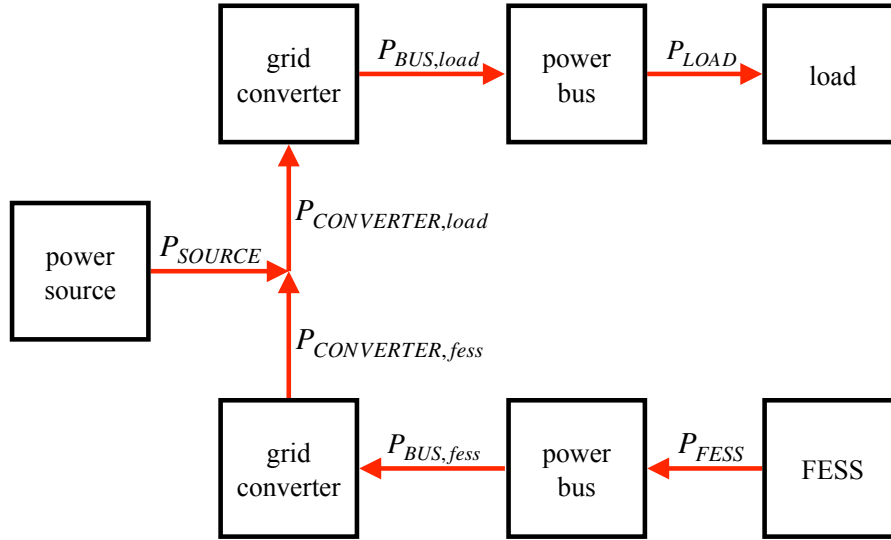


Figura 3.10: Riferimenti dei flussi di potenza nella modalità di accumulo *wayside*.

della sorgente di alimentazione, si possono distinguere 3 scenari. Considerando le convenzioni di segno di Figura 3.10:

- $P_{tot} = 0$: volendo fare in modo che la velocità del FESS vari solo in base all'energia elettrica erogata/assorbita e non a causa degli attriti interni, questo viene comandato con un riferimento coppia uguale e opposta a quella causata dagli attriti e l'energia viene fornita dalla sorgente di alimentazione, quindi $P_{SOURCE} = -P_{CONVERTER,fess}$
- $P_{tot} > 0$: la tensione della sorgente di alimentazione tenderà a scendere. Per mantenerla costante, la sorgente e il FESS insieme devono erogare potenza, quindi $P_{SOURCE} + P_{CONVERTER,fess} = P_{tot}$
- $P_{tot} < 0$: allora la tensione della sorgente di alimentazione tenderà a salire. Per mantenerla costante deve essere assorbita potenza da parte dell'accumulatore, quindi $P_{CONVERTER,fess} = P_{tot}$.

Essendo P_{tot} dipendente dalle condizioni della rete, dalla distanza reciproca tra i mezzi e dalla distanza di questi dalla sorgente di alimentazione, non è possibile valutare le potenze scambiate dal FESS e quindi anche dalla sorgente di alimentazione se non con una simulazione che tenga conto di tutte le variabili del sistema.

3.2.2 On-board

Nel caso di accumulo *on-board* c'è una relazione diretta tra il FESS e il carico, quindi l'operatività dell'accumulatore dipenderà dal comportamento del mezzo di trasporto. Si valuterà di seguito il funzionamento del sistema nelle fasi di accelerazione, decelerazione e di percorrenza a velocità costante.

Accelerazione

Durante la fase di accelerazione l'energia accumulata nel FESS viene fornita al carico seguendo il riferimento di potenza richiesta da questo. Come nel caso

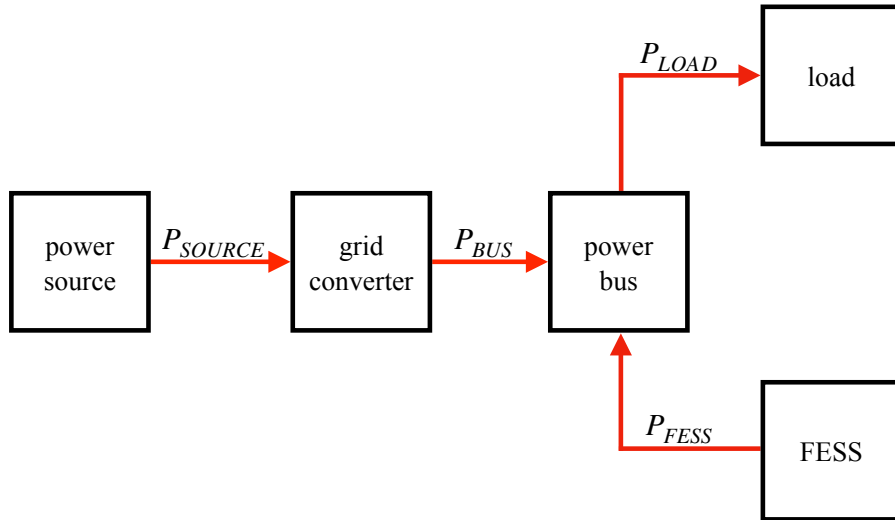


Figura 3.11: Flussi di potenza nella modalità di accumulo *on-board* durante la fase di accelerazione.

wayside, volendo eliminare l'effetto degli attriti interni, l'accumulatore viene comandato sottraendo alla richiesta del carico una coppia uguale e opposta a quella causata dagli attriti. La potenza fornita dal FESS vale quindi:

$$P_{FESS} = P_{acc} + P_{joule,load} - P_{fric,fess} \quad (3.2)$$

dove P_{acc} è la potenza meccanica necessaria ad accelerare il carico, $P_{joule,load}$ è la potenza dissipata per effetto Joule dal carico e $P_{fric,fess}$ è la potenza dissipata per gli attriti interni del FESS.

La potenza erogata dalla sorgente invece vale:

$$P_{SOURCE} = P_{fric,fess} + P_{trans} \quad (3.3)$$

La Figura 3.11 evidenzia gli scambi di potenza tra i vari componenti del sistema durante la fase di accelerazione.

Decelerazione

Durante la fase di decelerazione l'energia rigenerativa del carico viene immagazzinata nel FESS, in modo opposto a quanto avviene durante l'accelerazione. L'energia recuperabile è sicuramente minore di quella fornita durante l'accelerazione a causa di due principali motivi:

- l'attrito che durante l'accelerazione deve essere vinto, durante la frenata "aiuta" il motore a rallentare il mezzo, per cui la potenza necessaria ad eseguire la frenata è minore
- una parte dell'energia recuperata viene dispersa per effetto Joule sulle resistenze della macchina elettrica.

La potenza assorbita dal FESS vale quindi:

$$P_{FESS} = P_{dec} - P_{joule,load} - P_{fric,fess} \quad (3.4)$$

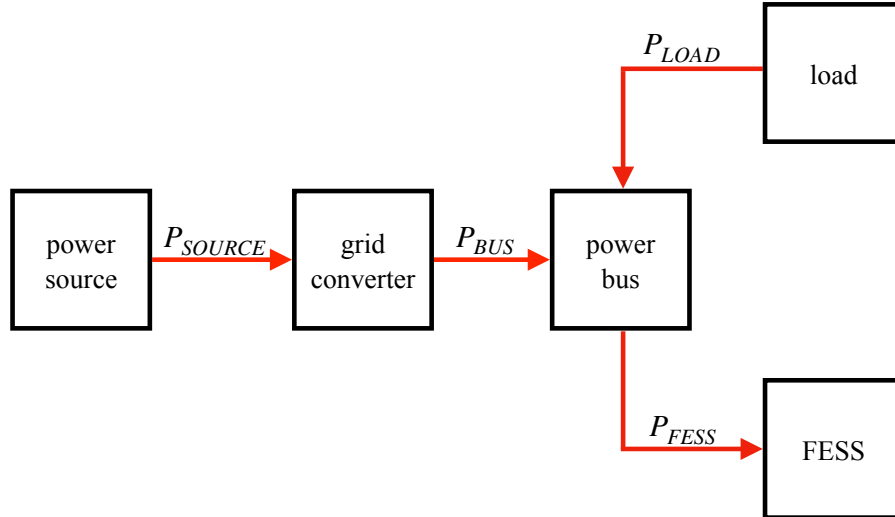


Figura 3.12: Flussi di potenza nella modalità di accumulo *on-board* durante la fase di decelerazione.

dove P_{dec} è la potenza meccanica necessaria a decelerare il carico. La potenza erogata dalla sorgente invece vale come in precedenza:

$$P_{SOURCE} = P_{fric,fess} + P_{trans} \quad (3.5)$$

La Figura 3.12 evidenzia gli scambi di potenza tra i vari componenti del sistema durante la fase di decelerazione.

Funzionamento a Regime

Quando il mezzo sta funzionando a regime è possibile ripristinare le condizioni operative del FESS, preparandolo per la fase successiva, interagendo con la sorgente di alimentazione. Questa fornisce contemporaneamente energia al carico e al FESS in modo tale da compensare l'effetto degli attriti e mantenerli ad una velocità costante. La potenza assorbita dal FESS è pari a:

$$P_{FESS} = P_{fric,fess} + P_{SoC} \quad (3.6)$$

dove P_{SoC} è la potenza richiesta dal controllore dello stato di carica per riportare l'accumulatore alle condizioni ottimali di funzionamento, preparandolo per la fase successiva. La potenza erogata della sorgente di alimentazione invece è pari a:

$$P_{SOURCE} = P_{fric,load} + P_{FESS} \quad (3.7)$$

La Figura 3.13 evidenzia gli scambi di potenza tra i vari componenti del sistema quando il mezzo sta viaggiando a velocità costante.

3.2.3 Considerazioni

Nei sistemi reali le potenze dissipate non sono perfettamente conoscibili, in quanto variano in relazione alle condizioni di funzionamento.

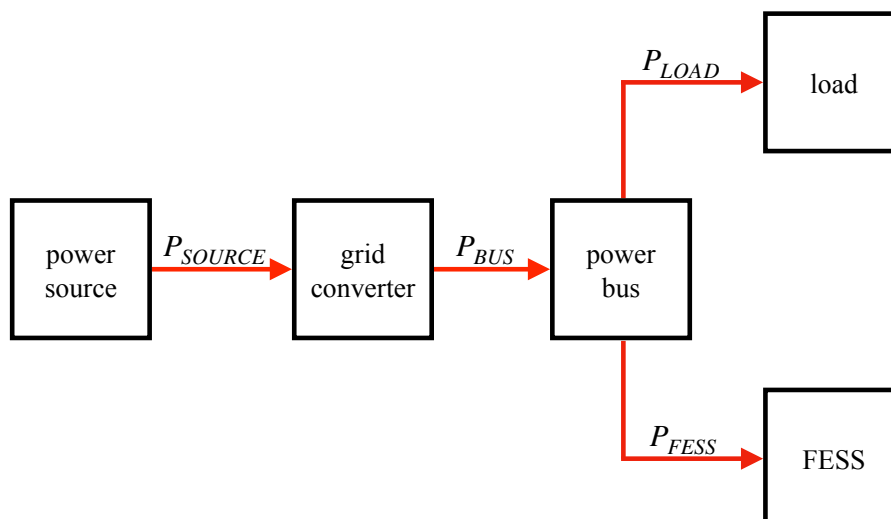


Figura 3.13: Flussi di potenza nella modalità di accumulo *on-board* durante la fase di funzionamento a regime.

Le potenze dissipate per effetto Joule nei motori elettrici sono comunque stimabili approssimativamente considerando i parametri nominali come:

$$P_{joule} = \sum_j R i_j^2 \quad (3.8)$$

dove R è la resistenza di fase nominale e i_j è la corrente del motore che scorre nella j -esima fase.

Le potenze dissipate a causa degli attriti del FESS possono essere considerate note con un elevato grado di sicurezza se si presume di effettuare una identificazione parametrica del dispositivo prima della messa in servizio.

Le potenze dissipate a causa degli attriti del veicolo non sono conoscibili in quanto variano continuamente in relazione a fattori esterni. Dal momento che è necessario conoscerle per effettuare l'azione di controllo in feed-forward è possibile pensare di utilizzare tecniche di stima basate sulle grandezze fisiche misurabili del mezzo. A titolo di esempio un'idea potrebbe essere quella di utilizzare un *disturbance observer* che stimi la coppia di attrito equivalente sfruttando la conoscenza dalla misura della velocità del veicolo e della coppia di riferimento comandata.

Anche le perdite di trasmissione sulla rete P_{trans} non sono prevedibili in quanto dipendono dall'effetto complessivo di fattori quali numero di treni nella rete e tensione di alimentazione al punto di contatto. In ogni caso la conoscenza di tale quantità non è critica ai fini del controllo e si può pensare di compensare questi disturbi grazie all'utilizzo di controllori con retroazione.

Capitolo 4

Schema di Controllo

In questo capitolo verrà presentato lo schema di controllo del sistema di trazione elettrica con accumulatore energetico. Ogni componente costitutivo del sistema verrà analizzato nel dettaglio in modo tale da fornire una possibile strategia di controllo.

Lo studio del sistema seguirà l'ordine di presentazione del Capitolo 3.

4.1 Carico

4.1.1 Dinamica Meccanica

Un veicolo che si muove su una pavimentazione stradale o su rotaie è soggetto a forze attive F , di trazione o di frenatura che sono generate dal motore, e a forze passive R , che si oppongono a quelle attive. Le forze passive che agiscono sul mezzo vengono spesso espresse in rapporto alla peso del mezzo e possono essere divise in:

- Forze ordinarie: sono sempre presenti durante il moto e dipendono dalla velocità del mezzo
 - resistenza al rotolamento e degli organi meccanici
 - resistenza aerodinamica
- Forze accidentali: si presentano in particolari condizioni e sono legate all'inerzia del veicolo
 - resistenza alle variazioni di velocità
 - resistenza alla variazione di direzione
 - resistenza alla variazione di pendenza

Per semplificare la trattazione si è deciso di considerare tutte le forze passive ordinarie mentre, tra quelle accidentali, tenere conto solamente di quelle legate alla variazione di velocità.

Mezzo	a	b	c	α
autovettura	17.5	0.024	0.0026	0.2
autocarro	20.9	1.400	0.0052	1.1
treno	2.5	0.001	0.0003	0.1
metropolitana	3.2	0.004	0.0004	0.1

Tabella 4.1: Coefficienti per il calcolo delle forze passive. [23]

Resistenza al rotolamento e degli organi meccanici

Le forze di resistenza al rotolamento hanno luogo a causa della deformabilità delle superfici di contatto e crescono all'aumentare dell'area d'impronta. In prima approssimazione la forza di resistenza al rotolamento specifica vale:

$$r_r = a + b \cdot v \left[\frac{N}{kN} \right] \quad (4.1)$$

dove v è la velocità del mezzo in [km/h], mentre a e b sono coefficienti che dipendono principalmente dalla tipologia di veicolo, come presentato in Tabella 4.1.

Resistenza aerodinamica

Le forze di resistenza aerodinamica sono causate dall'attrito viscoso tra il mezzo e l'aria in cui si muove. In prima approssimazione la forza di resistenza aerodinamica specifica vale:

$$r_a = c \cdot v^2 \left[\frac{N}{kN} \right] \quad (4.2)$$

Il coefficiente c dipende dalla tipologia di veicolo e in Tabella 4.1 vengono presentati alcuni valori tipici.

Resistenza alle variazioni di velocità

Le forze di resistenza alle variazioni di velocità sono legate all'inerzia del veicolo e alla presenza di numerose masse rotanti. Approssimando la forza di resistenza alle variazioni di velocità specifica vale:

$$r_v = \frac{1000(1 + \alpha)}{3.6 \cdot g} \cdot \frac{dv}{dt} = k \cdot \frac{dv}{dt} \left[\frac{N}{kN} \right] \quad (4.3)$$

dove g è l'accelerazione gravitazionale e α è un coefficiente che tiene conto dell'inerzia delle masse rotanti (vedi Tabella 4.1).

Resistenza globale

L'effetto complessivo delle forze di resistenza, in rapporto al peso del mezzo, può essere approssimato come:

$$r_g = a + b \cdot v + c \cdot v^2 + k \cdot \frac{dv}{dt} \left[\frac{N}{kN} \right] \quad (4.4)$$

La forza di resistenza globale che si oppone alle forze attive vale quindi:

$$R = \frac{mg}{1000} \cdot r_g \quad (4.5)$$

dove m è la massa complessiva del mezzo.

Uguagliando forze attive e passive si ottiene quindi:

$$F = \frac{mg}{1000} \cdot \left[a + b \cdot v + c \cdot v^2 + k \cdot \frac{dv}{dt} \right] \quad (4.6)$$

Sapendo inoltre che:

$$F \cdot r = \tau_L \cdot t_r \quad (4.7)$$

dove τ_L è la coppia di carico del mezzo e t_r è il rapporto di trasmissione tra motore e ruote che vale:

$$t_r = \frac{\omega}{\omega_r} \quad (4.8)$$

dove ω_r è la velocità angolare della ruota, si può esprimere τ_L in funzione di F

$$\tau_L = F \cdot \frac{r}{t_r} \quad (4.9)$$

Modello meccanico

L'effetto della coppia prodotta dalla macchina elettrica sul mezzo di trasporto dipende dalle caratteristiche meccaniche del motore elettrico, dell'organo di trasmissione e del veicolo stesso ed è esprimibile con:

$$\tau = \tau_M + \tau_L \quad (4.10)$$

dove τ è la coppia prodotta dalla macchina elettrica, τ_M rappresenta la coppia di carico del motore e τ_L rappresenta la coppia di carico del mezzo. Sapendo che:

$$\tau_M = J_M \frac{d\omega}{dt} + B_M \omega \quad (4.11)$$

dove J_M è l'inerzia e B_M è il coefficiente di attrito viscoso del motore e che:

$$\tau_L = \frac{mg}{1000} \cdot \frac{r}{t_r} \cdot \left[a + b \cdot \frac{3.6r}{t_r} \cdot \omega + c \cdot \left(\frac{3.6r}{t_r} \right)^2 \cdot \omega^2 + k \cdot \frac{3.6r}{t_r} \cdot \frac{d\omega}{dt} \right] \quad (4.12)$$

$$= \Gamma_1 + \Gamma_2 \omega + \Gamma_3 \omega^2 + \Gamma_4 \frac{d\omega}{dt} \quad (4.13)$$

ottenuta dalle (4.6) e (4.9) sostituendo:

$$v = \frac{3.6r\omega}{t_r} \quad (4.14)$$

si ottiene:

$$\tau = \Gamma_1 + (\Gamma_2 + B_M)\omega + \Gamma_3 \omega^2 + (\Gamma_4 + J_M) \frac{d\omega}{dt} \quad (4.15)$$

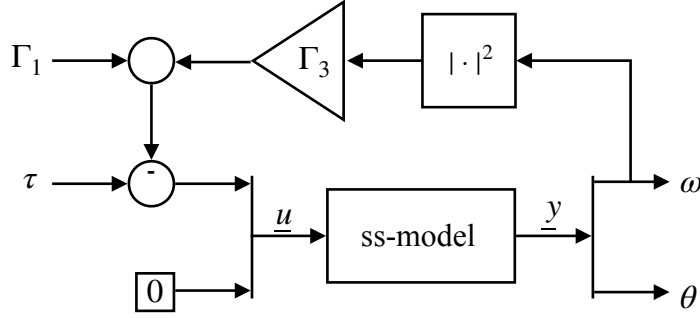


Figura 4.1: Implementazione in Simulink del modello meccanico del motore accoppiato al carico.

Si può procedere quindi ricavando il modello in spazio di stato del motore accoppiato al veicolo:

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{x}}{dt} = \begin{bmatrix} -\frac{\Gamma_2 + B_M}{\Gamma_4 + J_M} & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} \frac{1}{\Gamma_4 + J_M} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{x} \end{cases}$$

dove \mathbf{x} è il vettore di stato:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \omega \\ \theta \end{bmatrix}$$

\mathbf{u} è il vettore degli ingressi:

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \tau - \Gamma_1 - \omega^2 \Gamma_3 \\ 0 \end{bmatrix}$$

e \mathbf{y} è il vettore delle uscite:

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \omega \\ \theta \end{bmatrix}$$

L'ingresso Γ_1 si comporta come un attrito statico, quindi:

$$\begin{cases} \Gamma_1 = \tau, & \text{se } \tau < \Gamma_{1,max} \text{ e } \omega = 0 \\ \Gamma_1 = \Gamma_{1,max} & \text{se } \tau \geq \Gamma_{1,max} \text{ o } \omega \neq 0 \end{cases}$$

dove:

$$\Gamma_{1,max} = \frac{mg}{1000} \cdot a \quad (4.16)$$

La Figura 4.1 rappresenta schematicamente l'implementazione in Simulink del modello meccanico del motore accoppiato al carico.

4.1.2 Motore

Il motore è il dispositivo che si occupa di convertire la energia elettrica in meccanica e viceversa. Viene fornito di seguito il modello elettrico del motore. In questa

tesi si farà riferimento ad un motore sincrono a magneti permanenti. L'equazione di bilancio delle tensioni di un generico motore sincrono è:

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + \frac{d}{dt}\lambda_d(i_d, i_q) - \omega_{me}\lambda_q(i_d, i_q) \\ u_q = Ri_q + \frac{d}{dt}\lambda_q(i_d, i_q) - \omega_{me}\lambda_d(i_d, i_q) \end{cases} \quad (4.17)$$

dove u sono le tensioni, i sono le correnti, R è la resistenza di fase, λ è il flusso magnetico e ω_{me} è la velocità meccanico-elettrica, ottenuta moltiplicando la velocità meccanica per il numero di poli; i_d e i_q indicano l'asse di un sistema di riferimento rotante sincrono con il rotore a cui sono riferite le grandezze.

La coppia prodotta da un generico motore sincrono vale:

$$\tau = \frac{3}{2}p[\lambda_d(i_d, i_q)i_q - \lambda_q(i_d, i_q)i_d] \quad (4.18)$$

Da questa si capisce che per controllare la coppia erogata dal motore è necessario controllare le correnti di fase. Per fare ciò viene controllata la tensione in ingresso al motore, regolando di conseguenza anche la corrente e quindi la coppia.

In Figura 4.2 è illustrata l'implementazione in Simulink di un generico motore sincrono, mentre in Figura 4.3 viene rappresentata l'implementazione del calcolo della coppia meccanica prodotta.

4.1.3 Convertitore di potenza

Il convertitore di potenza si occupa di alimentare il motore seguendo il riferimento in uscita dal controllore di corrente. Per i motori sincroni trifase solitamente si utilizza un inverter che, tramite la modulazione vettoriale (SVM - *Space Vector Modulation*), alimenta le singole fasi del motore. In Figura 4.4 è illustrato lo schema di un inverter trifase.

Inverter

Ogni ramo dell'inverter è composto da due interruttori controllati che sono comandati con segnali opposti per cui, analizzando ad esempio il primo ramo, se lo switch S_1 è chiuso allora lo switch S_2 è sicuramente aperto. Da ciò ne deriva che le possibili combinazioni di comando degli switch sono 8 a cui corrispondono 6 vettori fissi nel piano $\alpha - \beta$ (che verrà quindi suddiviso in 6 settori), detti attivi, e 2 vettori nulli, detti passivi. La Figura 4.5 illustra i vettori di tensioni generabili con un inverter trifase.

La massima ampiezza di un vettore è pari a:

$$|v|_{max} = \frac{2}{3}V_{dc} \quad (4.19)$$

Il riferimento di tensione in uscita dal controllore di corrente è sincrono con il rotore, perciò deve essere prima portato in un sistema di riferimento stazionario attraverso un'opportuna trasformazione. Se questo giace in una posizione intermedia rispetto ai vettori canonici, allora per produrre in uscita la tensione desiderata verranno applicati, per intervalli di tempo opportuni rispetto al tempo

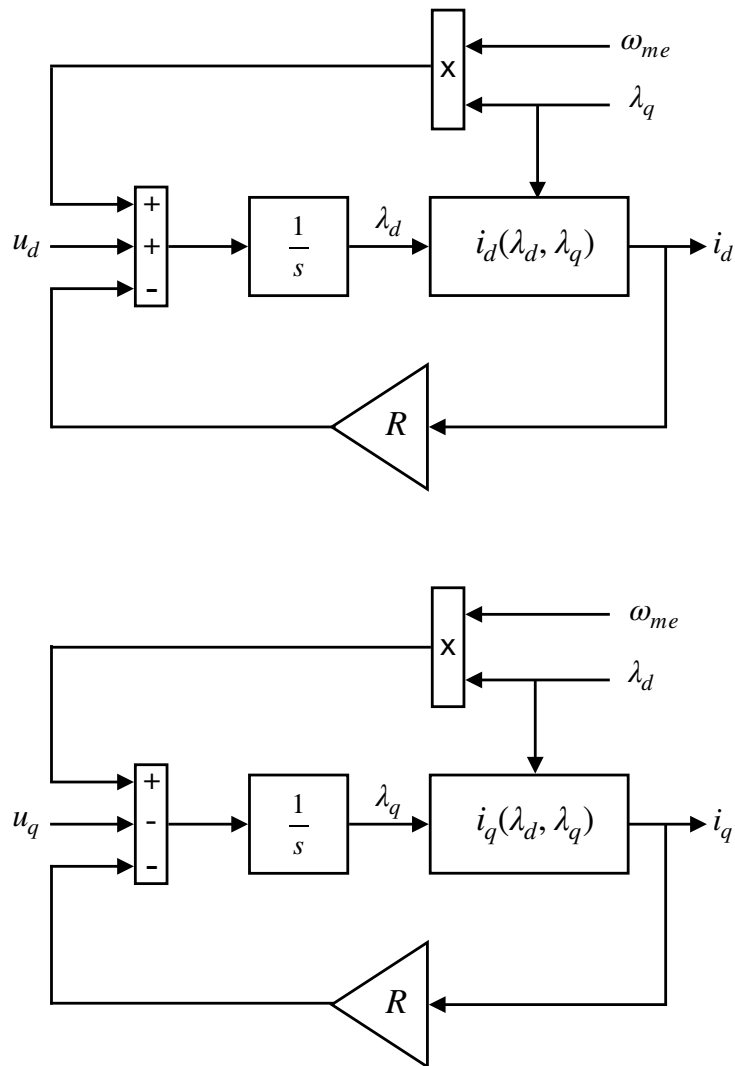


Figura 4.2: Implementazione in Simulink di un generico motore sincrono.

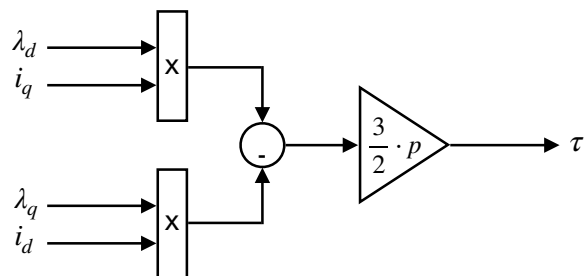


Figura 4.3: Implementazione del calcolo della coppia meccanica prodotta da un generico motore sincrono.

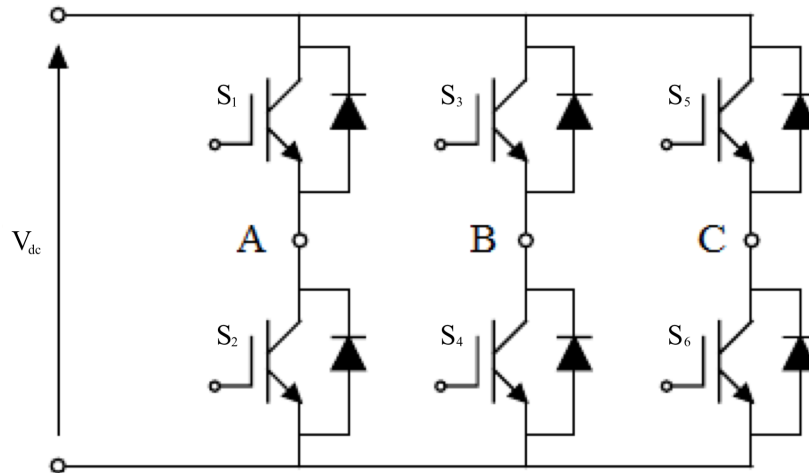


Figura 4.4: Schema inverter trifase.

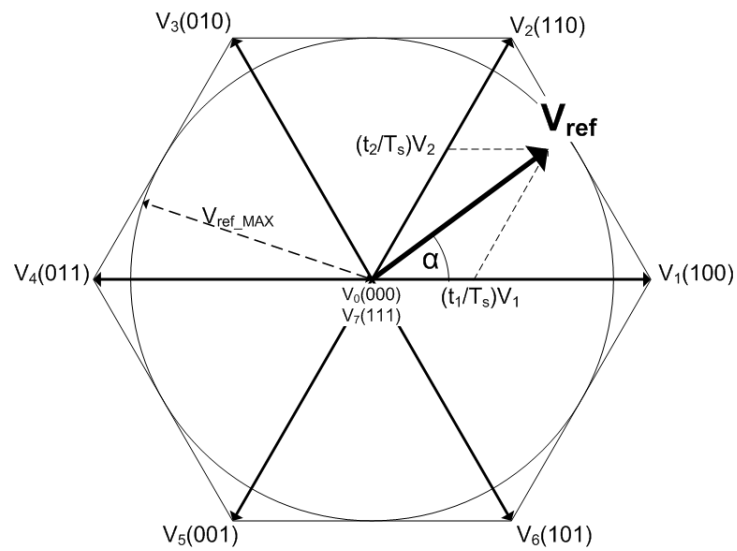


Figura 4.5: Vettori di tensione canonici in un inverter trifase.

di controllo, i due vettori canonici limitrofi e nel tempo restante verrà applicato il vettore nullo. Ad esempio se il vettore di riferimento giace nell' m -esimo settore, i tempi di applicazione dei vettori m e $m+1$ varranno:

$$t_m = \sqrt{3} \cdot \frac{T_{PWM}}{V_{dc}} \cdot \left[u_{ref,\alpha} \cdot \sin\left(m \frac{\pi}{3}\right) - u_{ref,\beta} \cdot \cos\left(m \frac{\pi}{3}\right) \right] \quad (4.20)$$

$$t_{m+1} = \sqrt{3} \cdot \frac{T_{PWM}}{V_{dc}} \cdot \left[-u_{ref,\alpha} \cdot \sin\left((m-1) \frac{\pi}{3}\right) + u_{ref,\beta} \cdot \cos\left((m-1) \frac{\pi}{3}\right) \right] \quad (4.21)$$

dove $u_{ref,\alpha}$ e $u_{ref,\beta}$ sono le componenti della tensione di riferimento e T_{PWM} è il periodo di controllo. Il vettore nullo verrà applicato per:

$$t_0 = T_{PWM} - t_m - t_{m+1} \quad (4.22)$$

Se il vettore di riferimento oltrepassa l'area esagonale i cui vertici sono le punte dei vettori canonici, allora t_0 sarà negativo, ma non essendo possibile generare un vettore per un tempo negativo, sarà necessario limitare i tempi di applicazione dei vettori canonici saturando l'uscita. Si parla di saturazione esagonale se si impone:

$$t_m + t_{m+1} = T_{PWM} \quad (4.23)$$

perciò potranno essere generati tutti i vettori che giacciono nell'area esagonale precedentemente descritta. Così facendo l'ampiezza massima del vettore di tensione che è possibile generare, varia in funzione dell'angolo tra il riferimento e l'asse α , causando la presenza di subarmoniche nella tensione prodotta durante la saturazione. Riducendo l'area massima operativa è possibile ridurre il problema delle subarmoniche, infatti se si impone come limite operativo l'area racchiusa dal cerchio inscritto nell'esagono, in caso di saturazione l'ampiezza del vettore di tensione è costante in ogni direzione. Si parla in questo caso di saturazione del cerchio e l'ampiezza massima del vettore di tensione producibile vale:

$$|v|_{max} = \frac{V_{dc}}{\sqrt{3}} \quad (4.24)$$

Per ottenere il vettore di tensione desiderato i vettori canonici vengono applicati per porzioni del tempo di controllo e la modalità in cui vengono suddivisi i tempi di applicazione viene detta tecnica di modulazione. La più diffusa è la modulazione simmetrica in cui i vettori vengono generati in modo simmetrico all'interno del periodo di controllo, come illustrato in Figura 4.6.

Durante il funzionamento del dispositivo reale, la tensione prodotta è diversa da quella di riferimento a causa delle non idealità, tra le quali possiamo identificare:

- necessità di introdurre tempi morti tra lo spegnimento di uno switch e l'accensione dell'altro nello stesso ramo, per evitare cortocircuiti;
- caduta di tensione non nulla negli switch e nei diodi;
- tempi di accensione degli switch diversi dai tempi spegnimento;
- presenza di capacità parassite che mantengono accesi gli switch anche quando il comando è spento.

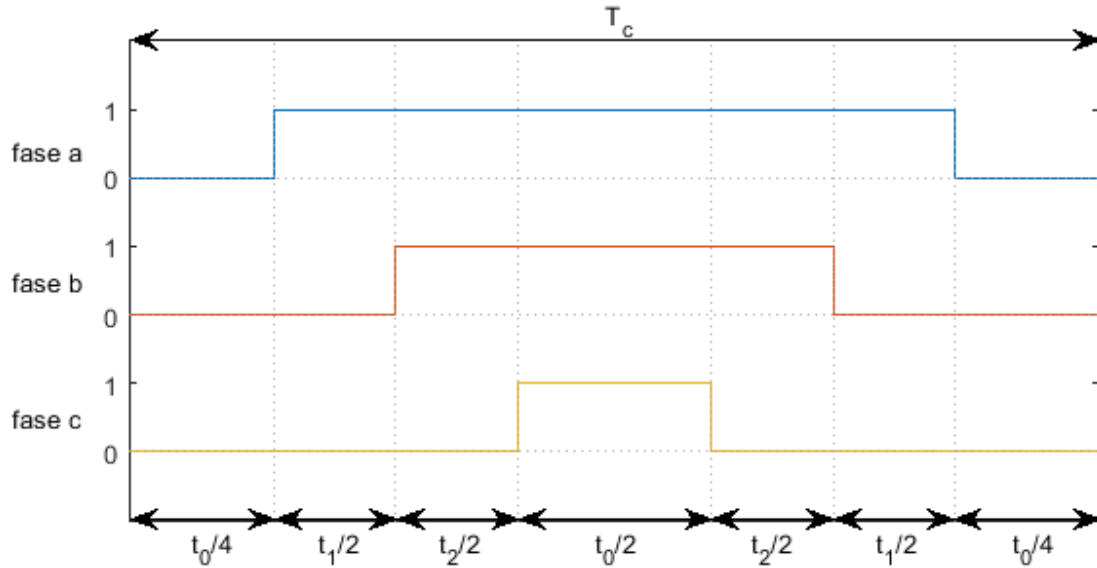


Figura 4.6: Esempio di applicazione dei vettori con la tecnica di modulazione simmetrica.

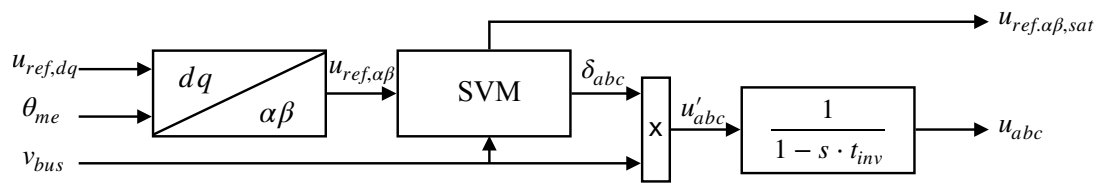


Figura 4.7: Implementazione in Simulink di un inverter trifase.

Grazie ad un'analisi dettagliata del dispositivo è possibile valutare l'effetto delle non idealità, potendo poi compensarle modificando il segnale di riferimento in ingresso.

A livello di controllo, supponendo di aver compensato tutte le non idealità presenti e ipotizzando di utilizzare la tecnica di modulazione simmetrica, la funzione di trasferimento tra la tensione prodotta e il riferimento in ingresso è approssimabile come ritardo pari a:

$$t_{inv} = \frac{T_{PWM}}{2} \quad (4.25)$$

Nel dominio di Laplace questo è rappresentabile come un sistema del primo ordine con costante di tempo pari al tempo di ritardo, come segue:

$$FdT_{inverter} = \frac{1}{1 + s \cdot t_{inv}} \quad (4.26)$$

In Figura 4.7 è illustrata l'implementazione in Simulink di un inverter trifase.

4.1.4 Controllore

Il controllore è un dispositivo che, partendo da una misura delle grandezze del sistema, genera i riferimenti per l'attuatore, in modo tale da controllarne la dinamica. Nel caso del carico l'interesse è quello di regolarne la velocità, facendo in modo che questa evolva nel tempo seguendo un riferimento imposto dall'esterno.

Per modificare la velocità del mezzo è necessario che il motore generi una coppia. Sapendo dalla Eq. 4.18 che la coppia attuata è legata alla corrente, il controllore sarà composto da due regolatori annidati, uno che a partire dall'errore di velocità generi il riferimento di coppia necessaria, e un altro che regoli la corrente del motore in modo tale da generare la coppia richiesta.

Regolatore di Corrente

Il regolatore permette di imporre la dinamica desiderata all'evoluzione della corrente del motore, controllandone il riferimento di tensione. Per progettare il regolatore di corrente per il carico, si parte dall'equazione di bilancio delle tensioni del motore (4.17), ipotizzando costante la velocità di rotazione meccanico-elettrica e considerando il flusso magnetico proporzionale solamente alle induttanza apparenti, si ottiene l'equazione di bilancio delle tensioni del motore nel dominio di Laplace:

$$\begin{cases} U_d(s) = RI_d(s) + sL_d I_d(s) - \Omega_{me} L_q I_q(s) \\ U_q(s) = RI_q(s) + sL_q I_q(s) + \Omega_{me} [L_d I_d(s) + \lambda_{mg}] \end{cases} \quad (4.27)$$

La velocità meccanico-elettrica può essere considerata costante in quanto la dinamica elettrica è molto più veloce di quella meccanica. Esprimendo inoltre il flusso in funzione delle sole induttanze apparenti come segue:

$$\begin{cases} \lambda_d = L_d i_d + \lambda_{mg} \\ \lambda_q = L_q i_q \end{cases}$$

dove λ_{mg} è il flusso dell'eventuale magnete permanente, si semplifica la sintesi del regolatore ma viene introdotto un errore di modello che porta ad ottenere nel sistema reale bande passanti e margini di fase diversi da quelli di progetto.

Nella (4.27) si nota una dipendenza delle tensioni dalla velocità di rotazione e dalle grandezze dell'altro asse (*cross coupling*), nei termini che vengono definiti mozionali. Compensando in feed-forward questi termini è possibile eseguire il disaccoppiamento degli assi, semplificando ulteriormente il modello del motore da controllare:

$$\begin{cases} U'_d(s) = U_d(s) + \Omega_{me} L_q I_q(s) = RI_d(s) + sL_d I_d(s) \\ U'_q(s) = U_q(s) - \Omega_{me} [L_d I_d(s) + \lambda_{mg}] = RI_q(s) + sL_q I_q(s) \end{cases} \quad (4.28)$$

La funzione di trasferimento tra corrente e tensione, per ogni asse, è esprimibile come:

$$FdT_{motore} = \frac{1}{R + sL} \quad (4.29)$$

Nel modello del sistema da controllare, oltre al motore, deve essere considerato anche il convertitore di potenza. Nella Sezione 4.1.3 si è visto come un inverter possa essere modellizzato come un sistema del primo ordine con costante di tempo pari a metà del periodo di controllo. Il controllo discreto introduce un ulteriore ritardo di un periodo di controllo, infatti al passo $k - 1$ vengono effettuate le misure, successivamente viene effettuato il calcolo del riferimento e al passo k viene applicato, come illustrato in Figura 4.8.

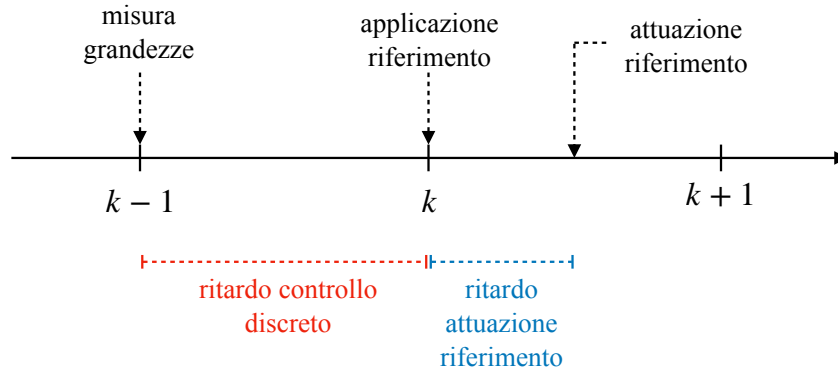


Figura 4.8: Linea temporale di controllo.

Considerando l'effetto di queste due componenti il ritardo complessivo è pari a:

$$T_D = t_{inverter} + t_{controllo\ discreto} = \frac{T_{PWM}}{2} + T_{PWM} \quad (4.30)$$

che nel dominio di Laplace è approssimabile come:

$$FdT_{convertitore} = \frac{1}{1 + sT_D} \quad (4.31)$$

La funzione di trasferimento complessiva del sistema, tra la corrente e il riferimento di tensione, si ottiene moltiplicando le (4.29) e (4.31) e vale:

$$\frac{I(s)}{U_{ref}(s)} = \frac{1}{1 + sT_D} \cdot \frac{1}{R + sL} \quad (4.32)$$

Conoscendo la funzione di trasferimento in catena aperta (*open loop*) del sistema composto da motore e inverter è possibile sintetizzare il regolatore che permetta di imporre la banda passante e il margine di fase desiderati nell'anello di corrente (*closed loop*) attraverso, per esempio, il metodo di Bode. Grazie alla retroazione si riesce quindi a modificare la dinamica originale del sistema, imponendo quella desiderata. La Figura 4.9 illustra la risposta in frequenza di modulo e fase del guadagno dell'anello di corrente del carico, regolato e non regolato, ed evidenzia le frequenze di taglio del motore (ω_{mot}), dell'inverter (ω_{inv}) e quella desiderata per il sistema retroazionato (ω_{des}).

Il riferimento di tensione in uscita dal controllore di corrente non sempre può essere riprodotto fedelmente dal convertitore di potenza, infatti esso può essere soggetto a saturazione. Nel caso si usi un regolatore PI, bisogna fare attenzione a questa eventualità, infatti può verificarsi un accumulo indesiderato di energia nell'azione integrale e, quando la saturazione viene rimossa, il sistema può rispondere in modo imprevisto e instabile. Una strategia di antiwindup può prevenire questo problema e può essere implementata in diversi modi:

- parametrica: l'azione integrale viene ridotta in modo proporzionale all'errore di saturazione;
- non parametrica: viene temporaneamente interrotta l'integrazione dell'errore nel caso si verifichi la saturazione.

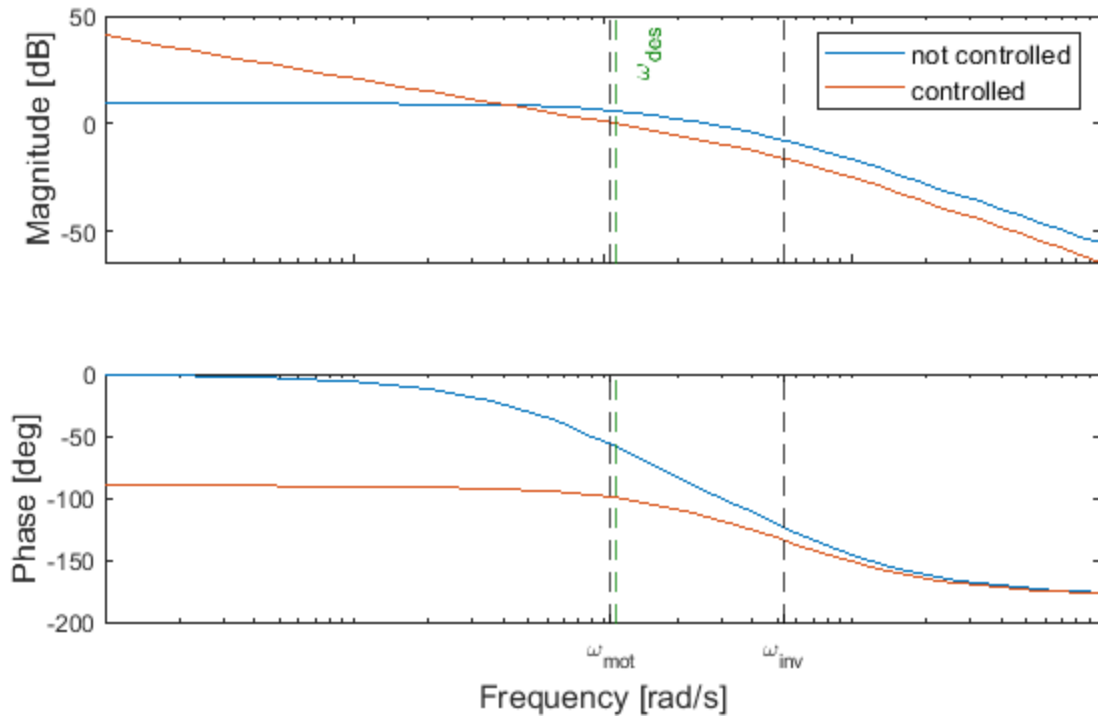


Figura 4.9: Risposta in frequenza di modulo e fase del guadagno dell'anello di corrente del carico, regolato e non regolato.

La prima tipologia richiede il tuning di un ulteriore parametro per il regolatore, mentre la seconda può essere implementata solamente conoscendo il segno dell'errore ε all'ingresso del regolatore e dell'errore di saturazione $u_{err,sat}$, come segue:

- se $\varepsilon > 0$ e $u_{err,sat} > 0$ allora AWU attivo
- se $\varepsilon > 0$ e $u_{err,sat} < 0$ allora AWU disattivo
- se $\varepsilon < 0$ e $u_{err,sat} > 0$ allora AWU disattivo
- se $\varepsilon < 0$ e $u_{err,sat} < 0$ allora AWU attivo

Quando l'antiwindup è attivo significa che viene interrotto il ramo che collega la componente integrale dell'errore con il suo integratore.

La Figura 4.10 presenta la struttura dell'anello di corrente valida sia per l'asse d che q , con l'unica differenza nella compensazione dei termini mozionali, come illustrato in Figura 4.11.

Se opportunamente regolato l'anello di corrente può essere approssimato, per le frequenze di interesse, come un sistema del primo ordine con frequenza di taglio e margine di fase pari a quelli desiderati in fase di sintesi del controllore. Nella Figura 4.12 si può vedere il confronto tra il diagramma di Bode dell'anello di corrente reale e approssimato.

Regolatore di Velocità

Il regolatore permette di imporre la dinamica desiderata all'evoluzione della velocità del carico, controllandone il riferimento di coppia. Volendo progettare un

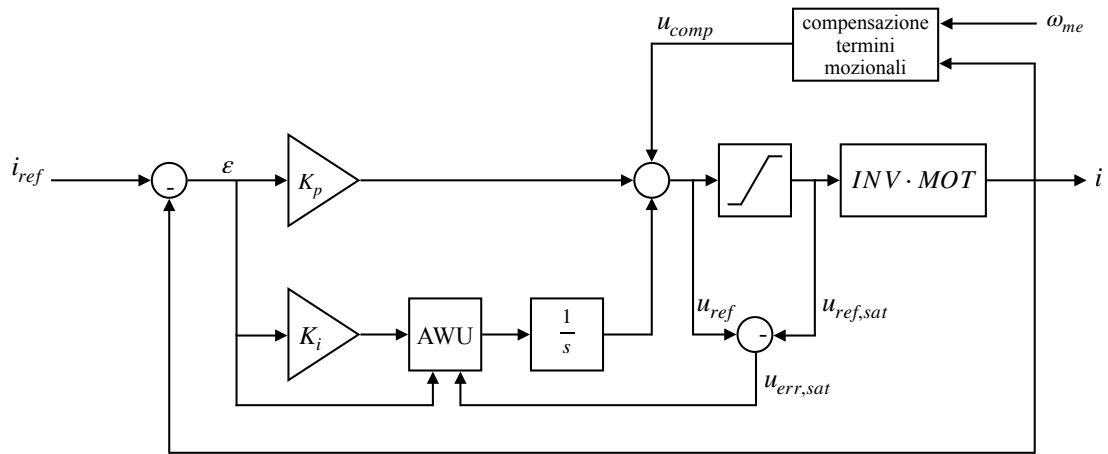


Figura 4.10: Struttura dell'anello di corrente del carico per il singolo asse d o q .

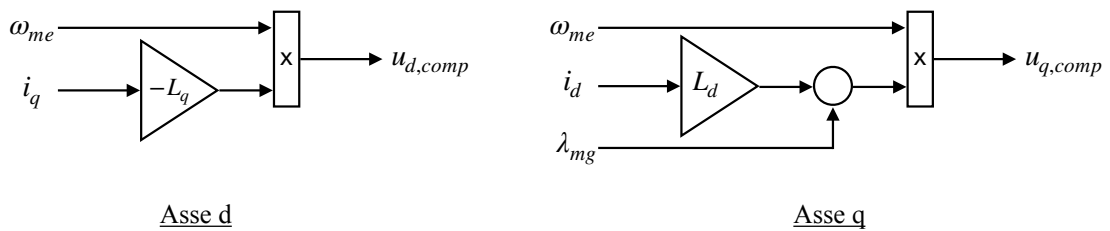


Figura 4.11: Compensazione dei termini mozionali per gli assi d e q .

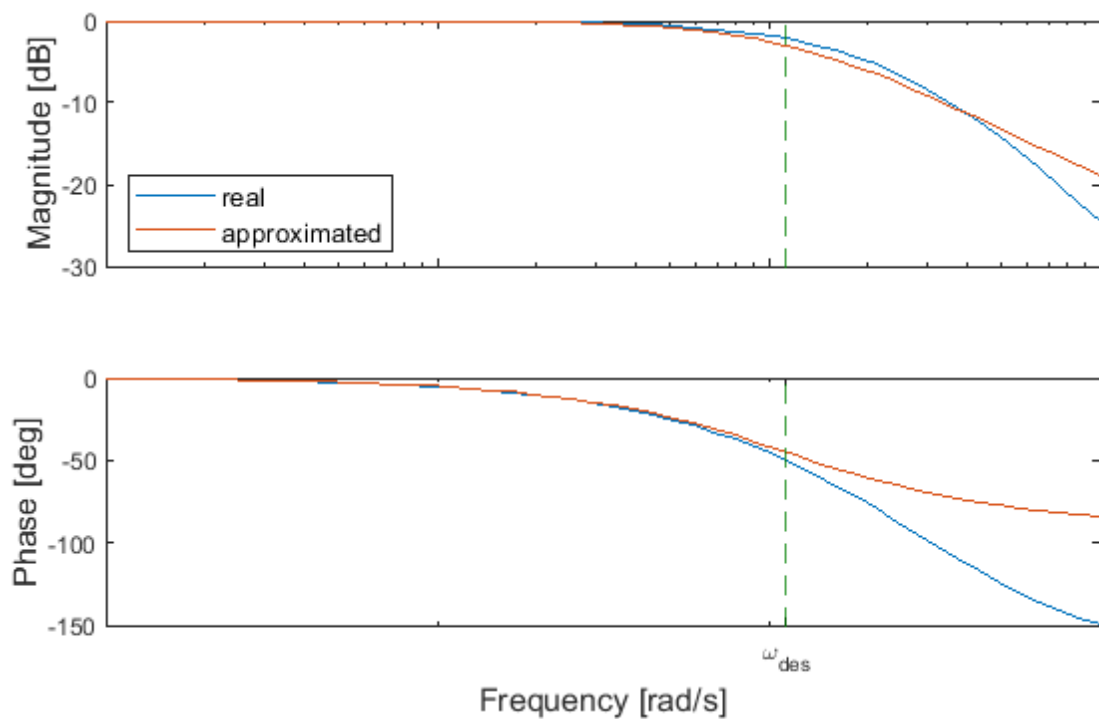


Figura 4.12: Confronto dei diagrammi di Bode per anello di corrente del carico, reale e approssimato.

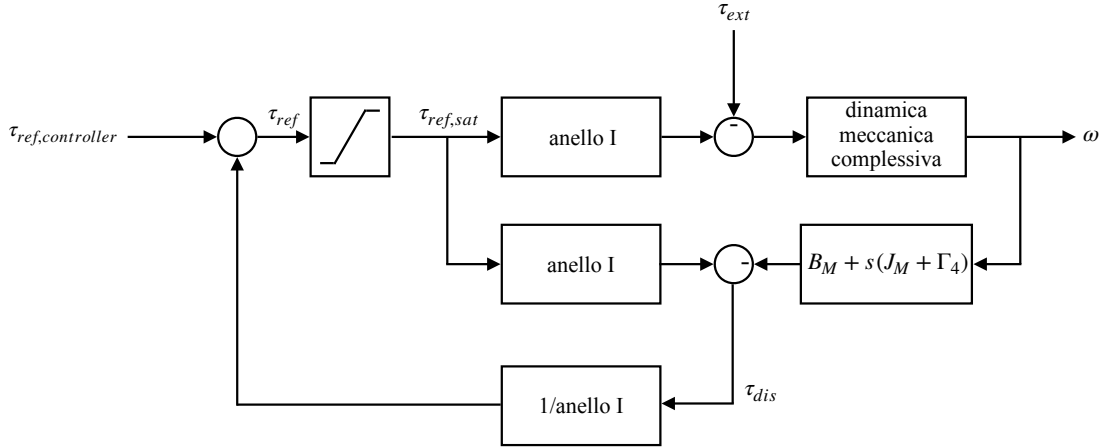


Figura 4.13: Schema *disturbance observer* ideale.

sistema di controllo indipendente dai parametri meccanici variabili del mezzo, ma legato solamente ai parametri nominali del motore e inerziali del veicolo, si è scelto di implementare un *disturbance observer* (DOB) che stimi la coppia di disturbo introdotta dagli attriti variabili che agiscono sul mezzo e dalle variazioni dei parametri del motore, rispetto ai valori nominali. L'idea è quella di confrontare la coppia prodotta dal motore con la coppia fittizia che, considerando solamente le caratteristiche nominali del motore e inerziali del veicolo, genererebbe la velocità misurata nel sistema reale. La differenza tra le due quantità può essere considerata come la coppia di disturbo che agisce sul sistema ideale, compensandola quindi in feed-forward, come illustrato in Figura 4.13.

Lo schema proposto non è direttamente implementabile, in quanto necessita del calcolo di derivate pure, che non è fattibile in un sistema discreto, dove si necessita di funzioni proprie e strettamente proprie. Questo problema è risolvibile implementando al posto del calcolo della derivata pura, una derivata filtrata. Si ottiene così lo schema reale di Figura 4.14, in cui g è la frequenza di taglio del filtro, mentre τ_I è la costante di tempo dell'anello di corrente approssimato.

Grazie all'utilizzo del DOB il sistema risponde ad un riferimento di coppia approssimativamente come se fosse il sistema ideale caratterizzato dai soli parametri nominali del motore, nonostante le caratteristiche meccaniche reali variano nel tempo.

Il sistema da controllare è quindi quello composto dall'anello di corrente in serie alla dinamica meccanica del motore ideale e la sua funzione di trasferimento è:

$$FdT_\omega = \frac{1}{1 + s\tau_I} \cdot \frac{1}{B_M + s(J_M + \Gamma_4)} \quad (4.33)$$

Il parametro d'inerzia J_M è ricavabile dal datasheet del motore mentre il coefficiente di attrito viscoso B_M dipende da fattori quali velocità, temperatura e verso di rotazione e viene scelto pari al 5% della potenza nominale del motore. Il parametro Γ_4 invece è legato all'inerzia del veicolo ed è stata analizzato in Sezione 4.1.1. L'effetto delle differenze parametriche tra i valori selezionati e quelli reali viene, in ogni caso, compensato dal DOB.

Conoscendo la funzione di trasferimento in catena aperta del sistema da controllare è possibile procedere con la sintesi del regolatore che permetta di imporre la banda passante e il margine di fase desiderati nell'anello di velocità. In

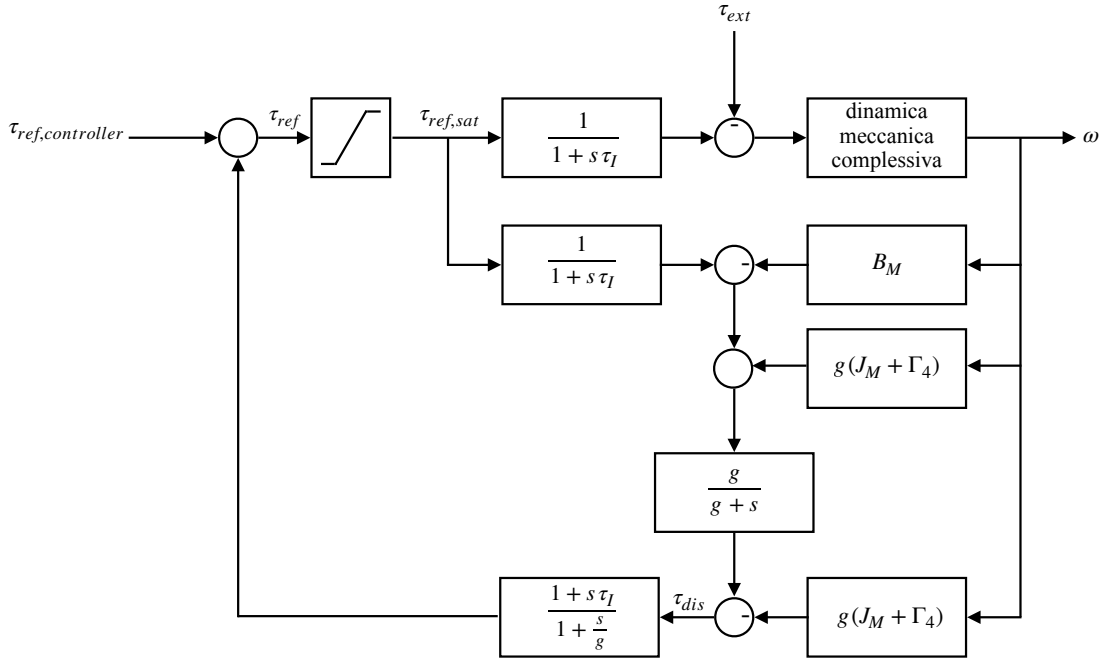


Figura 4.14: Schema *disturbance observer* implementabile.

questo caso i disturbi sono eliminati dal DOB, quindi è sufficiente implementare un controllore proporzionale. La Figura 4.15 illustra la risposta in frequenza di modulo e fase del guadagno dell'anello di velocità del carico, regolato e non regolato, ed evidenzia le frequenze di taglio della dinamica meccanica del motore (ω_M), dell'anello di corrente (ω_I) e quella desiderata per il sistema retroazionato (ω_{des}).

Il riferimento di coppia in uscita dal controllore viene convertito in un riferimento di corrente attraverso una funzione che massimizza la coppia prodotta a parità di corrente (MTPA - *Maximum Torque Per Ampere*), in modo tale da minimizzare le perdite per effetto Joule. Nel caso dei motori PMSM isotropi non in deflussaggio ad esempio, dal momento che la coppia prodotta vale:

$$\tau = \frac{3}{2} p \lambda_{mg} i_q \quad (4.34)$$

si impone la componente di asse d della corrente a zero, in quanto non influisce sulla coppia prodotta ma genera solo perdite, e la componente di asse q viene posta a:

$$i_{ref,q} = \frac{2}{3p\lambda_{mg}} \tau_{ref,sat} \quad (4.35)$$

Per tutte le altre tipologie di motori solitamente la curva di MTPA viene ricavata per punti effettuando dei test su banco di prova e viene salvata all'interno di *look-up-table* oppure viene interpolata con una funzione.

A differenza del caso del controllore di corrente, qui non c'è la necessità di implementare una strategia di antiwindup che intervenga in caso di saturazione del riferimento di coppia, in quanto non è prevista la componente integrale del regolatore. La Figura 4.16 presenta la struttura dell'anello di velocità.

Se opportunamente regolato l'anello di velocità può essere approssimato, per le frequenze di interesse, come un sistema del primo ordine con frequenza di taglio

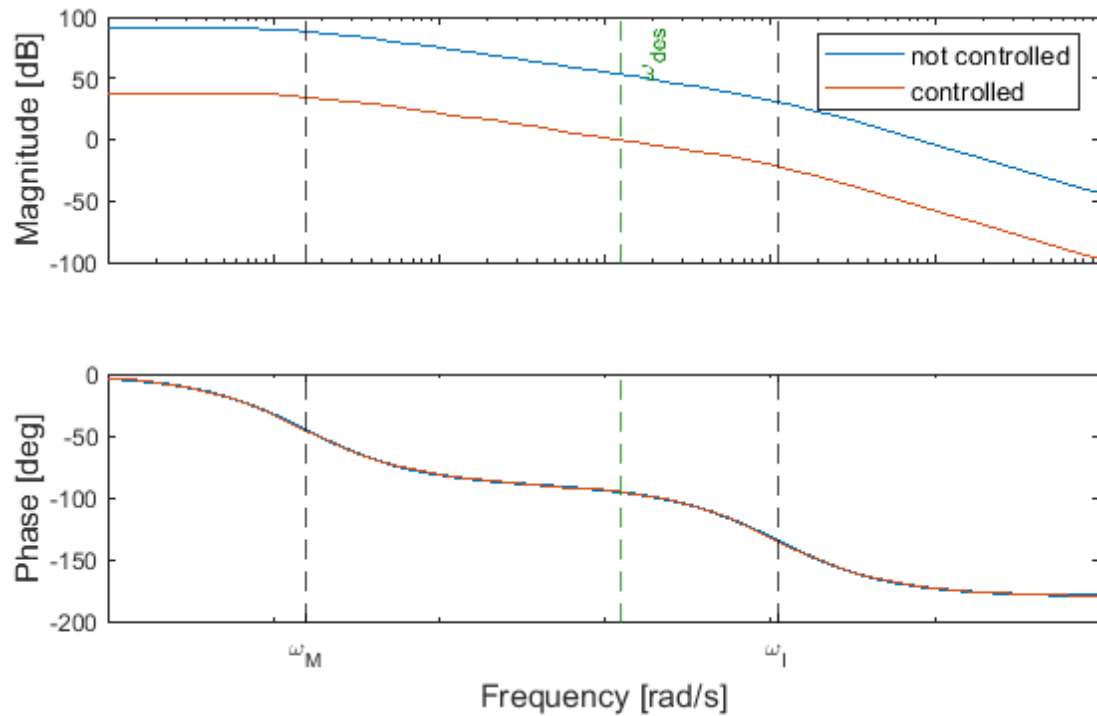


Figura 4.15: Risposta in frequenza di modulo e fase del guadagno dell'anello di velocità del carico, regolato e non regolato.

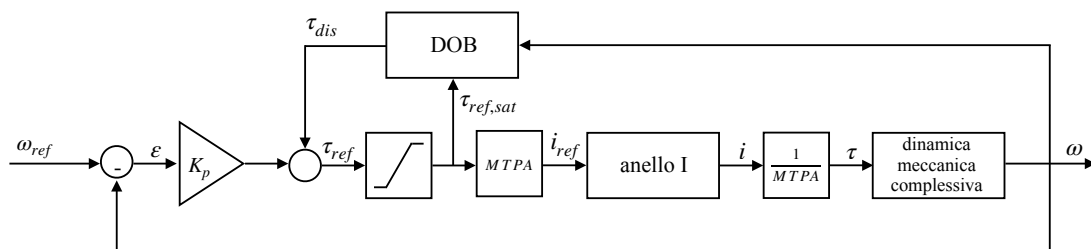


Figura 4.16: Struttura dell'anello di velocità del carico.

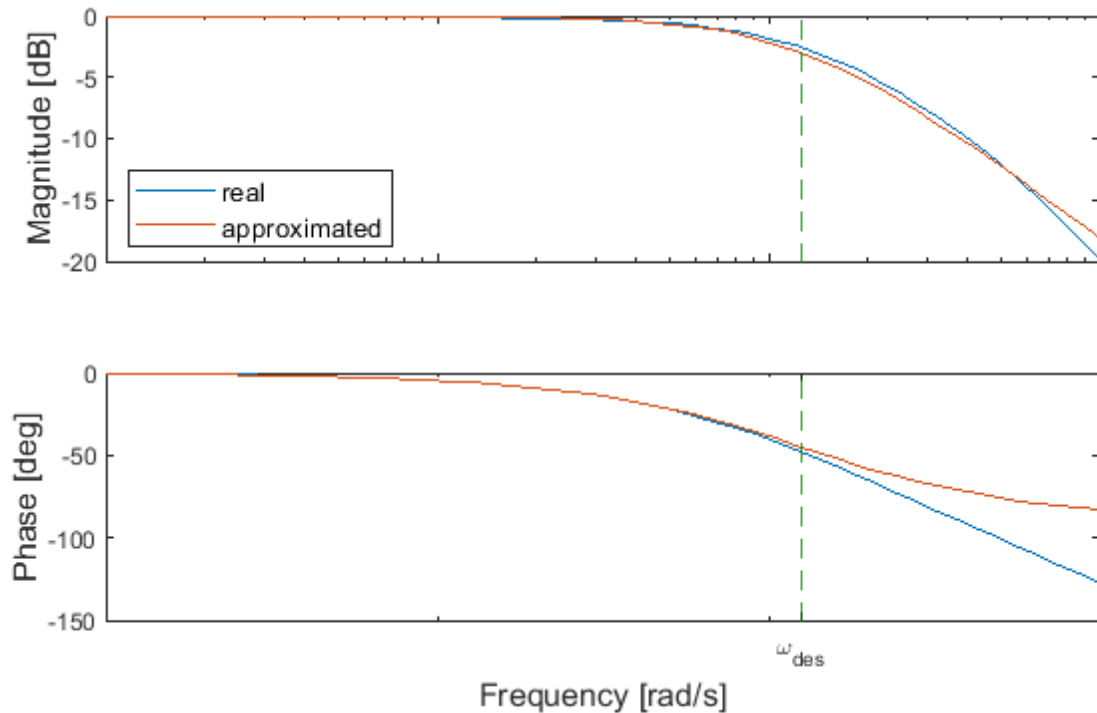


Figura 4.17: Confronto dei diagrammi di Bode per anello di velocità del carico, reale e approssimato.

e margine di fase pari a quelli desiderati in fase di sintesi del controllore. Nella Figura 4.17 si può vedere il confronto tra il diagramma di Bode dell'anello di velocità reale e approssimato.

4.2 FESS

Il FESS è il dispositivo in cui viene accumulata l'energia recuperata durante le frenate rigenerative e può essere disposto in tre diverse modalità:

- *onboard*
- *wayside accoppiato* alla sorgente di alimentazione
- *wayside isolato*

Ogni modalità necessita di una sistema di controllo leggermente diverso, come presentato di seguito.

Si rimanda a quanto discusso in precedenza nelle Sezioni 4.1.2, 4.1.3 e 4.1.4 per l'analisi rispettivamente di motore (considerando di adottare un motore sincrono a magneti permanenti), convertitore di potenza e controllore di corrente, in quanto le considerazioni fatte per il carico valgono anche per il FESS. Verranno quindi analizzate la dinamica meccanica e la parte di schema di controllo caratteristica dell'accumulatore.

4.2.1 Dinamica Meccanica

Supponendo il volano direttamente calettato all'albero della macchina elettrica, l'effetto della coppia da questa generata dipenderà dalle caratteristiche meccani-

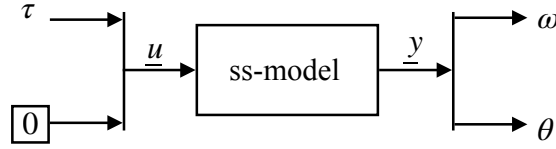


Figura 4.18: Implementazione in Simulink del modello meccanico del FESS.

che della macchina stessa e del flywheel. Vale la relazione:

$$\tau = \tau_M + \tau_F \quad (4.36)$$

dove τ è la coppia prodotta dalla macchina elettrica, τ_M rappresenta la coppia di carico del motore e τ_F rappresenta la coppia di carico introdotta dal flywheel. Sapendo che vale l'Eq. 4.11 e che:

$$\tau_F = J_F \frac{d\omega}{dt} + B_F \omega \quad (4.37)$$

dove J_F è l'inerzia e B_F è il coefficiente di attrito viscoso del volano, si ottiene:

$$\tau = (J_M + J_F) \frac{d\omega}{dt} + (B_M + B_F) \omega \quad (4.38)$$

Da questa è possibile ricavare il modello meccanico in spazio di stato del FESS:

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{x}}{dt} = \begin{bmatrix} -\frac{B_M + B_F}{J_M + J_F} & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ J_M + J_F & 0 \end{bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{x} \end{cases} \quad (4.39)$$

dove \mathbf{x} è il vettore di stato:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \omega \\ \theta \end{bmatrix}$$

\mathbf{u} è il vettore degli ingressi:

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \tau \\ 0 \end{bmatrix}$$

e \mathbf{y} è il vettore delle uscite:

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \omega \\ \theta \end{bmatrix}$$

La Figura 4.18 rappresenta l'implementazione in Simulink del modello meccanico del FESS.

4.2.2 Controllore

Il controllore del FESS è formato da due rami, uno in feedback, che regola lo stato di carica, e uno in feed-forward, che si occupa di gestire gli scambi di potenza del dispositivo. I segnali in uscita dalle due linee di comando vengono sommati e passati come un unico riferimento alla funzione che massimizza la coppia prodotta rispetto alla corrente (MTPA), la quale genera il riferimento per il regolatore di corrente, come accade nello catena di controllo del carico.

Regolatore dello Stato di Carica

Il regolatore dello stato di carica fa parte della linea di feedback e si occupa di riportare il livello di carica del FESS al valore di regime.

Lo stato di carica percentuale del FESS è calcolato come il rapporto percentuale tra l'energia disponibile e l'energia accumulabile:

$$SoC_{\%} = 100 \cdot \frac{E_d}{E_a} \quad (4.40)$$

$$= 100 \cdot \frac{E_i - E_{min}}{E_{max} - E_{min}} \quad (4.41)$$

$$= 100 \cdot \frac{\frac{1}{2}(J_M + J_F)(\omega^2 - \omega_{min}^2)}{\frac{1}{2}(J_M + J_F)(\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2)} \quad (4.42)$$

$$= 100 \cdot \frac{\omega^2 - \omega_{min}^2}{\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2} \quad (4.43)$$

dove E_i è l'energia totale immagazzinata, E_{min} ed E_{max} le energie legate ai limiti operativi discussi in Sezione 2.2 e ω è la velocità angolare del FESS. Il riferimento di energia immagazzinata è legato al riferimento di stato di carica da:

$$E_{i,ref} = \frac{SoC_{ref,\%}}{100} \cdot E_a + E_{min} \quad (4.44)$$

L'energia disponibile è ricavabile tramite l'integrazione temporale della potenza meccanica netta P_m fornita al FESS, quindi:

$$E_d = \int_0^t P_m dt \quad (4.45)$$

$$= \int_0^t \omega[\tau - \omega\tau_{fric}]dt \quad (4.46)$$

$$= \int_0^t \omega[\tau - \omega(B_M + B_F)]dt \quad (4.47)$$

dove τ è la coppia prodotta dalla macchina elettrica, τ_{fric} è la coppia d'attrito viscoso di motore e volano. Controllando la potenza netta fornita al dispositivo è possibile quindi regolarne la dinamica dello stato di carica.

Sapendo che la dinamica elettrica è molto più veloce della dinamica meccanica è possibile pensare di controllare la potenza netta agendo sul riferimento di coppia, considerando la velocità angolare lentamente variabile. Nel dominio di Laplace la relazione tra energia disponibile e coppia netta vale:

$$E_d(s) = \frac{1}{s} \omega T_m(s) \quad (4.48)$$

La funzione di trasferimento tra energia disponibile e coppia meccanica netta vale quindi:

$$\frac{E_d(s)}{T_m(s)} = \frac{1}{s} \omega \quad (4.49)$$

Compensando in feed-forward i termini di coppia legati all'attrito e sapendo che il comportamento dell'anello di coppia è esprimibile approssimativamente come un

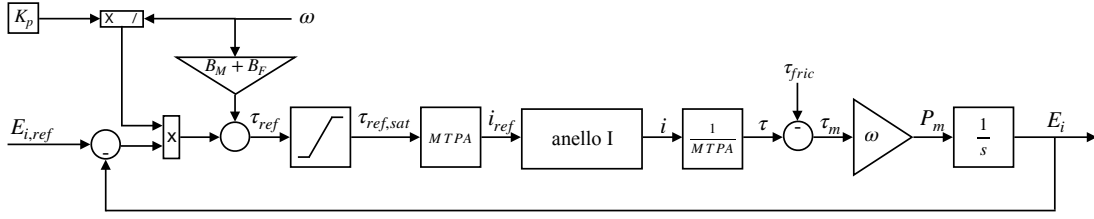


Figura 4.19: Schema dell'anello di controllo dello stato di carica del FESS.

sistema del primo ordine con costante di tempo τ_I (costante di tempo dell'anello di corrente), è possibile ricavare la FdT tra l'energia disponibile e il riferimento di coppia come:

$$\frac{E_d(s)}{T_{ref}(s)} = \frac{1}{1 + s\tau_I} \frac{1}{s} \omega \quad (4.50)$$

Si noti che il guadagno statico della FdT dipende dalla velocità angolare del punto di lavoro, perciò i guadagni del regolatore dipenderanno da ω . Si procede quindi sintetizzando il regolatore per:

$$\frac{E_d(s)}{T_{ref}(s)} = \frac{1}{1 + s\tau_I} \frac{1}{s} \quad (4.51)$$

e i guadagni ottenuti dovranno essere divisi per la velocità angolare, prestando attenzione ad evitare divisioni per zero. La presenza di un polo nell'origine permette di utilizzare un regolatore puramente proporzionale, garantendo l'errore a regime nullo. La Figura 4.19 presenta lo schema dell'anello di controllo dello stato di carica, mentre la Figura 4.20 illustra la risposta in frequenza di modulo e fase del guadagno d'anello normalizzato per il punto di lavoro, regolato e non regolato, evidenziando la frequenza di taglio desiderata.

Il riferimento di stato di carica è legato al riferimento di energia totale immagazzinata dalla (4.44) e dipende dalla modalità di accumulo. Nei casi *wayside* l'accumulatore deve essere sempre pronto, con la stessa probabilità, a erogare o assorbire energia mentre, nel caso *on-board*, si sa che una fase di erogazione sarà sicuramente seguita da una fase di assorbimento. Nei casi *wayside* quindi il riferimento viene posto ad un livello intermedio, mentre, nel caso di accumulo *on-board*, può essere definita una zona di non intervento del controllore tramite una soglia. In particolare se lo stato di carica è inferiore al livello di soglia allora il controllore funzionerà normalmente mentre, se è superiore, il riferimento viene posto uguale al valore dello stato di carica, annullando l'errore all'ingresso del regolatore. Così facendo il controllore, se il livello di carica è sufficiente, si occuperà solamente di mantenere costante la velocità del dispositivo, grazie al feed-forward delle coppie di attrito presente nel regolatore. Sapendo che l'energia estratta dal FESS in fase di accelerazione del carico, a meno di altre piccole dispersioni legate alla non idealità del sistema, vale:

$$E_{acc,FESS} \approx E_{acc,mech} + E_{joule,LOAD} + E_{joule,FESS} \quad (4.52)$$

dove $E_{acc,FESS}$ è l'energia totale estratta dal FESS, $E_{acc,mech}$ è l'energia meccanica necessaria ad accelerare il carico, $E_{joule,LOAD}$ e $E_{joule,FESS}$ sono rispettivamente l'energia dissipata per effetto joule nel motore e nel FESS, e che l'energia

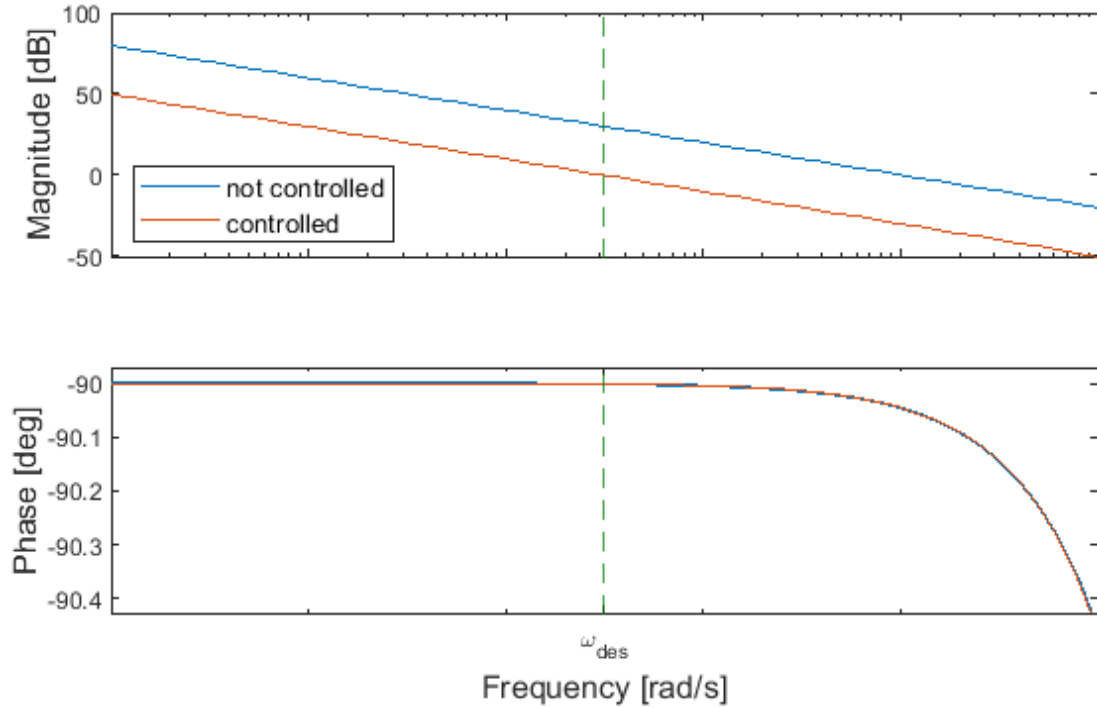


Figura 4.20: Risposta in frequenza di modulo e fase del guadagno dell'anello di controllo dello stato di carica del FESS, regolato e non regolato.

recuperabile in fase di frenata rigenerativa vale:

$$E_{dec,FESS} \approx E_{dec,mech} - E_{joule,LOAD} - E_{joule,FESS} \quad (4.53)$$

inferiore a quella estratta in accelerazione, la soglia viene posta ad un livello tale da permettere al FESS di avere un'energia disponibile a seguito di una decelerazione, pari all'energia necessaria all'accelerazione successiva. Perciò il livello di stato di carica al di sotto del quale interviene il controllore vale:

$$SoC_{th,\%} = 100 \cdot \frac{E_{acc,FESS} - E_{dec,FESS}}{E_a} \quad (4.54)$$

$$= 100 \cdot \frac{E_{acc,mech} - E_{dec,mech} + 2E_{joule,LOAD} + 2E_{joule,FESS}}{E_a} \quad (4.55)$$

Il tempo di risposta desiderato per il regolatore deve essere posto circa uguale alla media dei tempi per i quali il sistema si trova in una fase di regime; così facendo l'intervento del regolatore non influenza particolarmente il funzionamento della componente di controllo di potenza in feed-forward e lo stato di carica viene regolato quando il FESS non è interessato da operazioni di condivisione di energia.

Controllore FFW

Come detto in precedenza il compito della componente feed-forward del controllore si occupa di gestire gli scambi di potenza tra il FESS e il carico/rete. A causa delle diverse modalità di accumulo lo schema di controllo è composto da una parte comune, che si occupa di trasformare il riferimento di potenza in un riferimento di coppia, e da una parte specifica, che genera il riferimento di potenza.

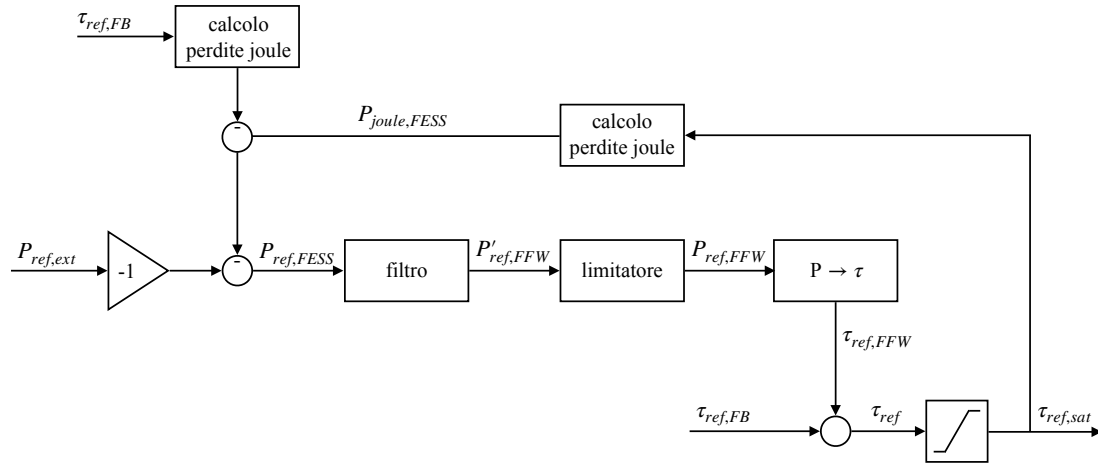


Figura 4.21: Struttura comune dello schema di controllo in feed-forward del FESS.

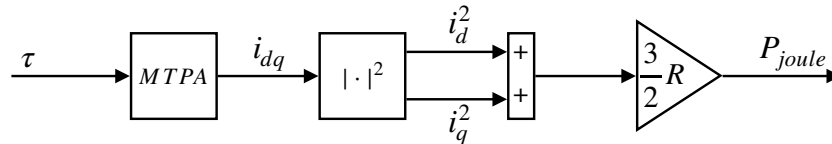


Figura 4.22: Implementazione in Simulink del calcolo della potenza dispersa per effetto joule.

Nella parte di schema comune a tutte le modalità di accumulo al riferimento di potenza richiesta viene sottratto il riferimento di potenza di effetto joule del FESS, calcolato a partire dal riferimento di coppia inviato al motore. Questo segnale poi viene dato in ingresso ad una funzione che isola la componente di potenza legata ai transistori e scarta quella legata alle fasi di funzionamento a regime del carico, consentendo quindi al dispositivo di intervenire quando si presentano variazioni di potenza e lasciando alla rete il compito di fornire l'energia necessaria al mantenimento della velocità costante. Il segnale filtrato viene fornito ad un'altra funzione che lo limita in relazione allo stato di carica del dispositivo; successivamente viene convertito in un riferimento di coppia, dividendolo per la velocità angolare del volano. Il riferimento di coppia generato viene poi sommato al riferimento in uscita dalla componente in feedback del controllore. La Figura 4.21 fornisce uno schema generale della parte comune della componente in feed-forward di controllo del FESS.

Sapendo che la potenza dispersa per effetto Joule vale:

$$P_{joule} = \frac{3}{2}R(i_d^2 + i_q^2) \quad (4.56)$$

e che le componenti di corrente di asse d e q si ricavano applicando la funzione MTPA alla coppia, il blocco *calcolo perdite joule* può essere implementato in Simulink come in Figura 4.22.

Sottraendo alle perdite totali per effetto Joule la componente di perdita legata alla coppia di feedback si fa in modo che, quando il FESS non è impegnato in azioni di scambio energetico ($P_{ref,ext} = 0$), le azioni di controllo dello stato

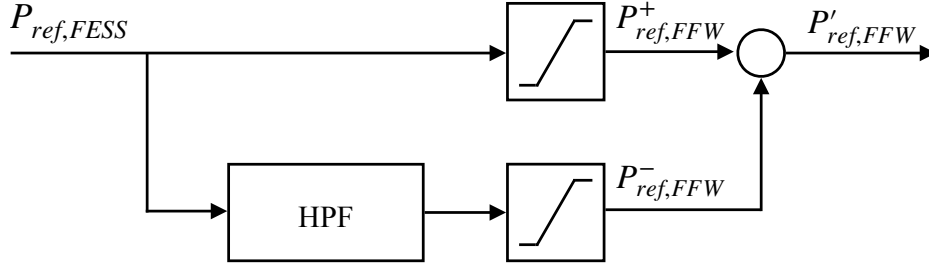


Figura 4.23: Schema implementativo del blocco di filtraggio del riferimento di potenza in feed-forward del FESS.

di carica e di mantenimento della velocità non siano attenuate dalla catena di feedforward.

Il blocco *filtro* può essere implementato in diversi modi a seconda della strategia da seguire. Una possibilità è quella di voler recuperare tutta l'energia rigenerativa possibile e fornire energia solamente durante i transitori di accelerazione. Per fare ciò la componente positiva del riferimento in ingresso, legata alla potenza da assorbire, attraversa senza distorsioni il blocco, costituendo la componente positiva del riferimento d'uscita. Ricavando poi con un filtro passa-alto la componente in alta frequenza del riferimento in ingresso ed estraendone la parte negativa, si ottiene la componente negativa del segnale d'uscita. La frequenza di taglio del filtro passa-alto deve essere scelta in modo tale da eliminare dal segnale in ingresso la componente di potenza legata al funzionamento a regime. La Figura 4.23 presenta lo schema implementabile in Simulink del blocco.

Il blocco *limitatore* fa in modo che lo stato di carica del FESS non esca dai limiti operativi, limitando la potenza massima assorbibile quando il livello di carica è vicino al limite superiore e limitando la potenza massima erogabile quando è vicino a quello inferiore. Questo blocco interviene solamente in prossimità dei limiti operativi dell'accumulatore (e.g. soglia inferiore SoC=5% e soglia superiore SoC=95%) e per evitare che ne limiti la capacità deve essere configurato conoscendo le potenze richieste dal controllore dello stato di carica, in modo tale che in corrispondenza dei limiti operativi le massime potenze di riferimento gestibili per la componente di controllo in feed-forward siano uguali e contrarie a quelle della componente in feedback. In corrispondenza di uno stato di carica dello 0% quindi la massima potenza erogabile è uguale a:

$$P_{out,0\%} = \min\{P_{mot,out,0\%}, P_{SoC,0\%}\} \quad (4.57)$$

dove $P_{mot,out,0\%}$ è la potenza limite erogabile dal motore in corrispondenza della velocità minima operativa ω_{min} :

$$P_{mot,out,0\%} = \omega_{min}[T + \omega_{min}(B_M + B_F)] \quad (4.58)$$

$P_{SoC,0\%}$ è la potenza richiesta dal controllore dello stato di carica:

$$\begin{aligned} P_{SoC,0\%} &= \omega_{min} \left[(E_{i,ref} - E_{i,0\%}) \frac{K_{SoC}}{\omega_{min}} + \omega_{min}(B_M + B_F) \right] \\ &= \omega_{min} \left[(SoC_{ref,\%} - 0) \frac{E_a}{100} \cdot \frac{K_{SoC}}{\omega_{min}} + \omega_{min}(B_M + B_F) \right] \\ &= \omega_{min} \left[SoC_{ref,\%} \frac{E_a}{100} \cdot \frac{K_{SoC}}{\omega_{min}} + \omega_{min}(B_M + B_F) \right] \end{aligned} \quad (4.59)$$

e K_{SoC} è il guadagno del controllore dello stato di carica. La potenza massima assorbibile invece non è limitata e vale:

$$P_{in,0\%} = P_{mot,in,0\%} = \omega_{min}[T - \omega_{min}(B_M + B_F)] \quad (4.60)$$

Per uno stato di carica del 100% i limiti sono ribaltati, infatti la massima potenza assorbibile è:

$$P_{in,100\%} = \min\{P_{mot,in,100\%}, -P_{SoC,100\%}\} \quad (4.61)$$

dove $P_{mot,in,100\%}$ è la potenza limite assorbibile dal motore in corrispondenza della velocità massima operativa ω_{max} :

$$P_{mot,in,100\%} = \omega_{max}[T - \omega_{max}(B_M + B_F)] \quad (4.62)$$

$P_{SoC,100\%}$ è la potenza richiesta dal controllore dello stato di carica:

$$P_{SoC,100\%} = \omega_{max} \left[(SoC_{ref,\%} - 100) \frac{E_a}{100} \cdot \frac{K_{SoC}}{\omega_{max}} + \omega_{max}(B_M + B_F) \right] \quad (4.63)$$

La potenza massima erogabile invece non è limitata:

$$P_{out,100\%} = P_{mot,out,100\%} = \omega_{max}[T + \omega_{max}(B_M + B_F)] \quad (4.64)$$

Quando lo stato di carica del FESS è al valore soglia del limitatore, le potenze massime risultano essere limitate solamente dalla massima potenza erogabile/assorbibile dal motore alla velocità corrispondente allo stato di carica di soglia, per cui la curva del limitatore è ricavabile trovando la retta pasante per i punti corrispondenti allo stato di carica di soglia e limite.

Il blocco che converte il riferimento di potenza in un riferimento di coppia esegue semplicemente la divisione del primo per la velocità angolare, verificando che questa non sia inferiore alla velocità minima operativa ω_{min} e ponendo l'uscita di questo blocco a zero nel caso si verifichi questa situazione. La strategia implementata permette quindi di evitare che il dispositivo venga interessato da scambi di potenza durante la fase di messa in servizio.

La differenza tra la potenza richiesta $P_{ref,FESS}$ e la potenza effettivamente comandata corrisponde alla potenza che la rete deve fornire al carico, perciò nel caso di accumulo *on-board* questa dovrà essere gestita dal convertitore di rete del mezzo, mentre nel caso *wayside accoppiato* con la sorgente di alimentazione, dovrà essere gestita da quest'ultima.

Nel caso *wayside isolato* invece, non essendoci nessun dispositivo in grado di erogare potenza oltre al FESS, questo segnale non può essere sfruttato.

Si è discussa finora la parte di schema di controllo in feed-forward in comune tra le diverse modalità di accumulo. La parte di generazione del segnale di riferimento di potenza $P_{ref,ext}$ invece è diversa per i vari casi.

Modalità *on-board* In questa configurazione si conosce il riferimento di coppia inviato al carico, quindi è possibile sfruttarlo per ricavare in anticipo il riferimento di potenza che verrà assorbita/erogata da questo. Sommando le componenti di potenza meccanica e di effetto joule del carico si ottiene il valore di potenza elettrica totale assorbita. Sapendo che la dinamica di potenza di FESS e carico

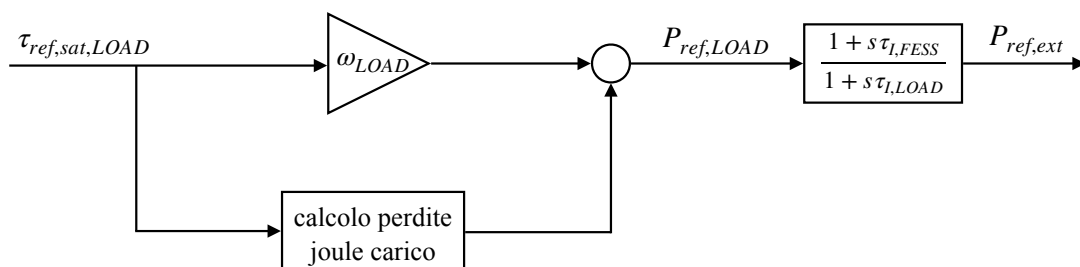


Figura 4.24: Schema di generazione del riferimento della potenza di feed-forward nella modalità di accumulo *on-board*.

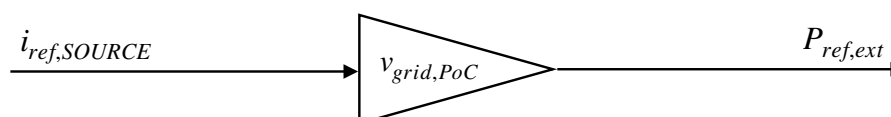


Figura 4.25: Schema di generazione del riferimento della potenza di feed-forward nella modalità di accumulo *wayside*.

possono essere differenti è necessario quindi sincronizzare i riferimenti. La dinamica di coppia (e quindi di potenza) è approssimabile alla dinamica di un sistema del primo ordine con costante di tempo pari alla costante di tempo dell'anello di corrente. Da questo si ottiene che il segnale di potenza totale, per essere sincronizzato deve essere ritardato, in relazione con costante di tempo del carico, e anticipato, in relazione con costante di tempo del FESS. Si ottiene così lo schema di Figura 4.24 in cui viene schematizzata la generazione del riferimento di potenza per il FESS a partire dal riferimento di coppia al carico.

Modalità *wayside accoppiata* In questa configurazione non sono presenti riferimenti anticipati dai quali ricavare la potenza che deve essere erogata, ma l'unica possibilità è sfruttare il riferimento di corrente generato dal regolatore di tensione della sorgente di alimentazione, ricavato a partire dall'errore di tensione sul punto di contatto tra il convertitore di potenza della sorgente e la rete. Il riferimento di corrente viene moltiplicato per la tensione di rete, generando così il riferimento di potenza per il FESS. In questo caso, non avendo una conoscenza anticipata delle richieste di potenza, la compensazione viene effettuata con un leggero ritardo, con il risultato di avere delle oscillazioni di tensione sulla rete. La Figura 4.25 presenta lo schema di generazione del riferimento di potenza per il FESS a partire dal riferimento di corrente della sorgente di alimentazione.

Modalità *wayside isolata* In questa configurazione la generazione del riferimento avviene allo stesso modo di quanto visto per la modalità accoppiata, con l'unica differenza che il riferimento di corrente è fornito da un regolatore di tensione aggiuntivo incluso nel sistema di controllo del convertitore di rete del FESS.

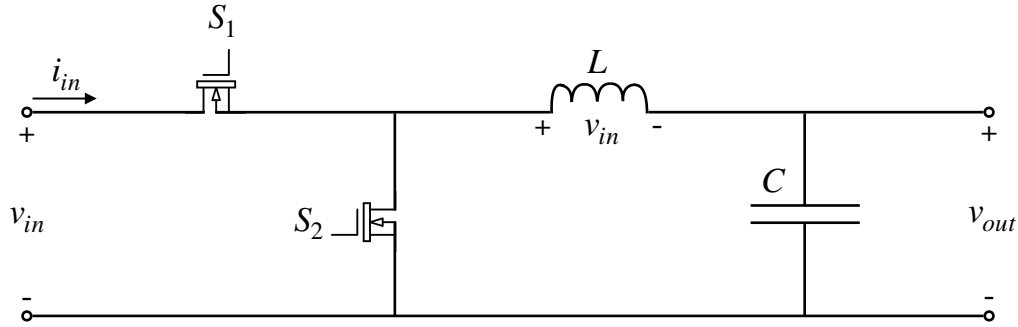


Figura 4.26: Schema circuitale buck bidirezionale.

4.3 Convertitore di Rete

4.3.1 Convertitore di Potenza

Il convertitore di potenza si occupa di iniettare o rimuovere energia dal bus a cui è collegato il FESS e/o il carico, stabilizzandone la tensione. Nel caso di sistemi di trazione elettrica indipendenti, la topologia di questo dispositivo è direttamente legata alla tensione della sorgente di alimentazione. Nel caso di sistemi di trazione centralizzati invece solitamente la rete è mantenuta ad una tensione, sia essa continua o alternata, superiore a quella di alimentazione del carico, in modo tale da ridurre le perdite per effetto Joule sui conduttori di trasmissione. In questo lavoro è stato preso in esame il caso in cui la tensione di alimentazione è continua e superiore a quella del bus, tipico di tram e metropolitane. Negli altri casi si segue lo stesso procedimento, con leggere differenze per quanto riguarda la funzione di trasferimento del sistema da controllare.

Il convertitore abbassatore più diffuso è il buck, il cui schema circuitale è illustrato in Figura 4.26.

Indicando con t_{on} il tempo di accensione dello switch S_1 (e di conseguenza spegnimento dello switch S_2) e con T il periodo di controllo, si ha che:

$$i_{in} = \begin{cases} i_L & t \in [0, t_{on}] \\ 0 & t \in [t_{on}, T] \end{cases} \quad (4.65)$$

$$v_L = \begin{cases} v_{in} - v_{out} & t \in [0, t_{on}] \\ -v_{out} & t \in [t_{on}, T] \end{cases} \quad (4.66)$$

Mediando nel periodo di controllo si ottengono i valori medi della corrente in ingresso e della tensione sull'induttore:

$$\begin{cases} \bar{i}_{in} = \delta \bar{i}_L \\ \bar{v}_L = \delta \bar{v}_{in} - \bar{v}_{out} \end{cases} \quad (4.67)$$

dove δ è il duty cycle di controllo degli switch, calcolato come rapporto tra t_{on} e T . Sapendo che per una generica grandezza x vale:

$$\bar{x} = X + \hat{x}$$

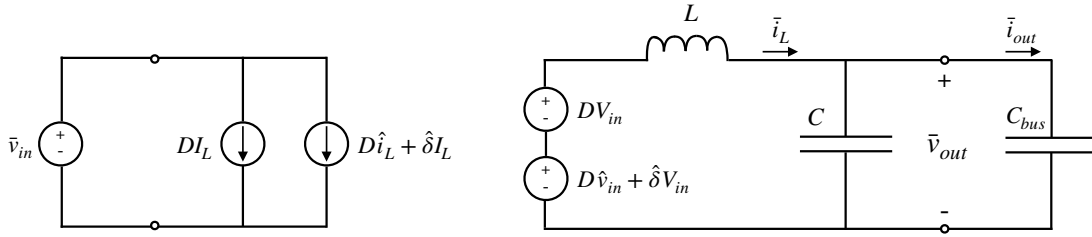


Figura 4.27: Circuito equivalente buck collegato al bus.

dove con \bar{x} si intende il valore medio, mentre con X e \hat{x} rispettivamente il valore a regime e la variazione ai piccoli segnali all'interno del periodo di controllo, è possibile esprimere la media di corrente in ingresso e tensione sull'induttore come segue:

$$\begin{cases} \bar{i}_{in} = (D + \hat{\delta})(I_L + \hat{i}_L) \approx DI_L + D\hat{i}_L + \hat{\delta}I_L \\ \bar{v}_L = (D + \hat{\delta})(V_{in} + \hat{v}_{in}) \approx DV_{in} + D\hat{v}_{in} + \hat{\delta}IV_{in} \end{cases} \quad (4.68)$$

Si ottiene così il circuito equivalente del buck collegato al bus, in cui gli switch sono modellizzati come generatori ideali di tensione e di corrente, come illustrato in Figura 4.27.

Da questo circuito equivalente si possono ricavare tutte le funzioni di trasferimento necessarie al controllo.

Il dimensionamento di induttore e condensatore dipende dalle condizioni operative del circuito e dai massimi ripple di tensione e corrente ammessi, secondo le seguenti formule:

$$L = \frac{V_{out}}{f_s \Delta I_{L,max}} \cdot \left(1 - \frac{V_{out}}{V_{in,max}}\right) \quad (4.69)$$

$$C = \frac{\Delta I_{L,max}}{8f_s \Delta V_{C,max}} - C_{bus} \quad (4.70)$$

dove f_s è la frequenza di controllo del buck.

4.3.2 Controllore

Il controllore del convertitore di rete è composto da un regolatore di tensione, che calcola un riferimento di corrente a partire dall'errore di tensione del bus, e da un regolatore di corrente, che controlla la corrente iniettata dal buck nel bus, regolando il duty cycle di controllo degli switch.

Regolatore di Corrente

Il regolatore permette di imporre la dinamica desiderata all'evoluzione della corrente iniettata nel bus, controllando il duty cycle degli switch del buck. La funzione di trasferimento che lega la corrente in uscita dal buck (e in ingresso al bus) rispetto al duty cycle degli switch è:

$$FdT_{i,buck} = \frac{\hat{i}_{out}}{\hat{\delta}}$$

Per ricavarla si sfrutta il circuito equivalente ricavato in precedenza. Si inizia calcolando l'impedenza d'uscita composta dai due condensatori in parallelo (C e C_{bus}) posti in serie all'induttore (L):

$$Z_L + Z_{C//C_{bus}} = sL + \frac{1}{s(C + C_{bus})} = \frac{s^2L(C + C_{bus}) + 1}{s(C + C_{bus})} \quad (4.71)$$

Sapendo che:

$$\hat{i}_{out} = \frac{\hat{v}_{out}}{Z_{C_{bus}}} \quad (4.72)$$

e che:

$$\hat{v}_{out} = \frac{\hat{\delta}V_{in}}{Z_L + Z_{C//C_{bus}}} \cdot Z_{C//C_{bus}} \quad (4.73)$$

si ottiene:

$$\hat{i}_{out} = \frac{\hat{\delta}V_{in}}{Z_L + Z_{C//C_{bus}}} \cdot \frac{Z_{C//C_{bus}}}{Z_{C_{bus}}} \quad (4.74)$$

da cui si ottiene la FdT desiderata:

$$\frac{\hat{i}_{out}}{\hat{\delta}} = \frac{sV_{in}C_{bus}}{s^2L(C + C_{bus}) + 1} \quad (4.75)$$

Conoscendo la funzione di trasferimento in catena aperta del sistema da controllare è possibile procedere con la sintesi del regolatore che permetta di imporre la banda passante e il margine di fase desiderati nell'anello di corrente, ugualmente a quanto fatto nella Sezione 4.1.4. La Figura 4.28 illustra la risposta in frequenza di modulo e fase del guadagno dell'anello di corrente del buck, regolato e non regolato, evidenziando la frequenza di taglio desiderata.

La corrente massima viene erogata ponendo il duty cycle a 1 ed è pari a:

$$i_{out,max} = \frac{v_{in}}{Z_L + Z_{C//C_{bus}}} \cdot \frac{Z_{C//C_{bus}}}{Z_{C_{bus}}} \quad (4.76)$$

e questo limiterà il riferimento generato dal regolatore di tensione. Il riferimento di corrente in ingresso al regolatore non supererà mai quindi il valore massimo ammissibile, perciò non c'è la necessità di implementare una strategia di antiwindup. La Figura 4.29 presenta la struttura dell'anello di corrente.

Se opportunamente regolato l'anello di corrente può essere approssimato, per le frequenze di interesse, come un sistema del primo ordine con frequenza di taglio e margine di fase pari a quelli desiderati in fase di sintesi del controllore. Nella Figura 4.30 si può vedere il confronto tra il diagramma di Bode reale dell'anello di corrente e quello approssimato.

Regolatore di Tensione

Il regolatore permette di imporre la dinamica desiderata all'evoluzione della tensione del bus e di mantenerla al valore desiderato, controllando il riferimento di corrente d'uscita del buck. La funzione di trasferimento tra la tensione del bus e il riferimento di corrente vale:

$$\frac{V_{bus}(s)}{I_{ref}(s)} = \frac{1}{1 + s\tau_I} \frac{1}{sC_{bus}} \quad (4.77)$$

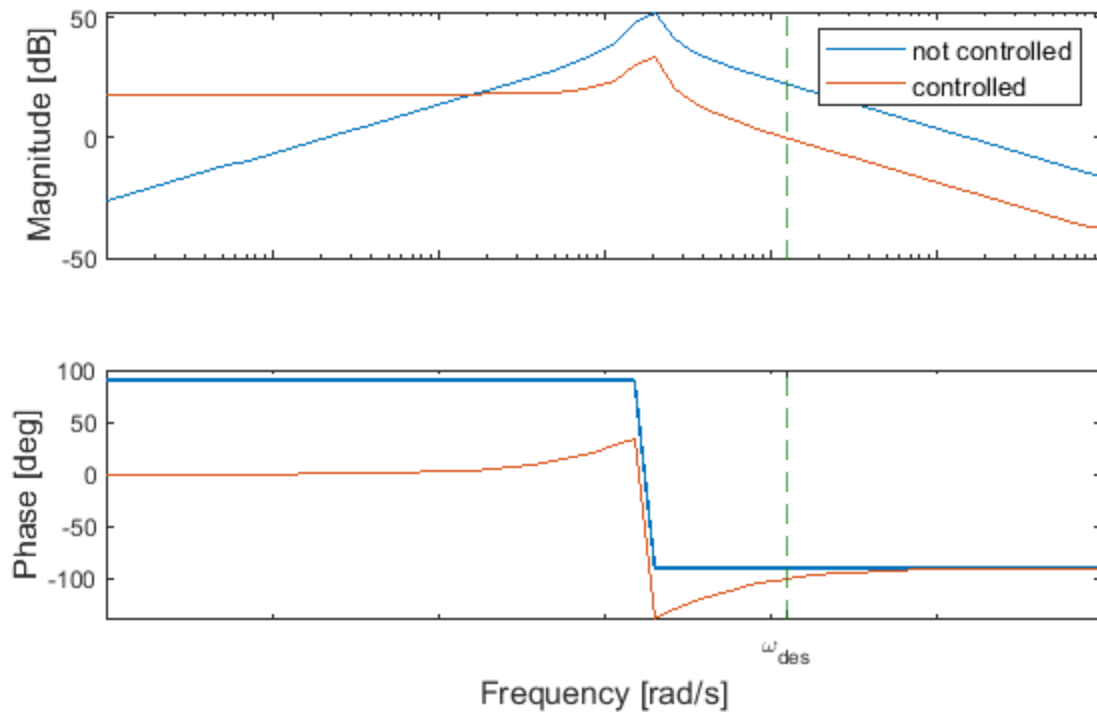


Figura 4.28: Risposta in frequenza di modulo e fase del guadagno dell'anello di corrente del buck, regolato e non regolato.

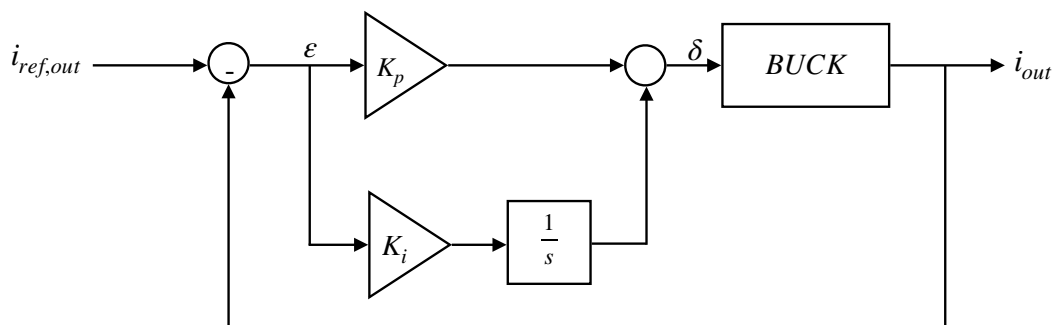


Figura 4.29: Struttura dell'anello di corrente del buck.

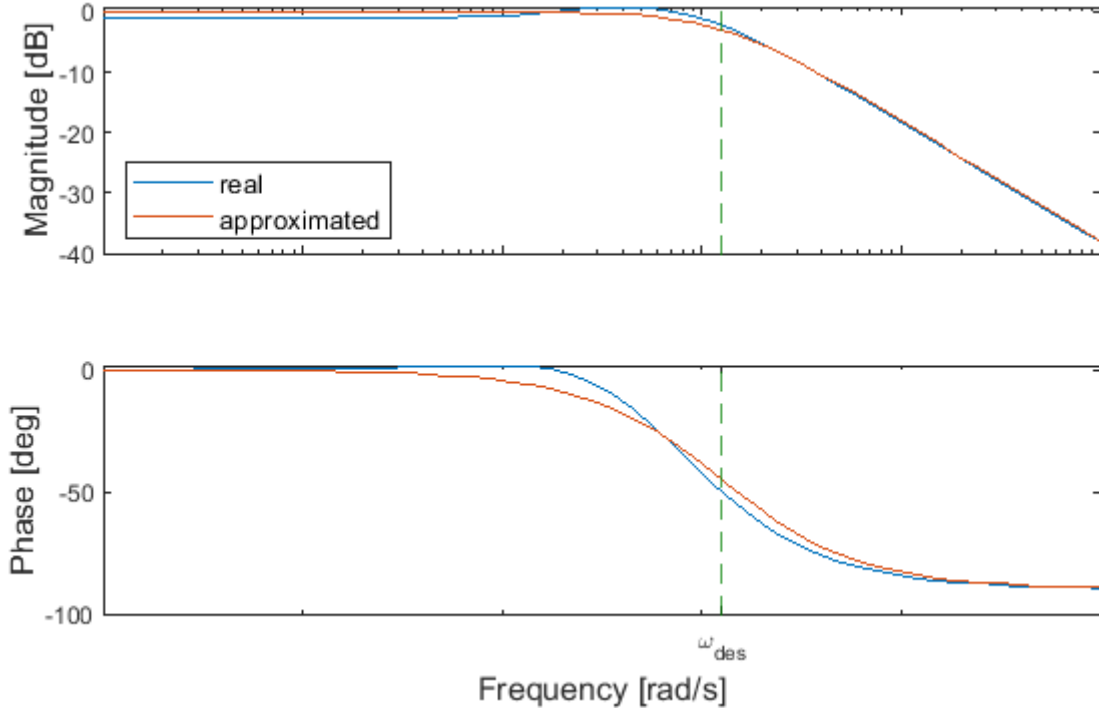


Figura 4.30: Confronto dei diagrammi di Bode per anello di corrente del buck, reale e approssimato.

Conoscendo la funzione di trasferimento in catena aperta del sistema da controllare è possibile procedere con la sintesi del regolatore che permetta di imporre la banda passante e il margine di fase desiderati nell'anello di tensione. La Figura 4.31 illustra la risposta in frequenza di modulo e fase del guadagno dell'anello di tensione del buck, regolato e non regolato, evidenziando la frequenza di taglio desiderata.

A causa della limitazione sulla corrente massima erogabile dal buck è necessario saturare il riferimento generato dal regolatore secondo la (4.76); si genera così la necessità di implementare una strategia di antiwindup che agisca in caso di saturazione del riferimento.

Anche per il convertitore di rete è possibile sfruttare la conoscenza di alcune grandezze per velocizzare l'azione di controllo, agendo con un comando in feed-forward, che è diverso per ogni modalità di accumulo.

Modalità *on-board* In questo caso sfruttando il segnale che indica la differenza tra la potenza richiesta al FESS $P_{ref,FESS}$ e la potenza effettivamente comandata ($\tau_{ref,sat} \cdot \omega$), sommato del termine corrispondente alle perdite di per effetto Joule legate alla catena di feedback $P_{joule,FB,FESS}$, è possibile ricavare la quantità di corrente che dovrà essere gestita dal buck per evitare che la tensione del bus vari:

$$\begin{aligned} i_{out,FFW} &= -\frac{P_{err}}{v_{bus}} \\ &= -\frac{P_{ref,FESS} - \tau_{ref,sat} \cdot \omega + P_{joule,FB,FESS}}{v_{bus}} \end{aligned} \quad (4.78)$$

Modalità *wayside* In questo caso è noto che le variazioni di tensione del bus sono legate ad assorbimenti/immissioni di potenza da parte del FESS. Conoscen-

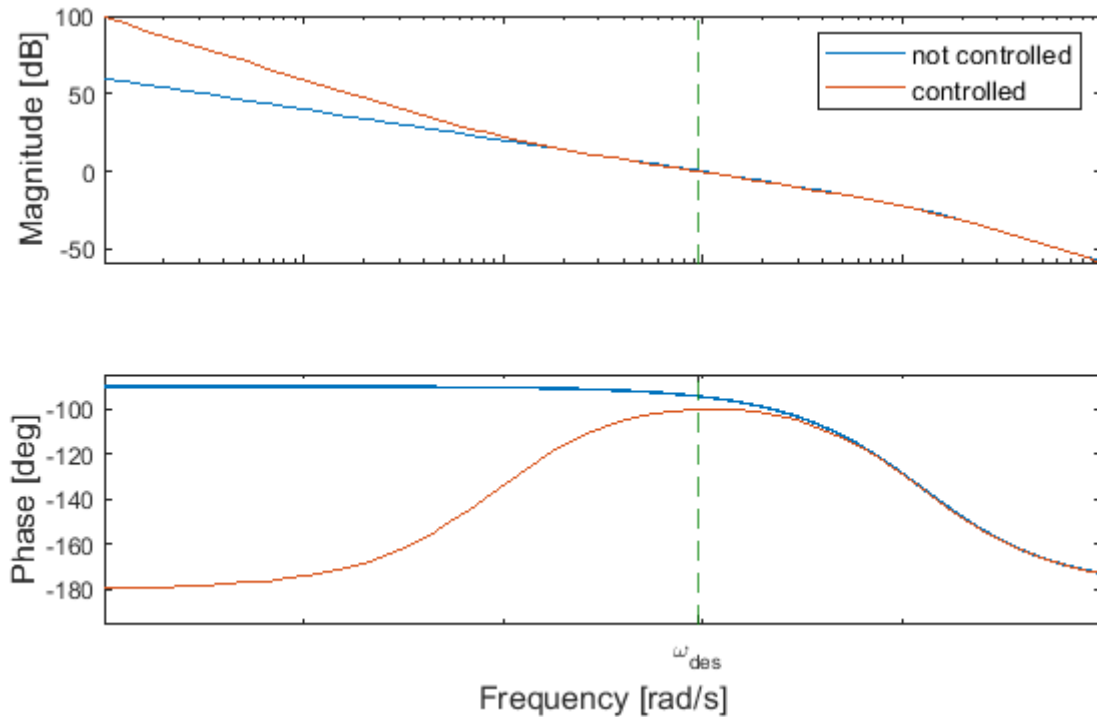


Figura 4.31: Risposta in frequenza di modulo e fase del guadagno dell'anello di tensione del buck, regolato e non regolato.

do la potenza comandata, calcolata moltiplicando la velocità per il riferimento di coppia saturato, e conoscendo l'entità delle perdite per effetto Joule, è possibile ricavare la quantità di corrente che dovrà essere gestita dal buck per evitare che la tensione del bus vari. In particolare:

$$i_{out,FFW} = \frac{\tau_{ref,sat} \cdot \omega + P_{joule,FESS}}{v_{bus}} \quad (4.79)$$

dove $P_{joule,FESS}$ tiene conto della totalità delle perdite per effetto Joule.

La Figura 4.32 illustra lo schema del controllore di tensione del buck comprensivo della componente in feedback e di quella in feed-forward.

Nel caso dei sistemi centralizzati è possibile che l'immissione di energia in rete provochi un eccessivo aumento della tensione di nel punto di collegamento. Se

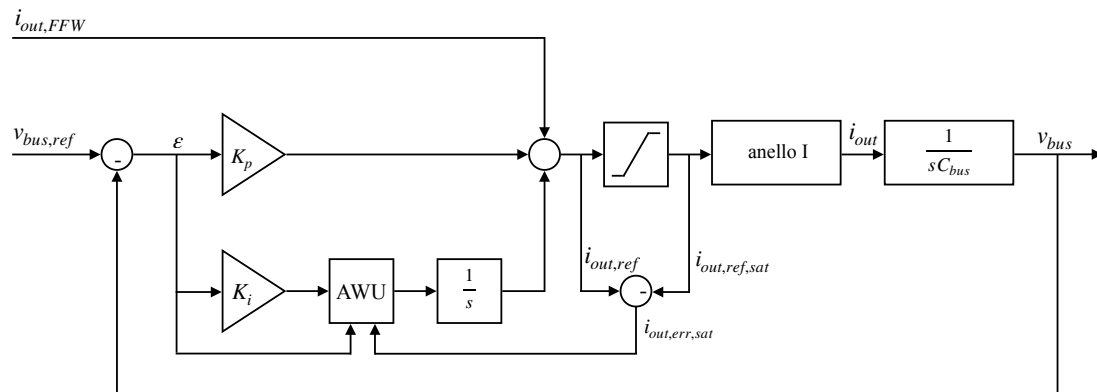


Figura 4.32: Struttura dell'anello di tensione del buck.

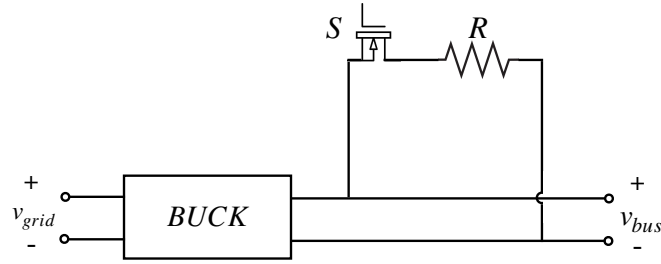


Figura 4.33: Schema circuitale convertitore di rete con chopper.

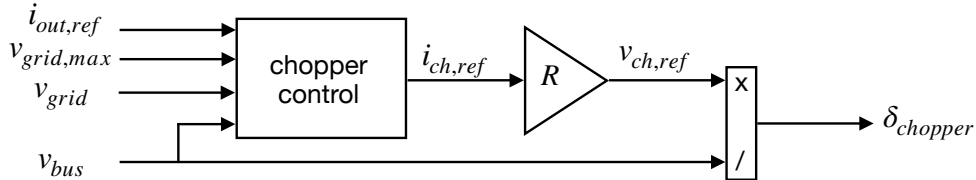


Figura 4.34: Parte del controllore di tensione del buck aggiuntiva per il chopper.

ciò accade il controllore di tensione deve quindi interrompere il flusso di energia e andare a dissiparla in un banco di resistori (chopper) a bordo del mezzo. La Figura 4.33 presenta l'aggiunta del chopper nello schema circuitale del convertitore di rete. La corrente che deve essere dissipata nella resistenza di chopper si calcola con la seguente funzione matematica, implementata nel blocco *chopper control* dello schema aggiuntivo di controllo di tensione:

$$\begin{aligned}
 & \text{if}(v_{grid} > v_{grid,max}) \\
 & \quad \text{if}((v_{bus}/R) > i_{out,ref}) \\
 & \quad \quad i_{ch,ref} = i_{out,ref}; \\
 & \quad \text{else} \\
 & \quad \quad i_{ch,ref} = v_{bus}/R; \\
 & \text{else} \\
 & \quad i_{ch,ref} = 0;
 \end{aligned}$$

La Figura 4.34 illustra la componente di controllo aggiuntiva per il controllore di tensione.

4.4 Sorgente di Alimentazione

La sorgente di alimentazione fornisce energia al sistema di trasporto ed è costituita da un generatore di potenza, da un chopper e da un regolatore di tensione.

4.4.1 Generatore di Potenza

Il generatore di potenza è costituito da una fonte di energia elettrica accoppiata ad un convertitore di potenza controllato. Il generatore, a seconda della tipologia di fonte energetica utilizzata, può essere unidirezionale, cioè può solamente

erogare potenza, oppure bidirezionale, in grado quindi di erogarla e assorbirla. La topologia del convertitore dipende dalle caratteristiche operative della rete e della fonte energetica, in modo simile a quanto discusso nella sezione 4.3.1. Per non rendere troppo specifica l'analisi si può considerare in prima approssimazione il convertitore accoppiato alla fonte energetica come un generatore ideale controllato di potenza.

4.4.2 Controllore

Regolatore di Tensione

Il compito del regolatore di tensione è quello di controllare la potenza in uscita dalla sorgente di alimentazione, in modo tale da stabilizzare ad un certo valore la tensione della rete. Nel caso la sorgente sia accoppiata ad un FESS (modalità *wayside accoppiata*) il riferimento generato dal controllore viene utilizzato per comandare l'accumulatore. Il segnale che rappresenta la differenza tra la potenza richiesta e la potenza comandata viene utilizzato poi per controllare il generatore della sorgente, in modo che la somma tra la potenza in uscita dal FESS e quella dalla sorgente sia uguale al comando del regolatore di tensione. Nelle altre modalità di accumulo, essendo la sorgente l'unica fonte di energia nello specifico punto della rete, tutto il riferimento in uscita dal controllore viene passato al generatore di potenza.

Se la potenza che si richiede di assorbire è maggiore di quella che la sorgente può gestire, l'eccesso di energia viene dissipato su un banco di resistori, allo stesso modo di quanto visto nella Sezione 4.3.2.

Capitolo 5

Simulazioni

In questo capitolo si è scelto di simulare il comportamento di un sistema di trasporto centralizzato, valutando gli eventuali benefici risultanti dall'applicazione di dispositivi di accumulo energetico basati sui flywheel. In particolare si vuole verificare quale modalità di accumulo sia più efficiente dal punto di vista dell'energia consumata e della potenza richiesta. Attualmente esistono alcuni esempi di sistemi di trasporto che utilizzano i FESS per recuperare l'energia rigenerativa, come ad esempio la metropolitana di Los Angeles [19], che sfrutta la modalità di accumulo *wayside*, oppure il sistema di tram di Rotterdam [21], che sfrutta la modalità di accumulo *on-board*. L'idea di questo progetto è quella di confrontare le prestazioni delle diverse modalità di accumulo riferendosi allo stesso sistema di trasporto. Si è scelto di basare l'analisi sulla linea 2 della metropolitana di Milano, in cui non è presente alcun accumulatore, e verificare quale modalità di accumulo porterebbe i maggiori benefici nel caso venisse implementata.

5.1 Dati del sistema

La linea 2 della metropolitana di Milano si estende per quasi 40 km ed è la più lunga d'Italia, presenta 35 stazioni e la distanza media tra queste è di circa 1150 m. La rete di alimentazione è a 1500 V e i treni attualmente in uso sono i *Leonardo* forniti dall'azienda *Hitachi*. Questi sono composti da 2 unità di trazione (UdT) funzionalmente autonome, composte a loro volta da 3 casse, 2 motrici e 1 rimorchiata. Ogni cassa motrice viene trazionata da 4 motori elettrici da 283 kW ciascuno, alimentati a 750 V, per un totale di 16 motori nell'intero treno con una potenza complessiva continuativa di circa 4.5 MW. La massa a vuoto di ogni veicolo è di $2 \cdot 10^5$ kg, mentre quella a pieno carico è di $2.87 \cdot 10^5$ kg. La velocità massima raggiungibile è di 90 km/h [24]. La Tabella 5.1 riassume i principali dati finora elencati.

Conoscendo solo poche caratteristiche tecniche dei motori impiegati nel treno, per effettuare le simulazioni, si è scelto di utilizzare i dati di un motore dell'azienda *ABB* con potenza continuativa e tensione di alimentazione simili a quelli dichiarati dal costruttore del veicolo [25]. In particolare la Tabella 5.2 presenta i principali dati dei motori utilizzati nelle simulazioni, alcuni ricavati dal catalogo ed altri stimati.

Per realizzare il modello del treno è stata seguita la (4.13) utilizzando i coefficienti per il calcolo delle forze passive caratteristici delle metropolitane:

Distanza media tra le stazioni	1150	<i>m</i>
Tensione di rete	1500	<i>V</i>
Tensione di alimentazione	750	<i>V</i>
Numero motori	16	
Potenza continuativa motore	283	<i>kW</i>
Massa a vuoto	$2 \cdot 10^5$	<i>kg</i>
Massa a pieno carico	$2.87 \cdot 10^5$	<i>kg</i>
Velocità massima	90	<i>km/h</i>

Tabella 5.1: Dati principali linea 2 della metropolitana di Milano. [24]

Tipologia	PMSM	
Tensione nominale	750	<i>V</i>
Corrente nominale	418	<i>A</i>
Corrente di picco	741	<i>A</i>
Potenza nominale	283	<i>kW</i>
Potenza di picco	516	<i>kW</i>
Velocità nominale	3000	<i>rpm</i>
Velocità massima	5000	<i>rpm</i>
Coppia nominale	900	<i>N · m</i>
Coppia di picco	1941	<i>N · m</i>
Inerzia del rotore	0.417	<i>kg · m²</i>
Resistenza di fase*	55	<i>mΩ</i>
Induttanza di fase*	6	<i>mH</i>
Flusso del magnete permanente*	0.287	<i>V · s</i>
Numero di coppie polari*	5	
Massa	287	<i>kg</i>

(*) valore stimato

Tabella 5.2: Dati tecnici del motore del treno. [25]

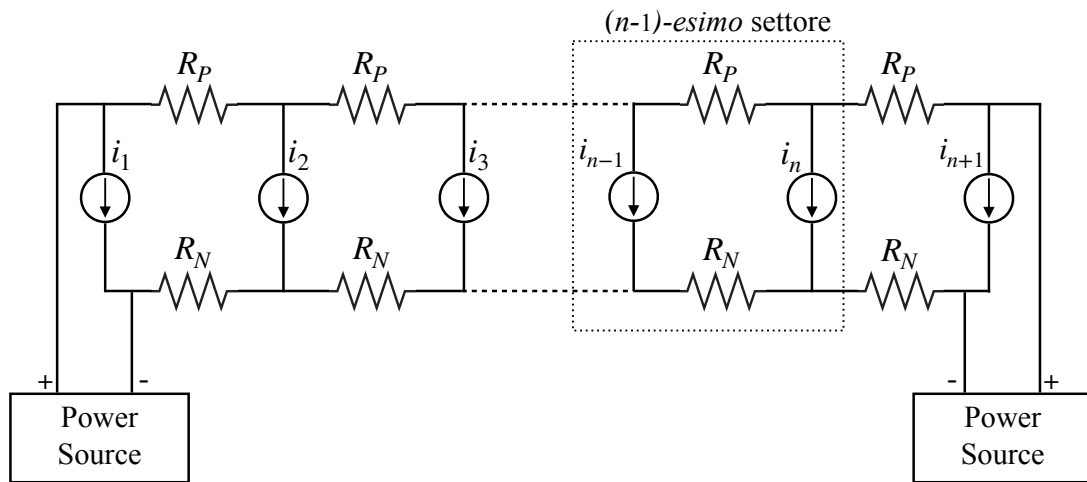


Figura 5.1: Idea di sviluppo del modello della rete in settori.

- coefficienti di resistenza al rotolamento e degli organi meccanici:

$$a = 3.2 \left[\frac{N}{kN} \right], \quad b = 0.004 \left[\frac{N \cdot h}{kN \cdot km} \right] \quad (5.1)$$

- coefficiente di resistenza aerodinamica:

$$c = 0.0004 \left[\frac{N \cdot h^2}{kN \cdot km^2} \right] \quad (5.2)$$

- coefficiente di resistenza alle variazioni di velocità:

$$k = 31.15 \left[\frac{N \cdot s^2}{kN \cdot m} \right] \quad (5.3)$$

5.2 Modello della rete

Per tenere conto delle perdite di trasmissione legate alla resistenza di rete ne è stato sviluppato un modello simulativo utilizzando dei generatori ideali di corrente in parallelo collegati tra loro da resistori di valore fisso, come illustrato in Figura 5.1.

Per simulare il valore di resistenza tra il treno in movimento e la stazione di alimentazione, variabile in relazione alla posizione del veicolo, è possibile considerare la corrente estratta/iniettata dal mezzo come una corrente equivalente estratta/iniettata dai due generatori fittizi adiacenti al settore in cui giace il treno, opportunamente calcolata. Così facendo la simulazione risulta essere molto più fluida rispetto ad utilizzare resistenze di valore variabile, che determinano un elevato onere computazionale. Misurando poi la tensione ai capi dei generatori fittizi è possibile ricavare la tensione al punto di contatto tra il treno e la rete. L'unico vincolo legato a questo approccio è il fatto che in ogni settore in cui viene

suddivisa la rete, per non perdere informazioni, può giacere in ogni momento al massimo un unico mezzo, perciò il numero di settori in simulazione deve essere scelto in base alla distanza reciproca minima che i mezzi possono raggiungere.

Facendo riferimento alla nomenclatura di Figura 5.2 è possibile trovare i valori di corrente da assegnare ai generatori del circuito equivalente di Figura 5.1. Si inizi valutando il bilancio di tensioni nei due circuiti, reale ed equivalente nel settore k -esimo:

$$\begin{cases} v_{in} = R_I i_{in} + R_{II}(i_{in} - i_{train,j}) + v_{out} + R_{IV}(i_{in} - i_{train,j}) + R_{III} i_{in} \\ v_{in} = R_P(i_{in} - i_{k,j}) + v_{out} + R_N(i_{in} - i_{k,j}) \end{cases} \quad (5.4)$$

dove v_{in} è la tensione ai capi della porta d'ingresso del settore e v_{out} è la tensione ai capi della porta d'uscita. Eguagliando le due espressioni della tensione in ingresso si ottiene:

$$(R_I + R_{III})i_{in} + (R_{II} + R_{IV})(i_{in} - i_{train,j}) = (R_P + R_N)(i_{in} - i_{k,j}) \quad (5.5)$$

Sapendo che:

$$R_I + R_{II} + R_{III} + R_{IV} = R_P + R_N \quad (5.6)$$

si ottiene:

$$(R_{II} + R_{IV})i_{train,j} = (R_P + R_N)i_{k,j} \quad (5.7)$$

Da cui si ricava il valore di corrente del generatore equivalente k -esimo corrispondente al j -esimo treno:

$$i_{k,j} = \frac{R_{II} + R_{IV}}{R_P + R_N} i_{train,j} \quad (5.8)$$

Ora sapendo che:

$$i_{k,j} + i_{(k+1),j} = i_{train,j} \quad (5.9)$$

si ottiene il valore di corrente del generatore equivalente $(k+1)$ -esimo corrispondente al j -esimo treno:

$$i_{(k+1),j} = i_{train,j} - i_{k,j} = \frac{R_I + R_{III}}{R_P + R_N} i_{train,j} \quad (5.10)$$

Il valore di corrente da assegnare ai generatori equivalente si ottiene poi con la sovrapposizione degli effetti per cui:

$$i_k = \sum_j i_{k,j} \quad (5.11)$$

$$i_{(k+1)} = \sum_j i_{(k+1),j} \quad (5.12)$$

Per calcolare la tensione al punto di contatto v_x a partire dalle informazioni del circuito equivalente si procede iniziando da un'altro bilancio di tensioni:

$$\begin{cases} v_{in} = (R_P + R_N)(i_{in} - i_k) + v_{out} \\ v_{in} = (R_I + R_{III})i_{in} + v_x \end{cases} \quad (5.13)$$

Si ricava dalla prima la corrente d'ingresso:

$$i_{in} = \frac{v_{in} - v_{out} + (R_P + R_N)i_k}{R_P + R_N} \quad (5.14)$$

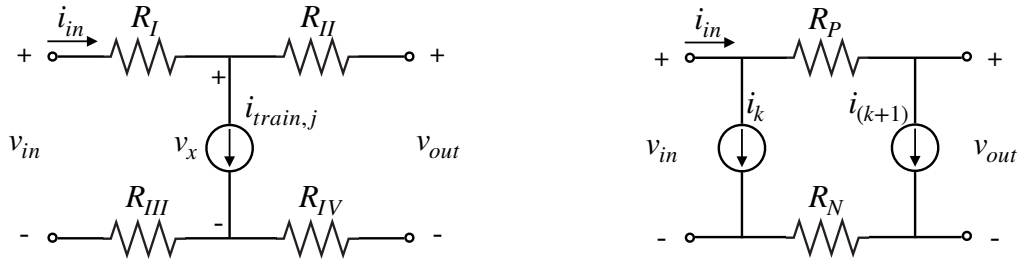


Figura 5.2: Circuito equivalente del treno nella rete in un k -esimo.

e sostituendo quanto ricavato nella seconda si ottiene il valore della tensione al punto di contatto cercato:

$$v_x = v_{in} - \frac{R_I + R_{III}}{R_P + R_N} (v_{in} - v_{out} + (R_P + R_N)i_k) \quad (5.15)$$

Si è scelto di simulare il tratto di rete compreso tra 5 stazioni passeggeri, pensando di alimentare la rete con due sottostazioni di alimentazione poste ai capi della rete di test.

Come avviene nella realtà la resistenza del ramo di alimentazione positivo è diversa da quella della linea negativa. In particolare sapendo che il polo positivo di alimentazione del treno è collegato alla catenaria oppure a una terza rotaia e che il polo negativo è collegato ai binari si ha che, soprattutto a causa delle diverse sezioni dei conduttori, la resistenza del ramo positivo è maggiore di quella del ramo negativo. I valori utilizzati in simulazione sono i seguenti [23]:

$$r_{pos} = 0.05 \frac{m\Omega}{km} \quad (5.16)$$

$$r_{neg} = 0.01 \frac{m\Omega}{km} \quad (5.17)$$

Per le linee di collegamento tra le reti che alimentano i due differenti versi del moto sono stati utilizzati gli stessi valori di resistenza per chilometro utilizzati per il ramo positivo, in quanto si è ipotizzato di utilizzare gli stessi conduttori della catenaria, e la distanza ipotizzata tra le due reti è di 50 m.

5.3 Riferimenti di comando

Sapendo che la velocità massima raggiungibile è di 90 km/h e che secondo la normativa UNI 11378 la massima accelerazione applicabile ad un convoglio passeggeri per evitare pericoli è di $1 m/s^2$, si è scelto di generare dei riferimenti di velocità con accelerazione costante dallo stato di fermata alla velocità massima e con una decelerazione costante dalla velocità massima a quella nulla. Si ottengono così delle leggi di comando della velocità trapezoidali. Per generalizzare la simulazione si è scelto inoltre di immaginare le stazioni equispaziate, con una distanza pari alla media delle distanze delle stazioni, ottenendo un comando di velocità periodico non vincolato dalle caratteristiche del singolo tratto di sistema preso in esame. Sapendo che la distanza media tra le stazioni è di 1150 m e imponendo un'accelerazione di riferimento di $0.85 m/s^2$, volutamente inferiore alla

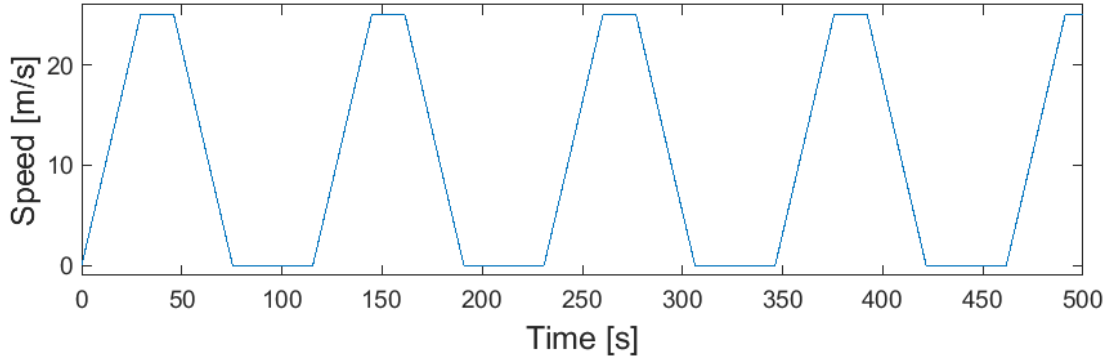


Figura 5.3: Riferimento di velocità per un treno in un ciclo di movimento.

massima ammissibile in modo da evitare di superare la soglia durante il transitorio di accelerazione nel veicolo reale, si ottiene che per andare da una stazione all'altra si impiega in media un tempo pari a:

$$t_p = t_{acc} + t_{cost} + t_{dec} \quad (5.18)$$

$$= \frac{v_{max}}{a} + \frac{\Delta x - \frac{1}{2}at_{acc}^2 - \frac{1}{2}at_{dec}^2}{v_{max}} + \frac{v_{max}}{a} \quad (5.19)$$

$$= 29.412s + 16.588s + 29.412s = 75.412s \quad (5.20)$$

Ponendo un tempo di fermata in stazione pari a 40 s si ottiene che il tempo che intercorre tra la partenza da una stazione e la ripartenza dalla stazione successiva è pari, in media, a circa 115.412 s. La Figura 5.3 rappresenta il profilo di velocità medio per il singolo mezzo.

Nelle diverse fasce orarie, a seconda dell'affluenza di passeggeri, è necessario variare la frequenza di passaggio dei treni, definita come il reciproco del tempo che intercorre tra la partenza di un mezzo da una stazione e l'arrivo di un altro. Si è scelto di simulare varie frequenze di passaggio, in modo tale da verificare il comportamento del sistema nelle diverse condizioni. In particolare verranno analizzate i casi di passaggio di un treno ogni 2, 4 e 6 minuti. La massima frequenza di passaggio è di un treno ogni 2 minuti perciò, in questa condizione, si ha che la distanza temporale tra la partenza di un treno e quello successivo è di:

$$\Delta t = \frac{1}{f_{passaggio}} + t_{fermata} = 120s + 40s = 160s \quad (5.21)$$

Da questo si ottiene che nella simulazione la distanza minima di riferimento tra due treni è maggiore della distanza tra una stazione e l'altra, quindi è sufficiente dividere la rete di test in numero di settori uguale al numero di stazioni per essere sicuri di non avere più veicoli nello stesso segmento di rete equivalente. Avendo un margine di soli 4 s dalla condizione definita si è scelto di dividere la rete in 6 settori al posto che 5, per non rischiare che le distanze reali, legate al riferimento da una certa dinamica, non risultino durante i transitori inferiori alla lunghezza di un particolare settore. Volendo simulare entrambe le direzioni di moto per tenere conto degli effetti rigenerativi la rete di test è stata suddivisa in 6 settori per direzione, come evidenziato in Figura 5.4. Si noti che le due tratte non sono indipendenti, ma sono collegate tra loro come nella struttura reale, in modo tale da condividere l'energia rigenerativa anche con i treni che viaggiano nel verso opposto.

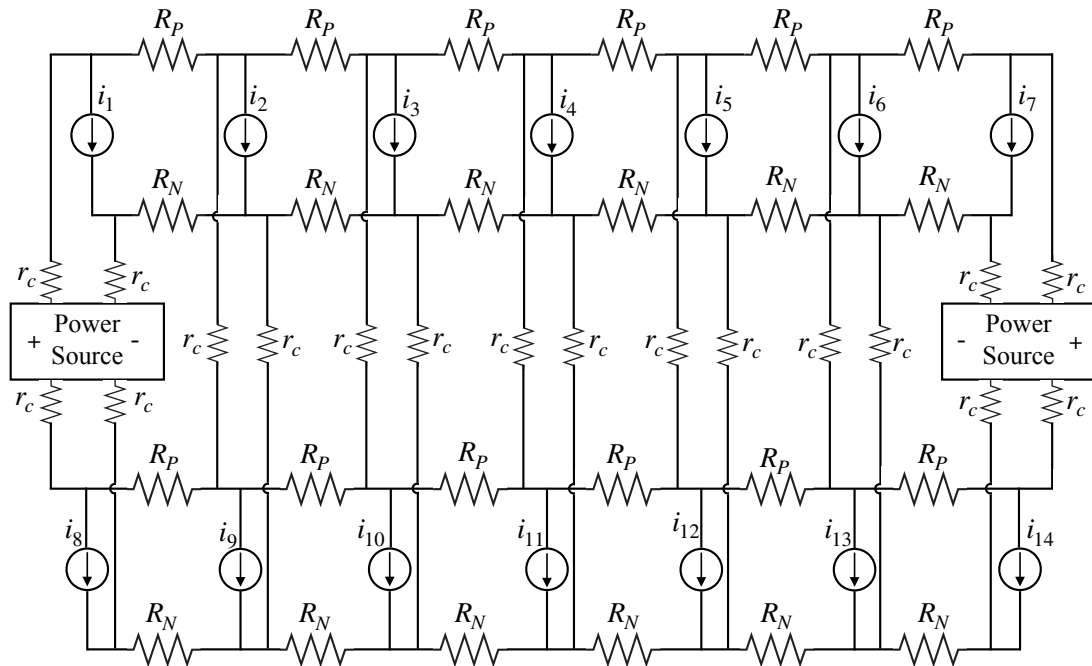


Figura 5.4: Modello della rete di test.

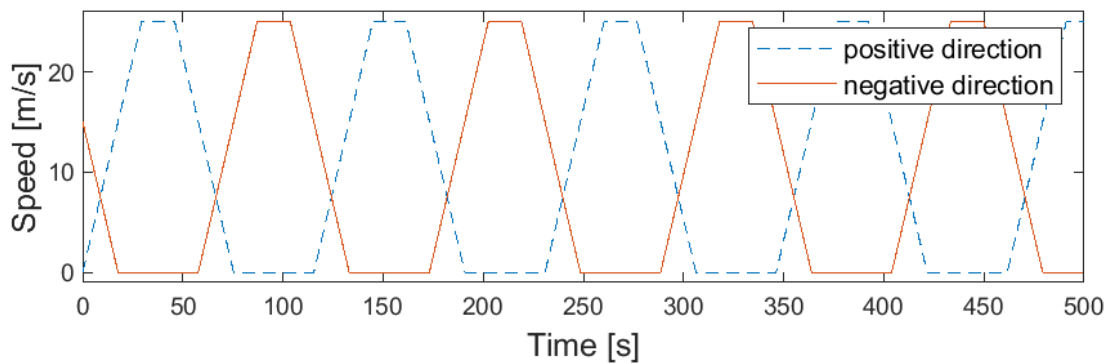


Figura 5.5: Confronto tra i riferimenti di velocità per treni che viaggiano in versi opposti, nel caso di sincronizzazione delle velocità.

Dal momento che la potenza istantanea richiesta dipende anche dalla sincronizzazione tra i treni che viaggiano in versi opposti, si è deciso di analizzare due possibili scenari:

- **sincronizzazione delle velocità:** il tempo in movimento in un verso è centrato con il tempo di attesa dei mezzi che viaggiano nell'altro verso, come evidenziato nei profili di velocità di Figura 5.5.
- **sincronizzazione delle partenze:** l'istante di partenza di un treno in un verso corrisponde all'istante di partenza di un treno nel verso opposto, ottenendo dei profili di velocità perfettamente sovrapponibili.

5.4 Dimensionamento

5.4.1 Sistema di controllo

Il dimensionamento del sistema di controllo segue diversi obiettivi tra cui:

- stabilizzazione della tensione dei bus di alimentazione dei dispositivi
- preciso inseguimento del riferimento di velocità per il mezzo
- massimizzazione del recupero energetico

Per raggiungere tali scopi tutte le bande passanti degli anelli di corrente dei buck e dei motori di treno e FESS sono poste a 200 Hz con un margine di fase di 80° . Per quanto riguarda l'anello di controllo del buck che regola la tensione del bus si è scelto di imporre la banda passante a 50 Hz , con un margine di fase, anche in questo caso, uguale a 80° .

La dinamica d'inseguimento del riferimento di movimento del treno dipende dalla banda passante dell'anello di velocità, la quale è stata posta a 20 Hz con un margine di fase di 80° , permettendo un quasi perfetto inseguimento del profilo desiderato.

Per massimizzare il recupero energetico inoltre si è scelto di imporre la banda passante dell'anello di controllo del SoC dell'accumulatore ad un valore che permetta di avere un tempo di risposta uguale al tempo per il quale il mezzo si muove a velocità costante, in modo tale che prima dell'inizio di una fase di decelerazione, lo stato di carica sia al livello di soglia desiderato. In particolare sapendo che in media il funzionamento alla velocità massima in un ciclo di movimento dura 16.588 s , utilizzando la formula semplificata che lega la banda passante di un sistema del primo ordine a tempo di risposta si ottiene:

$$B \approx \frac{0.35}{t_{rise}} \approx \frac{0.35}{16.588\text{ s}} = 0.02\text{ Hz} \quad (5.22)$$

dove B è la banda passante da imporre. Anche in questo caso si è scelto di porre un margine di fase pari a 80° .

Seguendo questa strategia di dimensionamento si ottiene che la tensione dei bus di alimentazione rimane stabile e costante, il riferimento di velocità viene seguito in modo accurato e il recupero energetico viene controllato principalmente dalla componente feed-forward del controllore del FESS, come presentato in Sezione 4.2.2.

5.4.2 Flywheel

Per procedere al dimensionamento del FESS è necessario considerare separatamente la modalità di accumulo *on-board* da quella *wayside*.

On-board

In questa modalità è necessario valutare la potenza e l'energia richiesta/erogata dal mezzo in un ciclo di movimento, indipendentemente dalla rete in cui lavora. Nella Figura 5.6 si nota come la massima richiesta di potenza è pari a circa 6.7 MW mentre la massima potenza erogata in fase di rigenerazione è di 5 MW .

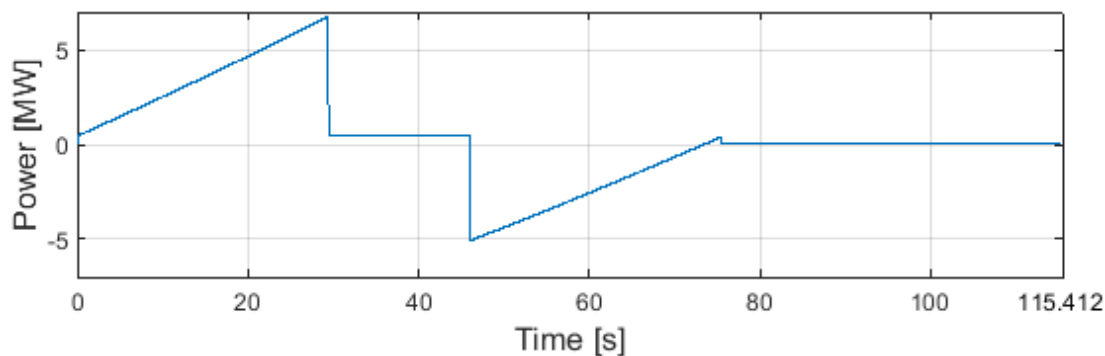


Figura 5.6: Potenza richiesta alla rete dal treno senza FESS.

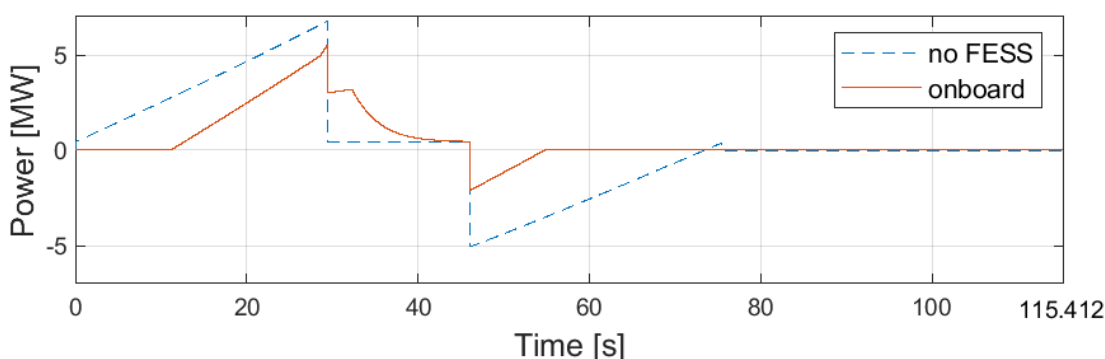


Figura 5.7: Confronto tra la potenza richiesta alla rete dal treno senza e con i FESS.

Volendo mantenere indipendenti le due unità di trazione che costituiscono un singolo treno si è scelto di inserire a bordo di ogni mezzo due FESS. Le potenze da gestire con un accumulatore sono quindi pari a metà delle potenze in gioco nel treno. Il dispositivo di accumulo deve essere progettato per riuscire a ricavare tutta l'energia erogata durante le fasi di frenata, per cui è necessario che ogni FESS riesca ad assorbire una potenza pari a $2.5 MW$. L'accumulatore opera in modo discontinuo, quindi è possibile sfruttare la regione di funzionamento non continuativo dei motori, lavorando ad una potenza superiore di quella nominale. Ipotizzando di avere una sovrapotenza del 65% è possibile utilizzare per ogni singolo FESS un motore con potenza nominale pari a $1.5 MW$. Per ridurre le dispersioni di energia per effetto Joule legate alla resistenza dell'avvolgimento e alla corrente che scorre nel motore, si è pensato di utilizzare due motori coassiali con potenza nominale di $750 kW$. Così facendo, se le resistenze del circuito di statore sono circa uguali, le correnti sul singolo motore risultano all'incirca dimezzate rispetto al caso precedente, così come le perdite per effetto Joule:

$$\frac{P_{2\text{motori}}}{P_{1\text{motore}}} \approx \frac{2 \left[\frac{3}{2} R' \left(\frac{i}{2} \right)^2 \right]}{\frac{3}{2} R'' i^2} \approx \frac{1}{2} \quad \text{se } \frac{R'}{R''} \approx 1 \quad (5.23)$$

Volendo ridurre le dimensioni geometriche del volano si è scelto inoltre di utilizzare motori che lavorino ad elevate velocità (HSPMSM - *High Speed* PMSM), di cui sono riportati i dati tecnici utilizzati per la simulazione in Tabella 5.3.

In Figura 5.7 è illustrato un confronto tra la potenza assorbita dal treno nel caso sia presente o meno l'accumulatore.

Tipologia	HS-PMSM	
Tensione nominale	750	V
Corrente nominale*	1150	A
Corrente di picco*	1500	A
Potenza nominale	750	kW
Potenza di picco*	940	kW
Velocità nominale	20000	rpm
Velocità massima*	25000	rpm
Coppia nominale*	360	$N \cdot m$
Coppia di picco*	450	$N \cdot m$
Inerzia del rotore*	0.200	$kg \cdot m^2$
Resistenza di fase*	40	$m\Omega$
Induttanza di fase*	8	mH
Flusso del magnete permanente*	0.026	$V \cdot s$
Numero di coppie polari*	8	
Massa*	250	kg

(*) valore stimato

Tabella 5.3: Dati tecnici della macchina elettrica del *Flywheel Energy Storage System*.

Per dimensionare il flywheel si analizza invece l'energia prelevata ed erogata dal treno durante un ciclo di lavoro. Dalle simulazioni si trova che durante un'accelerazione l'energia prelevata vale circa $29 kWh$, mentre durante una decelerazione vengono erogati indicativamente $19.5 kWh$, come illustrato in Figura 5.8.

In una prima analisi quindi si è pensato di dimensionare i volani in modo tale che possano contenere tutta l'energia necessaria a compiere un'accelerazione in un ciclo di lavoro medio. Seguendo la procedura presentata nel Sezione 2.2 si ottiene il valore del momento d'inerzia desiderato per i volani. Si inizia calcolando

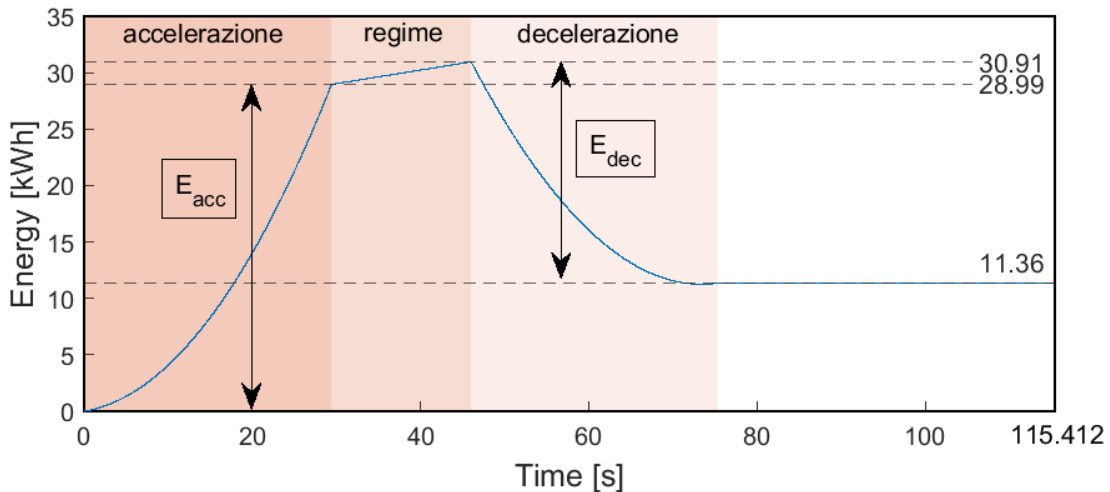


Figura 5.8: Energia richiesta alla rete dal treno.

l'energia massima accumulabile alla massima velocità:

$$\begin{aligned} E_{max} &= \frac{E_{disp}}{1 - k_{\omega}^2} \\ &= \frac{29kWh \cdot 3.6 \cdot 10^6 \frac{J}{kWh}}{1 - 0.5^2} \approx 140 \cdot 10^6 J \end{aligned} \quad (5.24)$$

Ogni volano deve poter accumulare quindi 70 MJ. Conoscendo la velocità massima del FESS si ricava il momento d'inerzia desiderato:

$$\begin{aligned} E_{max} = \frac{1}{2} J \omega_{max}^2 \rightarrow J &= \frac{2E_{max}}{\omega_{max}^2} \\ &= \frac{2 \cdot 70MJ}{\left(20000rpm \cdot \frac{\pi}{30} \frac{rad/s}{rpm}\right)^2} \approx 32kgm^2 \end{aligned} \quad (5.25)$$

La soglia di SoC fino alla quale interviene il regolatore dello stato di carica viene posta, sempre in prima approssimazione, ad un valore pari a:

$$\begin{aligned} SoC_{th,\%} &= \frac{E_{acc} - E_{dec}}{E_{acc}} \\ &= 100 \cdot \frac{29kWh - 19.5kWh}{29kWh} \approx 35\% \end{aligned} \quad (5.26)$$

Si noti che in questa prima analisi non si è tenuto conto delle perdite legate al FESS in quanto sono difficilmente identificabili. Un dimensionamento più accurato è possibile attraverso l'analisi dei risultati di varie simulazioni con parametri differenti di momento d'inerzia e di soglia di stato di carica, dalle quali si è scelto di utilizzare un flywheel con momento d'inerzia pari a $25 kgm^2$ e di imporre la soglia di SoC al 25%. In Figura 5.9 vengono confrontate le evoluzioni nel tempo dello stato di carica con i parametri iniziali e con quelli scelti a seguito dell'analisi delle varie simulazioni. Si nota che con il secondo set di parametri è possibile sfruttare maggiormente il range operativo, in termini di stato di carica, del dispositivo di accumulo, con l'ulteriore vantaggio di ridurre l'ingombro del volano. In ogni caso l'ottimizzazione di tutte le grandezze prese in esame dipende dal caso specifico e può essere oggetto di eventuali lavori futuri, in quanto esula dagli obiettivi di questa tesi, che vuole offrire un risultato indicativo delle potenzialità del sistema.

Sfruttando le formule riportate in Sezione 2.2 è possibile ricavare le dimensioni indicative di un volano con momento d'inerzia pari a $25 kgm^2$ per capire se l'ingombro è compatibile con l'applicazione desiderata. Ipotizzando di costruire il flywheel in materiale composito di cui sono riportate le caratteristiche tecniche in Tabella 5.4, si inizia calcolando la velocità tangenziale massima ammissibile:

$$v_{max}^2 = \frac{4\sigma_{\theta,max}}{\rho} \frac{1}{[(1 - \nu)k_r^2 + (3 + \nu)]} \approx 1350 \frac{m^2}{s^2} \quad (5.27)$$

da cui è possibile ricavare il raggio esterno del volano:

$$r_o = \zeta \frac{v_{max}}{\omega_{max}} \approx 0.5 m \quad (5.28)$$

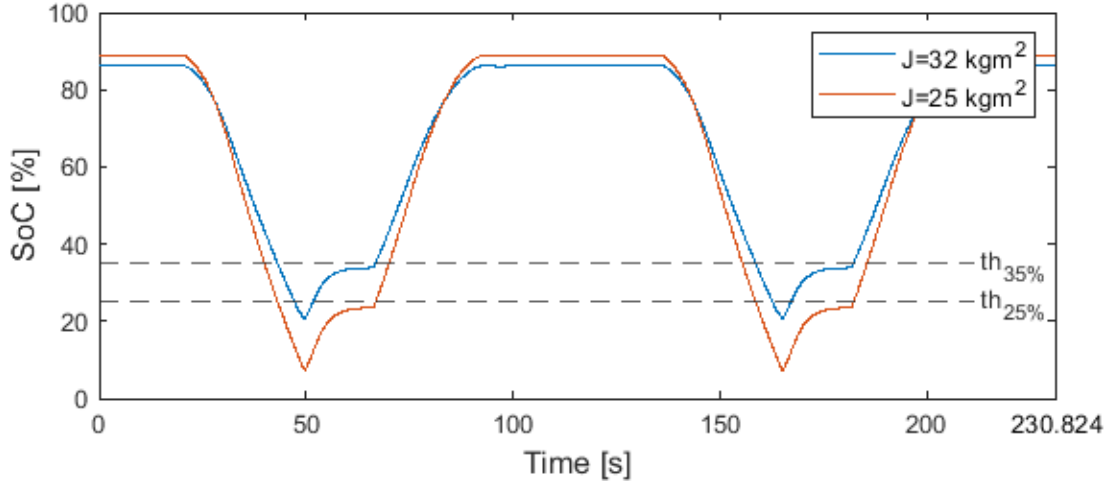


Figura 5.9: Confronto tra l'evoluzione dello stato di carica del FESS per diversi valori di momento d'inerzia e soglia d'intervento del controllore.

Tipologia	IM7 carbon-epoxy		
Densità	ρ	1610	kg/m^3
Coefficiente di Poisson	ν	0.03	
Coefficiente di sicurezza	ζ	75	%
Massima tensione di snervamento circonferenziale	$\sigma_{\theta,max}$	2589	MPa

Tabella 5.4: Caratteristiche tecniche materiale composito per il FESS.

Ora è possibile ricavare il volume totale:

$$V = \frac{2J}{\rho r_o^2 (1 + k_r^2)} \approx 0.083 m^3 \quad (5.29)$$

da cui si ricava l'altezza:

$$h = \frac{V}{\pi r_o^2 (1 - k_r^2)} \approx 0.21 m \quad (5.30)$$

La massa aggiuntiva legata alla presenza dei due accumulatori a bordo si può calcolare indicativamente come segue:

$$m_{FESS} = 2 \cdot (m_{flywheel} + 2 \cdot m_{motore}) \quad (5.31)$$

$$= 2 \cdot (V\rho + 2 \cdot m_{motore}) \quad (5.32)$$

$$\approx 2 \cdot (134 kg + 500 kg) = 1134 kg \quad (5.33)$$

Le dimensioni ottenute sono compatibili con l'applicazione *on-board* e l'aggiunta di massa rispetto al caso senza FESS è inferiore allo 0.4%.

Wayside

In questa modalità è necessario valutare la potenza e l'energia richiesta/erogata dalla sorgente di alimentazione che è direttamente legata a:

- struttura della rete
- frequenza di passaggio dei treni
- sincronizzazione tra i mezzi che viaggiano in versi opposti.

Al diminuire del numero delle sottostazioni di alimentazione la potenza istantanea richiesta alla singola aumenta, perciò il dimensionamento deve essere svolto avendo una conoscenza precisa della rete. Al diminuire della frequenza di passaggio inoltre viene meno l'effetto di condivisione dell'energia tra i mezzi e aumenta la potenza rigenerativa massima in ingresso alle sorgenti di alimentazione. Anche la sincronizzazione tra i mezzi che viaggiano in versi opposti influisce sulla condivisione dell'energia nella rete, infatti l'effetto di questa è tanto più evidente quanto più si verifica una corrispondenza tra le fasi di accelerazione e decelerazione di mezzi diversi.

In questa analisi viene quindi considerata la rete di test presentata in Sezione 5.2, perciò le grandezze vengono ricavate per questa specifica configurazione. Considerando altre topologie varieranno le taglie dei dispositivi impiegati, ma l'effetto complessivo in termini di potenza ed energia non è molto differente.

La Figura 5.10 illustra la potenza in uscita da una singola stazione, per le due modalità di sincronizzazione analizzate, nel caso la frequenza di passaggio sia di un treno ogni 6 minuti, ottenuta simulando il sistema senza accumulatore. Si nota che la massima potenza rigenerativa, per entrambe le modalità di sincronizzazione, è di circa 1 MW, quindi è possibile ipotizzare di utilizzare per il FESS un singolo motore uguale a quello identificato in Sezione 5.4.2 nel caso *on-board*. A differenza del caso precedente il dimensionamento del volano non è critico, in quanto le limitazioni di ingobro sono meno stringenti in caso di accumulo a terra. A tal proposito si è scelto quindi di non soffermarsi particolarmente sul dimensionamento del volano, scegliendo di simularne uno con caratteristiche identiche a quello utilizzato nel caso *on-board*. Per quanto riguarda la gestione dello stato di carica, essendo l'obiettivo del dispositivo quello di fungere da buffer energetico evitando che la potenza rigenerativa venga consumata nei banchi di resistori (chopper) e non quello di alimentare la rete, si è scelto di porre la soglia di riferimento al 50%. Così facendo il dispositivo può sia assorbire che erogare energia quando necessario, dal momento a regime il suo livello di carica è intermedio.

5.5 Risultati

In questa sezione si vuole confrontare i picchi di potenza e i consumi energetici complessivi del sistema per differenti frequenze di passaggio dei treni e modalità di sincronizzazione, nelle due diverse configurazioni di accumulo. I risultati vengono poi confrontati con il caso senza accumulatore, permettendo così di quantificare l'eventuale miglioramento derivante dall'utilizzo di accumulatori nel sistema, così da giustificare o meno l'implementazione.

5.5.1 Energia consumata

La Figura 5.11 riporta i consumi energetici complessivi del sistema per frequenze di passaggio di un treno ogni 2, 4 e 6 minuti, in un tempo di 30 minuti, nel caso

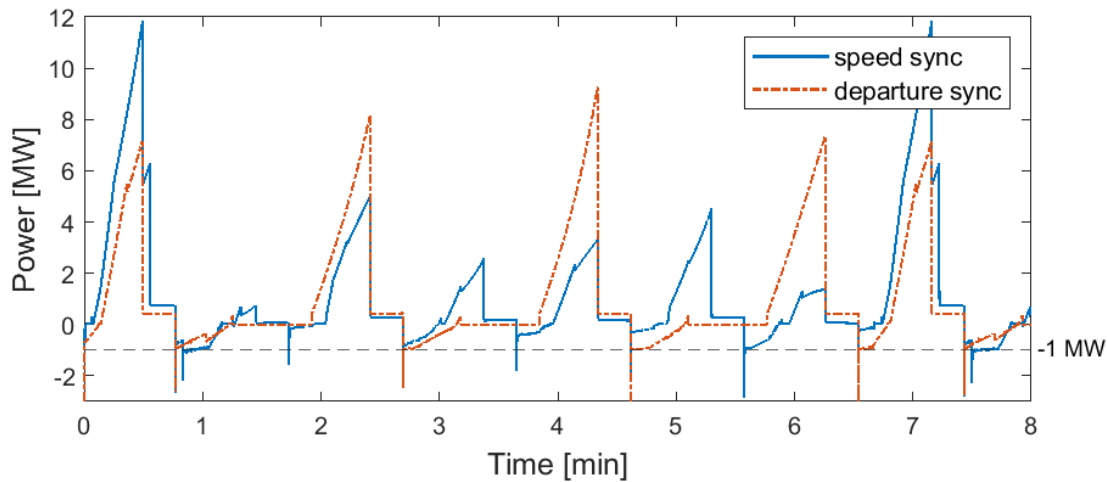


Figura 5.10: Potenza istantanea richiesta ad una sottostazione di alimentazione ricavata simulando il sistema senza accumulatore.

di sincronizzazione delle velocità, mentre la Figura 5.12 presenta i risultati nel caso di sincronizzazione delle partenze.

Nel caso in cui la frequenza sia di un treno ogni 2 minuti la presenza di molti mezzi ravvicinati permette un grande effetto di condivisione dell'energia, garantendo lo sfruttamento l'energia rigenerativa iniettata in rete direttamente a un altro treno adiacente che sta accelerando. Accumulare l'energia a bordo non porta a significativi vantaggi rispetto al caso senza accumulatori in quanto, sebbene ciò permetta di recuperare anche l'energia che non viene condivisa, l'energia dispersa per effetto Joule nelle conversioni energetiche dei FESS è circa uguale a quella che verrebbe dispersa a causa della mancata condivisione. L'accumulo *wayside* in questo caso permette di recuperare l'energia in eccesso, riducendo al tempo stesso le perdite di conversione, grazie al minor numero di accumulatori utilizzati. In generale quindi l'utilizzo di accumulatori energetici, nel caso di elevate frequenze di passaggio, porta ad una riduzione dei consumi ma, sapendo che l'effetto della condivisione dell'energia tra i veicoli è predominante, risulta conveniente accumulare il surplus complessivo di energia nella rete piuttosto che gestire in modo autonomo l'energia in ogni mezzo.

Al diminuire della frequenza di passaggio, come nel caso di un treno ogni 4 o 6 minuti, l'effetto della condivisione dell'energia si riduce e le perdite di trasmissione nella rete risultano essere più marcate. Non è più conveniente recuperare l'energia nelle stazioni in quanto, essendoci meno treni in movimento, la tensione al punto di contatto tra treno e rete risulta essere in media più alta e se la sovratensione supera la soglia limite del 20% imposta dagli standard europei [26], il regolatore di tensione del convertitore di rete impone la dispersione dell'energia in un banco di resistenze a bordo del treno. Accumulando l'energia rigenerativa *on-board* quindi si evita questo problema. Dalle simulazioni risulta evidente che, in questi casi, le perdite per effetto Joule nelle conversioni energetiche dei FESS sono inferiori alla quantità di energia dissipata a causa delle sovratensioni di rete. Con l'utilizzo di un accumulatore *wayside* comunque si ottiene un miglioramento rispetto al caso senza accumulatori, nonostante l'energia recuperabile sia limitata.

Dai risultati delle simulazioni si capisce quindi che quando la frequenza di passaggio è elevata e quindi l'effetto di condivisione è molto presente, la quantità

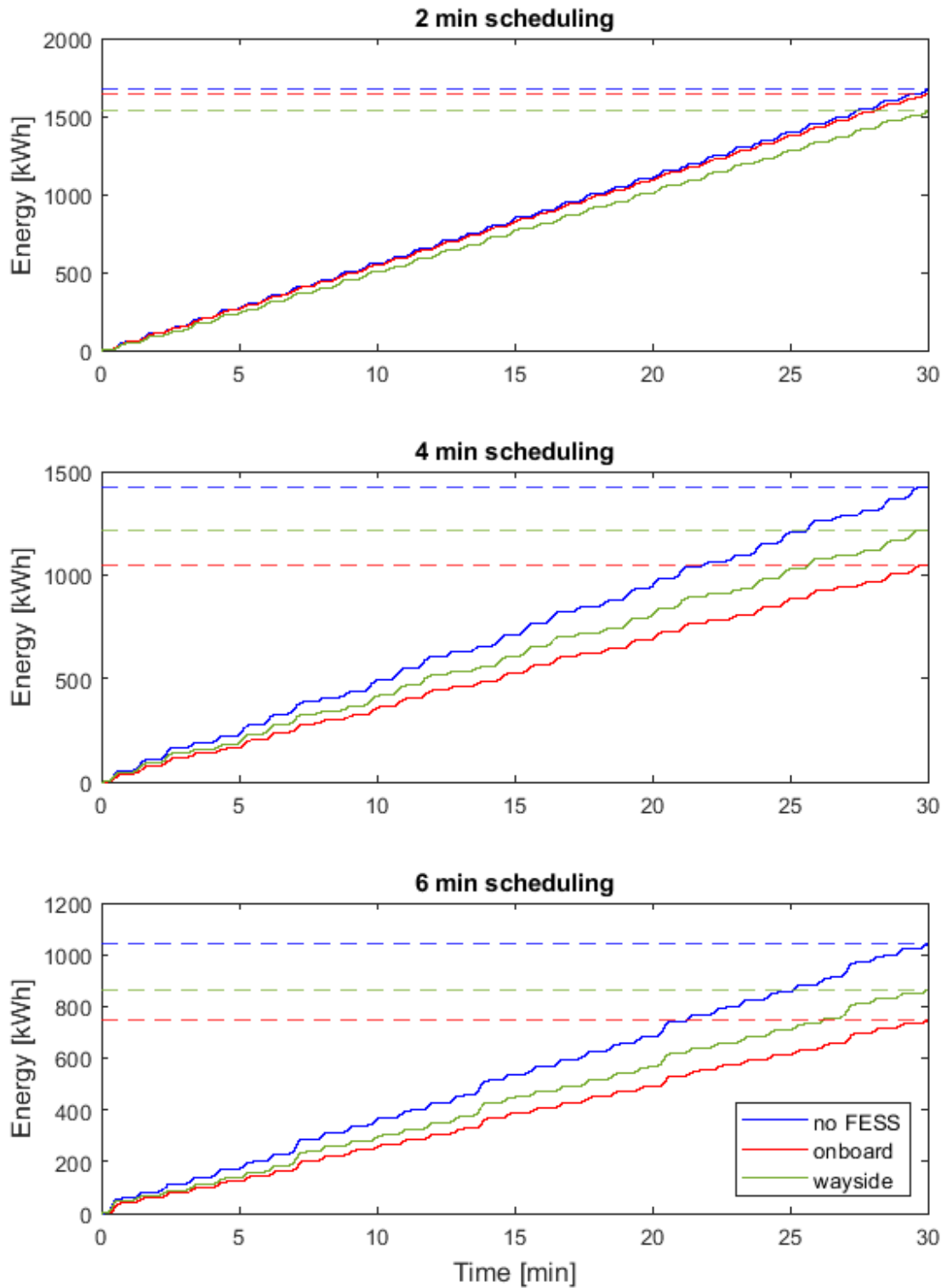


Figura 5.11: Energia consumata in 30 minuti per varie frequenze di passaggio dei treni nel caso di sincronizzazione delle velocità.

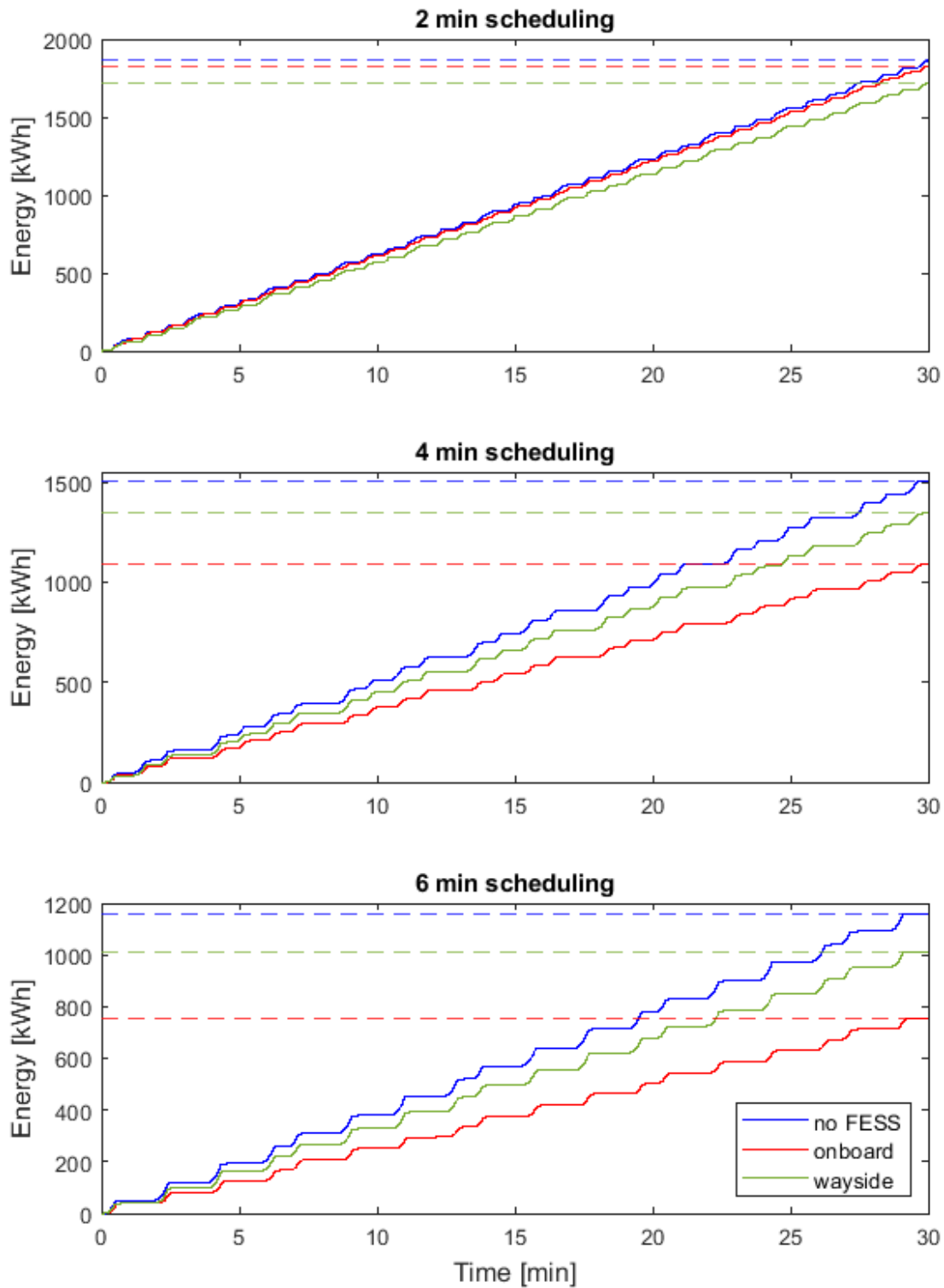


Figura 5.12: Energia consumata in 30 minuti per varie frequenze di passaggio dei treni nel caso di sincronizzazione delle partenze.

di energia recuperabile in stazione è maggiore rispetto alla somma delle energie nette accumulate nei singoli treni. Quando la frequenza di passaggio si riduce invece l'effetto di condivisione diminuisce e l'energia recuperabile in stazione, che è limitata dalla tensione nei punti di contatto tra treno e rete, risulta inferiore della somma delle energie nette accumulate nei singoli treni.

Analizzando le due modalità di sincronizzazione prese in esame si evince che in media l'energia richiesta nel caso di sincronizzazione delle velocità è inferiore a quella richiesta nel caso di sincronizzazione delle partenze. Ciò è legato al fatto che nel primo caso sussiste una maggiore corrispondenza tra accelerazioni e decelerazioni dei mezzi, quindi l'effetto della condivisione è più marcato. Nel secondo caso invece nelle fasi di accelerazione simultanea viene richiesta una maggiore potenza alla rete, che si traduce in maggiori perdite di trasmissione dell'energia, mentre nelle fasi di decelerazione l'erogazione contemporanea di energia da parte dei treni causa l'aumento della tensione media della di rete, causando maggiori dispersioni nelle resistenze di protezione a bordo dei treni.

L'utilizzo di accumulatori *on-board* limita fortemente l'effetto di questi fenomeni e ciò si traduce in una riduzione dei consumi, che risultano essere simili nelle due modalità di sincronizzazione quando le frequenze di passaggio sono minori e quindi l'effetto di condivisione è meno presente.

Sebbene nel caso di sincronizzazione delle partenze l'energia iniettata in rete durante le fasi di decelerazione sia maggiore, la potenza massima in ingresso alle stazioni rimane la stessa in quanto è limitata dal verificarsi di sovratensioni di rete, come evidenziato nella Sezione 5.4.2. L'energia recuperabile tramite l'utilizzo di accumulatori *wayside* risulta quindi inferiore perchè durante una fase di recupero l'energia assorbita è la stessa, ma queste fasi risultano essere meno frequenti.

5.5.2 Potenza estratta

Le Figure 5.13, 5.15, 5.17 illustrano la potenza istantanea e rms richiesta ad una singola sorgente di alimentazione, per frequenze di passaggio di un treno ogni 2, 4 e 6 minuti nel caso di sincronizzazione delle velocità dei treni che viaggiano in versi opposti, mentre le Figure 5.14, 5.16, 5.18 riguardano il caso di sincronizzazione delle partenze.

Si nota che i picchi di potenza nelle diverse configurazioni sono indipendenti dalla frequenza di passaggio, mentre la potenza rms ne è direttamente proporzionale. Per quanto riguarda la potenza rms valgono le stesse considerazioni illustrate nella Sezione 5.5.1 mentre, valutando i picchi massimi, si nota che la configurazione *on-board* permette un dimezzamento della potenza istantanea richiesta. Questo risultato è possibile grazie al fatto che i treni non sono alimentati solamente dalla sorgente di alimentazione principale, ma anche dall'accumulo locale di energia.

Nella modalità *wayside* si ottiene comunque una riduzione dei picchi rispetto al caso senza accumulatori ma, essendo la potenza nominale del FESS limitata, l'attenuazione risulta essere poco significativa.

Valutando l'effetto della sincronizzazione dei treni che viaggiano in versi opposti si nota che i picchi di potenza richiesti nel caso di sincronizzazione delle partenze sono in media più alti di quelli che si hanno nel caso di sincronizzazione delle velocità. Possono verificarsi alcune situazioni in cui il picco di potenza ri-

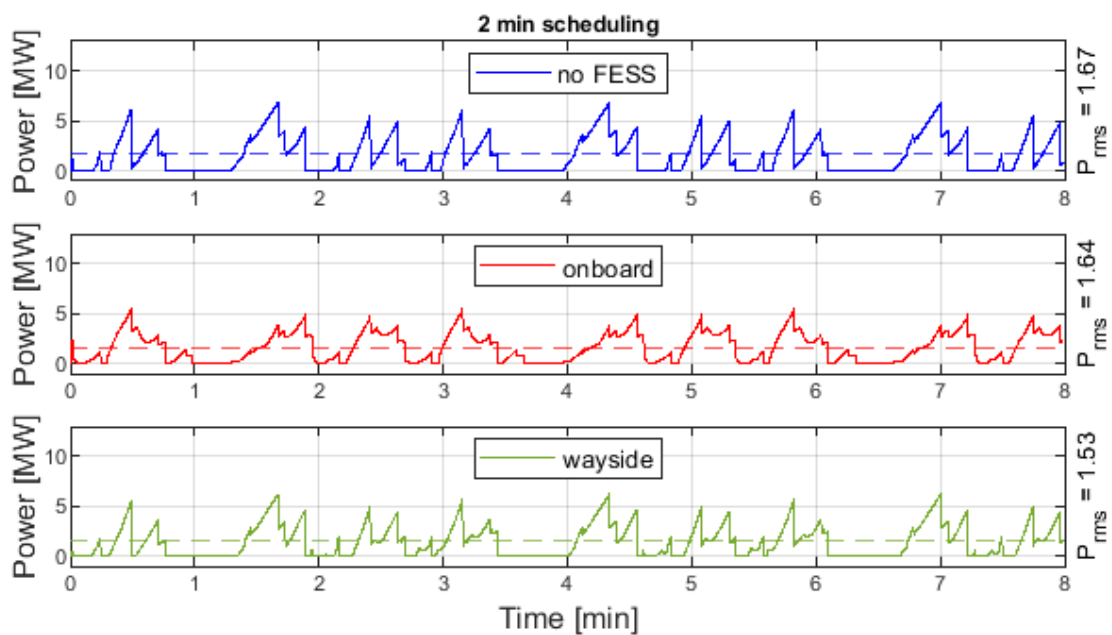


Figura 5.13: Potenza istantanea e rms estratta da una sottostazione di alimentazione con frequenza di passaggio di un treno ogni 2 minuti, nel caso di sincronizzazione delle velocità.

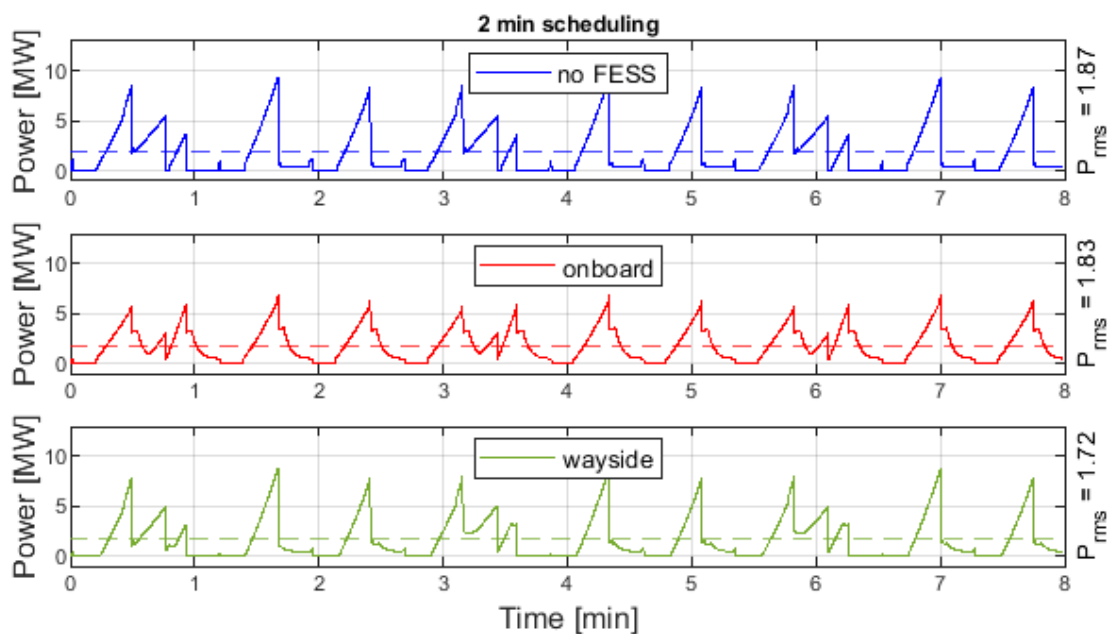


Figura 5.14: Potenza istantanea e rms estratta da una sottostazione di alimentazione con frequenza di passaggio di un treno ogni 2 minuti, nel caso di sincronizzazione delle partenze.

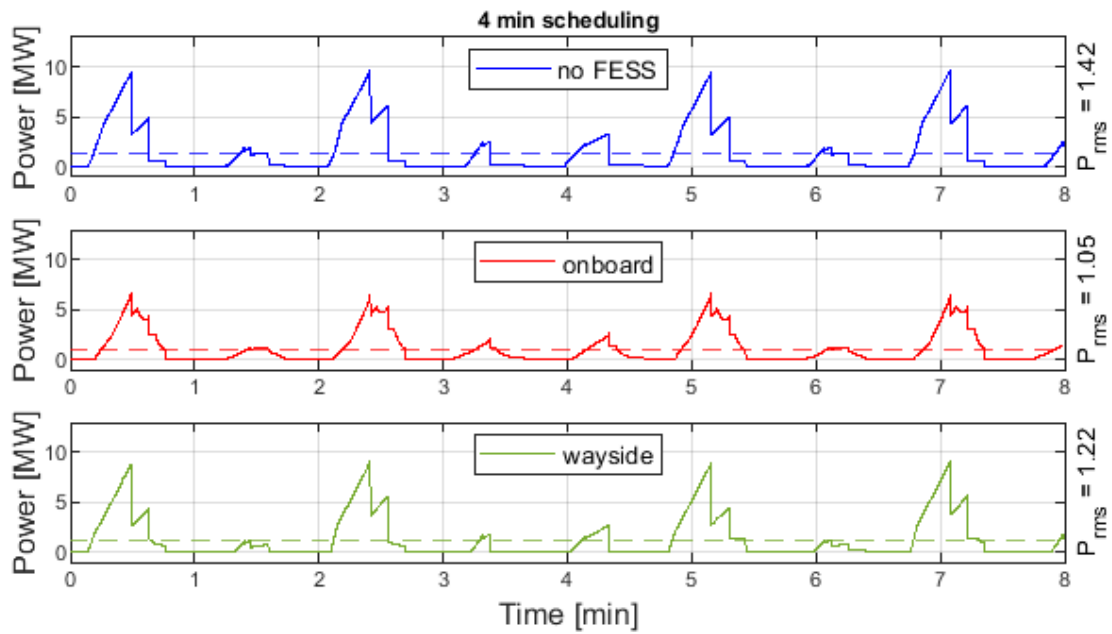


Figura 5.15: Potenza istantanea e rms estratta da una sottostazione di alimentazione con frequenza di passaggio di un treno ogni 4 minuti, nel caso di sincronizzazione delle velocità.

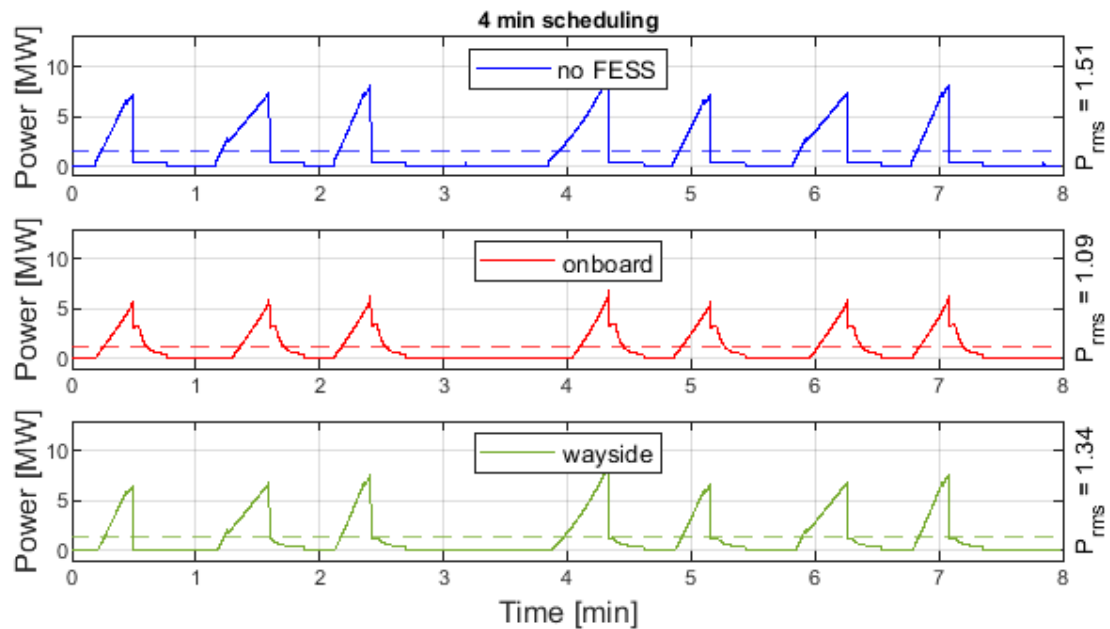


Figura 5.16: Potenza istantanea e rms estratta da una sottostazione di alimentazione con frequenza di passaggio di un treno ogni 4 minuti, nel caso di sincronizzazione delle partenze.

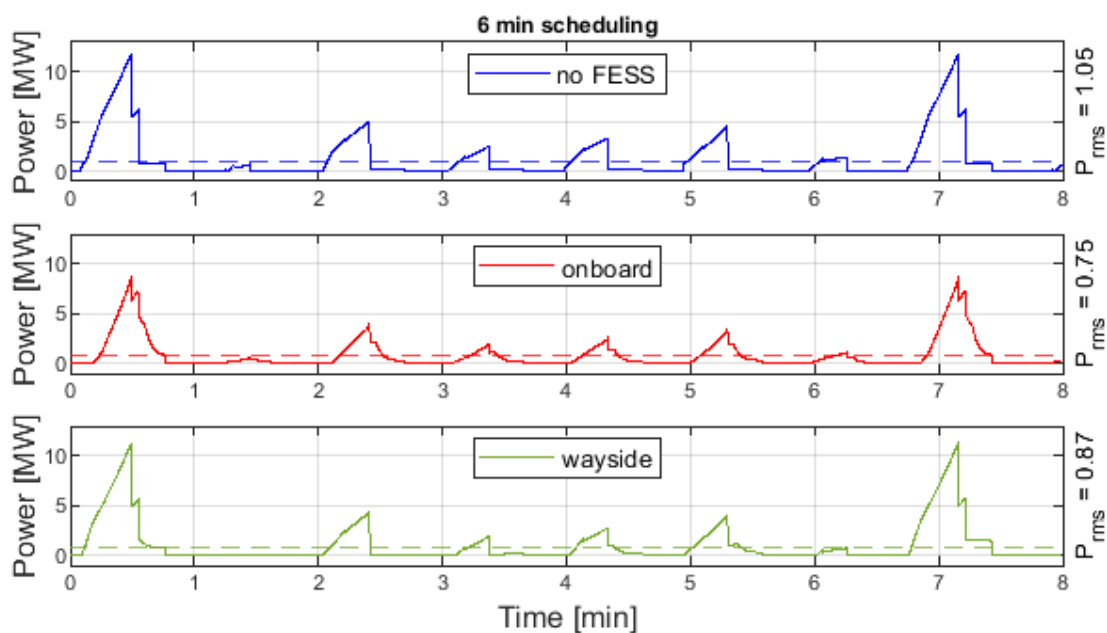


Figura 5.17: Potenza istantanea e rms estratta da una sottostazione di alimentazione con frequenza di passaggio di un treno ogni 6 minuti, nel caso di sincronizzazione delle velocità.

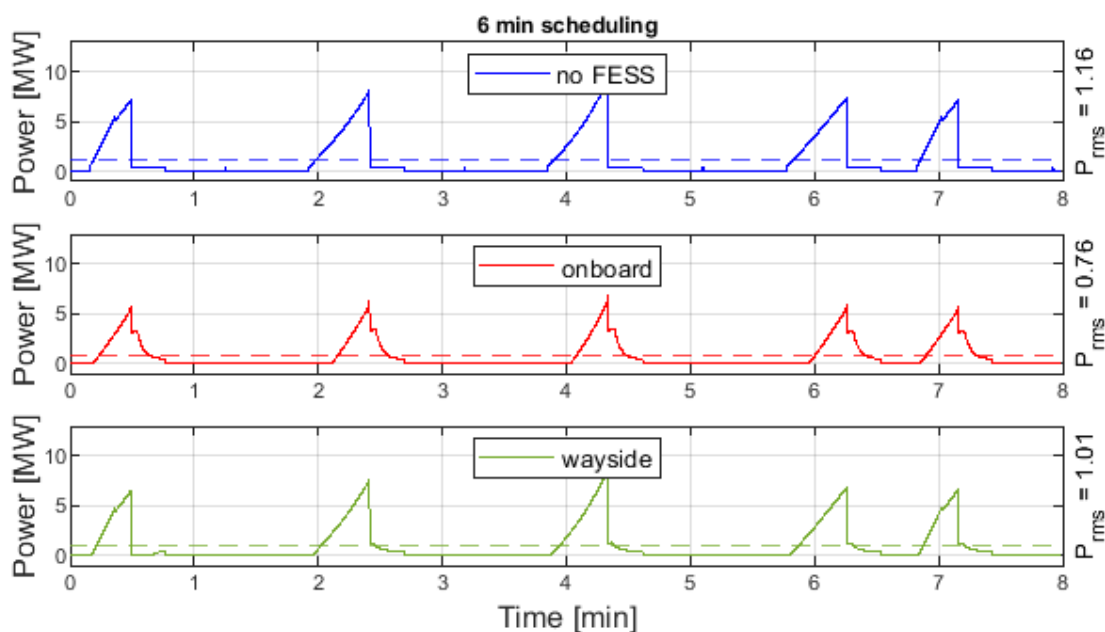


Figura 5.18: Potenza istantanea e rms estratta da una sottostazione di alimentazione con frequenza di passaggio di un treno ogni 6 minuti, nel caso di sincronizzazione delle partenze.

chiesto con la sincronizzazione delle velocità sia più alto rispetto a quello richiesto nell'altra modalità, ma questi avvenimenti hanno luogo sporadicamente ed sono causati da particolari sincronizzazioni temporanee tra le accelerazioni dei treni che viaggiano in versi opposti.

Conclusioni

L'analisi effettuata ha verificato che l'utilizzo di sistemi di accumulo dell'energia basati su flywheel può essere una valida scelta nel campo della trazione elettrica per recuperare l'energia rigenerativa prodotta in fase di frenata. I FESS (*Flywheel Energy Storage System*) infatti offrono una grande densità di potenza, rapidi tempi di risposta, un'elevata efficienza e una lunga durata in termini di cicli operativi. L'aspetto caratteristico più penalizzante di questa tipologia di accumulatori è l'elevato tasso di autoscarica ma, nell'ambito della trazione, non è particolarmente limitante in quanto i tempi medi dei cicli operativi sono brevi, nell'ordine massimo dei minuti. I costi di questa tecnologia potrebbero a primo impatto sembrare superiori a quelli di altri accumulatori presenti nel mercato, ma se la valutazione viene effettuata rispetto al numero di cicli ammissibili, l'utilizzo dei FESS risulta essere estremamente conveniente. Sono ottimi anche a livello di impatto ambientale e smaltimento a fine vita in quanto non contengono materiali pericolosi e una progettazione accurata garantisce elevati margini di sicurezza, limitando allo stesso tempo gli ingombri sia geometrici che di peso.

Lo schema di controllo proposto, basato su una regolazione in catena chiusa dello stato di carica e in feed-forward degli scambi di potenza, permette al FESS di lavorare sempre all'interno dei range operativi imposti, massimizzando contemporaneamente il recupero dell'energia rigenerativa. Il punto forte della strategia di controllo sviluppata è che questa può essere implementata, con modifiche minime, sia in accumulatori a bordo del mezzo che a terra.

Il dimensionamento del dispositivo è stato effettuato in modo tale da permettere un completo assorbimento dell'energia rigenerativa ma eventuali studi futuri potranno mirare ad una ottimizzazione dei parametri dell'accumulatore che massimizzi l'efficienza del sistema complessivo, tenendo conto anche del comportamento induttivo della rete.

Per verificare gli effetti dell'utilizzo di accumulatori basati su flywheel in un sistema reale sono state effettuate delle simulazioni basate sui parametri medi della linea 2 della metropolitana di Milano in diverse condizioni operative. Analizzando i risultati ottenuti si è visto che l'utilizzo di FESS porta ad una riduzione sia dell'energia totale utilizzata che dei picchi di potenza richiesti alle sottostazioni di alimentazione, specialmente quando le frequenze di passaggio dei treni sono ridotte e quindi l'effetto di condivisione dell'energia è limitato. In particolare grazie alla modalità di accumulo *wayside* si ottiene una riduzione dei consumi di energia del sistema che va dal 8% al 15% circa, mentre nel caso di accumulo *on-board* una riduzione che va dal 2% a 32%, a seconda delle frequenze di passaggio dei treni. I miglioramenti ottenuti nel caso di accumulo a bordo sono da attribuire alla diminuzione delle perdite di trasmissione sulla linea elettrica, grazie al fatto che non iniettando energia in rete, non si generano sovratensioni nei punti di contatto tra

i mezzi e i conduttori di alimentazione, le quali porterebbero all'attivazione di sistemi di protezione dissipativi che fanno uso di banchi di resistori per eliminare l'energia in eccesso.

La presenza di accumulatori in ogni treno, nel caso di stoccaggio dell'energia a bordo, permette un'operatività efficiente del sistema anche nel caso di malfunzionamento di alcuni FESS. Nel caso di accumulo a terra invece sono necessari molti meno dispositivi e quindi i costi d'investimento sono inferiori ma, nel caso si verificasse un malfunzionamento, ne risentirebbe l'efficienza dell'intero sistema.

In generale l'utilizzo di accumulatori basati su flywheel porta a significativi vantaggi dal punto di vista dei consumi energetici in un sistema di trazione centralizzato e la modalità di accumulo dovrà essere scelta sulla base di un trade-off tra costi, affidabilità ed efficienza.

Bibliografía

- [1] A. González-Gil, R. Palacin, and P. Batty, “Sustainable urban rail systems: Strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy,” *Energy Conversion and Management*, vol. 75, pp. 374–388, 2013.
- [2] T. Albrecht, “Reducing power peaks and energy consumption in rail transit systems by simultaneous train running time control,” *Computers in Railways IX*, vol. 15, p. 885–894., 2004.
- [3] M. Steiner and J. Scholten, “Energy storage on board of dc fed railway vehicles pesc 2004 conference in aachen, germany,” *IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference*, vol. 1, pp. 666–671, 2004.
- [4] F. Ciccarelli, D. Iannuzzi, and P. Tricoli, “Control of metro-trains equipped with onboard supercapacitors for energy saving and reduction of power peak demand,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 24, p. 36–49, 2012.
- [5] R. Barrero, X. Tackoen, and J. Van Mierlo, “Stationary or onboard energy storage systems for energy consumption reduction in a metro network,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 224, pp. 207–225, 2010.
- [6] T. Konishi, H. Morimoto, T. Aihara, and M. Tsutakawa, “Fixed energy storage technology applied for dc electrified railway,” *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, vol. 5, pp. 270–277, 2010.
- [7] J. Zhang and J. Lee, “A review on prognostics and health monitoring of li-ion battery,” *Lancet*, vol. 196, pp. 6007–6014, 2011.
- [8] B. Bolund, H. Bernhoff, and M. Leijon, “Flywheel energy and power storage systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, pp. 235–258, 2007.
- [9] J. Tzeng, R. Emerson, and P. Moy, “Composite flywheels for energy storage,” *Composites Science and Technology*, vol. 66, pp. 2520–2527, 2006.
- [10] J. Abrahamsson and H. Bernhoff, “Magnetic bearings in kinetic energy storage systems for vehicular applications,” *Journal of Electrical Systems*, vol. 7, pp. 225–236, 2011.
- [11] R. Thompson, J. Kramer, and R. Hayes, “Response of an urban bus flywheel battery to a rapid loss-of-vacuum event,” *Journal of Advanced Materials*, vol. 37, pp. 42–50, 2005.

- [12] A. Burke and M. Miller, “The power capability of ultracapacitors and lithium batteries for electric and hybrid vehicle applications,” *Journal of Power Sources*, vol. 196, pp. 514–522, 2011.
- [13] J. Libich, J. Máca, J. Vondrák, O. Čech, and M. Sedlaříková, “Supercapacitors: Properties and applications,” *Journal of Energy Storage*, vol. 17, pp. 224–227, 2018.
- [14] A. Burke and M. Miller, “Testing of electrochemical capacitors: Capacitance, resistance, energy density, and power capability,” *Electrochimica Acta*, vol. 55, pp. 7538–7548, 2010.
- [15] R. Peña-Alzola, R. Sebastian, J. Quesada, and A. Colmenar, “Review of flywheel based energy storage systems,” *International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, pp. 1–6, 2011.
- [16] S. Choudhury, “Flywheel energy storage systems: A critical review on technologies, applications, and future prospects,” *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 31, p. 2159, 2021.
- [17] S. Gurumurthy, V. Agarwal, and A. Sharma, “High efficiency bi-directional converter for flywheel energy storage application,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, pp. 5477–5487, 2016.
- [18] J. Hansen and D. O’Kain, “An assessment of flywheel high power energy storage technology for hybrid vehicles,” *U.S. Department of Energy*, 2011.
- [19] X. Li and A. Palazzolo, “A review of flywheel energy storage systems: state of the art and opportunities,” *Journal of Energy Storage*, vol. 46, p. 103576, 2022.
- [20] M. Daoud, A. Abdel-Khalik, A. Massoud, S. Ahmed, and N. Abbasy, “On the development of flywheel storage systems for power system applications: A survey,” *20th International Conference on Electrical Machines*, pp. 2119–2125, 2012.
- [21] G. Mousavi, F. Faraji, A. Majazi, and K. Al-Haddad, “A comprehensive review of flywheel energy storage system technology,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67, pp. 477–490, 2017.
- [22] *Review of the Research Program of the Partnership for a New Generation of Vehicles: Fourth Report by Standing Committee to Review the Research Programs of the Partnership for a New Generation of Vehicles*, 1998.
- [23] L. Biggiero, “Il veicolo isolato,” 2017. Appunti del Corso, UniNA.
- [24] Hitachi-Rail, *Dichiarazione Ambientale di Prodotto "Metro Leonardo"*, 2017.
- [25] ABB, *AMXE200 Motor Datasheet*, 2020.
- [26] A. Clerici, R. Chiumeo, C. Gandolfi, A. Villa, R. Zuelli, C. Chiappa, and M. Brenna, “Dual active bridge converters for mv distribution lines into 1500 v dc metro railway system,” *IEEE International Conference on Electrical*

Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), pp. 1–8, 2018.