



Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica

**Flywheel energy storage system per la regolazione di
frequenza**

Prof. Michele Angelo Pastorelli

Ing. Vincenzo Orlando

Daniele Baldizzone - s265165

A.Y. 2020/2021

Indice

1	Panoramica iniziale	1
1.1	Smart grid	2
1.2	Proposta del progetto	5
1.3	Stato dell'arte sull'accumulo di energia	6
1.4	Peculiarità e funzionamento del FESS	10
1.5	Panoramica di mercato	13
2	La regolazione della frequenza	19
2.1	Regolazione della frequenza e della potenza attiva	19
2.2	Approccio di risoluzione classico e con il FESS	23
2.3	Normative di riferimento	24
3	Modellizzazione del sistema FES	27
3.1	FESS	27
3.1.1	Considerazioni generali	28
3.1.2	Considerazioni meccaniche sul volano	30
3.1.3	Sistema elettronico di interfaccia	35
3.1.4	Confronto tra le diverse macchine elettriche	40
3.1.5	Modello dei motori in continua	46

3.1.6	Modello del generatore diesel	50
4	Descrizione dei test per il modello	51
4.1	Risposta dinamica del sistema FESS	52
4.2	Test sul sistema combinato FESS e generatore Diesel	62
4.3	Conclusioni	69
4.4	Ringraziamenti	70

Elenco delle figure

1.1	Rete tradizionale e Smart grid	2
1.2	Tempo di scarica in relazione alla potenza	8
1.3	Campi di applicazione	8
1.4	Sistema Micro Grid con FESS	12
1.5	Sistema FESS Beacon Power	14
1.6	Sistema FESS Active power	15
1.7	Sistema FESS Vycon power	16
1.8	Sistema FESS Amber kinetics	17
1.9	Prodotti FESS	18
2.1	Flywheel e Generatore principale connessi alla rete AC	22
2.2	Soglia di intervento delle protezioni	26
3.1	Struttura del FESS	28
3.2	fattori di forma [17]	32
3.3	Esempio di sezione (quotata) per un volano in composito	34
3.4	Tipologia di controllo dei convertitori BTB	36
3.5	Schema dei convertitori Back to Back	37
3.6	Convertitore DC-DC a quattro quadranti	38

3.7	Motore a induzione	41
3.8	Motore sincrono a Riluttanza	42
3.9	Rotore di un motore sincrono a magneti permanenti	43
3.10	Motore DC ABB	47
3.11	Modello del generatore Diesel	50
4.1	Risposta al gradino di carico di un sistema FESS	53
4.2	Risposta al gradino di carico di un sistema FESS, ingrandimento	54
4.3	Risposta al gradino di carico di un sistema FESS, Energia residua	55
4.4	Risposta al gradino di carico di un sistema FESS, scarica del primo sistema	56
4.5	Sensitività al carico	58
4.6	Risposta per un sistema modulare	59
4.7	Risposta al treno di impulsi	60
4.8	Risposta al treno di impulsi, energia residua	61
4.9	FESS e Generatore Diesel indipendenti	63
4.10	Energia residua	64
4.11	FESS e Generatore Diesel indipendenti, sistema modulare	65
4.12	Energia residua	66
4.13	FESS e Generatore Diesel combinati	67
4.14	Risposta al gradino di carico di un sistema FESS, Energia residua	68

Elenco delle tabelle

1.1	Caratteristiche delle diverse applicazioni	7
3.1	Caratteristiche delle diverse applicazioni	29
3.2	Confronto volani	33
3.3	Confronto controllo BTB	37
3.4	Differenti macchine elettriche utilizzate per il sistema FESS [17]	44
3.5	vantaggi e svantaggi nell'utilizzo delle diverse macchine elettriche. [17]	45
4.1	Simulazione singolo FESS	52
4.2	Sensibilità al carico	57
4.3	FESS e DG	62

Capitolo 1

Panoramica iniziale

Il sistema elettrico classico di tipo verticalmente integrato in Italia ha avuto modo di esistere finché l'introduzione del mercato libero dell'energia elettrica, alla fine degli anni novanta, con il Decreto Bersani, permise di avviare una graduale liberalizzazione delle attività di acquisto e vendita di energia elettrica. Da allora ad oggi il sistema elettrico, specialmente in termini di distribuzione, sta subendo un notevole cambiamento. Mentre infatti tradizionalmente il flusso di potenza è sempre stato unidirezionale dalla rete di trasmissione agli utilizzatori finali ora, invece, con la crescente penetrazione di forniture di energia rinnovabile e il crescente sviluppo dei convertitori di energia, il sistema sta affrontando sempre più problematiche. Inoltre, grazie alla produzione di energia in 'piccola scala' non è più scontato che il flusso di energia si muova in maniera unidirezionale verso i carichi. Tutto ciò rende necessario uno sviluppo tecnologico efficiente e un sistema di accumulo dell'energia rapido ed efficace in grado di compensare questa generazione intermittente; bilanciando così la produzione di energia, limitando gli squilibri sulla rete e riducendo l'utilizzo di fonti non rinnovabili oggi indispensabili per compensare questi squilibri. Nel corso di questa prima sezione verrà mostrato lo stato dell'arte circa i sistemi di accumulo presenti sul mercato analizzando le possibili applicazioni per le diverse tecnologie descrivendone anche le caratteristiche principali.

1.1 Smart grid

Come accennato, la rete elettrica esistente, ancora legata al vecchio sistema verticalmente integrato, non è progettata per soddisfare i requisiti della società moderna, comprese le unità di generazione indipendenti su piccola scala, l'uso crescente di apparecchiature digitali, le installazioni di energia rinnovabile, il crescente utilizzo di sistemi di misura 'intelligenti' e l'introduzione di una "flotta" di veicoli elettrici. [1]

La rete elettrica tradizionale consiste di grandi unità di generazione lontane dagli utenti finali e l'energia viene trasferita attraverso una rete di trasmissione principale ad alta tensione alle reti di distribuzione locali a bassa tensione. Al giorno d'oggi si rende indispensabile una dislocazione di piccole reti elettriche il più possibile indipendenti per stare al passo con lo sviluppo delle tecnologie sopra elencate.

Il confronto schematico tra queste due tipologie strutturali è rappresentato in figura 1.1.

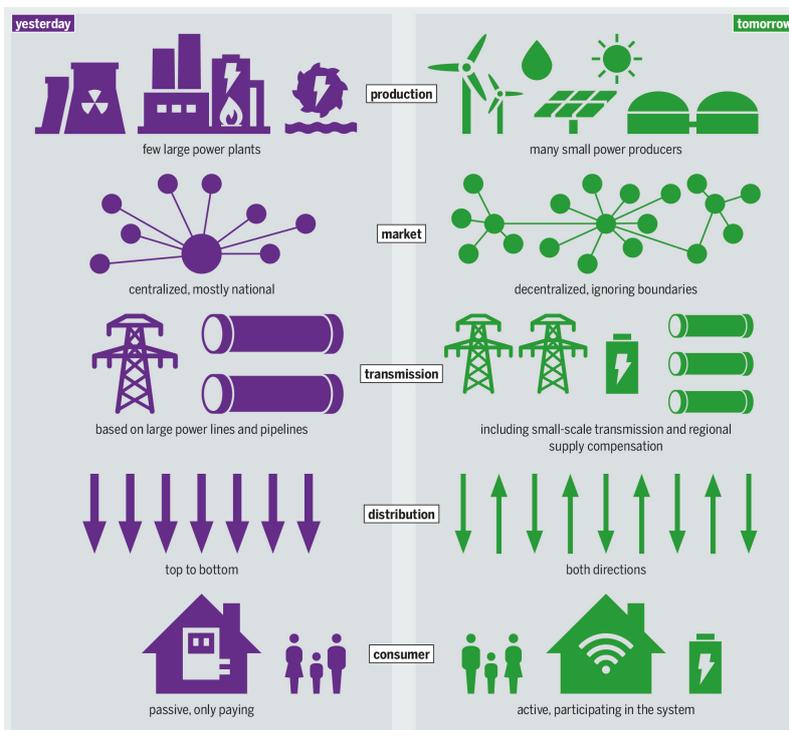


Figura 1.1: Rete tradizionale e Smart grid

Per soddisfare i cambiamenti sotto elencati oggi la topologia della rete deve cambiare permettendo il flusso bidirezionale sia di elettricità che di informazioni così da formare una rete di trasmissione automatizzata e territorialmente distribuita. Questa versione della rete è chiamata Smart Grid.

I principali benefici di una futura Smart Grid, descritti in [2], sono:

- facilitare la connessione e il funzionamento dei generatori di tutte le dimensioni e tecnologie
- permettere ai consumatori di avere un ruolo nell'ottimizzazione del funzionamento del sistema [3]
- fornire ai consumatori una maggiore informazione e scelta dell'offerta
- ridurre significativamente l'impatto ambientale dell'intero sistema di approvvigionamento elettrico
- fornire maggiori livelli di affidabilità e sicurezza dell'approvvigionamento.
- promuovere l'uso su larga scala di fonti di energia rinnovabili
- riduzione dei picchi nella domanda di elettricità
- ottenere una maggiore efficienza nell'uso dell'energia elettrica

Tra gli sviluppi necessari per la realizzazione di questo nuovo tipo di infrastrutture, i sistemi di stoccaggio dell'energia (Energy Storage System) giocheranno un ruolo centrale.

Introdurre sistemi di accumulo di energia efficienti potrebbe aiutare a risolvere alcune delle problematiche principali.

Dapprima è possibile osservare che i sistemi di stoccaggio considerati nella norma CEI 0-16 [4] sono definiti come un insieme di dispositivi e sistemi di controllo:

- usati per assorbire o fornire elettricità
- operanti in modo continuo in parallelo alla rete di distribuzione, o idonei ad alterare gli scambi di energia con la rete (immissione da o immissione in), anche se determinato da disconnessioni/connessioni volontarie di una parte del sistema o dell'intero sistema

Ci sono però alcuni sistemi non considerati come stoccaggio i quali operano solo per migliorare la qualità della tensione (buchi di tensione, sfarfallio, armoniche e sbilanciamento).

L'utilizzo di sistemi di accumulo di energia però non è legato solo alla dislocazione di smart grid [1], sempre più indipendenti infatti; uno degli obiettivi principali è l'aumento della flessibilità del sistema sotto molteplici punti di vista come:

- qualità del servizio elettrico o controllo della tensione e riduzione dei disturbi della rete
- gestione della rete e controllo della frequenza
- pianificazione e rinforzo del sistema e riduzione della vulnerabilità
- gestione dell'energia (stoccaggio dell'energia prodotta per essere utilizzata in seguito)
- mercato libero dell'energia, anche con partecipazione attiva degli utenti
- miglioramento dell'efficienza energetica anche in sistemi multi-energia
- migliore utilizzo delle risorse esistenti

La scelta della combinazione ottimale di tecnologie deve tenere conto di tutte queste caratteristiche.

1.2 Proposta del progetto

La struttura del progetto di tesi si divide in quattro sezioni; nella prima si cercherà di fornire una panoramica sullo stato dell'arte per i sistemi di accumulo di energia con una particolare attenzione circa una tipologia di applicazione denominata FESS (Flywheel energy storage system).

In questa prima parte oltre ad un'analisi dei vari sistemi di accumulo ci sarà una descrizione dei principali attori di mercato attivi con il sistema FESS e una descrizione generale del principio con cui opera questo sistema.

Nella seconda parte sarà analizzato più nello specifico una delle applicazioni di questo sistema che riguarda la qualità dell'energia elettrica ed in particolare la regolazione della frequenza.

Nella terza parte verrà descritto più nel dettaglio il modello utilizzato per lo studio di simulazione del sistema, considerando tutti i componenti principali.

Nella quarta ed ultima parte invece verranno inseriti i risultati sotto forma di immagini e tabelle ed inoltre verranno fatte alcune riflessioni sui risultati e alcune proposte su possibili sviluppi futuri.

1.3 Stato dell'arte sull'accumulo di energia

Per quanto riguarda l'accumulo di energia non è possibile generalizzare il concetto in quanto sono presenti una grande varietà di tecnologie atte allo stoccaggio ed è quindi necessario descrivere le caratteristiche principali in modo da associare ad ognuna l'applicazione più adeguata e nella quale viene effettivamente utilizzata.

La seguente sezione fornisce una panoramica dei sistemi esistenti. Verranno descritte le caratteristiche tecniche e verrà fornita una panoramica delle proprietà generali, dei vantaggi e degli svantaggi di ogni sistema.

Lo scopo è di dare informazioni di base sulle alternative all'immagazzinamento dell'energia elettrica con i volani, oggetto dello studio di tesi.

alcune tra le principali tecnologie presenti sul mercato sono:

- Impianti idroelettrici a pompaggio
- Accumulo di energia ad aria compressa
- Accumulo elettrochimico a batterie
- Stoccaggio energetico a superconduttori magnetici
- Sistemi di accumulo a super-condensatori
- Sistemi di accumulo meccanico con volani (FESS)

In tabella 1.1 vengono riassunte le caratteristiche principali dei sistemi appena elencati [2]:

Tabella 1.1: Caratteristiche delle diverse applicazioni

Tecnologia	<i>Potenza [MW]</i>	<i>risposta</i>	<i>Rendimento</i>	<i>Ciclo di vita [anni]</i>
<i>Pompe idroelettriche</i>	100 – 400	10s – 3min	0.6 – 0.8	30 – 75
<i>Aria compressa</i>	35 – 3000	3 – 15min	0.5 – 0.85	20 – 40
<i>Flow battery</i>	0.25 – 10	30 – 100ms	0.65 – 0.85	2 – 10
<i>Batterie Li-ion</i>	0.5 – 30	30 – 100ms	0.70 – 0.80	2 – 10
<i>Supercondensatori</i>	0.1 – 1	5 – 10ms	0.85 – 0.95	2 – 10
<i>Superconduttori</i>	1 – 100	5 – 10ms	0.85 – 0.95	30 – 40
<i>Flywheel</i>	0.1 – 20	5 – 10ms	0.85 – 0.95	20

A questo punto è possibile accostare ogni sistema di accumulo al proprio campo di applicazione; nella pratica infatti a seconda della potenza istantanea fornita dal sistema, dall'energia immagazzinata e dal tempo di risposta si ha che l'utilizzo delle tecnologie può essere molto vario come si vede nelle figure 1.2 e 1.3.

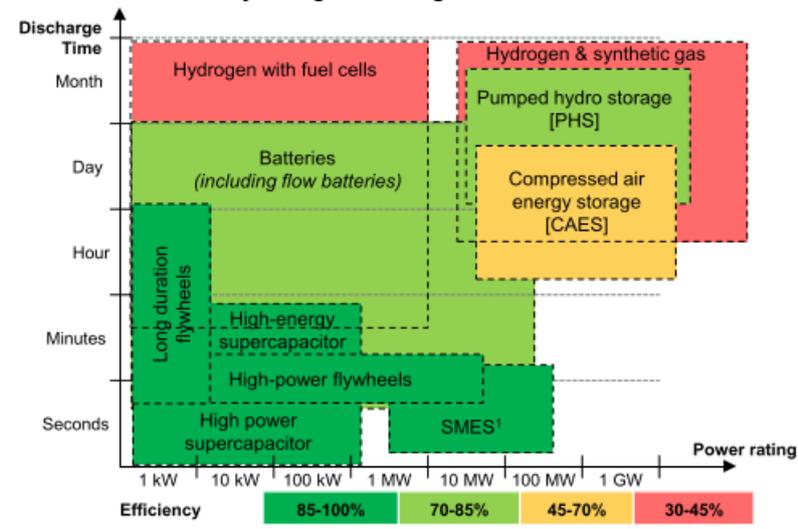


Figura 1.2: Tempo di scarica in relazione alla potenza

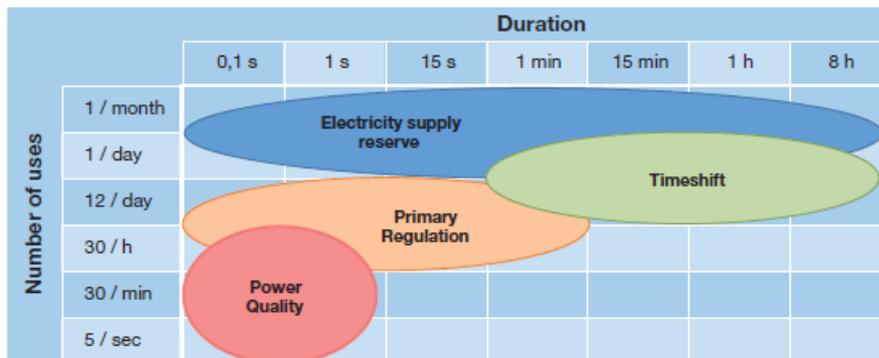


Figura 1.3: Campi di applicazione

Nella prima figura 1.2 si osservano i tempi di scarica tipici di ogni sistema.

Nella seconda figura 1.3 invece vengono accostati i tempi di scarica ai campi di applicazione; è possibile quindi dall'analisi combinata di entrambe le figure associare ad ogni tecnologia la rispettiva utilità.

I sistemi FESS in particolare, grazie all'elevato tasso di carica-scarica e al tempo di scarica non eccessivamente elevato, si collocano bene nell'ottica di power quality ed in particolare nella regolazione primaria; nei paragrafi successivi verrà analizzato più nel dettaglio questo aspetto.

1.4 Peculiarità e funzionamento del FESS

Dopo aver analizzato qual è lo stato dell'arte tecnologico nel settore dell'immagazzinamento di energia e la rispettiva collocazione a seconda delle diverse caratteristiche, è il momento di focalizzarsi sul sistema di accumulo oggetto di studio, il FESS (Flywheel energy storage system) che si occupa di immagazzinare energia sotto forma cinetica in un volano rotante.

Questo tipo di tecnologia sta prendendo piede nel mercato grazie, come detto, alla crescente necessità di accumulo dovuta alla nascita delle già menzionate smart grid ma le caratteristiche che la rendono competitiva rispetto alle altre sono [5]:

- Efficienza elevata
- Cicli di vita elevati (fino a un milione di cicli)
- Risposta rapida (fino a 10 ms)
- Alto tasso di carica/scarica
- Bilanciamento della generazione e del carico in tempo reale
- Alta densità di potenza (fino a 5-10 volte le batterie)
- La densità di potenza e l'energia immagazzinata possono essere progettate indipendentemente; l'energia è immagazzinata nella velocità, la potenza dipende dalla macchina elettrica che trascina il volano
- Nessun limite teorico superiore di stoccaggio se configurato in banchi modulari
- Facilità nel determinare lo stato di carica (SOC) che dipende dalla velocità del volano
- Limitato impatto ambientale

I volani sono lo strumento ideale per gestire cambiamenti imprevedibili e in tempo reale nella rete elettrica. L'efficienza e l'affidabilità offerte da queste risorse permettono agli operatori di rete di integrare con fiducia più energia rinnovabile. A livello di impatto ambientale invece la lunga vita di calendario (più di 20 anni, senza deterioramento delle prestazioni) permette di ridurre l'inquinamento dovuto al frequente riciclo del sistema e allo stesso tempo il sistema di per sé, durante il funzionamento, è ad emissioni 0.

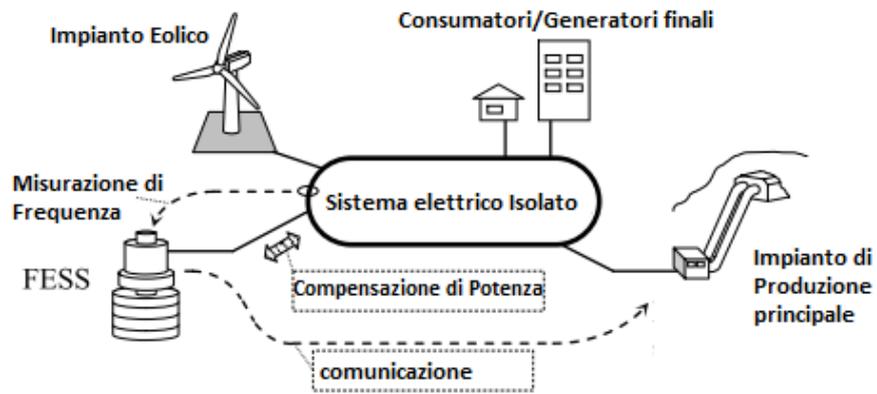
Questa tipologia di sistema ha inoltre alcuni grandi vantaggi rispetto alla concorrenza dovuti alla relativamente semplice replicabilità del sistema il che non pone limiti teorici in termini di potenza installata, può immagazzinare energia in nell'inerzia del volano o nella velocità del rotore ed inoltre ha un volano che può essere trascinato da diverse tipologie di macchine elettriche a seconda dell'esigenza, come verrà descritto nei paragrafi successivi.

Queste caratteristiche fanno sì che il FESS possa partecipare a diverse funzioni in aiuto al sistema elettrico; in questo progetto verrà analizzato il contributo che il sistema dà alla rete nella regolazione della frequenza elettrica.

Nella pratica il FESS rileva la frequenza di rete e la stabilizza fornendo o assorbendo potenza attiva da/verso la rete grazie alla macchina elettrica che aziona il volano, collegata alla rete per mezzo di un convertitore di potenza back to back.

Una figura schematica di una Micro-grid con sistema FESS si può osservare in figura 1.4

Figura 1.4: Sistema Micro Grid con FESS



1.5 Panoramica di mercato

Come visto il sistema Flywheel può essere formato da componenti diversi e utilizzato per specifiche altrettanto diverse quindi non è possibile generalizzare il sistema all'interno di un preciso campo di applicazione. Per lo stesso motivo quindi è possibile fare una panoramica dei diversi produttori che concorrono in questa tipologia di mercato per analizzare anche all'atto pratico quali sono effettivamente i possibili utilizzi.

Beacon power

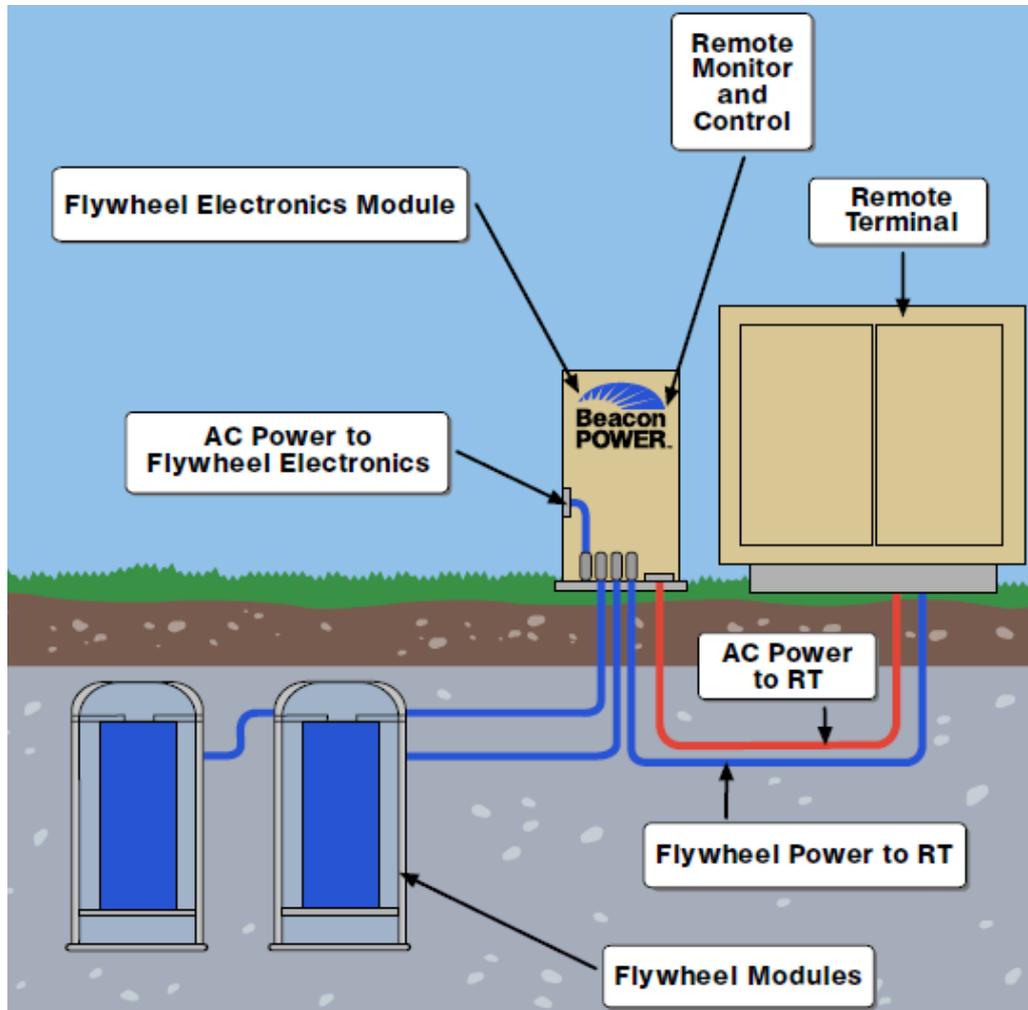
Uno dei leader nel settore, con sede in Massachusetts, USA, che mira a sviluppare sistemi avanzati di immagazzinamento dell'energia basati sui volani è Beacon Power.

I loro primi sistemi erano soluzioni di alimentazione di backup per applicazioni di telecomunicazione ma l'attenzione è ora cambiata verso lo sviluppo di un sistema di accumulo di energia a volano per applicazioni come il servizio di regolazione della frequenza.

Il convertitore di potenza fornisce un'interfaccia DC che permette di collegare più unità in parallelo ad un comune DC-link per soddisfare richieste di potenza più elevate.

Nell'immagine 1.5 si può osservare la struttura di un FESS Beacon. [6]

Figura 1.5: Sistema FESS Beacon Power

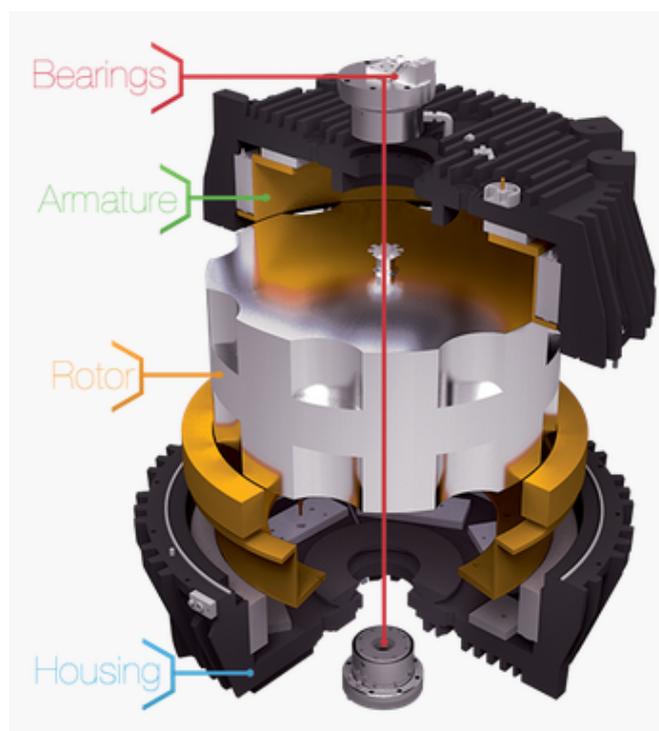


Active power

Active Power progetta e produce sistemi di alimentazione ininterrotta (UPS) senza batteria ma a volani, prodotti per l'immagazzinamento dell'energia per applicazioni di potenza in tutto il mondo.

In figura 1.6 si osserva uno schema 3D del sistema FESS prodotto da Active Power. [7]

Figura 1.6: Sistema FESS Active power



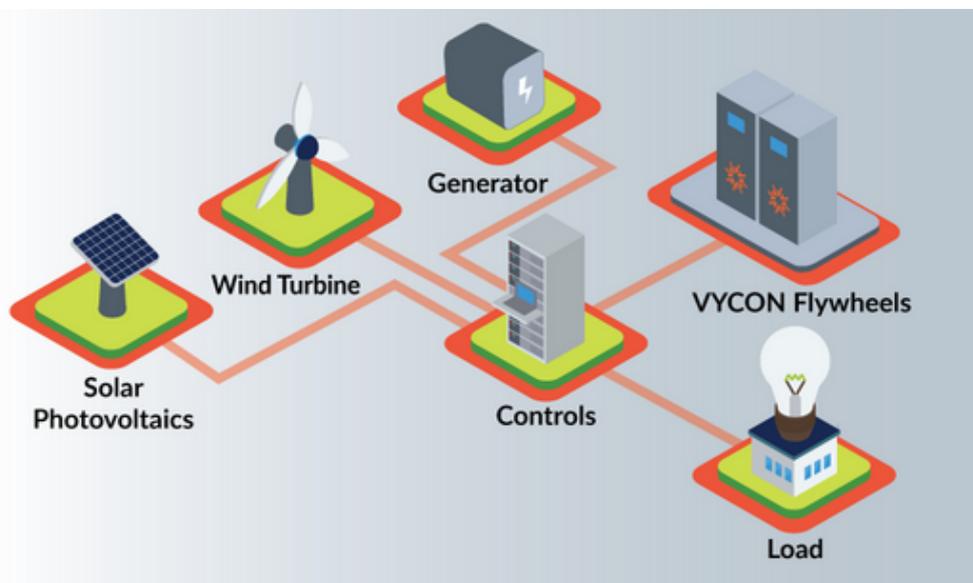
Vycon power

Vycon Power scopre, progetta, sviluppa, implementa e migliora continuamente le soluzioni di stoccaggio a volano; leader nel settore e rispettoso dell'ambiente.

La tecnologia a volano offerta elimina la necessità di raffreddamento e manutenzione costosi e occupa una frazione dello spazio rispetto ai banchi di batterie di riserva. [8]

In figura 1.7 è raffigurata una micro-grid con sistema FESS Vycon integrato.

Figura 1.7: Sistema FESS Vycon power



Amber kinetics

Amber kinetics è un altro partecipante nel settore della produzione di sistemi di stoccaggio di energia cinetica su scala di rete. Ha collaborato con West Boylston Municipal Lighting Plant (WBMLP) per installare un sistema di accumulo di energia a volano da 128kW/512kWh in Massachusetts.

I volani sono situati accanto a un array solare esistente montato a terra in un impianto di generazione e progettati per la gestione dell'energia, riducendo i picchi di carico e aumentando l'affidabilità della rete. Una foto dell'impianto è visibile in 1.8. [9]

Figura 1.8: Sistema FESS Amber kinetics



Questi sono solo alcuni dei principali produttori FESS; è comunque già possibile osservare come questo sistema può essere adattato a diverse applicazioni, dalla power-quality a sistemi UPS.

Nella figura 1.9 e sono elencati alcuni tra i principali produttori oltre a quelli già descritti indicando nel dettaglio il tipo di FESS prodotto, la macchina elettrica utilizzata, il materiale del rotore ed il rispettivo campo di applicazione. [10]

Figura 1.9: Prodotti FESS

	Piller Power Bridge	Active Power	Temporal Power	Beacon Power Gen 4	Rosseta T2	Vycon	Kinetic Traction Systems	Stornetic	PowerThru	Gyrotricity	Amber Kinetics
Origin	Germany	USA	Canada	USA	Germany	USA	USA	Germany	USA	UK	USA
Rated Power	1600	250 kW	100-500 kW	100 kW	500 kW	500 kW	200 kW	22 kW	190 kW	100 kW	8 kW
Rated Energy Capacity	4 kWh	0.9 kWh	50 kWh	25 kWh	4 kWh	0.83 kWh	1.5 kWh	4 kWh	0.63 kWh	5 kWh	32 kWh
Application area	UPS	UPS	Voltage Stability/Maintenance	Frequency Stability/Maintenance	Recuperation	UPS, Recuperation	UPS, Power Quality, Micro-grid & Railway	Grid services, Railway	UPS	Frequency Stability, Railway	Micro-grid, Telecoms, Utilities
Maximum rpm	3300	7700	11,500	16,000	25,000	36,000	37,800	45,000	52,000	20,000	10,000
Bearing concept	Rolling bearings, relieved magnetically	Rolling bearings, relieved magnetically	Unclear	Rolling bearings, relieved magnetically	Rolling bearings	Active magnetic bearings	Magnetic & hydrodynamic bearings	Active magnetic bearings	Active magnetic bearings	Mechanical & magnetic bearings	Not stated
Electrical machine type	Not provided	Not provided	Permanent magnet	Permanent magnet	Not provided	Permanent magnet	Permanent magnet	Permanent magnet	Synchronous Reluctance	Permanent magnet	Permanent magnet
Flywheel material	Steel	Steel	Steel	Fibre composite	Fibre composite	Steel	Fibre composite	Fibre composite	Fibre composite	Laminated Steel	Steel
Topology											
Configuration											

Nel seguito verranno analizzate le possibili strutture di un sistema FESS nel dettaglio ma in figura 1.9 è già possibile osservare che per le stesse applicazioni, diversi produttori attuano le stesse scelte; è quindi possibile in linea di massima decidere la composizione del sistema FESS (in termini di azionamento elettrico e materiali) dato l'utilizzo desiderato.

Capitolo 2

La regolazione della frequenza

Prima di iniziare a descrivere il sistema FESS nelle sue componenti ed il modello utilizzato per simularne il funzionamento è giusto andare ad introdurre l'ambito in cui questo tipo di stoccaggio di energia andrà ad agire, quale è la situazione attuale, i possibili miglioramenti apportati da questo sistema e i riferimenti normativi; dopodiché verrà fatta una analisi tecnica più dettagliata.

2.1 Regolazione della frequenza e della potenza attiva

Come visto nel primo capitolo, uno dei campi di applicazione in cui può essere inserito il sistema di accumulo con volani è quello del miglioramento della qualità energetica della rete elettrica.

Ma nella pratica quale può essere il vantaggio apportato da questo sistema?

Per descriverlo bisogna analizzare il legame che intercorre tra la frequenza elettrica di rete, idealmente costante a 50 Hz, e la potenza attiva continuamente scambiata tra generatori e carichi, i quali, con il crescente sviluppo delle smart grid, hanno un ruolo sempre meno "passivo".

Può capitare infatti che alcuni componenti della rete (come per esempio un edificio dotato di impianto fotovoltaico con accumulo a batteria) possano partecipare allo scambio di potenza attiva sia come generatori che come utilizzatori a seconda di diverse condizioni.

In questo contesto diventa sempre più complicato mantenere istantaneamente bilanciata la generazione con l'assorbimento e ciò provoca una deviazione della frequenza di rete dal riferimento ideale. La frequenza, infatti, è strettamente legata alla potenza attiva ed è importante che non si discosti dal suo valore nominale poiché [11]:

- la velocità dei motori alimentati da rete dipende dalla frequenza, la cui variazione porta una conseguente variazione della velocità
- alcuni orologi ricavano il tempo dalla frequenza di rete
- un brusco abbassamento della frequenza può provocare la saturazione dei materiali magnetici come si osserva dalla relazione che lega l'induzione magnetica alla frequenza:

$$B = \frac{E}{N \cdot 4.44 \cdot S_n \cdot f} \quad (2.1)$$

- una forte deviazione può causare un blackout nella rete [14]

Questi sono alcuni dei motivi per cui è bene che la frequenza non si discosti dal suo valore nominale.

Come detto la causa scatenata di questa deviazione va ricercata nello scambio di potenza attiva tra generazione e carichi; il legame che intercorre tra potenza e frequenza si può osservare tramite la seguente equazione:

$$P_{DG} - P_{load} - P_{FESS} = J\omega \frac{d\omega}{dt} \quad (2.2)$$

I vari termini dell'equazione 2.2 sono:

- P_{DG} che rappresenta l'energia fornita dal generatore diesel (solitamente impiegato nella regolazione primaria) la cui velocità è direttamente correlata con la frequenza (dal momento che porta i rotazione il generatore elettrico) che come detto deve essere mantenuta costante
- P_{FESS} che invece indica la quota di potenza che il sistema di accumulo FESS può assorbire o erogare per andare in aiuto al generatore Diesel in modo tale che questo non si accorga di variazioni di breve durata (o per lo meno possa reagire con la sua dinamica)
- P_{load} che d'altra parte rappresenta l'aspetto più critico ed aleatorio per la regolazione di frequenza; questa affermazione è tanto più valida quanto maggiore è l'Introduzione di fonti rinnovabili abbinate a piccole reti generalmente passive le quali, oltre al problema dell'incertezza della generazione, ne introducono un altro e cioè la possibilità che in caso di aumento di generazione il classico approccio di regolazione risulti inefficace e non in grado di assorbire questo surplus che andrebbe così disperso
- ω è la velocità meccanica del generatore di rete azionato dal generatore diesel e direttamente correlata alla frequenza infatti si ha che:

$$\omega = \frac{2\pi \cdot f}{p} \quad (2.3)$$

- J infine è l'inerzia complessiva delle parti rotanti, elemento fondamentale utilizzato proprio come 'serbatoio' di energia cinetica in caso di squilibrio di potenza tra generatori e carichi

In figura 2.1 è rappresentata schematicamente una rete in cui la regolazione primaria di frequenza viene attuata per mezzo di un generatore diesel coadiuvato ad un sistema di accumulo a volani; il carico potrebbe essere puramente passivo o attivo/passivo se dotato di un proprio sistema di generazione di energia la cui produzione talvolta potrebbe essere maggiore rispetto ai consumi provocando così un'immissione di potenza in rete.

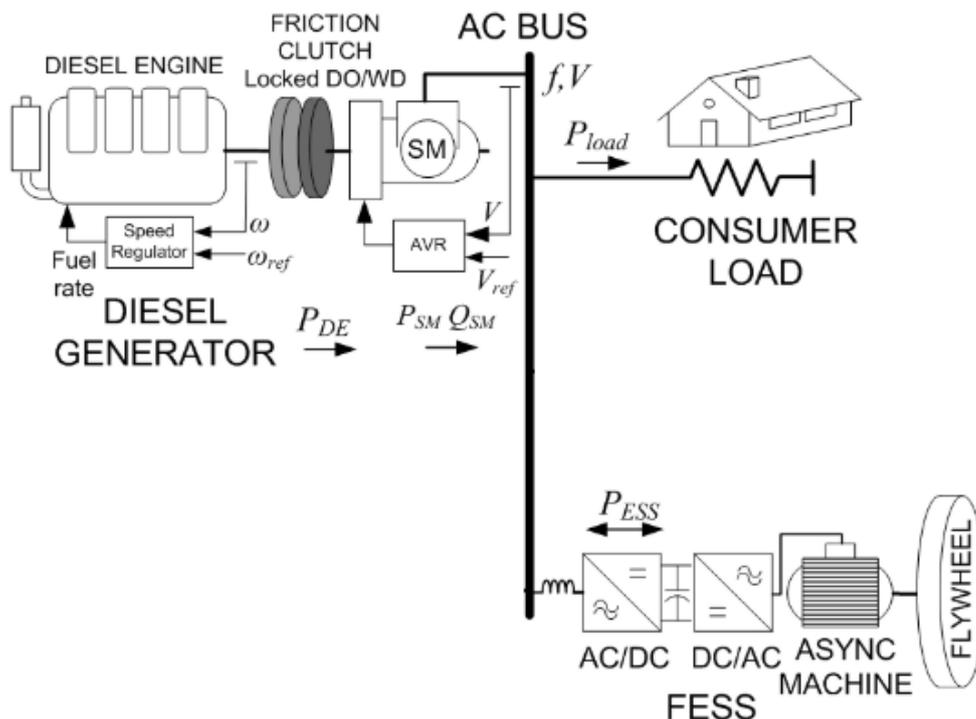


Figura 2.1: Flywheel e Generatore principale connessi alla rete AC

2.2 Approccio di risoluzione classico e con il FESS

Tradizionalmente, poiché come detto è necessaria l'inerzia delle masse rotanti per la regolazione di frequenza, questa è stata attuata dai grandi generatori alimentati da combustibili fossili come il gasolio.

Solitamente però un generatore senza un carico costante può consumare fino al 40 % del consumo nominale di carburante. Inoltre, la natura intermittente delle fonti rinnovabili fa sì che il numero di variazioni di potenza necessarie per fornire il carico netto istantaneo più la riserva di rotazione richiesta cambi molto spesso, e per questo motivo i DG in un sistema di tipo smart grid sono avviati/arrestati molto di frequente.

Al fine di ridurre efficacemente il consumo di carburante e il numero di cicli di start-stop dei DG, il sistema elettrico può incorporare un sistema di stoccaggio dell'energia a breve termine (Energy Storage System).

L'ESS a breve termine è usato per coprire i picchi del carico netto dovuti alle variazioni stocastiche della produzione rinnovabile e del carico e per immagazzinare temporaneamente l'eccesso di energia durante i periodi di forte produzione e/o di basso carico dei consumatori.

L'aggiunta di un sistema di accumulo a breve termine che copra il carico medio per minuti potrebbe ridurre significativamente il numero di cicli di start-stop dei DG a livelli accettabili [12].

Un'altra soluzione potrebbe essere quella di adottare in sistema combinato nel quale il generatore Diesel intervenga solo nel caso in cui lo squilibrio di carico sia prolungato e comunque nel rispetto della sua dinamica, più lenta di quella che avrebbe un sistema di accumulo con Flywheel.

2.3 Normative di riferimento

A questo punto, prima di descrivere nel dettaglio le componenti del sistema FESS e il modello analitico utilizzato è giusto fare una panoramica di quelle che sono le normative italiane ed europee sui vincoli di frequenza imposti. Nel Codice di Rete redatto da Terna sono presenti due allegati che fanno da riferimento per la regolazione della frequenza elettrica.[13]

Entrambi gli allegati fanno riferimento alle norme CEI 0-16 (regola tecnica di riferimento per la connessione di utenti attivi e passivi alle reti AT ed MT delle Imprese distributrici di energia elettrica) e 0-21 (regola tecnica di riferimento per la connessione di Utenti attivi e passivi alle reti BT delle imprese distributrici di energia elettrica).

La guida regola i requisiti tecnici a cui gli impianti di produzione di energia elettrica connessi alle reti di distribuzione MT e BT devono rispondere ai fini della sicurezza del sistema elettrico nazionale interconnesso. In particolare hanno lo scopo di prescrivere i requisiti minimi relativamente anche ai campi di funzionamento in tensione e frequenza.

Le prescrizioni si applicano anche a impianti di tutte le altre tipologie connessi alla rete mediante interposizione di sistemi di raddrizzamento/inversione (inverter lato rete).

L'osservanza delle prescrizioni previste nel presente documento deve costituire condizione essenziale per la connessione degli impianti alla rete.

Riguardo all'esercizio in parallelo con la rete MT/BT in funzione della frequenza, l'impianto di produzione deve essere in grado di rimanere connesso alla rete permanentemente, per valori di frequenza tra:

$$47,5Hz < f < 51,5Hz \quad (2.4)$$

Per il controllo dei transitori in frequenza, si richiede agli impianti di produzione connessi alle reti MT e BT la capacità di ridurre la potenza immessa in rete in risposta ad una variazione della frequenza del sistema al di sopra di una soglia predefinita (regolazione della potenza in funzione della sovralfrequenza).

Per quanto riguarda le due soglie di massima frequenza, esse dovranno essere regolate come di seguito:

- 50,3 Hz (con tempo 0,1 s) - una soglia permissiva a 51,5 Hz (con tempo 1,0 s)
- una soglia restrittiva a 49,7 Hz (con tempo 0,1 s) - una soglia permissiva a 47,5 Hz (con tempo 4,0 s)

Infatti, una perturbazione di sistema (transitorio in sottofrequenza o sovra frequenza che interessa una vasta rete funzionante in regime separato con carico o produzione eccedente) è un fenomeno normalmente caratterizzato da una variazione relativamente lenta del parametro frequenza e da un andamento delle tensioni di tipo simmetrico. Se il fenomeno si presenta con queste caratteristiche la finestra restrittiva di frequenza (49,7 – 50,3 Hz) dovrà rimanere inattiva ed il distacco degli impianti dovrà essere affidato esclusivamente alla finestra di frequenza larga (47,5 – 51,5 Hz).

Un riassunto schematico delle soglie di intervento legate al distacco dei carichi è presentato in figura 2.2

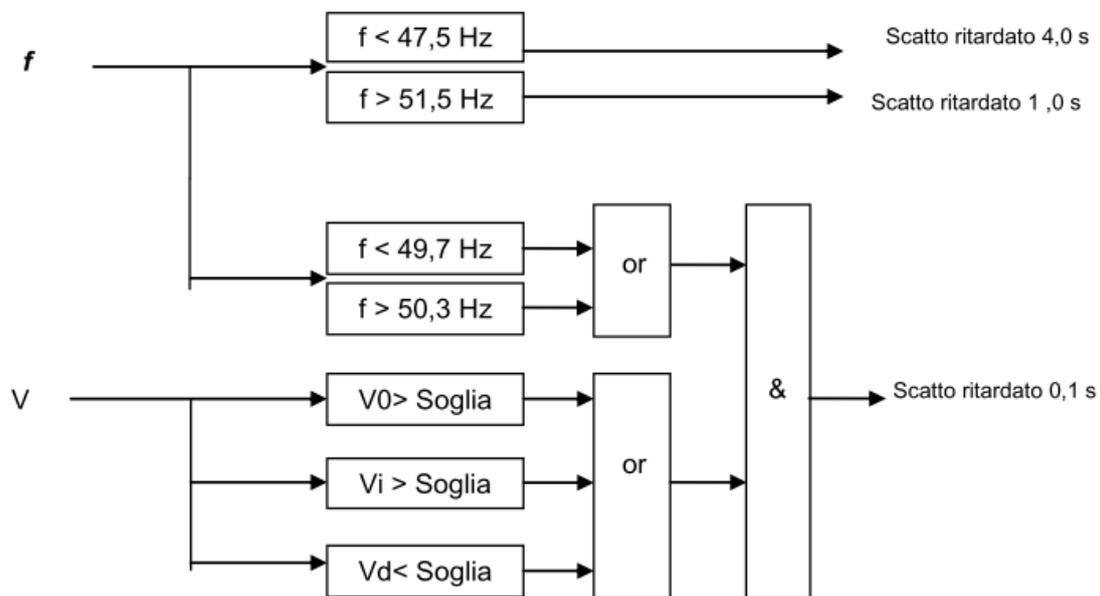


Figura 2.2: Soglia di intervento delle protezioni

Inoltre se la frequenza supera l'intervallo di 47,5 Hz o 51,5 Hz, difficilmente potrebbe essere evitato un blackout del sistema e di conseguenza il servizio elettrico dovrebbe essere ripristinato con conseguenti vari disagi. [14]

Capitolo 3

Modellizzazione del sistema FES

3.1 FESS

Questa sezione sarà dedicata a descrivere nel dettaglio tutti i componenti utilizzati all'interno del modello di simulazione facendo, per ogni paragrafo, una panoramica generale di ciò che potrebbe essere utilizzato a livello pratico e cercando di motivare le scelte fatte nel progetto.

Per cominciare, il sistema di stoccaggio a volani è composto da:

- il volano stesso (flywheel), la cui rotazione è supportata da appositi cuscinetti
- la macchina elettrica, che può funzionare da motore o da generatore a seconda del "verso" della potenza
- due convertitori trifase (connessi ad un sistema di condensatori comune) che agiscono da inverter o da raddrizzatori a seconda della direzione della potenza attiva e che permettono così di disaccoppiare il sistema FESS dalla rete; questa tipologia di conversione è comunemente denominata 'back to back'

3.1.1 Considerazioni generali

Partendo da destra in figura 3.1 il primo elemento rappresentato è il volano.

Proprio il volano gioca il ruolo di immagazzinamento di energia ed è per questo motivo che la scelta delle dimensioni e dei materiali è fondamentale per ottenerne il funzionamento desiderato.

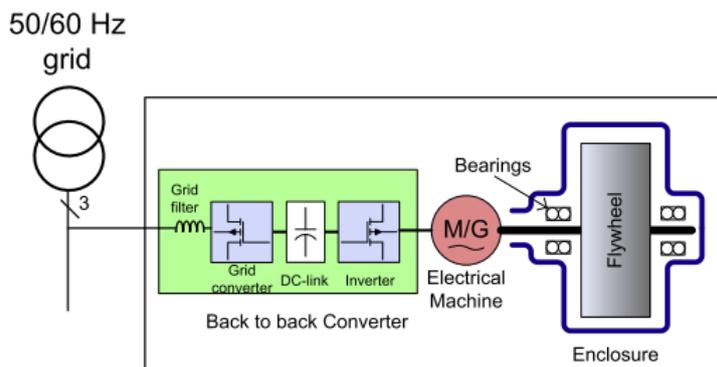


Figura 3.1: Struttura del FESS

Prima di descrivere le considerazioni che devono essere fatte per il dimensionamento meccanico si osserva dall'equazione dell'energia immagazzinata nel sistema che, per incrementarne il valore, è possibile andare ad agire sull'inerzia (intesa come massa rotante) o sulla velocità del volano:

$$E_{FESS} = \frac{1}{2}(J_{FESS} + J_{rot})(\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2) \quad (3.1)$$

Ed è proprio per questo motivo che nella pratica esistono FESS ad alta velocità con bassa inerzia e viceversa.

I primi avranno volani più piccoli e snelli ma che potranno ruotare ad una velocità più elevata mentre i secondi saranno in grado di ruotare più lentamente optando per immagazzinare energia nelle più elevate dimensioni.

In tabella 3.1 vengono presentate le caratteristiche principali di queste due scelte progettuali [15]:

Tabella 3.1: Caratteristiche delle diverse applicazioni

Caratteristiche	<i>Bassa velocità</i>	<i>Alta velocità</i>
<i>Materiale del rotore</i>	acciaio	materiali compositi
<i>Tipo di macchina elettrica</i>	ASM, SPM, SyR	SPM, SyR
<i>Confinamento atmosferico</i>	Vuoto parziale o gas leggero	Vuoto totale
<i>Peso del contenitore</i>	2 volte il peso del volano	0.5 volte il peso del volano
<i>Cuscinetti</i>	meccanici o ibridi	magnetici
<i>Applicazioni principali</i>	media potenza	alta potenza, qualità della potenza
<i>Maturità tecnologica</i>	commercializzata e matura	recente commercializzazione

Dal momento che la finalità del progetto è la simulazione su un FESS utilizzato per qualità della rete la scelta in fase di progettazione dovrebbe ricadere su sistemi ad alta velocità per cui si avrebbero volani più piccoli (in termini di inerzia) ma portati in rotazione ad una velocità più elevata, con tutte le conseguenze progettuali che ne conseguono.

3.1.2 Considerazioni meccaniche sul volano

Prima di vedere un esempio numerico su un volano utilizzabile per applicazioni ad alta velocità è possibile fare un elenco con i passi che portano concettualmente alla scelta di un valore di inerzia, per poi verificare le effettive dimensioni di un volano con quel valore.

Nella pratica si può procedere con:

- l'identificazione dell'entità del disturbo a carico del sistema (deficit-plus di rinnovabile, scompenso generazione-carico)
- la stima della durata media questo tipo di disturbo
- il calcolo dell'energia da accumulare nel sistema

$$E_{FESS} = P_{avg} \cdot \Delta t \quad (3.2)$$

- dal primo punto si sceglie il motore; la potenza nominale dovrebbe essere fornita per velocità che vanno dalla velocità nominale fino alla metà della velocità nominale; dall'equazione dell'energia si nota infatti una proporzionalità quadratica con la velocità, risulta poco utile cercare di estrarre energia dal volano fino a velocità zero.

Quindi, considerando il caso più sfavorevole [16], serve avere una potenza nominale pari a:

$$P_n = 2 \cdot (T_n \cdot \omega_n) \quad (3.3)$$

- Scelta della massima velocità sulla base dell'applicazione e nota l'energia da immagazzinare è possibile calcolare l'inerzia come:

$$J_{FESS} = \frac{E_{FESS}}{\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2} - J_{mot} \quad (3.4)$$

A questo punto si ha una stima dell'inerzia necessaria per il sistema di accumulo.

Un altro aspetto importante da tenere in considerazione è la scelta del materiale di cui sarà composto il volano; questo influenzerà molto infatti i limiti di velocità massima rischiando di compromettere le scelte fatte in fase di progetto.

Di seguito verranno riportate le equazioni principali per il dimensionamento meccanico e poi verrà fatto un esempio di calcolo mettendo a confronto i risultati ottenuti per volani di materiali diversi.

La prima equazione richiamata è quella dell'energia immagazzinata in forma estesa:

$$E_{fess} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot h \cdot \omega^2 \cdot (r_{ext}^2 - r_{int}^2) \quad (3.5)$$

Come si può notare l'incremento di energia può essere ottenuto sia da un aumento di velocità (con proporzionalità quadratica) che di massa (ρ).

L'altra equazione che è necessario considerare però è quella che lega gli stress radiali alla velocità di rotazione radiale massima, la quale fornirà un vincolo sul raggio esterno (quindi sul volume), a velocità impostata.

$$\sigma_{lim} = \rho \cdot \omega_{fess}^2 \cdot r_{ext}^2 \quad (3.6)$$

Inoltre bisogna tenere in considerazione il fatto che l'energia immagazzinata va diminuita nel caso in cui il volano abbia forme particolari.

Nel caso di FESS ad alta velocità il volano viene solitamente utilizzato di forma ad anello sottile quindi con un fattore di forma pari a 0.5 come si vede in figura 3.2.

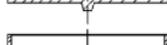
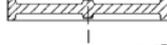
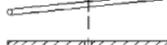
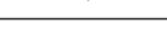
Fly wheel geometry	Cross section	Shape factor K
Disc		1.000
Modified constant stress disc		0.931
Conical disc		0.806
Flat unpierced disc		0.606
Thin firm		0.500
Shaped bar		0.500
Rim with web		0.400
Single bar		0.333
Flat pierced bar		0.305

Figura 3.2: fattori di forma [17]

L'ultimo aspetto da considerare prima dell'esempio numerico è il coefficiente di sicurezza che si applica allo stress radiale in configurazione di disco sottile [18]:

$$\sigma_{lim} = \frac{\sigma_{max}}{1.45} \quad (3.7)$$

Sulla base di queste equazioni è possibile fare un paragone numerico su un volano in carbonio ed uno in acciaio:

Tabella 3.2: Confronto volani

Caratteristiche	<i>Carbon T1000</i>	<i>Acciaio</i>
<i>Densità</i> [$\frac{kg}{m^3}$]	1520	7700
σ_{lim} [MPa]	1950	1520
<i>Massa</i> [kg]	367	1380
<i>Raggio</i> [m]	0.35	0.2
<i>Inerzia</i> [$kg \cdot m^2$]	35	33
<i>Velocità limite</i> [rpm]	25600	16350

A parità di Inerzia, considerata come specifica di progetto, è possibile osservare che un volano in composito può essere portato in rotazione a velocità molto maggiori di contro, un volano in acciaio, avrà una massa più elevata.

In figura 3.3 è riportata la sezione quotata del volano in carbonio.

La scelta, se si utilizza questo materiale, è quella di una configurazione ad anello sottile, con tutte le dovute considerazioni fatte in precedenza. [19]

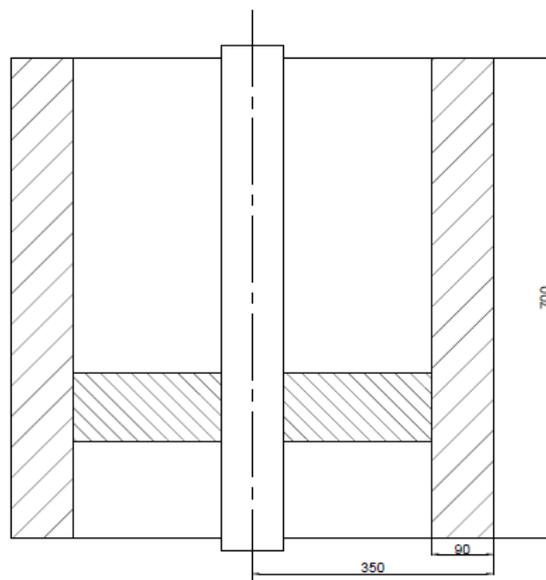


Figura 3.3: Esempio di sezione (quotata) per un volano in composito

3.1.3 Sistema elettronico di interfaccia

Per interfacciare il sistema FESS alla rete il metodo più utilizzato e consolidato è quello di utilizzare due Inverter VSI con DC-link in comune in modo tale da controllare separatamente il sistema Flywheel ‘disaccoppiandolo’ dalla richiesta di potenza della rete. [19,20,21,22].

Questo sistema di convertitori è tipicamente denominato ‘Back to back’ (BTB converter).

Per ottenere il bilanciamento di potenza desiderato è necessario controllare al meglio entrambi i convertitori. Condizione necessaria per il corretto trasferimento di potenza è che uno dei due convertitori sia controllato in modo tale da mantenere la tensione di bus sul DC-link ad un valore di riferimento costante; infatti se questa tensione viene mantenuta costante (con variazioni accettabili) nelle diverse modalità di funzionamento, è garantito il completo trasferimento di potenza da un lato all’altro, e non viene immagazzinata energia extra nel condensatore. [15]

In una prima tipologia di controllo il convertitore lato rete (Grid Side Converter) ha questo compito mentre il convertitore lato motore (Motor Side Converter) fornisce il riferimento di Coppia in modo da annullare l’errore di frequenza riferito a 50 Hz.

Questo è l’approccio utilizzato nel modello proposto in questo progetto per controllare l’azionamento lato motore.

Nella seconda tipologia il GSC invece si occuperà di annullare lo sbilanciamento di potenza in arrivo dalla rete mentre l'MSC dovrà generare il riferimento di coppia in modo tale da annullare l'errore di tensione sul DC-link rispetto al valore nominale.

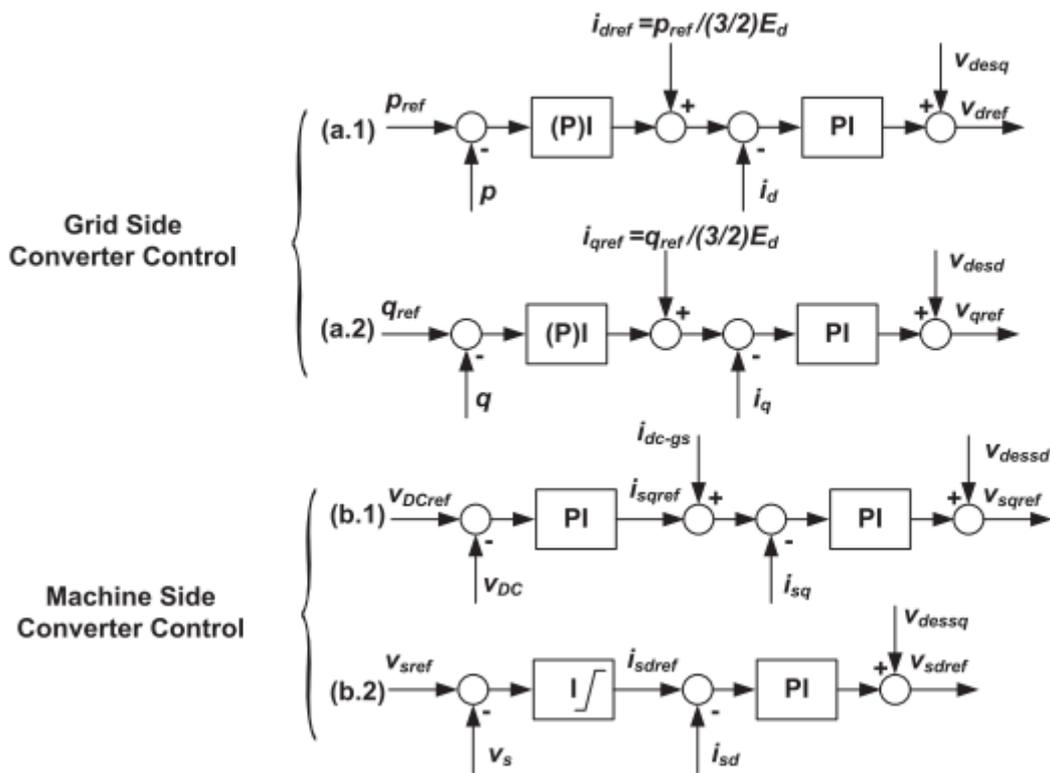


Figura 3.4: Tipologia di controllo dei convertitori BTB

Per la rete sarà come prelevare o fornire energia da una batteria [22].

In figura 3.5 è possibile osservare tutti i componenti appena descritti ai quali si aggiungono la macchina elettrica, il flywheel e la rete.

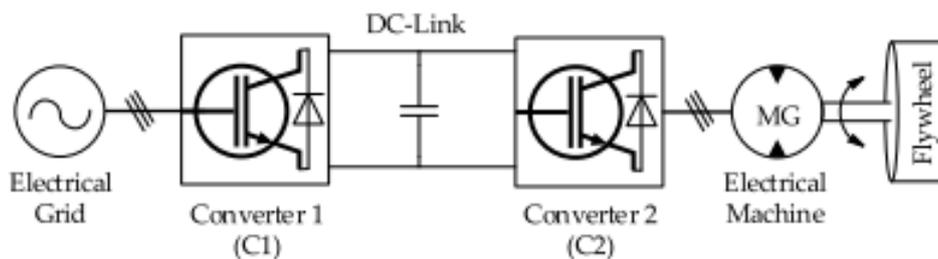


Figura 3.5: Schema dei convertitori Back to Back

In tabella 3.3 invece si possono confrontare rapidamente i riferimenti imposti per il controllo dei convertitori BTB nelle due tipologie sopra descritte, l'asterisco indica che il valore è un riferimento impostato dal controllo, mentre le grandezze senza asterisco si riferiscono ai feedback in retroazione.

Tabella 3.3: Confronto controllo BTB

Tipologia	<i>GSC</i>	<i>MSC</i>
1	$V_{DC}^* - V_{DC} = 0$	T^* da errore sulla frequenza
2	i_{dq}^* tali da regolare il trasferimento di potenza attiva	$V_{DC}^* - V_{DC} = 0$

Nel modello di simulazione proposto in questa tesi è stata fatta la scelta di controllare un motore in corrente continua come se l'anello di corrente in DC fosse l'equivalente di un anello di corrente in assi dq per un motore SPM isotropo, questa scelta permette di:

- utilizzare alcune equazioni pratiche per ricavare i parametri del regolatore PI di corrente di primo tentativo
- utilizzare un convertitore DC-DC a quattro quadranti come il ponte ad H (figura 3.6)
- ridurre i tempi di calcolo necessari per simulare un controllo di tipo Field-oriented che prevede la trasformazione delle componenti trifase in assi dq sia in catena diretta che in retroazione

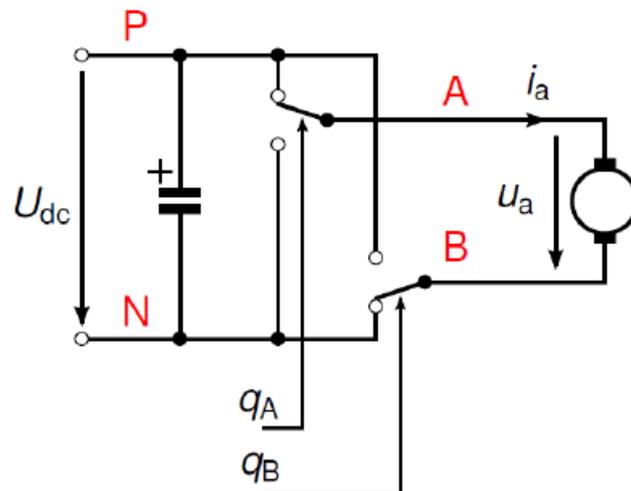


Figura 3.6: Convertitore DC-DC a quattro quadranti

Descrizione analitica del modello

La tensione di armatura di un motore in corrente continua è la tensione differenziale fornita dal ponte ad H e viene comandata agendo sui duty-cycle delle due 'gambe'. [23]

$$V_a = V_A - V_B = V_{dc} \cdot (d_a - d_b) \quad (3.8)$$

La tensione di armatura dipende da entrambi i duty-cycle per cui bisogna stabilire una relazione tra d_a e d_b . La modulazione bipolare controfase usa duty-cycle complementari:

$$d_b = 1 - d_a \quad (3.9)$$

La tensione di armatura V_a vale quindi:

$$V_a = V_{dc} \cdot (2d_a - 1) \quad (3.10)$$

Mente la legge di controllo (cioè come vengono generati i duty-cycle di riferimento) si ricava conoscendo il riferimento della tensione di armatura.

Per d_a si ha che il riferimento da impostare vale:

$$d_a^* = \frac{V_a^*}{2 \cdot V_{DC}} + 0.5 \quad (3.11)$$

Mentre per d_b , ricordando (3.9), si ha:

$$d_b^* = -\frac{V_a^*}{2 \cdot V_{DC}} + 0.5 \quad (3.12)$$

Grazie al riferimento dei duty-cycle sarà possibile controllare con la tecnica PWM (pulse-width modulation) i transistor di potenza del convertitore.

3.1.4 Confronto tra le diverse macchine elettriche

L'energia è immagazzinata nel volano, il quale, per caricarsi e scaricarsi deve essere accoppiato al rotore di una macchina elettrica.

Quando il sistema si sta caricando la macchina accelera il volano e quando l'energia viene estratta la macchina rallenta il volano.

Quindi deve essere in grado di funzionare sia come motore che come generatore.

I criteri chiave di progettazione che la macchina deve soddisfare includono alta efficienza, alta densità di potenza e basse perdite:

- l'alta efficienza è un requisito importante perché il FESS sia un efficace sistema di stoccaggio dell'energia
- le basse perdite del rotore sono fondamentali poiché la maggior parte dei FESS opera nel vuoto e la rimozione del calore è complicata
- le basse perdite a vuoto o in stand-by sono desiderabili per l'immagazzinamento di energia per tempi più lunghi; ciò significa ridurre al minimo le perdite per attrito e ventilazione così da evitare l'auto-scarica del sistema

Le tipologie più comuni di macchine elettriche usate nei FESS sono:

- la macchina a induzione (IM); è usata per applicazioni di alta potenza grazie alla sua robustezza e alla coppia elevata se riferita al basso costo.

Le limitazioni di velocità, il controllo complesso e i maggiori requisiti di manutenzione sono i principali problemi.

La tipologia di rotore a gabbia di scoiattolo può essere un'opzione meno costosa per applicazioni a risposta lenta [20]. Una macchina a induzione a doppia alimentazione invece (DFIM) può essere utilizzata in applicazioni FESS per permettere un dimensionamento ridotto dell'elettronica di potenza [24]. (Figura3.7)

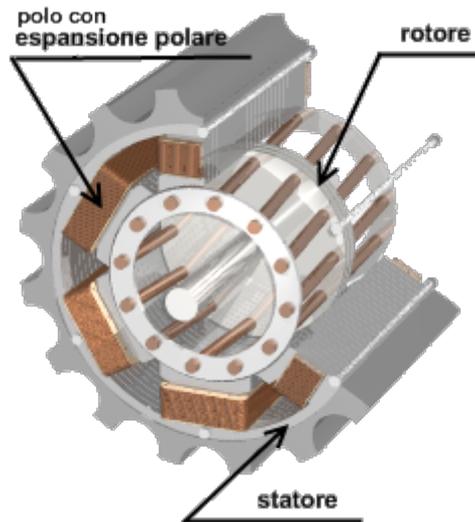


Figura 3.7: Motore a induzione

- la macchina sincrona a riluttanza (SyR); è molto robusta e ha basse perdite per un'ampia gamma di velocità.

Ha un sistema di controllo più semplice della macchina a induzione, quando si tratta di operare ad alta velocità.

Di contro, ha un basso fattore di potenza e elevati ripple di coppia. (Figura 3.8)

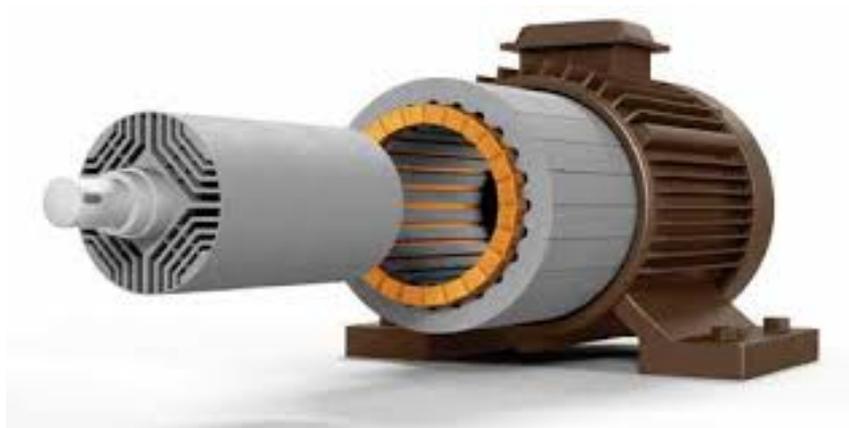


Figura 3.8: Motore sincrono a Riluttanza

- la macchina sincrona a magneti permanenti (PMSM); è la macchina più comunemente usata per il FESS a causa della sua maggiore efficienza, alta densità di potenza e le basse perdite del rotore [18].

È ampiamente utilizzata nelle applicazioni ad alta velocità a causa delle limitazioni di velocità dei motori ad induzione e dell'ondulazione di coppia, delle vibrazioni e del rumore dei SyR.

Il problema con un PM sono dovuti alle sue perdite a bassa velocità per correnti parassite dello statore ed al suo prezzo elevato.

Inoltre i magneti possono essere soggetti a smagnetizzazione. (Figura 3.9)

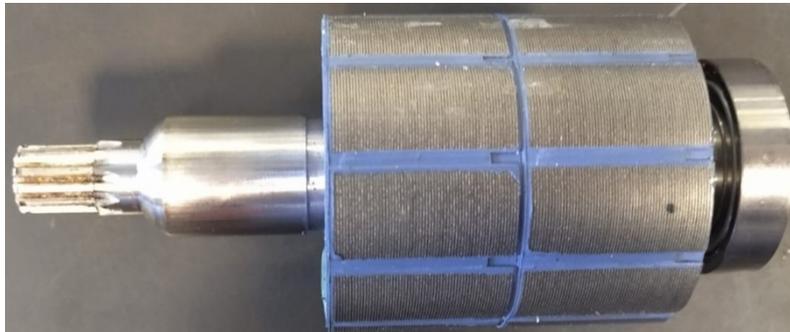


Figura 3.9: Rotore di un motore sincrono a magneti permanenti

Come già accennato il tipo di azionamento scelto nell'analisi del modello è quello di un motore in corrente continua.

Nella pratica però le macchine elettriche utilizzate sono quelle sopraelencate ed è quindi possibile fare prima un riassunto in tabella delle caratteristiche di queste macchine e successivamente analizzarne i pregi ed i difetti.

Per quanto riguarda invece i diversi campi di applicazione è possibile rifarsi alla figura 1.9 mentre per il range di velocità si può osservare la tabella 3.1.

In tabella 3.4 sono riassunte le caratteristiche delle macchine elettriche descritte:

Tabella 3.4: Differenti macchine elettriche utilizzate per il sistema FESS [17]

Macchina	<i>IM</i>	<i>SyR</i>	<i>SMPM</i>
<i>Potenza</i>	Alta	Medio-Bassa	Medio-bassa
<i>Potenza specifica</i>	Media $[0.7 \frac{kW}{kg}]$	Media $[0.7 \frac{kW}{kg}]$	Alta $[12 \frac{kW}{kg}]$
<i>Perdite nel rotore</i>	Ferro e Rame	Ferro	Assenti
<i>Efficienza</i>	Alta (93.4%)	Alta (93%)	Molto alta (95.2%)
<i>Taglia</i>	$1.8 \frac{l}{kW}$	$2.6 \frac{l}{kW}$	$2.3 \frac{l}{kW}$
<i>Ripple di coppia</i>	Medio (7.3%)	Alto (24%)	Medio (10%)
<i>Smagnetizzazione</i>	No	No	Sì
<i>Costi</i>	Bassi $[22 \frac{euro}{kW}]$	Bassi $[24 \frac{euro}{kW}]$	Alti $[38 \frac{euro}{kW}]$

In tabella 3.5 sono invece elencati vantaggi e svantaggi per le tre tipologie di macchine descritte.

Tabella 3.5: vantaggi e svantaggi nell'utilizzo delle diverse macchine elettriche. [17]

Macchina	<i>Vantaggi</i>	<i>Svantaggi</i>
PMSM	Alta Densità di potenza	Materiali fragili
	Capacità di sovraccarico	Struttura costosa
	Facilità di dissipazione del calore	Smagnetizzazione dei magneti
IM	Bassi costi	Alto rapporto di scorrimento di rotore
	Non soggetto a smagnetizzazione	Velocità limitata
	Elevata energia immagazzinata	Efficienza più bassa
SyR	Alta densità di coppia	Basso fattore di potenza
	Alta densità d potenza	Struttura complessa
	Semplice rimozione del calore	Ripple di coppia

3.1.5 Modello dei motori in continua

Come detto, per questa analisi di un sistema di accumulo con volano fatta tramite Simulink, il modello utilizzato è quello di un motore in corrente continua.

Questa scelta permette di utilizzare un sistema relativamente più semplice senza le necessarie trasformazioni del sistema di riferimento dei motori in corrente alternata, ma allo stesso tempo presenta molte somiglianze con i motori in corrente alternata controllati su assi rotanti dq.

Per questi motivi la scelta è ricaduta su un azionamento con motore DC.

Le due equazioni di riferimento, tradotte poi in ambiente Simulink sono l'equazione di armatura [25]

$$V_a = R_a \cdot i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + k_e \omega \quad (3.13)$$

e l'equazione di coppia

$$T_a = k_t \cdot i_a = T_l + J \frac{d\omega}{dt} \quad (3.14)$$

Alcuni parametri sono già stati descritti (coppie, inerzia e velocità), gli altri indicano:

- V_a tensione di armatura
- R_a resistenza di armatura
- L_a induttanza di armatura
- i_a corrente di armatura
- k_e costante di forza elettromotrice
- k_t costante di coppia

I parametri utilizzati, specialmente quelli di armatura e per l'inerzia del rotore, sono stati ricavati dal catalogo ABB per un motore elettrico con potenza nominale di 100 kW i cui valori di targa sono riportati in figura 3.10. [26]

DMR 160 MN

	Speed n Armature voltage Ua of:			Out- put	Out- put	n max electr.	Armature current	Torque	Torque	Effectivity		Induc- tivity	Armature circuit impedance	Order DesiDMRtion
	420	460	480							eta A	eta tot			
400	[V]	[V]	[V]	Pab	Pab	[min-1]	Ia	M	M	[%]	[%]	[mH]	[Ohm]	
2590				100	134	3200	270	369	272	92,4	90,7	1,50	0,045	DMR 160 MN- Y7AO
				105	141	3500	270	369	272	92,7	91,0	1,50	0,045	DMR 160 MN- Y7AP
				116	156	3800	270	369	272	93,2	91,6	1,50	0,045	DMR 160 MN- Y7AR
				121	162	3800	270	369	272	93,4	91,9	1,50	0,045	DMR 160 MN- Y7AT
2120				84,0	113	3900	233	378	279	90,3	88,3	2,10	0,068	DMR 160 MN- 4710
				88,4	119	3900	232	378	279	90,7	88,8	2,10	0,068	DMR 160 MN- 471P
				97,5	131	3900	232	378	279	91,3	89,6	2,10	0,068	DMR 160 MN- 471R
				102	137	3900	232	378	279	91,6	89,6	2,10	0,068	DMR 160 MN- 471T
1680				69,0	93	3000	193	392	289	89,6	87,2	3,3	0,10	DMR 160 MN- Y72O
				72,7	97	3000	192	392	289	90,0	87,7	3,3	0,10	DMR 160 MN- Y72P
				80,1	107	3000	192	392	289	90,7	88,6	3,3	0,10	DMR 160 MN- Y72R
				84,2	113	3000	192	392	289	91,0	89,0	3,3	0,10	DMR 160 MN- Y72T
1220				50,0	67	2400	143	391	288	87,4	84,3	5,9	0,19	DMR 160 MN- 47BO
				52,9	71	2400	143	391	288	87,9	85,0	5,9	0,19	DMR 160 MN- 47BP
				58,2	78	2400	143	391	288	88,8	86,1	5,9	0,19	DMR 160 MN- 47BR
				61,1	82	2400	143	391	288	89,2	86,6	5,9	0,19	DMR 160 MN- 47BT
880				37,5	50	1800	110	407	300	85,0	81,2	10,4	0,32	DMR 160 MN- 272O
				39,6	53	1800	110	407	300	85,7	82,0	10,4	0,32	DMR 160 MN- 272P
				43,9	59	1800	110	407	300	86,8	83,4	10,4	0,32	DMR 160 MN- 272R
				46,0	62	1800	110	407	300	87,3	84,0	10,4	0,32	DMR 160 MN- 272T
Form Factor	< 1.03			Excitation Power		2100 W		Operating Mode		S 1		Weight		320 kg
Mech. limit speed	4500 RPM			Excitation current at 310V		6.7 A		Type of protection		IP 23		Uncompensated		
Moment of inertia	0.35 kgm ²			Insulation material class		H		Type of cooling		IC 06/17/37				

Figura 3.10: Motore DC ABB

controllo dei motori in corrente continua

Il motore è controllato in coppia con un riferimento generato da un regolatore proporzionale integrale in modo tale da annullare l'errore della frequenza di regime come visto nel paragrafo sui convertitori di interfaccia.

Ovviamente, a seconda del segno dell'errore in ingresso, la macchina si comporterà da motore o da generatore.

Per il settaggio dei parametri dei due regolatori PI (quello esterno per l'errore di frequenza e quello interno per l'errore di corrente) sono state utilizzate le seguenti equazioni [27]:

$$k_{p,i} = L_a \cdot 2\pi \cdot f_{sw} \quad (3.15)$$

$$k_{i,i} = k_{p,i} \frac{2\pi \cdot f_{sw}}{10} \quad (3.16)$$

$$k_{p,\omega} = J \cdot 2\pi \cdot f_{sw} \quad (3.17)$$

$$k_{i,\omega} = k_{p,\omega} \frac{2\pi \cdot f_{sw}}{100} \quad (3.18)$$

Queste formulazioni permettono di avere un valore di primo tentativo per i guadagni dei regolatori tali da ottenere una risposta dinamica che sia un buon compromesso tra rapidità e smorzamento.

Interruzione di Coppia

Per simulare il funzionamento del sistema una volta terminata l'energia immagazzinata (o viceversa completata la carica) è stata inserita una look-up table in parallelo al riferimento di coppia in modo tale che il motore non fornisca potenza nel caso in cui vengano oltrepassati i limiti di velocità previsti in fase di progettazione, secondo tutte le considerazioni già fatte nelle sezioni precedenti.

Stato di energia del sistema

Valutare lo stato energetico del FESS è relativamente semplice se paragonato ad altri sistemi di accumulo come per esempio le batterie elettrochimiche, il che è uno dei vantaggi di questo sistema. Esso infatti è strettamente legato alla velocità di rotazione del volano come già detto in precedenza; nella pratica il valore che si andrà ad osservare nelle simulazioni dipenderà dai valori di velocità massimi e minimi (scelti in questa fase solo sulla base della semplicità di calcolo) e dalla velocità attuale.

Il tutto verrà poi normalizzato per l'energia totale immagazzinata e moltiplicato per cento in modo tale da avere un'informazione percentuale dell'energia residua.

3.1.6 Modello del generatore diesel

Il modello del Generatore a gasolio utilizzato per la simulazione e ricavato in [28] è composto da un regolatore PI che riceve in ingresso l'errore di frequenza e fornisce in uscita una potenza che verrà applicata al generatore elettrico.

Sono aggiunti in catena diretta la funzione di trasferimento del regolatore che è rappresentata da un polo e da un ulteriore ritardo che emula gli attuatori delle valvole.

Lo schema è rappresentato in figura 3.11.

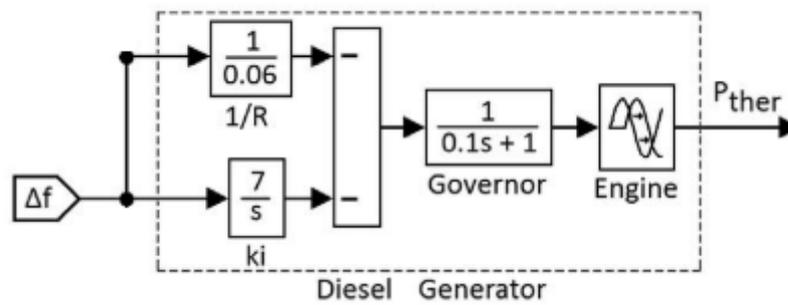


Figura 3.11: Modello del generatore Diesel

Capitolo 4

Descrizione dei test per il modello

In quest'ultimo paragrafo verrà simulata la risposta del sistema FESS sottoposto a diverse entità di squilibrio tra carico e generazione; tutto ciò verrà fatto sia per un sistema che si occupi in autonomia della regolazione di frequenza sia che cooperi con un classico generatore Diesel.

La sequenza delle simulazioni sarà la seguente:

- risposta di alcuni sistemi FESS con differenti valori di inerzie
- risposta di un singolo sistema FESS con differenti valori di potenza del carico
- confronto tra la risposta di un singolo sistema FESS ed un sistema modulare
- risposta di un singolo sistema FESS ad un treno di impulsi
- risposta di un sistema combinato FESS e Generatore Diesel indipendenti
- risposta di un sistema combinato FESS e Generatore Diesel indipendenti ma con più moduli FESS
- risposta di un sistema combinato FESS e Generatore Diesel cooperanti

Nella parte finale verranno fatte alcune considerazioni.

4.1 Risposta dinamica del sistema FESS

In questa prima sezione dell'ultimo capitolo verranno mostrati i risultati delle simulazioni ottenuti testando un sistema FESS sotto diversi punti di vista:

- Sensitività all'inerzia
- Sensitività al carico
- Andamento dell'energia al variare dell'inerzia
- Effetti della modularità
- Risposta ad un treno di impulsi

In tabella 4.1 sono elencati i parametri dei valori principali inseriti nel modello per ottenere i seguenti risultati:

Tabella 4.1: Simulazione singolo FESS

Caratteristiche	<i>Sistema 1</i>	<i>Sistema 2</i>
<i>Inerzia [kg · m²]</i>	10	20
<i>Potenza del carico [W]</i>	12000	12000
<i>Velocità iniziale [$\frac{rad}{s}$]</i>	170	170

Come si vede nelle figure 4.1 e 4.2, un sistema con un valore di inerzia più elevato è in grado di limitare la deviazione massima di frequenza permettendo così al sistema di restare più vicino ai valori limite imposti dalle normative, richiamati nel capitolo 2.

Figura 4.1: Risposta al gradino di carico di un sistema FESS

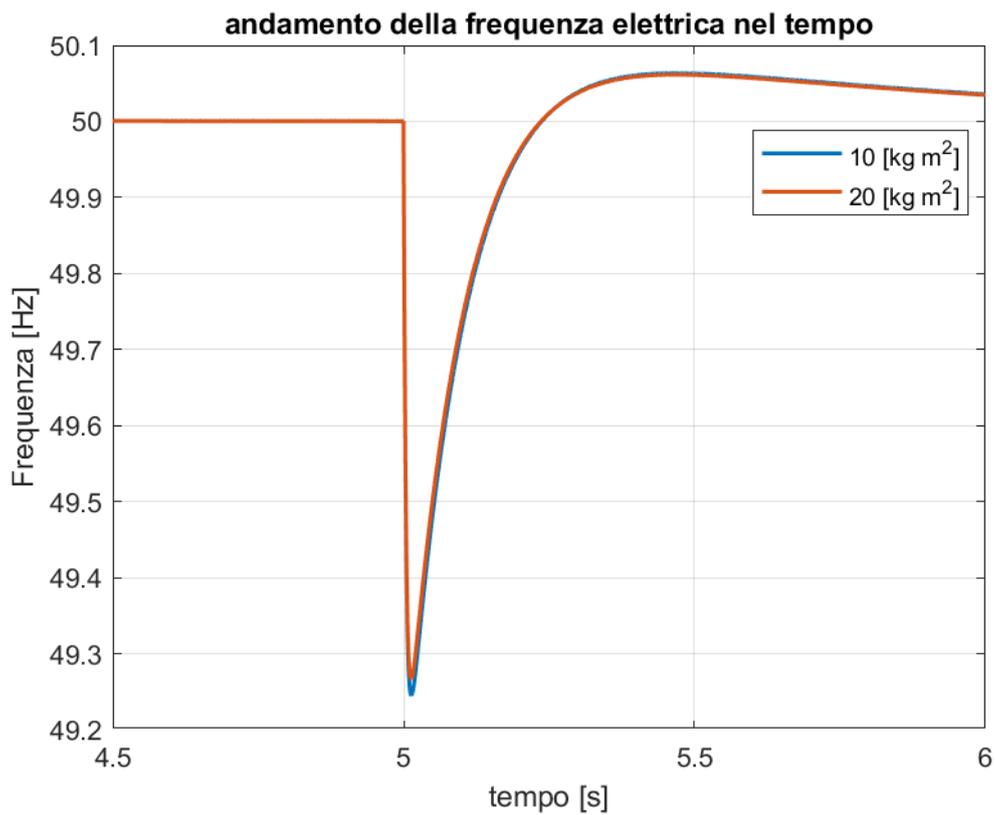
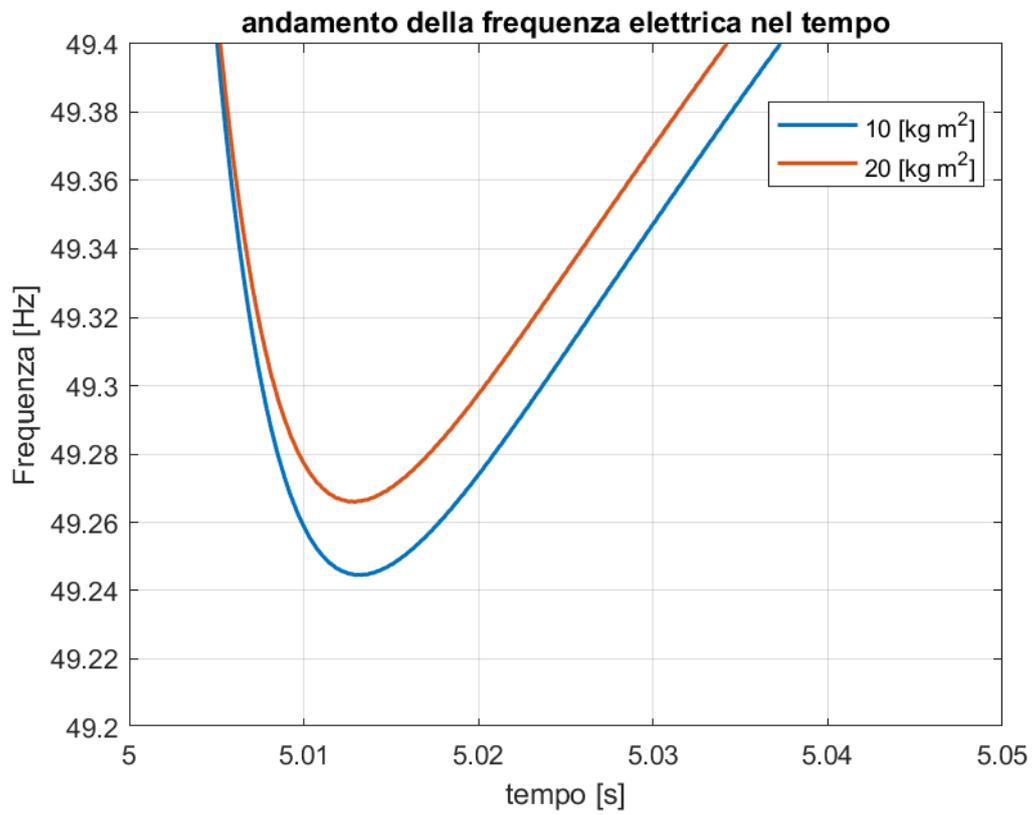


Figura 4.2: Risposta al gradino di carico di un sistema FESS, ingrandimento



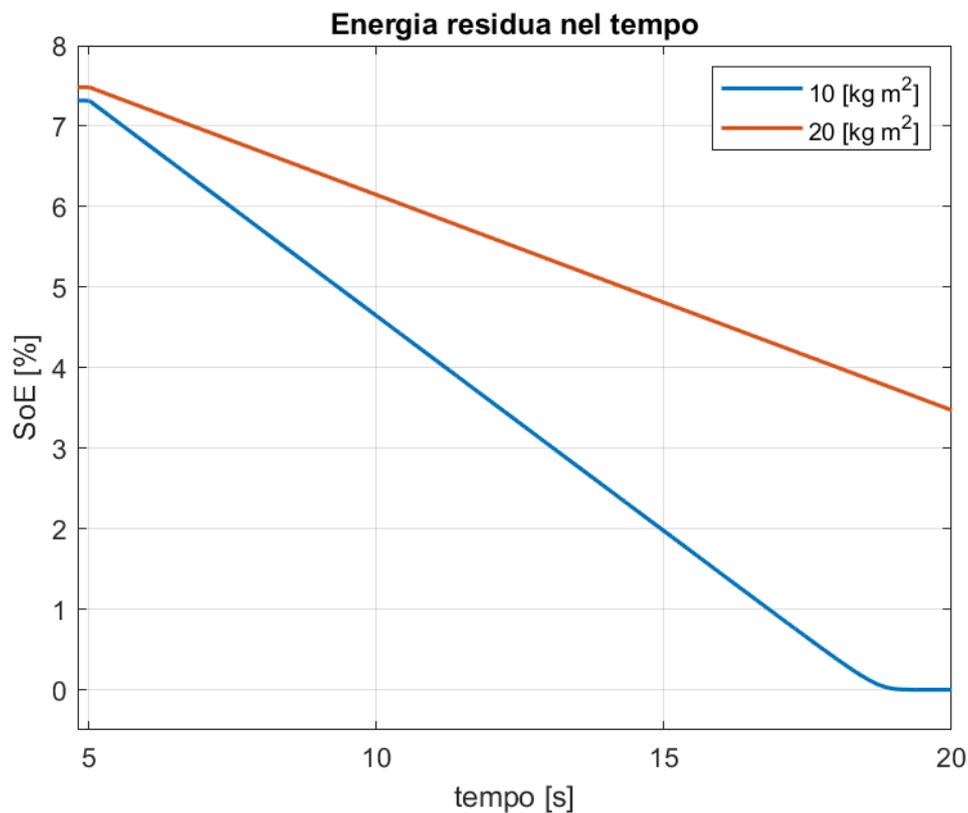
Andamento dell'energia residua

Come detto il valore dell'energia è direttamente legato al valore della velocità; è possibile però osservare anche come il valore dell'inerzia riesca a rallentare il processo di scarica infatti si ha che:

$$T_m - T_l = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (4.1)$$

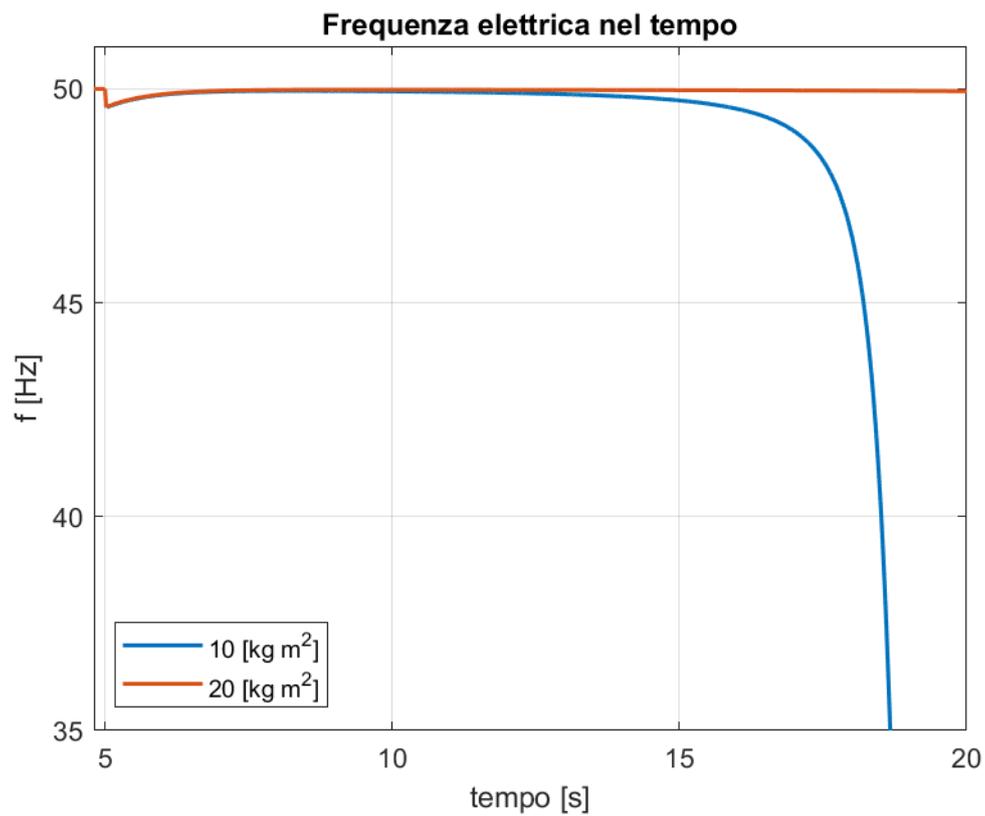
Perciò a parità di carico resistente, un maggiore valore di inerzia limiterà il decrescere della velocità preservando lo stato energetico del sistema come si può infatti osservare in figura 4.3.

Figura 4.3: Risposta al gradino di carico di un sistema FESS, Energia residua



Il sistema FESS che ha un valore di inerzia inferiore terminerà prima l'energia immagazzinata, l'effetto sarà quello di vedere la frequenza elettrica deviare dal riferimento e crollare dopo circa 18 secondi, dal momento che il FESS non parteciperà più alla regolazione di frequenza finché non sarà nuovamente carico, vedi figura 4.4.

Figura 4.4: Risposta al gradino di carico di un sistema FESS, scarica del primo sistema



Sensitività al carico e modularità

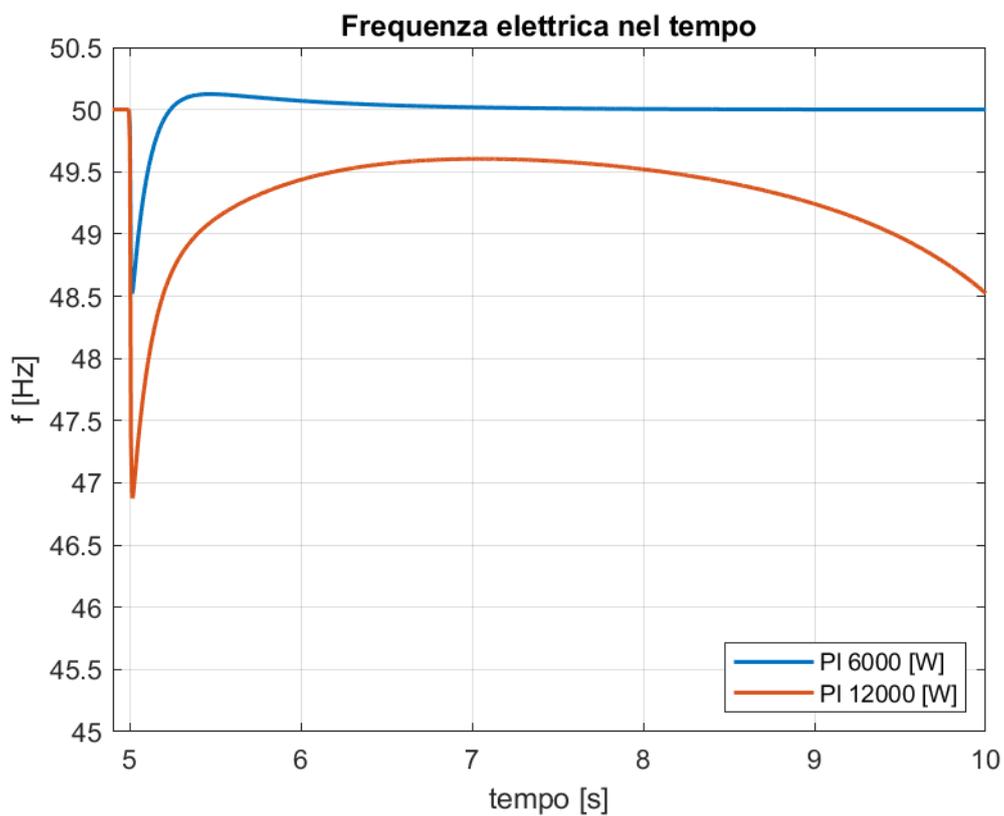
Dopo aver osservato il comportamento di due sistemi FESS con diversi valori di inerzia è possibile vedere come lo stesso sistema reagisce a diverse entità di carico e come sia possibile migliorare questo aspetto.

Tabella 4.2: Sensitività al carico

Caratteristiche	<i>Sistema 1</i>	<i>Sistema 2</i>
<i>Inerzia [kg · m²]</i>	20	20
<i>Potenza del carico [W]</i>	6000	12000
<i>Velocità iniziale [$\frac{rad}{s}$]</i>	170	170

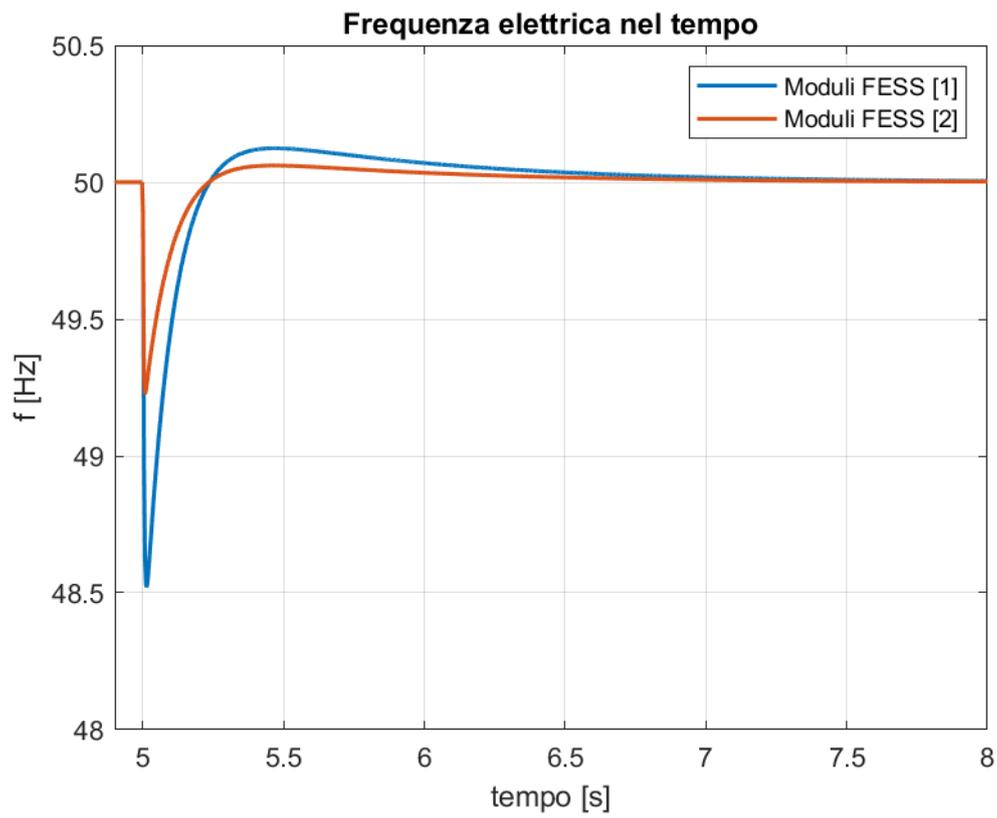
In figura 4.5 si osserva molto bene come un carico più elevato possa far sì che un sistema FESS non correttamente dimensionato non riesca a mantenere la frequenza entro certi i limiti stabiliti dalle normative.

Figura 4.5: Sensività al carico



In questo caso un'alternativa percorribile, grazie anche alla particolarità del sistema FESS, potrebbe essere quella di utilizzare un sistema modulare in grado di erogare una potenza maggiore con i risultati che si osservano in figura 4.6 per due sistemi sottoposti allo stesso squilibrio

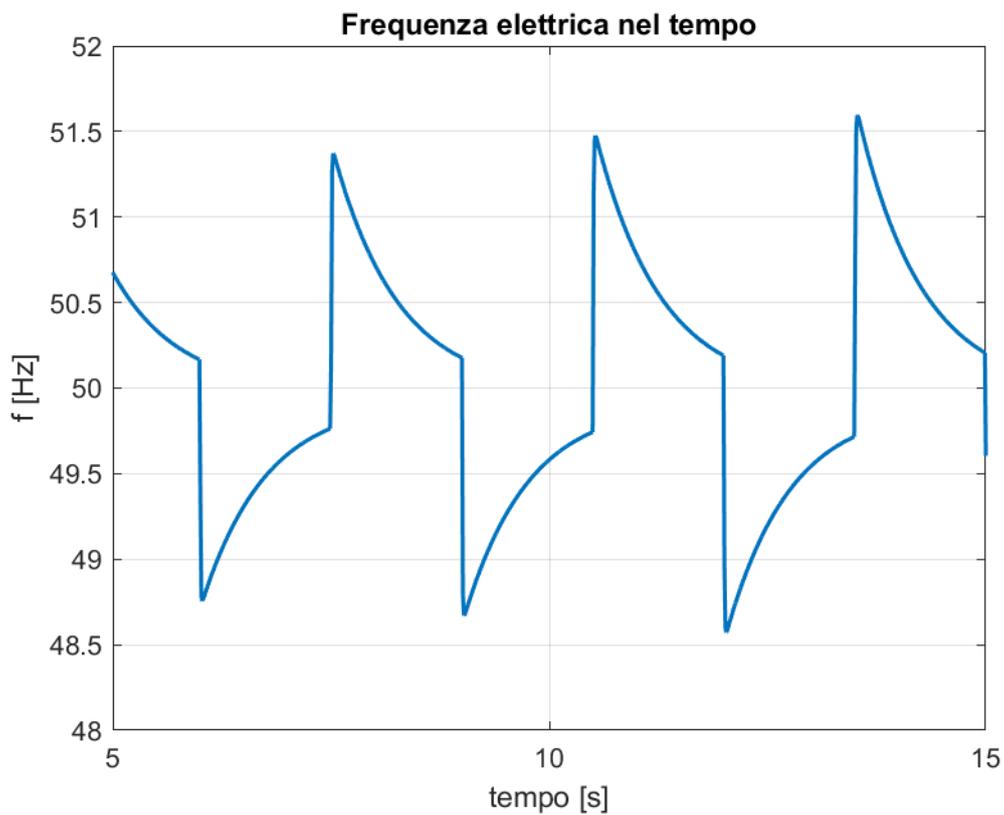
Figura 4.6: Risposta per un sistema modulare



Treno di impulsi

Un ultimo Test fatto sul sistema con il solo FESS è quello di applicare in ingresso un treno di impulsi; in questo caso si avranno i due funzionamenti quindi in ricarica e in scarica con la frequenza che andrà anche oltre i 50 Hz per poi essere riportata al valore di riferimento grazie all'assorbimento del surplus di potenza attiva da parte del sistema FESS, vedi figura 4.7.

Figura 4.7: Risposta al treno di impulsi

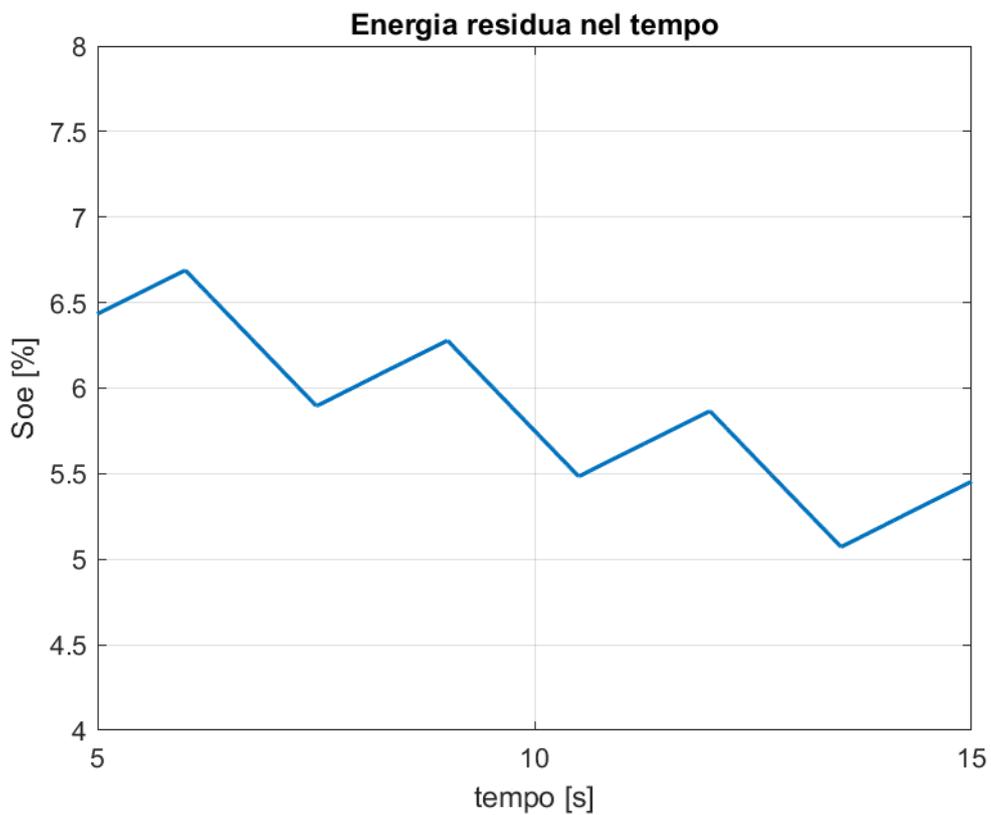


Questo risultato può essere interpretato in ottica di inserimento di energie rinnovabili; infatti, nelle reti elettriche attuali, si può riscontrare un carico attivo che immetta potenza in rete.

Con un sistema di questo tipo è possibile accumulare energia senza il bisogno di dissiparla incrementando, per il tempo in cui la generazione eccede i carichi, il valore dello stato energetico del sistema.

(4.8)

Figura 4.8: Risposta al treno di impulsi, energia residua



4.2 Test sul sistema combinato FESS e generatore Diesel

In questa sezione finale verranno commentati i risultati ottenuti dalla simulazione del sistema combinato FESS e generatore Diesel per la regolazione della frequenza.

La sequenza della simulazioni si svilupperà nel modo seguente:

- Risposta indipendente del sistema con volani e del generatore a combustibile
- Prima proposta di miglioramento: incremento dei moduli FESS per aumentare la capacità di regolazione
- Seconda proposta di miglioramento: controllo combinato dei due componenti in modo tale che il FESS intervenga istantaneamente ma conservi lo stato energetico grazie all'aiuto del DG

Per ogni risposta verrà osservato l'andamento della frequenza e lo stato energetico del FESS.

I parametri delle varie simulazioni sono i seguenti:

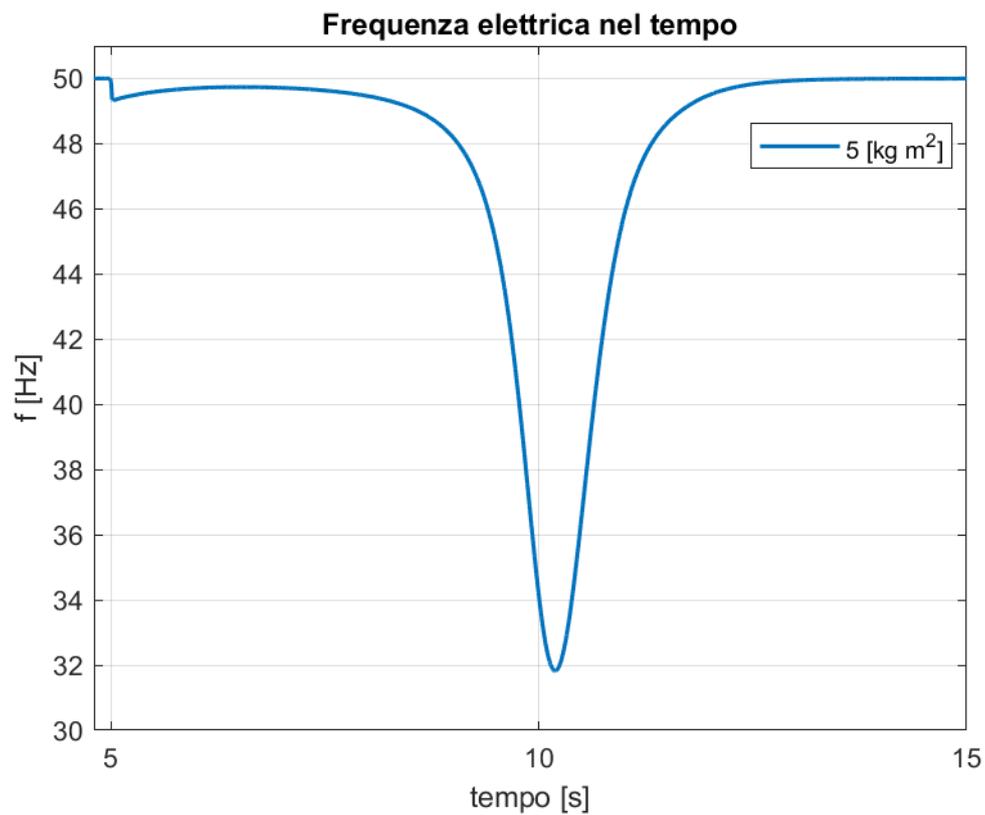
Tabella 4.3: FESS e DG

Caratteristiche	<i>Sistema</i>	
<i>Inerzia del volano</i>	5	$[kg \cdot m^2]$
<i>Potenza del carico</i>	3000	$[W]$
<i>Velocità iniziale</i>	170	$[\frac{rad}{s}]$

Prima simulazione

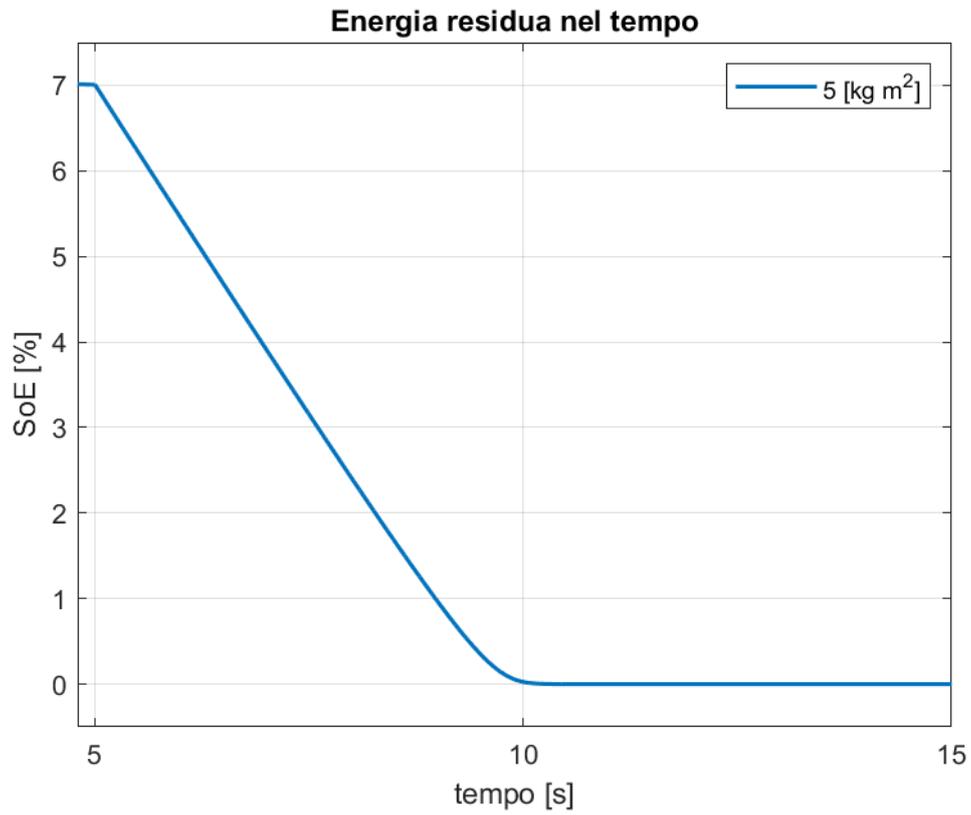
In questo caso, come si vede in figura 2.1, non appena il sistema di accumulo ha terminato l'energia immagazzinata intorno ai 10 s interviene con la regolazione il sistema Diesel, il quale, ha una dinamica più lenta; sarà in grado di portare il valore della frequenza al riferimento però i valori da questa raggiunti non sono sostenibili in termini di qualità della rete.

Figura 4.9: FESS e Generatore Diesel indipendenti



Si vede come, nel momento in cui il sistema FESS ha terminato le risorse di energia (figura 4.10) la frequenza inizi progressivamente a deviare dal riferimento con valori non accettabili

Figura 4.10: Energia residua

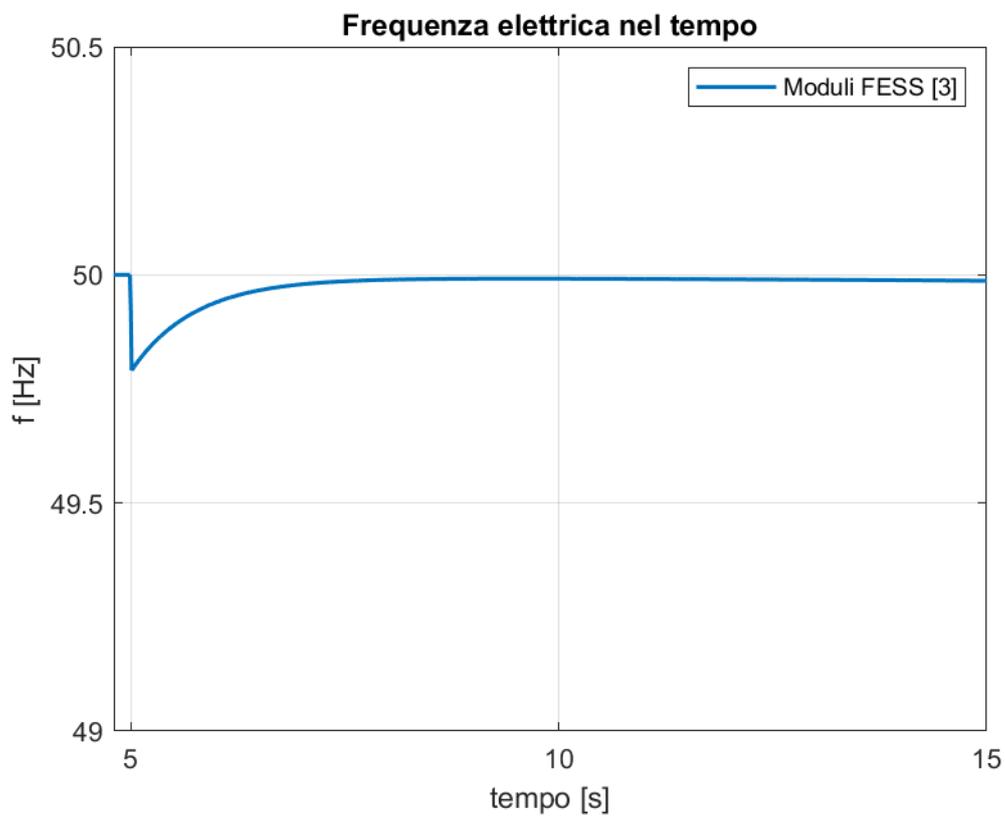


Seconda simulazione

Una prima soluzione per evitare questa netta deviazione di frequenza potrebbe essere quella di installare nel sistema una maggiore potenza ed energia incrementando i moduli FESS; questo permetterebbe così di sopportare un carico prolungato.

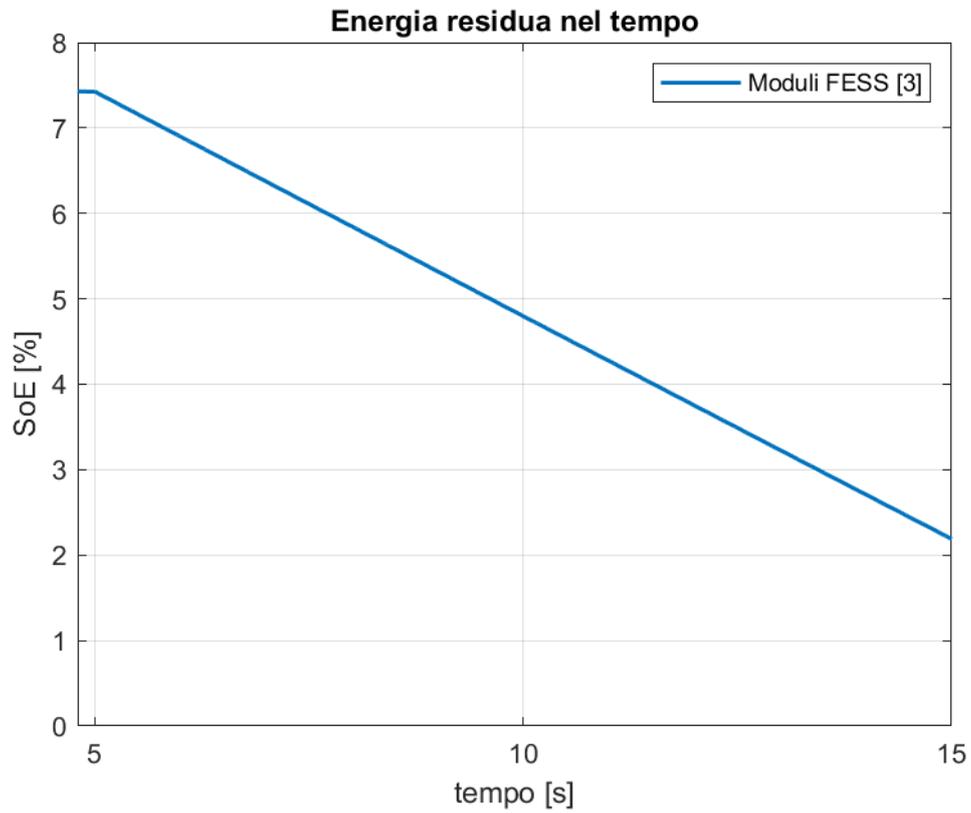
Il problema in questo caso non verrebbe del tutto risolto, però nel caso in cui il carico cessasse intorno ai 15-20 secondi il problema precedente non si avrebbe come osservabile in figura 4.11.

Figura 4.11: FESS e Generatore Diesel indipendenti, sistema modulare



In questo caso non si nota l'effetto visto nella prima simulazione grazie al fatto che dopo 10 s il sistema ha ancora energia immagazzinata (4.12)

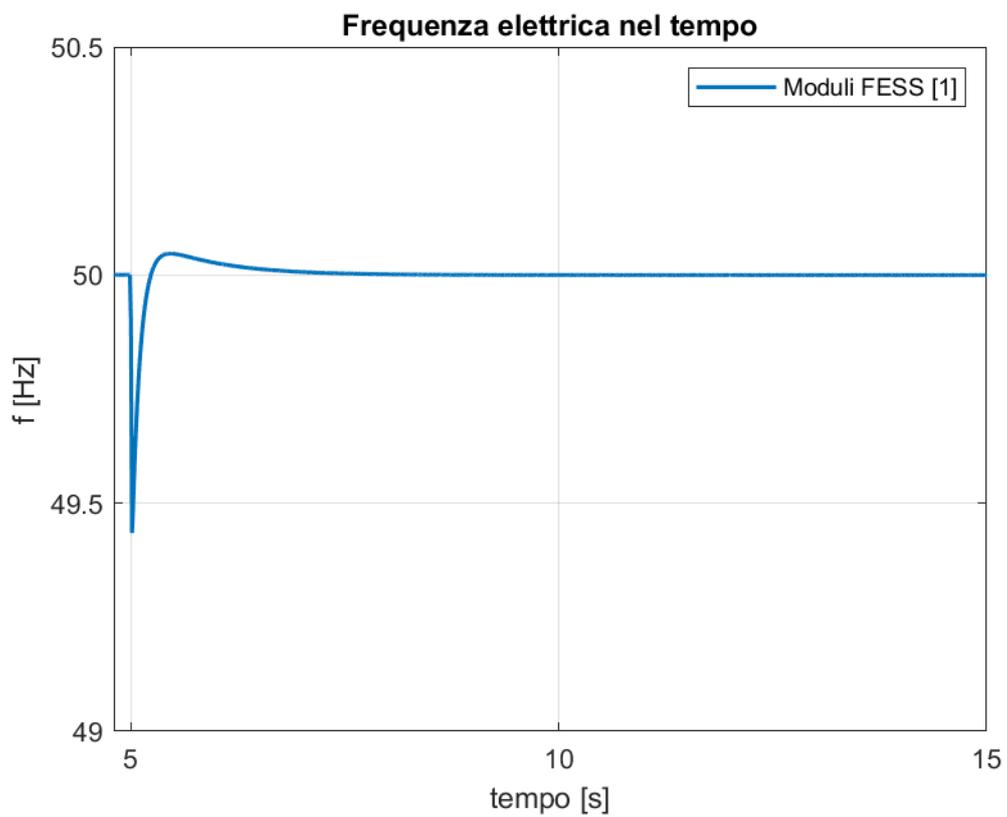
Figura 4.12: Energia residua



Terza simulazione

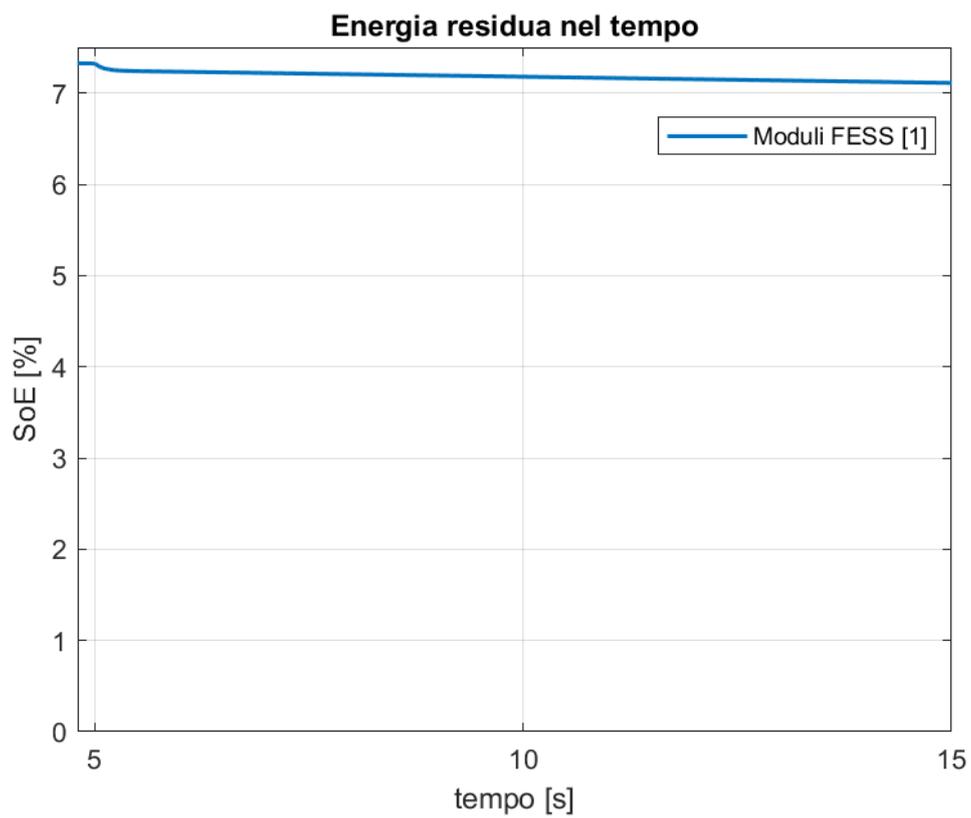
In questa parte conclusiva viene proposto il metodo che sembra essere più efficace per la regolazione di frequenza. Questa volta FESS e generatore diesel lavoreranno contemporaneamente; in particolare il FESS si occuperà di riportare la frequenza al valore di regime e successivamente il carico sarà bilanciato dal Generatore che nel frattempo avrà raggiunto il suo valore di regime. (4.13)

Figura 4.13: FESS e Generatore Diesel combinati



In questo caso si nota come anche il valore di energia immagazzinato la sistema FESS venga preservato il più possibile; questo infatti decresce nei primi istanti per poi assestarsi dal momento che il compito della regolazione è svolto dal generatore. (4.14)

Figura 4.14: Risposta al gradino di carico di un sistema FESS, Energia residua



4.3 Conclusioni

Lo scopo del progetto era quello di creare un modello del sistema FESS, simulandone la risposta se utilizzato per la regolazione della frequenza.

Nella prima sezione è stata presentata questa tecnologia sotto tutti i punti di vista facendone inoltre una panoramica di mercato.

Nella seconda sezione è stato invece analizzato più nel dettaglio il tema della regolazione della frequenza in modo tale da avere un riferimento per i risultati dell'ultimo capitolo.

Nella terza sezione è stato descritto il modello di tutti i componenti del sistema facendo anche un'analisi su ciò che può essere scelto in fase di progetto. Nell'ultima sezione sono invece rappresentati i risultati delle simulazioni.

Poiché tipicamente questo ruolo di gestione della potenza attiva è svolto dai grandi generatori rotanti, nell'ultima parte della quarta sezione sono state analizzate le possibili combinazioni di questi due sistemi verificando l'efficacia di un sistema combinato.

Si è visto come un sistema cooperante sia in grado di combinare la rapidità di risposta di un sistema FESS e allo stesso tempo preservarne lo stato energetico; un ulteriore sviluppo potrebbe essere quello di impostare un ritardo di intervento del generatore Diesel; in questo caso per tutti quei disturbi di breve entità temporale il generatore non si accorgerebbe per nulla dell'intervento del FESS riducendo notevolmente i cicli di start-stop.

Le potenzialità di sviluppo di questo sistema sono notevoli ed inoltre ha il vantaggio di essere un sistema robusto che non necessita di grande manutenzione ed a emissioni 0 durante il funzionamento.

Se in un futuro, come sembra, le smart grid prenderanno il sopravvento sulle reti elettriche tradizionali, un sistema di supporto alla regolazione di frequenza come quello FESS avrà sicuramente modo di farne parte.

4.4 Ringraziamenti

In questa parte della Tesi vorrei inserire una parte meno tecnica ma altrettanto importante per me che riguarda i ringraziamenti a tutte le persone che mi hanno aiutato e supportato in questi anni.

Prima di tutto vorrei ringraziare la mia famiglia; mia mamma, mio papà e mio fratello i quali, oltre al sostegno economico, non mi hanno mai fatto sentire la pressione addosso nonostante alcune volte fossero anche più coinvolti di me.

Mia cugina Serena che mi ha aiutato molto soprattutto nell'ultimo periodo.

Un altro ringraziamento va alle mie nonne, entrambe maestre, che fin da bambino hanno fatto sì che nascesse in me un interesse costante nel conoscere nuove cose.

Ringrazio la mia ragazza Mariangela che mi è stata vicina ed ha condiviso con me praticamente tutto il percorso.

Ringrazio anche i miei migliori amici Davide, Matteo e Gerardo di tutto quello che hanno fatto per me, augurandomi di non perderli mai qualsiasi cosa ci accada nella vita.

Ringrazio di cuore infine il Relatore Michele Pastorelli ed il mio tutor aziendale Vincenzo Orlando per avermi aiutato in questo percorso di Tesi; sempre pronti, con una disponibilità fuori dal comune, ad aiutarmi quando ne avevo necessità.

Bibliografia

- [1] Dispense Professore Gianfranco Chicco 2019/2020, Politecnico di Torino; Smart electricity system, Smart Meter.
- [2] Flywheel energy storage a conceptual study, Rickard Östergård.
- [3] Dispense Professore Huang Tao 2019/2020, Politecnico di Torino; Smarte electricity system, Prosumers.
- [4] Norma CEI 0-16, Regola tecnica di riferimento per la connessione di Utenti attivi e passivi alle reti AT ed MT delle imprese distributrici di energia elettrica
- [5] Flywheel energy and power storage systems, Bjorn Bolund, Hans Bernhoff, Mats Leijon. DOI: 10.1016/j.rser.2005.01.004
- [6] <https://beaconpower.com/>
- [7] <https://www.activepower.com/en-GB>
- [8] <https://vyconenergy.com/>
- [9] <https://amberkinetics.com/>
- [10] Development of a High-Fidelity Model for an Electrically Driven Energy Storage Flywheel Suitable for Small Scale Residential Applications. Mustafa E. Amiryar, Keith R. Pullen and Daniel Nankoo School. 13 November 2017. DOI: 10.3390/app8030453
- [11] Appunti Professore Enrico Carpaneto 2018/2019, Politecnico di Torino; Sistemi elettrici di potenza.
- [12] Control and simulation of a flywheel energy storage for a wind diesel power system. R. Sebastián, R. Peña-Alzola; Department of Electrical, Electronic and Control Engineering (DIEEC), Spanish University for Distance Education, 28040 UNED, Madrid, Spain article. DOI:10.1016/j.ijepes.2014.08.017
- [13] Regolazione tecnica dei requisiti di rete della generazione distribuita, Terna: Allegato A 70
- [14] ENTSO-E Network Code for Requirements for Grid Connection Applicable to all Generators
- [15] Induction machine-based flywheel energy storage system modeling and control for frequency

regulation after micro-grid islanding. Ali Asghar Khodadoost Arani | Behrooz Zaker | Gevork B. Gharehpetian. DOI:10.1002/etep.2356

[16] Sizing and simulation of a low cost flywheel based energy storage system for wind diesel hybrid system; DOI: 10.1109/EnergyCon.2012.6348204

[17] A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications. Mustafa E. Amiryar and Keith R. Pullen. DOI: 10.3390/app7030286

[18] Kinetic energy storage: Theory and practice of advanced flywheel systems. Genta, G

[19] Development of a High-Fidelity Model for an Electrically Driven Energy Storage Flywheel Suitable for Small Scale Residential Applications. Mustafa E. Amiryar ID , Keith R. Pullen and Daniel Nankoo. 13 November 2017. DOI: 10.3390/app8030453

[20] Flywheel energy storage systems: Review and simulation for an isolated wind power system. R. Sebastia, R. Alzola, Department of Electrical, Electronic and Control Engineering, Spanish University for Distance Education, UNED, 28040 Madrid, Spain. DOI: 10.1016/j.rser.2012.08.008.

[21] A comprehensive review of Flywheel Energy Storage System technology. S.M. Mousavi G, Faramarz Faraji, Abbas Majazi, Kamal Al-Haddad. DOI:10.1016/j.rser.2016.09.060

[22] Control and simulation of a flywheel energy storage for a wind diesel power system. R. Sebastia, R. Alzola. DOI: 10.1016/j.ijepes.2014.08.017

[23] Dispense Professore Gianmario Pellegrino 2019/2020, Politecnico di Torino; Laboratory of power converters and electrical drives.

[24] Doubly fed induction generator, Electroyou. 25 February 2015

[25] Dispense Professore Andrea Cavagnino 2019/2020, Politecnico di Torino; Macchine elettriche II.

[26] ABB, DC Motors Type DMR

[27] Dispense Professore Michele Pastorelli 2018/2019, Politecnico di Torino; Azionamenti elettrici.

[28] Frequency Regulation in Microgrid using Wind - Fuel Cell - Diesel Generator. K.V. Vidyanandan, Member, IEEE and Nilanjan Senroy, Member, IEEE. DOI:10.1109/PESGM.2012.6344703