



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dell'Energia Elettrica

Modellizzazione di una sospensione elettromagnetica ibrida per
sistemi di accumulo a volano

Relatore

Prof. Andrea Tortella

Laureando

Matteo Scupola

Anno Accademico 2016/2017

“Alla mia famiglia che mi ha sempre sostenuto”

Grazie.

Indice

| | Pag. |
|---|------|
| Sommario | 5 |
| Introduzione | 7 |
| 1 L'accumulo dell'energia elettrica | 11 |
| 1.1 Tipologie di accumulo | 11 |
| 1.2 Impianti idroelettrici di pompaggio | 14 |
| 1.3 Impianti ad aria compressa CAES | 15 |
| 1.4 Impianti a batteria | 17 |
| 1.5 Riepilogo delle caratteristiche | 19 |
| 2 Accumulo cinetico di energia elettrica: i volani | 21 |
| 2.1 Principio di funzionamento | 21 |
| 2.2 Geometria e composizione | 22 |
| 2.3 Motori/generatori | 24 |
| 2.4 Elettronica di potenza | 25 |
| 2.5 Rendimento | 25 |
| 2.6 Cuscinetti | 25 |
| 2.7 Involucro di contenimento | 26 |
| 2.8 Considerazioni economiche | 27 |
| 3 Applicazioni | 29 |
| 3.1 Integrazione delle rinnovabili | 29 |
| 3.2 UPS | 30 |
| 3.3 Spazio | 30 |
| 3.4 Trazione elettrica | 30 |
| 4 Sospensione magnetica ibrida | 31 |
| 4.1 Dati di progetto | 31 |
| 4.2 Calcolo della forza verticale | 32 |
| 4.3 Scelta verso correnti | 33 |
| 4.4 Dipendenza della forza dalla temperatura | 34 |
| 4.5 Calcolo dell'induttanza delle bobine | 37 |
| 5 Controllo della sospensione | 41 |
| 5.1 Il controllo | 41 |
| 5.2 Forze agenti sul sistema | 42 |
| 5.3 Sottosistema avvolgimento superiore e inferiore | 45 |
| 5.4 Sottosistema forza cuscinetto superiore e inferiore | 49 |

| | |
|--|----|
| 5.5 Controllo PID | 51 |
| 5.6 Integratore anti wind-up | 54 |
| 6 Test e valutazioni finali | 59 |
| 6.1 Comportamento alle variazioni di temperatura | 59 |
| 6.2 Comportamento alle forze di disturbo | 61 |
| 6.3 Comportamento ai disturbi di traferro | 64 |
| 6.3 Comportamento in caso di terremoto | 66 |
| 7 Conclusioni | 69 |
| Bibliografia | 71 |

Sommario

La crescente competitività dei sistemi a volano, ha portato a una riscoperta di questi. La tecnologia che si ha oggi, permette di utilizzare queste macchine portandole a lavorare ad elevate velocità, e scambiare potenza elettrica con le reti grazie all'elettronica di potenza che gestisce il funzionamento sia in fase di carica che di scarica. Quello che verrà proposto inizialmente in questa tesi è, una breve introduzione alla situazione attuale in ambito energetico, cercando di far intendere al lettore quanto oggi siano importanti i sistemi di accumulo di energia elettrica, successivamente uno sguardo alle tecnologie di accumulo più diffuse sul mercato ed infine verrà descritto l'accumulo cinetico.

La tesi poi, si concentrerà su una particolare tecnologia in grado di far lavorare, i sistemi di accumulo a volano, ad alte prestazioni attraverso una sospensione magnetica. La base della tesi è proprio riuscire a elaborare, attraverso il software Matlab, un sistema di controllo attivo per poter mantenere stabile la massa rotante, sfruttando un modello matematico del cuscinetto. Infine verranno analizzate alcune casistiche per verificare la validità del controllo progettato, inserendo anche dei possibili eventi di disturbo, come ad esempio il verificarsi di un sisma, per analizzare la risposta del sistema.

Introduzione

Nell'ultimo decennio, si è assistito a un elevato aumento della produzione di fonti energetiche rinnovabili (FER); grazie anche ad accordi internazionali sul clima e l'ambiente, necessari se si vuole diminuire l'emissione dei gas a effetto serra.

Lo scenario mondiale sulle fonti rinnovabili si presenta molto variegato; ci sono governi che non hanno ancora aderito agli accordi internazionali e altri che non intendono ridurre la propria produzione di energia dal carbone, fonte molto ambita dai paesi in via di sviluppo perché a basso costo.

Ci sono nazioni invece, che hanno avviato un processo di decarbonizzazione, attivando delle politiche incentivanti sulle fonti rinnovabili. Il grafico di Figura 1 evidenzia chiaramente un trend in salita.

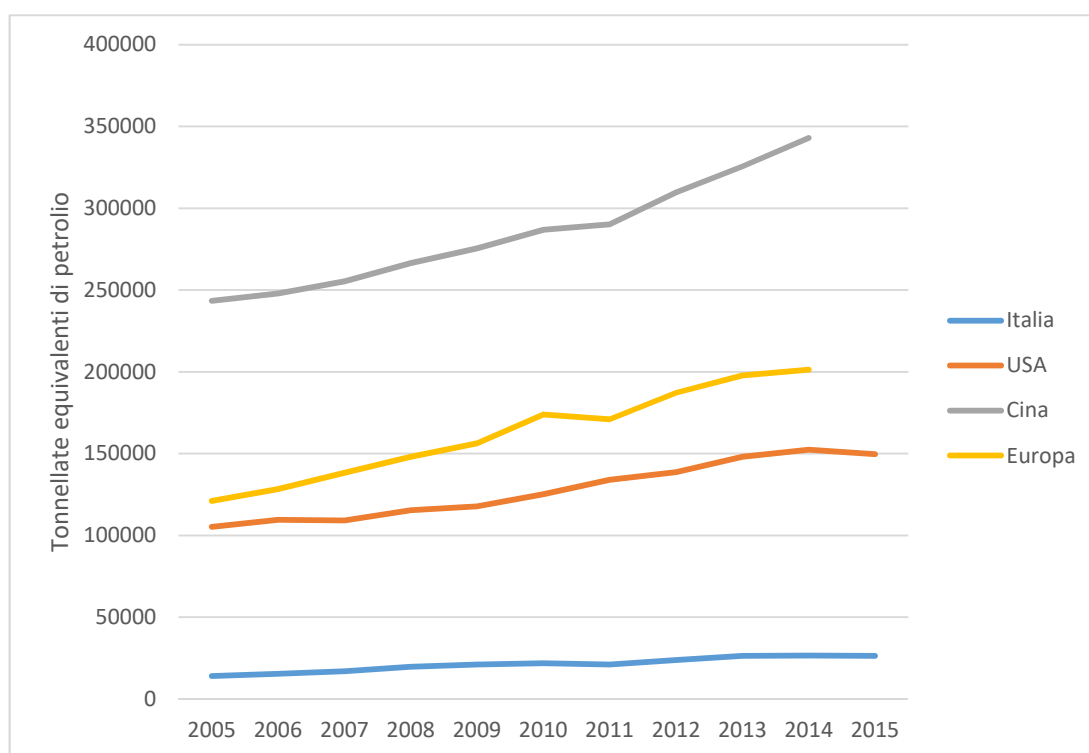


Figura 1: Produzione di energia primaria da fonti rinnovabili. [24]

Per quanto riguarda le fonti a energia rinnovabile, a servizio della rete elettrica, si spazia da quelle storiche come l'idroelettrico, il geotermico e le bioenergie¹, a quelle di uso più recente, come l'eolico e il fotovoltaico. Solo negli ultimi anni però, si è visto un vero cambiamento nel parco di produzione elettrica italiano. Se si guardano i dati, del rapporto annuale della International Energy Agency (IEA)², riportati in tabella 1, si nota come in Italia ci sia stato un vero e proprio picco tra gli anni 2010 e 2012.

¹ Le bioenergie sono considerate rinnovabili perché derivano da fonti naturali, e sono in grado di chiudere il ciclo del carbonio, sebbene in periodi lunghi. Fanno parte delle bioenergie: biomasse solide (anche rifiuti biodegradabili), biogas e bioliquidi.

² Il rapporto Statistical Review 2016 è consultabile sul sito della BP. [24]

| Anno | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 |
|----------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Megawatt | 38 | 50 | 120 | 458 | 1181 | 3502 | 12803 | 16450 | 18198 | 18622 | 18922 |

Tabella 1: Potenza installata di solare fotovoltaico in Italia. [24]

La rapida penetrazione di fotovoltaico, è dovuta alla politica di forte incentivazione legata ai conti energia (iniziati nell'anno 2006 con il Primo Conto Energia, e cessati con il Quinto conto energia nel 2013).

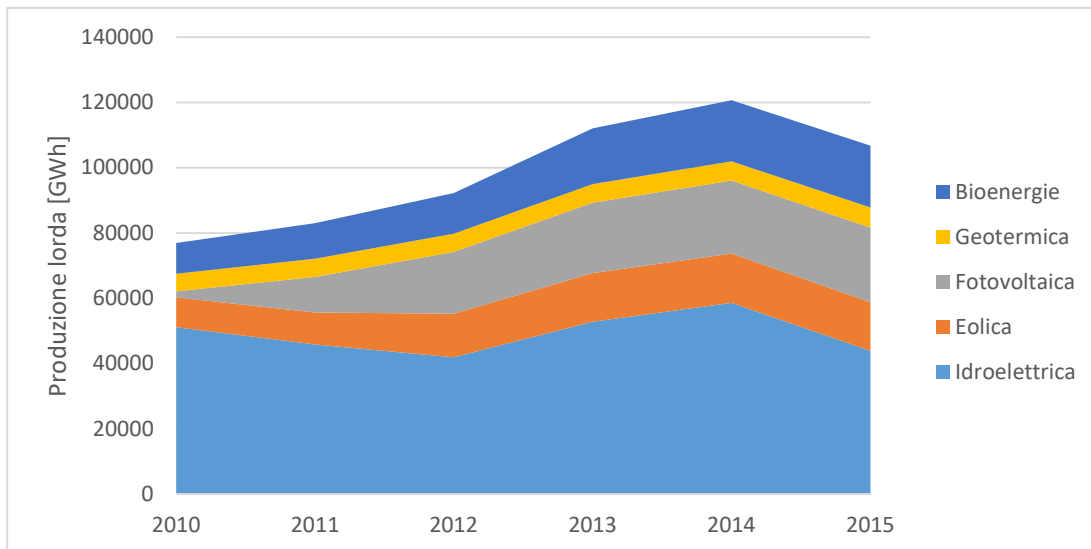


Figura 2: Produzione lorda di generazione elettrica da impianti rinnovabili in Italia. [23]

L'idea di incentivare una nuova tecnologia, nasce dal fatto che la stessa ha difficoltà ad entrare nel mercato, in quanto si trova in concorrenza con altre tecnologie più redditizie. Il fotovoltaico rientra in questa categoria. Nel 2005 nessun imprenditore o cittadino avrebbe mai pensato di installare un impianto produttivo soggetto a molte limitazioni, quali: produzione nelle uniche ore diurne, sensibilità alle condizioni metereologiche, bassi rendimenti (mediamente solo il 12% dell'energia che riceve è convertita in energia elettrica, questo per i pannelli in silicio monocristallino), e occupa molta superficie.

Inoltre, una delle caratteristiche delle fonti rinnovabili è l'aleatorietà di produzione (vengono spesso indicate con FRNP, fonti a energia rinnovabile non programmabile.) che rende difficile il bilanciamento istantaneo tra domanda ed offerta, se non ricorrendo a sistemi di accumulo o fonti convenzionali a gestione flessibile.

Ma non solo, anche il mercato elettrico ha subito profonde modifiche, si pensi che nelle ore della giornata in cui si ha la massima produzione da fotovoltaico, si evita l'accensione di centrali termoelettriche che lavorano a elevati costi.

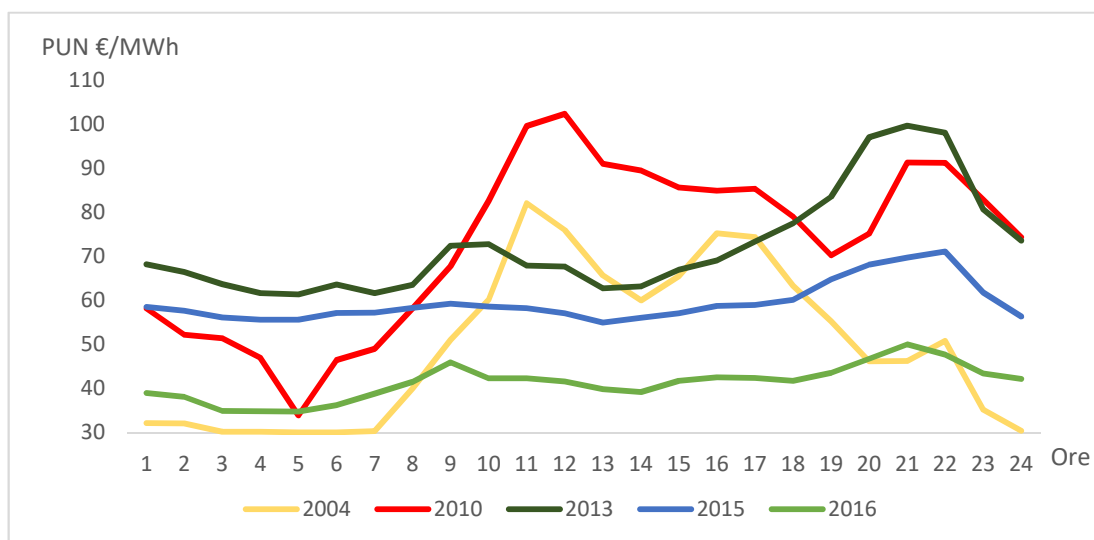


Figura 3: Valore del Prezzo Unico Nazionale rilevato nel primo Mercoledì del mese di Agosto. [22]

Si può notare nella Figura 3 come negli anni antecedenti il Primo Conto Energia, la curva del prezzo segue la curva della domanda, con un picco alle ore 12 e uno alle ore 18; corrispondenti all'intervento delle centrali termoelettriche atte a coprire il carico di punta. Negli anni successivi, le curve tendono ad appiattirsi durante il giorno, infatti alle ore 12 si ha la massima produzione fotovoltaica. Quindi si richiede a un numero inferiore di centrali di coprire il carico di punta, e il prezzo rimane pressoché lo stesso. Tuttavia si nota un aumento del prezzo nelle ore serali, quando la produzione fotovoltaica viene meno.

Logicamente una così rapida crescita delle rinnovabili ha cambiato il sistema elettrico italiano, in quanto inizialmente, è stato concepito per un flusso di potenza unidirezionale dalle grandi centrali verso i consumatori; ma con l'avvento della generazione distribuita si sono dislocati su tutto il territorio tanti piccoli produttori. Gli operatori della rete di distribuzione, dunque, si sono trovati in difficoltà perché se prima una semplice linea a sbalzo si trovava alimentata a monte, ora è possibile che un impianto fotovoltaico connesso a valle, porti a lavorare questa in isola. Creando un rischio per l'operatore che dovrà svolgere la manutenzione. Alla luce di questo per evitare isole incontrollate, si è pensato di disconnettere gli impianti eolici e fotovoltaici ogniqualvolta la frequenza non rientra tra 49.7 Hz e 50.3 Hz. Questa limitazione nel funzionamento però può comportare, nel peggiore dei casi, alla perdita della rete nazionale. Per capire meglio cosa può accadere, si può prendere come esempio una regione italiana con alta penetrazione da rinnovabili, tanto da creare il "caso della Sicilia". [1]

La Sicilia ha una scarsa magliatura della rete, una forte rigidità del parco termoelettrico e un collegamento con il continente a 380kV limitato³, che la rende sensibile alle elevate variazioni di carico. Nel caso in cui ci fosse un grave incidente di rete (improvviso fuori servizio di una centrale ad esempio), provocherebbe una variazione di frequenza tale, da far distaccare anche la generazione distribuita originando per effetto domino una perdita totale della rete. Logicamente questo è un caso estremo, ci sono condizioni particolari in Sicilia, ma a livello nazionale soprattutto nel sud Italia, si è visto che il problema della frequenza non è trascurabile.

³ Il sistema di trasmissione primario è un unico anello a 220kV; la produzione è concentrata su pochi impianti molto vecchi, alimentati a fonti convenzionali e con una limitata capacità di regolazione; si fa riferimento al collegamento prima dell'entrata in servizio del nuovo cavo Sorgente-Rizziconi.

Per i suddetti motivi, l'Autorità per l'energia elettrica e il gas ha previsto di modificare i sistemi di protezione della generazione distribuita, affinché si disconnettano quando la frequenza di rete fuoriesce dall'intervallo 47.5 Hz e 51.5 Hz.

Al fine di avere una maggiore stabilità di rete Terna ha pensato di attuare, ove necessario, una riduzione selettiva della generazione distribuita. Dunque dal 1 agosto 2012 Terna può inviare un comunicato alle imprese distributrici, per distaccare impianti eolici e fotovoltaici con potenza superiore a 100 kW. Solitamente vengono distaccati gli impianti nelle zone (nel sud Italia dove c'è una rete poco interconnessa) in cui, durante la giornata, si hanno picchi di produzione ma la domanda è scarsa. Ovviamente chi viene distaccato è comunque remunerato, e al suo posto entra in funzione una centrale termoelettrica che è in grado di aumentare l'energia regolante della rete, e mantenerla stabile.

Come ribadito, il problema principale delle FRNP è la loro aleatorietà dovuta principalmente alle condizioni meteorologiche. Si pensi, ad esempio, a un evento che coinvolga più nazioni: l'eclissi solare del 2015. Se le due nazioni principalmente coinvolte, Italia e Germania, ovvero quelle con una più alta potenza installata di fotovoltaico, non si fossero affidate alle centrali termoelettriche, si sarebbe potuta mantenere stabile la rete europea? Eventi come questo danno l'idea di quanto la rete elettrica sia rigida nei confronti della generazione distribuita.

Una soluzione ai problemi delle FRNP che, sviluppata su larga scala, permetterebbe di mantenere stabile la rete, è proprio l'accumulo di energia elettrica. Perché mantenendo in funzione gli impianti a rinnovabili anche quando la domanda è bassa; si può immagazzinare l'energia inutilizzata, e usufruirne nel momento del bisogno.

L'accumulo non è nuovo per la rete elettrica, da anni ormai si fa uso di impianti di pompaggio, ma questi non possono essere "installati" ovunque perché limitati dall'orografia del terreno. Per accumulo si intende, quindi, dei sistemi distribuiti sul territorio che siano in grado di collegare le FRNP con la rete, eliminando, o comunque diminuendo, l'aleatorietà di queste.

In questa tesi verranno presentate le caratteristiche dei sistemi di accumulo di energia cinetica, esaminando in particolare gli aspetti relativi al controllo della sospensione magnetica, creata per eliminare gli attriti meccanici che si instaurerebbero con l'uso di cuscinetti convenzionali. La crescente ascesa sul mercato di questa nuova soluzione di accumulo, risiede principalmente nella durata di vita e numero di cicli sostenibili di carica/scarica rispetto al convenzionale accumulo elettrochimico.

1 L'accumulo dell'energia elettrica

Come accennato nell'introduzione, l'accumulo di energia elettrica può essere efficacemente utilizzato per bilanciare domanda e offerta, infatti uno dei problemi principali è la fluttuazione della potenza generata dalle FRNP. Con un sistema di accumulo si rende più regolare e prevedibile il servizio. Inoltre si eviterebbero le elevate rampe di carico che si hanno in corrispondenza del tramonto, quando si ha la diminuzione della produzione fotovoltaica sommata alla domanda di illuminazione.

Esistono diverse tipologie di accumulo: meccanico (pompaggio idroelettrico, CAES⁴), elettrochimico (batterie), elettrico (supercondensatori), cinetico (volani), solo per citarne alcuni.

Solitamente, per necessità della rete elettrica si parla di accumulo statico e concentrato ovvero, dispositivi sempre connessi in un determinato punto della rete. E' doveroso accennare che, in un futuro non troppo lontano, con la necessità di avere una rete sempre più intelligente, smart grid, anche le auto elettriche possono fungere da sistemi di accumulo. Infatti, si può utilizzare il veicolo come un comune accumulatore elettrochimico e, nel momento in cui è connesso alla rete o in fase di ricarica, può rendersi disponibile per bilanciare il sistema elettrico. In questo scenario quindi si avrà una mobilità dell'accumulo.

1.1 Tipologie di accumulo

Nel mondo la tipologia più diffusa di accumulo, è quella che fin da subito si è cominciata a utilizzare: l'idroelettrico.

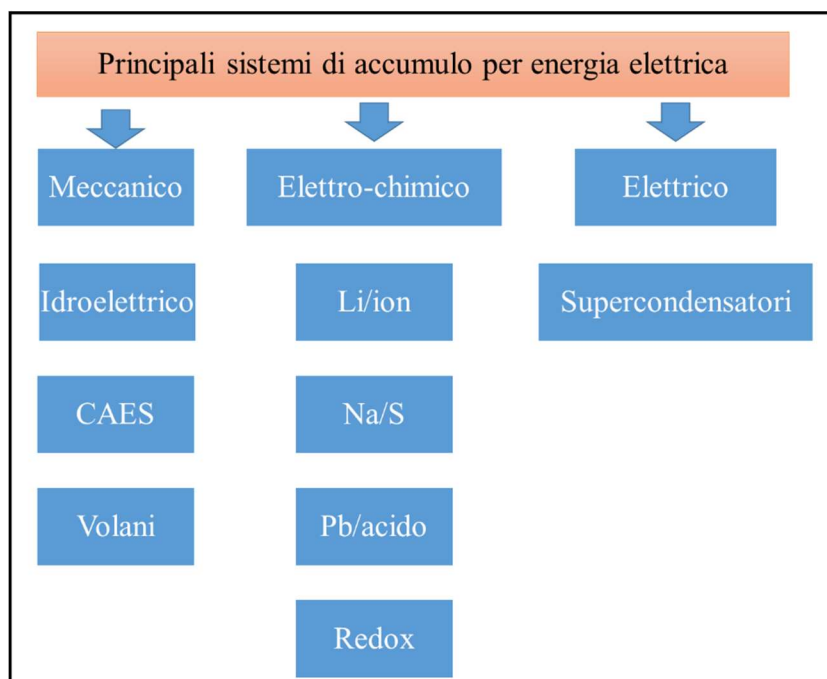


Figura 1.1: Principali sistemi di accumulo diffusi nel mondo.

Fino ad ora si è utilizzato l'idroelettrico per gestire la rete, infatti si è reso utile per la regolazione primaria e secondaria della frequenza, oltre che essere essenziale in caso black out, per la riaccensione del sistema elettrico.

⁴ CAES: Compressed Air Energy Storage.

Non a caso nel 2015 si stima che la totale potenza di accumulo degli impianti operativi nel mondo, sia di 165 GW (non tenendo in considerazione le piccole installazioni o quelle domestiche), di cui 160 solo di idroelettrico.

I tre paesi con più alta potenza installata sono: Cina, Giappone e Stati Uniti.

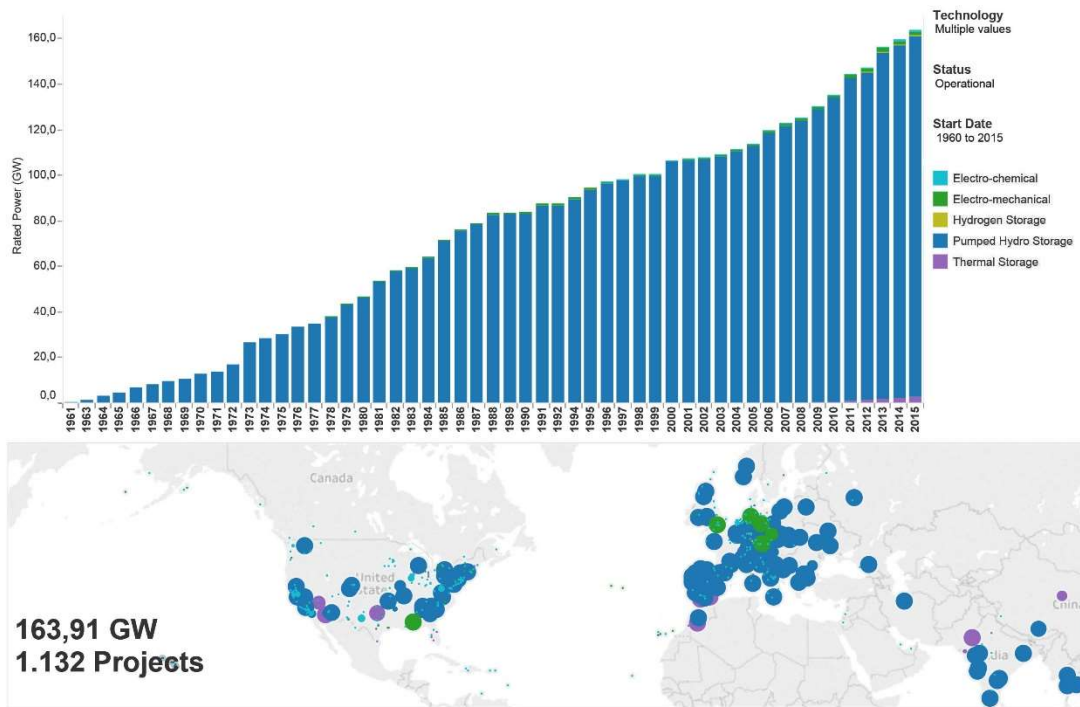


Figura 1.2: Potenza nominale installata degli impianti operativi nel mondo. [3]

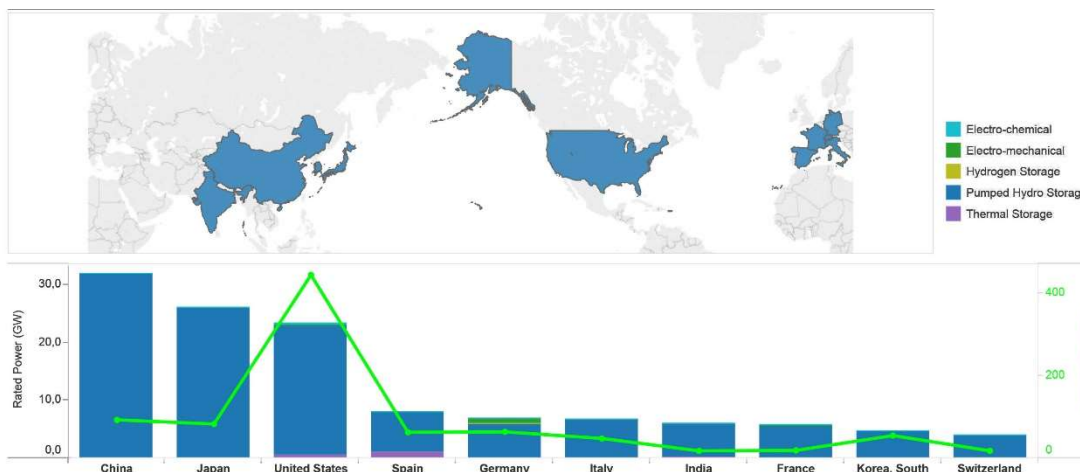


Figura 1.3: I primi 10 stati con più potenza di accumulo installata e numero di installazioni. [3]

Dalle figure 1.2 e 1.3 si può ben vedere come gli impianti di pompaggio idroelettrico siano dominanti, ma si nota anche che negli ultimi dieci anni, con la penetrazione nel mercato delle FRNP, si comincia a investire su altre tecnologie. Prima del 2010, è difficile distinguere le tecnologie non idroelettriche, mentre se si fa attenzione all'ultima colonna della figura 1.2, si possono notare più chiaramente anche altri sistemi.

La divisione che si deve fare sui sistemi di accumulo, è connessa alle prestazioni. Esistono sistemi a “prestazione in potenza” e “prestazione in energia”. Per sistemi di potenza, si intendono quelli in grado di fornire elevata potenza in un breve periodo, quindi che più si adattano alla power quality e a stabilizzare la tensione. Se invece si ha bisogno di fare una regolazione di frequenza o equilibrare la produzione con la domanda, si necessita di sistemi in grado di fornire potenza per un tempo prolungato.

Ogni tecnologia ha caratteristiche che la rendono idonea all’una o all’altra applicazione, in termini di efficacia dell’azione e durata di vita dei componenti. Una classificazione qualitativa in base al tipo di intervento è riportata in Figura 1.4.

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

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

Figura 1.4: Comparazione dei sistemi di accumulo. [4]

Uno degli interventi più importanti è il cosiddetto “time-shift” ovvero lo spostamento nel tempo di erogazione/assorbimento di energia per ottenere principalmente un beneficio economico.

Ad esempio, può risultare economicamente vantaggioso, accumulare energia quando il prezzo è basso e rivenderla quando è elevato. Oltretutto, questa operazione ottimizza gli assetti delle centrali termoelettriche; infatti nelle ore notturne, quando la domanda è bassa (e anche i prezzi sono bassi) si evita di limitarle, o addirittura spegnerle. Un altro vantaggio è il cosiddetto peak shaving, ovvero si è in grado di spianare i picchi di domanda con l’energia accumulata, evitando di chiamare in servizio i costosi impianti atti a fornire la produzione di punta.

Dal punto di vista della domanda di energia, con l’accumulo, si è in grado di rendere più regolare e prevedibile la richiesta di energia. Infatti un qualsiasi consumatore con un impianto di accumulo può far sì che la propria domanda di energia sia senza picchi.

1.2 Impianti idroelettrici di pompaggio

Tali impianti sono i più diffusi su scala mondiale e per questo rivestono un ruolo chiave per il sistema elettrico.

In particolare, si prestano bene all'erogazione di energia elettrica durante la giornata, con rapidi tempi di risposta (decine di secondi), sono due caratteristiche fondamentali richieste per regolare la frequenza, e coprire le punte di carico giornaliero.

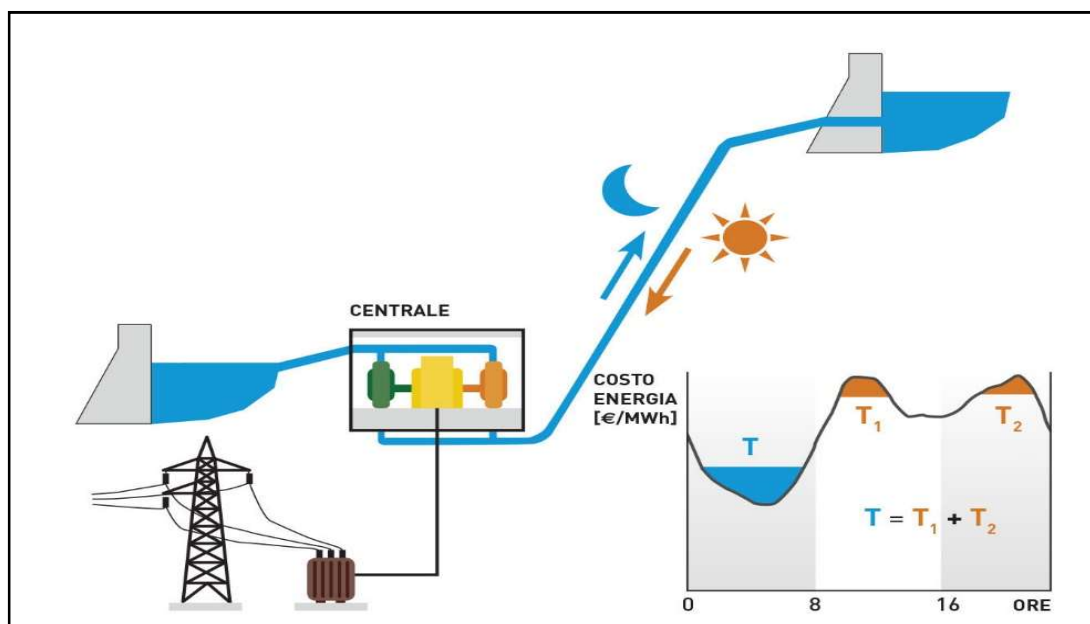


Figura 1.5: Schema tipico impianto di pompaggio.

Esistono diverse tipologie di impianti, a seconda della connessione tra il generatore/motore e la turbina/pompa. Le principali connessioni formano i gruppi binari e ternari.

Il gruppo ternario, presenta tre macchine coassiali: il generatore/motore, la turbina e la pompa. Questo sistema permette di utilizzare una turbina Francis o Pelton, a seconda del dislivello che si presenta tra l'impianto e il bacino. Si può avere sia una configurazione ad asse verticale che ad asse orizzontale. Con questo schema si ha una progettazione ben definita per ogni macchina, e una rapida transizione di funzionamento. È inoltre possibile usare il cortocircuito idraulico, che permette di far funzionare la turbina accoppiata alla pompa, nel momento in cui il surplus di potenza dalla rete non è sufficiente. Nel caso non ci fosse la possibilità di avere il corto circuito idraulico, è necessario svuotare la camera della turbina (solitamente pompando aria) per evitare che la turbina crei attrito girando a vuoto immersa in acqua.

Per quanto riguarda i sistemi binari, si utilizzano due macchine coassiali: generatore/motore e turbina Francis. In questo caso se si hanno elevati salti, si possono utilizzare più stadi; e si ha maggiore controllo nel passaggio di funzionamento. Lo spazio richiesto per un sistema binario è minore, ed ha anche un numero minore di valvole e tubazioni, dato che lavora con solo una macchina idraulica.

Un'ulteriore classificazione, va fatta sulla gestione della velocità, infatti si può gestire un impianto a velocità fissa o variabile. Il funzionamento a velocità fissa è ormai una tecnologia consolidata, necessita però, di un "soft-starter" durante la fase di avviamento del pompaggio, perché la pompa è immersa e non si può alimentare il motore sincrono direttamente alla tensione di rete. Dunque si porta ai giri nominali la pompa, poi si esclude il "soft-starter", e si collega direttamente alla rete il motore. Con questa tecnologia però, non si è in grado di seguire perfettamente la curva di carico.

Tornano utili i gruppi a velocità variabile perché permettono di modulare più facilmente la potenza erogata agendo sul controllo delle grandezze elettriche, ottenendo così una risposta più rapida alle variazioni di carico.

Ovviamente per questa tecnologia c'è abbondante uso di elettronica di potenza, infatti è richiesto l'uso di convertitori elettronici di potenza in grado di variare sia la tensione che la frequenza ai morsetti della macchina.

1.3 Impianti ad aria compressa CAES

Si tratta di impianti poco diffusi a causa delle difficoltà di stoccaggio dell'aria compressa, che richiede ampi volumi e sistemi di contenimento con caratteristiche meccaniche e fisiche adeguate. La tecnologia CAES prevede di immagazzinare aria ad elevata pressione, in serbatoi geologici, come ad esempio caverne o falde. Sono in grado di rilasciare energia per alcune ore con potenze pari ai comuni impianti termoelettrici $100 \div 1000$ MW.

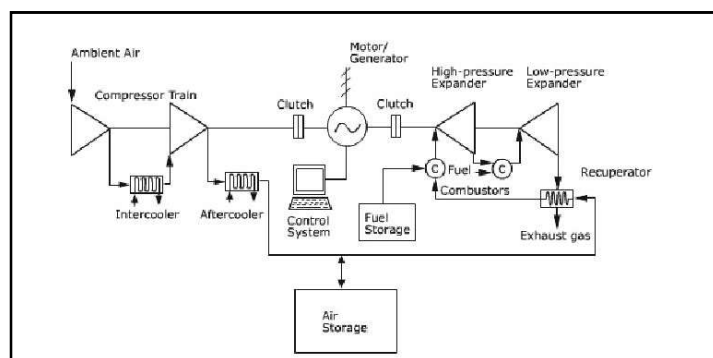


Figura 1.6: Schema impianto CAES con recupero di calore.

Il funzionamento è semplice, nel momento in cui nella rete si ha un surplus di energia, si azionano dei turbocompressori che immettono aria in caverna; l'aria rimane nel serbatoio finché non si ha necessità di utilizzo. Quando in rete è richiesta energia l'aria viene prelevata e mandata in una speciale turbina. La turbina non è convenzionale perché l'aria che arriva è già in pressione, quindi si ha bisogno di una macchina con il solo espansore. L'aria dopo essere passata dalla camera di combustione, e nell'espansore, viene rilasciata nell'ambiente sotto forma di comuni fumi di scarico. Esistono cicli anche più efficienti, come quello rappresentato in figura 1.6, che presenta un recuperatore di calore sui fumi in uscita. Oppure cicli combinati, cioè un ciclo convenzionale abbinato a un generatore di vapore figura 1.7.

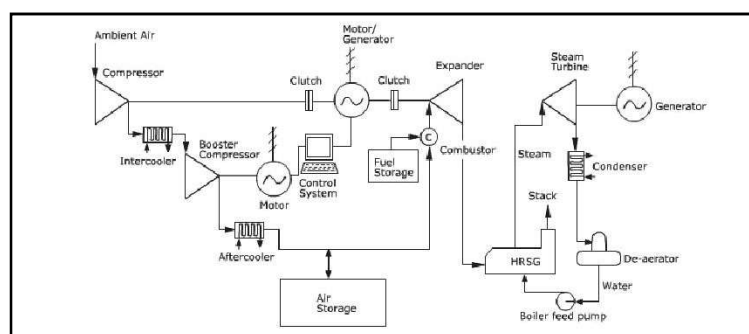


Figura 1.7: Schema impianto CAES abbinato a un ciclo a vapore.

Questo ciclo risulta avere una alta inerzia termodinamica, infatti per avere in funzione tutto l'impianto, bisogna che il ciclo CAES funzioni per almeno un'ora.

Il ciclo adiabatico invece, prevede di recuperare il calore sottratto nella fase di compressione, accumulandolo sotto forma di calore latente, con olii termici o sali, e restituirlo per preriscaldare l'aria in ingresso alla turbina.

Per incrementare la potenza generata dalla turbina, a parità d'aria di un ciclo convenzionale, si può utilizzare un ciclo ad aria umida; così il vapore generato dai fumi viene immesso in turbina. L'acqua che si utilizza nel generatore di vapore, ovviamente deve essere pretrattata e demineralizzata. Per evitare di trattare l'acqua, si può far uso di un ciclo ad aria umida, che attraverso un saturatore, permette il recupero dell'acqua.

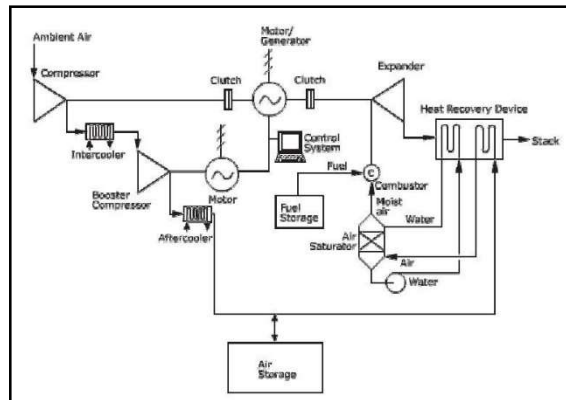


Figura 1.8: Schema impianto CAES ad aria umida.

La combinazione però, che negli ultimi anni ha destato più interesse, è l'utilizzo di un ciclo CAES abbinato a una turbina a gas.

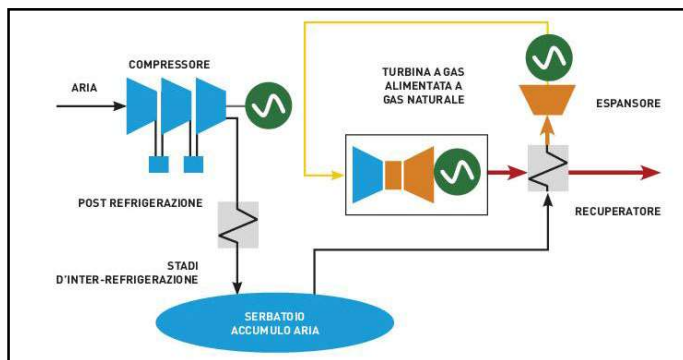


Figura 1.9: Ciclo di seconda generazione CAES abbinato a turbina a gas.

L'utilizzo di due gruppi separati per la compressione e l'espansione, garantisce di utilizzare una turbina a gas convenzionale; quindi il vero vantaggio di questa configurazione è di poter abbinare un gruppo CAES a una centrale già esistente. Quindi l'aria in uscita dal serbatoio viene preriscaldata dai fumi di scarico della turbina a gas, successivamente si espande in un espansore (senza l'utilizzo di combustibile), e infine entra nella camera di combustione della turbina.

Questi impianti tuttavia, sono molto limitati dalla presenza dell'elemento principale che li caratterizza: un serbatoio naturale.

Tipicamente si scelgono caverne saline, miniere abbandonate, formazioni porose (giacimenti esausti di petrolio o gas); più recentemente per impianti di piccola taglia, vengono utilizzati serbatoi metallici o serbatoi gonfiabili sottomarini. Logicamente la caverna deve essere impermeabile all'aria, dunque non tutte le caverne possono risultare adeguate.

I due principali impianti esistenti sono: Huntorf, nei pressi di Brema, 290 MW e McIntosh, Alabama, 110MW; ci sono attualmente altri progetti in corso. L'Italia potrebbe avere un particolare interesse per questa tecnologia, in quanto il 50% dell'energia elettrica viene prodotta da gas naturale, è possibile utilizzare lo stesso gas naturale in un impianto CAES ottenendo efficienze analoghe a quelle dei cicli combinati.

1.4 Impianti a batteria

Gli accumulatori elettrochimici, o più comunemente conosciuti come batterie, sono ad oggi il sistema di accumulo di cui quotidianamente facciamo più uso, si trovano nei cellulari, nei computer portatili o negli UPS.

Il principio di funzionamento si basa sull'ossidazione, un elettrodo positivo (catodo) subisce un processo di riduzione acquistando elettroni; mentre l'elettrodo negativo (anodo), si ossida e cede elettroni. Questo processo è reso possibile dall'elettrolita in cui sono immersi catodo e anodo, permettendo la conduzione ionica. Per dividere gli elettrodi ed evitare il loro contatto, viene inserito un separatore che permette la sola conduzione ionica. Esistono diverse tipologie di batterie che si differenziano per i materiali che partecipano alla reazione, tuttavia seguono tutte lo stesso principio.

Gli accumulatori al piombo sono i più diffusi e con una maturità tecnologica più alta, si trovano negli UPS, come alimentazione di emergenza nelle centrali di produzione o sottostazioni elettriche, nelle telecomunicazioni, nel settore automobilistico, ferroviario, aereo e navale. Gli elettrodi sono realizzati in piombo e immersi in una soluzione di acido solforico e acqua distillata (Figura 1.10). Si trovano sul mercato a basso costo, ma hanno una durata di vita limitata, infatti si resistono per $200 \div 700$ cicli di carica/scarica e possono risultare pericolose per la formazione di idrogeno dovuto all'idrolisi dell'acqua.

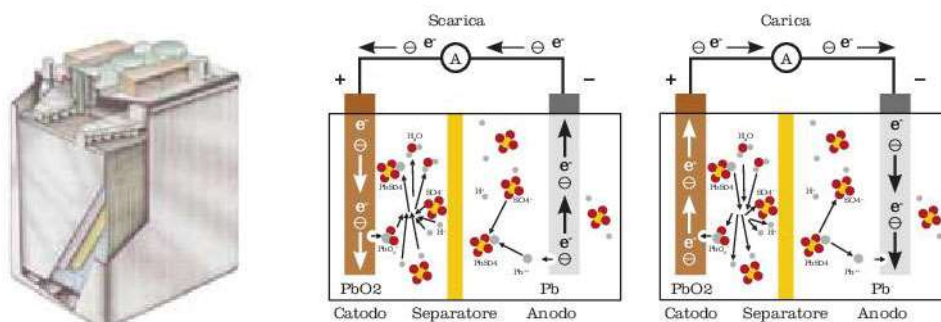


Figura 1.10: Batteria al piombo.

Esistono anche batterie che lavorano ad elevate temperature, ad esempio la tecnologia Na/S (sodio/zolfo) che opera con una temperatura interna di 300°C, inevitabile per portare gli elettrodi allo stato fuso e migliorare la conducibilità. A causa di ciò, è necessario un controllo della temperatura sia in fase di carica che di scarica, rendendole disponibili sul mercato non come celle singole, ma come sistemi completi comprensivi di gestione della carica e della temperatura. Uno dei vantaggi di questi accumulatori, è sicuramente l'elevata energia specifica $150 \div 200$ Wh/kg, ottenuta con materiali largamente disponibili in natura. La cella è di forma

cilindrica allungata, racchiusa in un recipiente ermetico, per l'elevata infiammabilità del sodio se a contatto con l'acqua (Figura 1.11).

Questa tecnologia è largamente utilizzata per applicazioni di elevata potenza (30 ÷ 50 MW) a supporto della rete, ad esempio per ridurre i picchi di potenza.

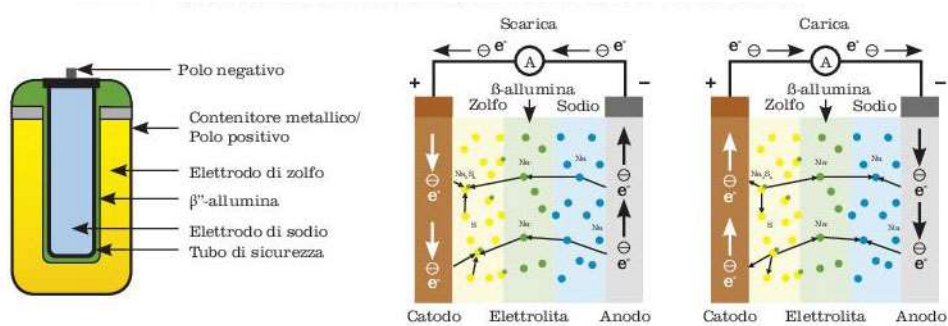


Figura 1.11: Batteria a sodio/zolfo.

Le batterie agli ioni di litio sono attualmente le più promettenti, perché hanno ottime prestazioni di energia e potenza specifica, inoltre hanno una vita utile abbastanza lunga. Non a caso sono le più utilizzate per piccole applicazioni quali elettronica, cellulari, elettrodomestici. Il loro punto di forza è sicuramente il peso, il litio è un metallo con basso peso atomico, infatti se ne fa largo uso nella trazione elettrica. L'elettrodo negativo è costituito da litio mentre quello positivo da ossido di litio e cobalto, immersi in un elettrolita di liquido organico (Figura 1.12). Il difetto maggiore è legato alla gestione dei sovraccarichi termici ed elettrici, in quanto possono portare alla rottura delle celle, quindi è necessario sempre un controllo della carica e della scarica.

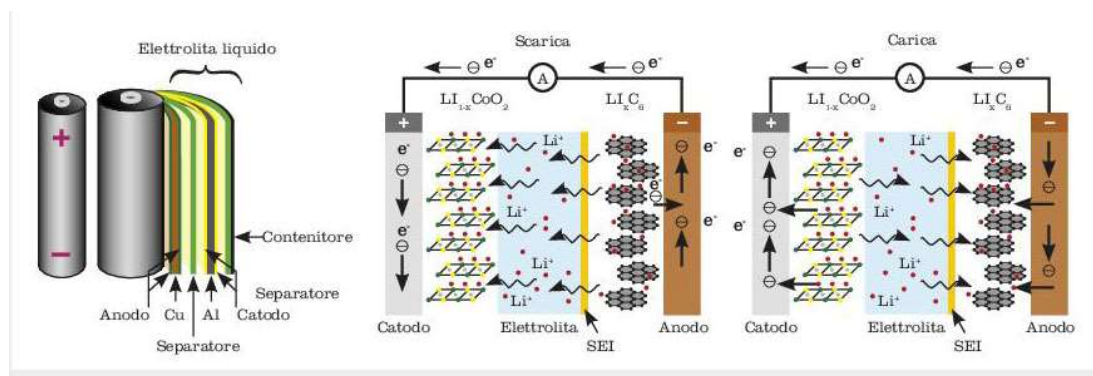


Figura 1.12: Batteria a litio/ioni

1.5 Riepilogo delle caratteristiche

Come già accennato ogni sistema di accumulo, ha delle caratteristiche che sono peculiari per un dato utilizzo, la sottostante tabella fornisce alcuni dati per valutare meglio i sistemi. Caratteristica da non sottovalutare è sicuramente il costo, infatti per poter entrare nel mercato, una tecnologia deve essere competitiva anche economicamente.

| Sistemi | Potenza | Energia | Potenza | Durata nel | Cicli di | Tempo di | Costo | |
|-------------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|-----------------|-----------|----------------|
| | | specificata | specificata | | | | tempo | carica/scarica |
| | | [Wh/kg] | [W/kg] | [Anni] | [n] | | | |
| Idro | 100-5000 MW | 0,5-1,5 | | 40-60 | | 1-24+ h | 600-2000 | 5-100 |
| CAES | 5-300 MW | 30-60 | | 20-40 | | 1-24+ h | 400-800 | 2-50 |
| Piombo | 0-20 MW | 30-50 | 75-300 | 5-15 | 500-1000 | sec - h | 300-600 | 200-400 |
| Na/S | 50 kW-8 MW | 150-240 | 150-230 | 10-15 | 2500 | sec - h | 1000-3000 | 300-500 |
| Litio/ioni | 0-100 kW | 75-200 | 150-315 | 5-15 | 1000-10000 | min - h | 1200-4000 | 600-2500 |
| Supercondensatori | 0-300 kW | 2,5-15 | 500-5000 | + 20 | + 100000 | millisec-1h | 100-300 | 300-2000 |
| Volani | 0-250 kW | 10-30 | 400-1500 | ~15 | + 20000 | millisec-15 min | 250-350 | 1000-5000 |

Tabella 1.1: Sistemi di accumulo a confronto, riepilogo delle caratteristiche.

Dalla tabella 1.1 si può constatare che, le batterie risultano come la tecnologia che ha l'energia specifica più elevata, e si possono utilizzare sia per la regolazione della frequenza (tempo di scarica di ore), che per l'accumulo di rinnovabili così da rendere più prevedibile il profilo di potenza.

Gli impianti idroelettrici a bacino e ad aria compressa, sono impianti che difficilmente si trovano di piccola taglia, anche per i costi di investimento che si devono fare. Il loro utilizzo è uguale a quello delle batterie, con la differenza che il tempo di scarica è molto maggiore.

Gli impianti di più piccola taglia, come per i supercondensatori o i volani, hanno la peculiarità di fornire elevata potenza in un breve periodo. Questa caratteristica non è da sottovalutare, perché risulta essenziale per la qualità del servizio di fornitura dell'energia. Un altro punto a loro favore, sono sicuramente i cicli di funzionamento, ci sono applicazioni che richiedono molti cicli giornalieri di carica/scarica, e le batterie si deperirebbero velocemente. Attualmente, le uniche batterie che resistono per un buon numero di cicli sono le litio/ioni, anche se ancora hanno un elevato costo sul mercato.

I volani rappresentano una soluzione molto promettente per la lunga durata di vita ed il numero di cicli, anche molto intensi, a cui possono essere sottoposti senza subire un degrado significativo. Anche la possibilità di riciclaggio dei materiali li rende più eco-compatibili rispetto a molti tipi di batteria.

2 Accumulo cinetico di energia elettrica: i volani

L'accumulo di energia attraverso dispositivi inerziali, è stata una delle primissime forme di accumulo dell'antichità. Infatti si hanno testimonianze dei primi volani all'incirca nel 2000 a.C., utilizzati per modellare i vasi di terracotta. Si trattava di semplici ruote in pietra, impernierate al centro e supportate da una tavola con un foro al centro, una volta messe in rotazione il vasaio modellava il vaso in modo da ottenere uno stampo simmetrico.

Successivamente se ne è fatto uso per i mulini ad acqua, nei telai per tessere, nei torni, e con l'avvento della Rivoluzione Industriale se ne è fatto largo uso nelle macchine a vapore. Ancora oggi si utilizzano nei motori termici per rendere più uniforme la velocità angolare.

Il problema che si è posto nell'uso di questi dispositivi è senza dubbio la difficoltà di avere un sistema di sospensione adeguato, in modo che mantenga il più a lungo possibile l'energia accumulata. Negli anni recenti si sono studiate soluzioni apposite che rendono possibile la sospensione del volano, limitando fenomeni di attrito sulla superficie di appoggio dei cuscinetti.

Inizialmente infatti si utilizzavano cuscinetti a sfera o ad olio, oggi una soluzione tecnologica, con una manutenzione meno onerosa, consiste nell'adottare dei cuscinetti che mantengono il volano in completa sospensione.

In questa tesi vengono presi in considerazione solo i sistemi ad accumulo cinetico al servizio della rete elettrica.

2.1 Principio di funzionamento

I sistemi a volano si basano sull'accumulo di energia meccanica attraverso la messa in rotazione di una massa da parte di un motore, successivamente, nel momento in cui si necessita di energia, la stessa viene convertita in energia elettrica con l'ausilio di un generatore.

Nelle configurazioni più comuni il volano si presenta come un disco in cui, su una estremità dell'asse di rotazione, è presente il rotore di una macchina elettrica che viene fatta lavorare, a seconda del caso, come generatore o come motore. Talvolta le due macchine sono separate.

L'energia immagazzinabile è proporzionale al momento d'inerzia I , e alla velocità angolare ω che è in grado di raggiungere, come definito dalla relazione 2.1.

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

Il momento d'inerzia I , dipende dalla massa e dal raggio del disco secondo la relazione 2.2.

$$I = \int r^2 dm \quad (2.2)$$

La scelta della velocità dunque, influenza l'energia accumulabile e la scelta dei cuscinetti che dovranno sorreggere il volano. Nelle applicazioni elettriche si lavora a velocità elevate (5000÷20000 rpm si può arrivare anche a 100000 rpm), logicamente il materiale di cui è

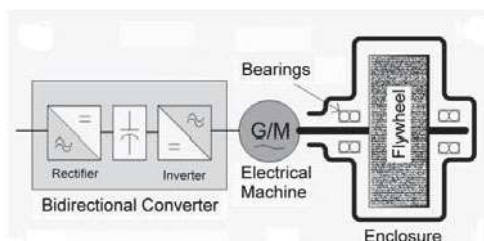


Figura 2.1: Schema di principio di un sistema ad accumulo a volano.

composta la massa deve poter sostenere una certa tensione interna, che si può definire resistenza alla trazione σ . Per applicazioni a bassa velocità, cioè quelle che lavorano intorno ai 10000 rpm, si utilizzano dischi in acciaio, mentre per più alte velocità, si usa fibra di carbonio (è cinque volte più resistente dell'acciaio) cioè materiali compositi che garantiscono una bassa densità e una elevata resistenza alla trazione, eccellenti dunque per immagazzinare energia.

Come già accennato lo scopo di queste macchine non è fornire potenza per lunghi periodi, in genere da alcuni secondi a qualche minuto (Figura 2.2).

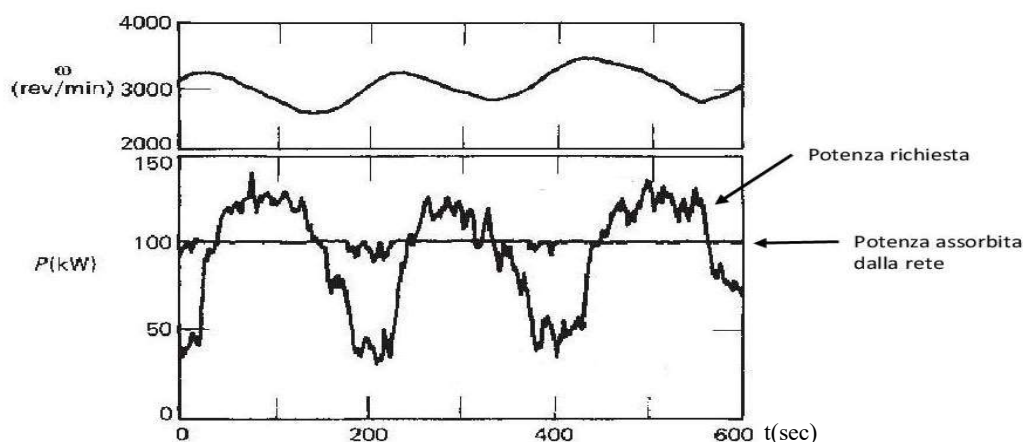


Figura 2.2: Andamento della potenza richiesta da un carico, e la potenza realmente assorbita dalla rete, resa stabile dall'intervento del volano.

Si può notare, come il volano sia in grado di appiattire la potenza assorbita dalla rete, e quindi ridurre i disturbi in rete.

2.2 Geometria e composizione

La scelta della velocità come si è visto, vincola la scelta dei materiali con cui si può costruire la massa, vengono ora definiti alcuni parametri da prendere in considerazione per la scelta della composizione e la forma che deve avere la massa.

La massima densità di energia rispetto al volume e alla massa è definita dalle relazioni:

$$e_v = K\sigma \quad (2.3)$$

$$e_m = K \frac{\sigma}{\rho} \quad (2.4)$$

Dove e_v e e_m sono rispettivamente l'energia cinetica per unità di volume e di massa, K il fattore di forma, σ la tensione specifica del materiale e ρ la densità di massa.

Il parametro che definisce l'influenza di una certa forma sulla densità di energia, è definito fattore di velocità:

$$\xi = \frac{\omega}{\omega_a} \quad (2.5)$$

In cui ω è la velocità angolare del disco, mentre per ω_a si intende la velocità angolare di un semplice disco piatto, che ha lo stesso diametro esterno e uguale densità.



Figura 2.3: Volano in fibra di carbonio.

Un riepilogo di queste costanti si trova in Figura 2.4, la configurazione migliore la si ha con $K=1$ e $\xi = \infty$, detto anche disco di Laval e caratterizzato da una distribuzione uniforme dello stress lungo tutta la sezione.

I materiali da tenere in considerazione, come suddetto, sono quelli compositi, studiati per presentare la massima resistenza meccanica nella direzione di maggior sollecitazione.

Tuttavia la loro bassa resistenza nella direzione perpendicolare alle fibre, fa in modo che non si riescano ad ottenere degli elevati fattori di forma. Tra i materiali compositi più indicati si trovano: fibra di vetro, fibra di carbonio, fibra di aramide conosciuta anche con il nome Kevlar.

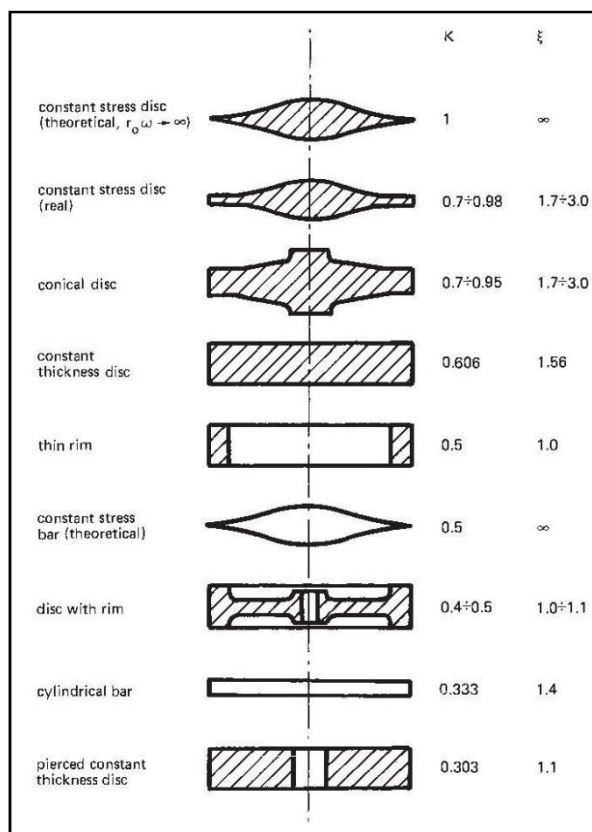


Figura 2.4: Principali forme adottate per i volani, con relativi fattori di forma e velocità. [12]



Figura 2.5: Volano in acciaio.

Esistono particolari tipologie di acciai ad elevata resistenza come: AISI 4340, 18Ni-250, hp 9-4-20 e hp 9-4-30. Questi acciai presentano una minore resistenza alla trazione, ma questo può essere compensato da un elevato fattore di forma che si riesce ad ottenere.

La scelta del materiale composito, solitamente non viene ostacolata da questioni tecniche, ma semplicemente da questioni strettamente economiche, l'elevato costo infatti fa preferire altri materiali come gli acciai.

Esistono particolari tipologie di acciai ad elevata resistenza come: AISI 4340, 18Ni-

| | Densità | Tensione specifica | Costo |
|-------------------|----------------------|----------------------|---------|
| Materiale | [kg/m ³] | [MN/m ²] | [\$/kg] |
| Acciaio AISI 340 | 7830 | 1790 | 1 |
| Fibra di vetro | 2000 | 1470 | 25 |
| Fibra di carbonio | 1520 | 1950 | 100 |
| Kevlar | 1400 | 2700 | 110 |

Tabella 2: Riepilogo caratteristiche dei materiali.

2.3 Motori/generatori

La macchina elettrica collegata sull'asse del volano svolge un ruolo chiave, infatti durante il funzionamento da generatore, l'energia meccanica accumulata viene convertita in elettrica; viceversa se sta lavorando come motore. Durante la fase di generazione la velocità del volano diminuisce, mentre quando lavora da motore, accumula più energia e la velocità aumenta come definito dalla relazione 2.1.

A seconda del tipo di applicazione, per la quale viene creato il volano, si definisce che macchina elettrica è più appropriata. La scelta cade su tre principali macchine: asincrono, sincrone a magneti permanenti e a riluttanza.

Per potenze elevate l'asincrono risulta la macchina più appropriata. Ha una costruzione semplice, gestisce elevate coppie all'asse ed è economico. Il principale svantaggio consiste nelle alte perdite rotoriche con relativa produzione di calore, che richiede di installare la macchina esternamente all'involucro di contenimento. Come si vedrà in seguito, la camera di contenimento è sottovuoto e rende impossibile dissipare il calore per convezione. In queste condizioni infatti il calore può trasmettersi solo per irraggiamento, e non è abbastanza per mantenere ad una bassa temperatura il rotore. Solitamente per grandi potenze si utilizza una configurazione "doubly fed" in modo da ridurre la taglia dell'elettronica di potenza di alimentazione.

Per applicazioni a più basse potenze, la macchina sincrona a magneti permanenti è la più indicata. L'elevato rendimento e la possibilità di lavorare ad alte velocità la rendono essenziale per questo tipo di applicazioni, inoltre avendo il rotore costituito da magneti permanenti si elimina il problema del raffreddamento, potendola così inserire all'interno della camera a vuoto. Tuttavia se dovesse aumentare accidentalmente la temperatura sul rotore, oltre il limite consentito dai magneti, bisogna tenere in considerazione la possibile smagnetizzazione di questi. Un'ultima considerazione è il costo, i magneti hanno elevati prezzi a causa dei materiali di cui sono costituiti.

Per quanto riguarda le macchine a riluttanza, sono sicuramente molto convenienti, perché lavorano con un ampio range di velocità, hanno rendimenti molto elevati e non presentano avvolgimenti o magneti sul rotore. Queste macchine dunque, possono essere installate all'interno della camera a vuoto; tuttavia hanno un ingombro più elevato rispetto a un sincrone con magneti permanenti di pari taglia.

| | Asincrono | Sincrono a magneti permanenti | Sincrono a riluttanza |
|---------------------------|------------------|--------------------------------------|------------------------------|
| Potenze | alte | medio basse | medio basse |
| Perdite di rotore | rame ferro | nessuna | nessuna |
| Rendimento | alto 93% | molto alto 95% | alto 93% |
| Tensione meccanica | media | bassa | media |
| Ripple di coppia | medio 7,3% | medio 10% | alto 24% |
| Smagnetizzazione | no | si | no |
| Costo | basso | alto | basso |

Tabella 2.1: Riepilogo principali macchine elettriche per applicazioni a volano.

2.4 Elettronica di potenza

La macchina elettrica è collegata alla rete attraverso un convertitore bidirezionale di potenza, come in figura 2.1. Il doppio stadio di conversione è necessario se si vuole alimentare l'azionamento con frequenze diverse da quelle di rete, si necessita quindi di una conversione che risponda rapidamente alle variazioni di frequenza e tensione da applicare alla macchina. Inoltre, la conversione deve sostenere dei picchi di potenza, c'è quindi bisogno di dimensionare il convertitore in modo più oneroso rispetto ad un normale convertitore per accumulo elettrochimico.

I componenti utilizzati sono SCR, GTO o IGBT, a seconda della corrente che devono sopportare e alla frequenza di lavoro a cui sono sottoposti. Solitamente la conversione da DC in AC avviene in PWM⁵ ad elevata frequenza, in modo di ridurre i ripple di corrente.

Il contenuto armonico è basso se si lavora ad elevate frequenze di switching, vengono comunque inseriti dei filtri per rendere più sinusoidale la forma d'onda.

Se il volano ha una sospensione elettromagnetica, bisogna tenere in considerazione che ci sarà un ulteriore sistema di conversione tipo DC/DC a bassa tensione, che può essere collegato al DC Bus, che eroga la corrente necessaria agli elettromagneti per stabilizzare la posizione del disco.

2.5 Rendimento

Se si ha bisogno di realizzare un'applicazione che necessita di poca energia da accumulare, non è necessario avere una macchina complicata e costosa, la velocità angolare è bassa, il disco di geometria semplice e quindi non risente dell'attrito con l'aria; risulta inutile farlo lavorare sottovuoto o dimensionare un sistema di sospensione magnetica. Quando invece si ha bisogno di sviluppare un'elevata densità di potenza, il rendimento del sistema è molto importante, perché influenzato dall'elevata velocità di rotazione, che provoca attrito con l'aria e con i cuscinetti di sostegno. La soluzione migliore è chiudere il volano in una camera priva d'aria (si ottengono buoni risultati anche con una miscela d'aria e elio a bassa pressione), e sostituire i cuscinetti meccanici con magneti.

Il rendimento dell'intero sistema disco, macchina elettrica e convertitore è di per sé molto elevato, ma dipende dal tempo per il quale viene mantenuta immagazzinata l'energia.

Si può affermare che nei brevi periodi di intervento, il rendimento è vicino al 99%, e diminuisce con l'aumentare del tempo di accumulo.

2.6 Cuscinetti

I cuscinetti sono una parte importante del sistema, devono essere in grado di sostenere il peso della massa rotante e rendere minime le perdite per attrito anche a velocità elevate. Le soluzioni tecniche sono due e dipendono dalla velocità di rotazione. Per velocità inferiori a 20000 rpm è più idoneo ed economico utilizzare i cuscinetti meccanici, mentre se si lavora sopra i 40000 rpm i cuscinetti magnetici sono l'unica soluzione.

Il cuscinetto meccanico è una soluzione a basso costo, ma produce attrito e deve essere costantemente lubrificato.

Per quanto riguarda i cuscinetti magnetici (se ne parlerà più approfonditamente nel capitolo 4), non richiedono lubrificanti e non sono in contatto con la massa rotante, ciò vuol dire eliminare attriti e usura. Si possono avere configurazioni con soli elettromagneti, oppure soluzioni ibride cioè magneti permanenti affiancati a degli elettromagneti. In entrambi i casi si ha bisogno di un sistema di controllo per mantenere stabile la massa rotante.

⁵ Pulse-Width Modulation: modulazione a larghezza d'impulso.

| Cuscinetti | Perdite approssimate | Velocità | Costo | Lubrificazione |
|------------|----------------------|------------|---------|----------------|
| Meccanici | 5-200 W | <20000 rpm | basso | Sì |
| Magnetici | 10-100 W | >40000 rpm | elevato | no |

Tabella 2.2: Riepilogo delle principali caratteristiche dei cuscinetti

Bisogna tenere in considerazione che, sebbene i cuscinetti magnetici eliminano le perdite per attrito, danno tuttavia maggiori gradi di libertà al volano. Per mantenerlo stabile, bisogna quindi iniettare correnti negli elettromagneti, e questo produce inevitabilmente perdite per effetto Joule. La configurazione ibrida, ha il pregio di mantenere in sospensione la massa rotante senza l'utilizzo degli elettromagneti, questi servono solo per stabilizzare la macchina durante i transitori.

2.7 Involucro di contenimento

La camera di contenimento, deve assolvere a due principali funzioni. Il primo è mantenere la massa rotante in un ambiente privo d'aria, il secondo è la sicurezza. Se per un qualsiasi motivo si perde il riferimento di velocità, e la massa raggiunge velocità critiche; è possibile che la forza esercitata sul materiale superi la tensione massima ammissibile. Questo può comportare la deflagrazione del volano in due o più parti, se si utilizza un disco in acciaio. Mentre se si utilizzano materiali compositi, si disintegra gradualmente. Risulta essenziale dunque, un recipiente che possa contenere i pezzi del disco, che urtano ad alta velocità sulla sua superficie interna. Ecco che per grandi applicazioni, è più sicuro far lavorare il volano sotto il livello del terreno, all'interno di una fondazione di cemento che contiene una singola macchina, in modo che un problema del singolo elemento non si propaghi alle altre unità.



Figura 2.5: Camera di contenimento inserita nella fondazione di cemento

2.8 Considerazioni economiche

Questi sistemi di accumulo sono sicuramente costosi, anche a causa della scarsa diffusione. Lo sfruttamento ottimale si ottiene prevalentemente per funzioni di power quality piuttosto che di time-shifting. Soprattutto per impianti eolici e fotovoltaici caratterizzati da intermittenza della potenza prodotta (raffiche di vento, ombreggiamento dei pannelli, eccetera) possono essere attenuate le brusche variazioni di potenza e con esse le possibili penalty di carattere economico.

Per queste applicazioni, non è economicamente conveniente installare un accumulatore elettrochimico, i numerosi cicli di carica/scarica nell'arco di una giornata, ne ridurrebbero notevolmente la vita utile. Oltretutto la velocità di carica e scarica è uguale, a differenza di alcuni accumulatori che devono seguire precisi andamenti, e i cicli di vita non dipendono dal carico di lavoro questo comporta un incremento di vita utile.

3 Applicazioni

Le possibili applicazioni spaziano dai sistemi di alimentazione in emergenza, come per gli UPS, alla compensazione delle oscillazioni di potenza derivanti da impianti a energia rinnovabile o nei satelliti in orbita terrestre.

3.1 Integrazione delle rinnovabili

L'aleatorietà di produzione e l'alta penetrazione avuta, nell'ultimo decennio, delle rinnovabili non programmabili, ha reso necessari interventi tempestivi sulla rete elettrica. I grandi impianti eolici e fotovoltaici infatti, risentono molto delle variazioni del vento, o dei passaggi di accumuli nuvolosi; portando a variare la produzione di $\pm 20\%$ nell'arco di pochi minuti. Le centrali adibite alla regolazione però, non sono in grado di seguire un tale scempenso in così poco tempo, quindi serve un sistema di accumulo che smorzi la variazione di potenza.

Le batterie non sono il sistema più indicato per riuscire a compensare variazioni di potenza che si manifestano nell'arco di pochi minuti o addirittura secondi. La soluzione migliore è un accumulo cinetico, l'unico in grado di rispondere tempestivamente con picchi di potenza, più volte al giorno, senza diminuire drasticamente la propria vita utile.

Tali interventi portano beneficio anche alle grandi centrali, che possono intervenire nella regolazione più lenta della frequenza.

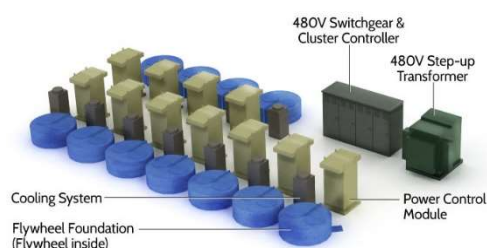


Figura 3.1: Schema impianti Beacon Power

Microreti e reti in isola, sono più soggette a una variazione di frequenza dovuta a repentine alterazioni di carico, e quindi possono incrementare la loro stabilità con l'adozione di un accumulo cinetico.

L'azienda leader di grandi impianti ad accumulo cinetico è la Beacon Power, che nel 2011 ha costruito una stazione di regolazione della frequenza da 20 MW, con 200 volani, a Stephentown, New York. L'impianto è in grado di fornire il 10% della regolazione di frequenza che lo stato ha bisogno.



Figura 3.2: Impianto di Stephentown, New York.

3.2 UPS

Agli UPS viene richiesto di mantenere in tensione il carico in mancanza di rete, e se i carichi sono particolarmente delicati, con elettronica sensibile alle variazioni di tensione, è necessario che l'UPS sia in grado di non far sentire al carico scompensi derivanti dalla rete.

Nel primo caso è prassi comune utilizzare un gruppo UPS affiancato a un generatore diesel. Il generatore impiega dai 15 ai 20 secondi per andare a regime, in questo frangente sono gli UPS ad alimentare i carichi. Un normale UPS utilizza batterie al piombo, che come visto, hanno una durata di vita breve, perciò si continuano a sostenere spese per il ripristino e il riciclo. Sostituendo le batterie al piombo con un volano, si ottiene lo stesso risultato e non si sostituisce prima di almeno 20 anni; inoltre si ha una maggiore stabilità dei carichi, grazie ai rapidi tempi di risposta.

Esistono diverse aziende che già hanno sviluppato UPS con tecnologia a volano, ad esempio Powerthru o ActivePower, entrambe sono in grado di fornire una tecnologia che ha una maggiore sicurezza di intervento, minori costi di gestione e minore impatto ambientale.

3.3 Spazio

La stazione spaziale internazionale, o i satelliti, ogni giorno compiono diverse orbite attorno alla terra, e vengono continuamente sottoposti a periodi di luce, e di buio quando sono nell'ombra della terra. Attualmente l'alimentazione viene fornita da dei pannelli fotovoltaici nel momento in cui sono esposti al sole, mentre quando sono in ombra, l'alimentazione è fornita da delle batterie a nickel-idrogeno. Sono in sviluppo dei sistemi a volano per sostituire le batterie, perché risultano più leggeri e meno ingombranti, inoltre dato i numerosi cicli a cui sono sottoposti, ne risulterebbe una maggiore durata di vita del satellite.

3.4 Trazione elettrica

Si cominciano a sviluppare applicazioni di volano anche sulle vetture a trazione ibrida (termico/elettrico), per ridurre la potenza richiesta al motore termico durante le accelerazioni. Nei momenti in cui il veicolo è fermo o è in fase di frenatura (l'energia del veicolo in movimento viene accumulata anziché dissipata, contribuendo al risparmio di carburante), si ricarica il volano per poi rilasciare l'energia quando si accelera o si incontra una salita. Se il volano si trova in movimento, crea l'effetto giroscopio e rende difficoltosa la sterzata del veicolo. È essenziale inserire il disco in modo che l'asse di rotazione sia perpendicolare con il terreno, oppure utilizzando due volani separati che ruotano in sensi opposti, in modo da eliminare l'effetto giroscopio.

Per quanto riguarda le applicazioni ferroviarie, si possono installare sistemi di accumulo cinetico in modo da accumulare energia durante la fase di frenata, e rilasciarla in linea nel momento in cui il treno accelera. Oltre ad ottenere una maggiore efficienza della rete ferroviaria, in quanto l'energia della fase di freno non viene dissipata in calore ma recuperata, si ottiene un profilo di potenza assorbita, dalle sottostazioni di alimentazione delle linee ferroviarie, più regolare.

4 Sospensione magnetica ibrida

Per sospensione magnetica ibrida si intende l'utilizzo di cuscinetti attivi che integrano sia magneti permanenti che elettromagneti. Con questa soluzione (ma anche con cuscinetti a soli elettromagneti) è necessario che la massa rotante sia di materiale ferromagnetico.

Questa configurazione, visibile in Figura 4.1, permette di sostenere la forza peso del volano e in caso di disturbi, cioè forze agenti sul disco mentre è in rotazione, di ristabilire la posizione in modo che il disco non impatti sui cuscinetti.

Bisogna precisare che in questa tesi si fa riferimento al solo controllo verticale del volano, se ci sono forze che agiscono anche orizzontalmente si rende necessario implementare un controllo anche orizzontale.

I cuscinetti si trovano sulla parte più esterna del disco, superiormente è presente il magnete e l'elettromagnete, mentre in quella inferiore solo l'elettromagnete. La particolare configurazione dei cuscinetti, è essenziale per evitare correnti indotte sul disco, in quanto non si hanno variazioni di flusso durante la rotazione, tranne che in presenza di variazioni di posizione verticale e/o laterale.

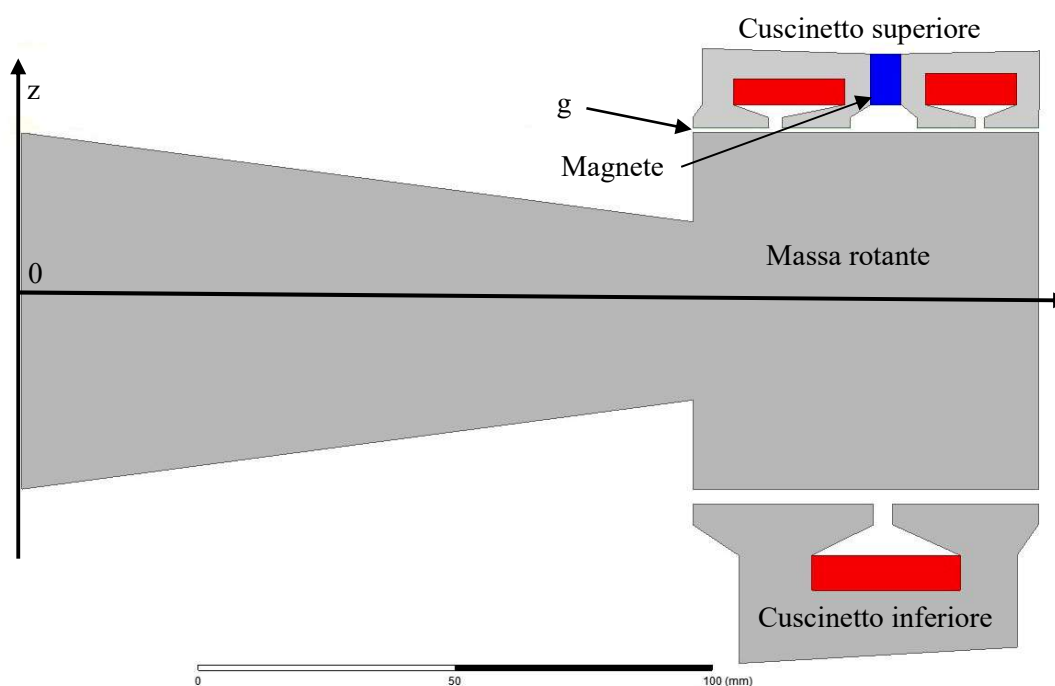


Figura 4.1: Configurazione del sistema di sospensione a simmetria assial-simmetrica.

4.1 Dati di progetto

Le caratteristiche principali e il materiale che è stato scelto, sono riportati in Tabella 4.

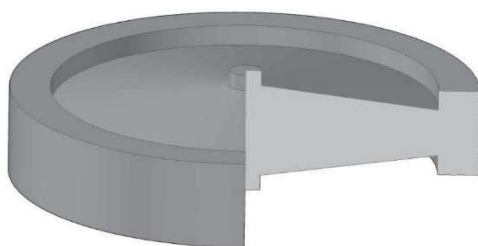


Figura 4.2: Prospetto 3D del volano.

In figura 4.2 invece, ci si può rendere conto della forma che assumerà il volano, ottenuta con un coefficiente di forma pari a 0.75.

La forma e la composizione sono state scelte per le caratteristiche fisiche dell'acciaio utilizzato, AISI 4340, le buone proprietà magnetiche, e per rendere il processo produttivo non troppo costoso.

| | |
|--------------------|------------------------|
| Potenza | 20 kW |
| Tempo di scarica | 3 - 5 min |
| Acciaio | AISI 4340 |
| Densità | 7830 kg/m ³ |
| Tensione specifica | 1790 MN/m ² |
| Massa | 74.2 kg |
| Velocità | 7000 - 32000 rpm |
| Fattore di forma | 0,75 |

Tabella 4: Principali caratteristiche di progetto.

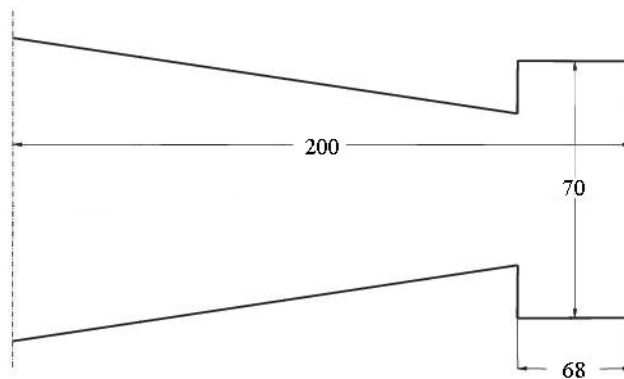


Figura 4.3: Dimensioni del disco in [mm].

4.2 Calcolo della forza verticale

In condizioni di equilibrio, il cuscinetto superiore è stato dimensionato con un magnete in grado di sostenere la forza peso ad un traferro di 2 mm. Tuttavia non è detto che il sistema rimanga in equilibrio, una possibile forza di disturbo, o uno spostamento verticale della parte fissa (ad esempio un terremoto), possono far variare il valore di traferro. Il magnete esercita una forza sul disco che varia con la distanza tra i due, cioè aumenta con il diminuire del traferro e viceversa, si può quindi affermare che il sistema non è intrinsecamente stabile. Con lo scopo di renderlo stabile, si sono introdotti degli elettromagneti che devono quindi sviluppare una forza tale da: eliminare la forza di disturbo e compensare la perdita di (o l'eccessiva) forza attrattiva esercitata dal magnete.

In figura 4.4 viene graficata la forza esercitata dal solo magnete⁶, in funzione del traferro alle temperature di 20 e 80 °C.

In questo grafico si può capire un altro concetto fondamentale: la dipendenza della forza dalla temperatura. Come si vedrà la temperatura a cui lavorano i cuscinetti è molto importante, perché influenza parametri di controllo come la forza e la resistenza degli avvolgimenti.

⁶ Il software utilizzato per ricavare i valori di forza, e per dimensionare i cuscinetti, è Ansys Maxwell.

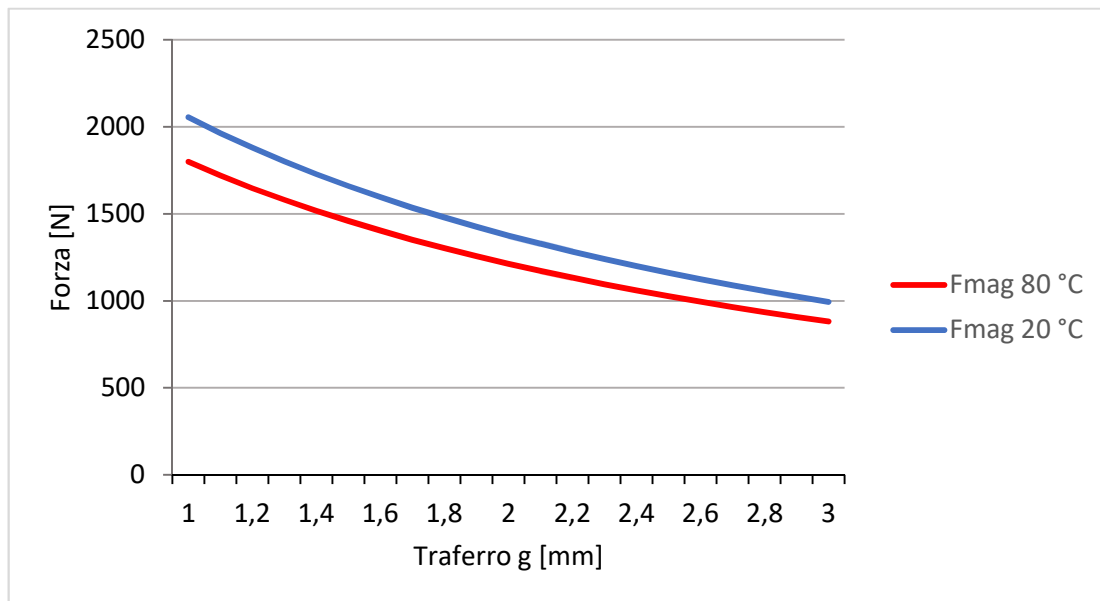


Figura 4.4: Andamento della forza sviluppata dal magnete permanente, in funzione del traferro superiore e alla temperatura di 20 e 80°C.

Il dimensionamento del magnete è stato eseguito tenendo come riferimento una temperatura di funzionamento di 80°C, cioè nelle condizioni peggiori quando la forza è più debole. In queste circostanze il magnete deve poter sorreggere l'intero peso del disco a un traferro di riferimento che è 2 mm, quindi la forza che sviluppa è 1213 N.

4.3 Scelta verso correnti

Da uno studio con il software Ansys Maxwell, si sono dimensionati i cuscinetti per avere una corrente di 450 A, per l'avvolgimento superiore, e 900 A per l'avvolgimento inferiore. Il cuscinetto superiore si presenta come in figura 4.3, in colore blu viene rappresentato il magnete, mentre in rosso le cave dove vengono inseriti gli avvolgimenti.

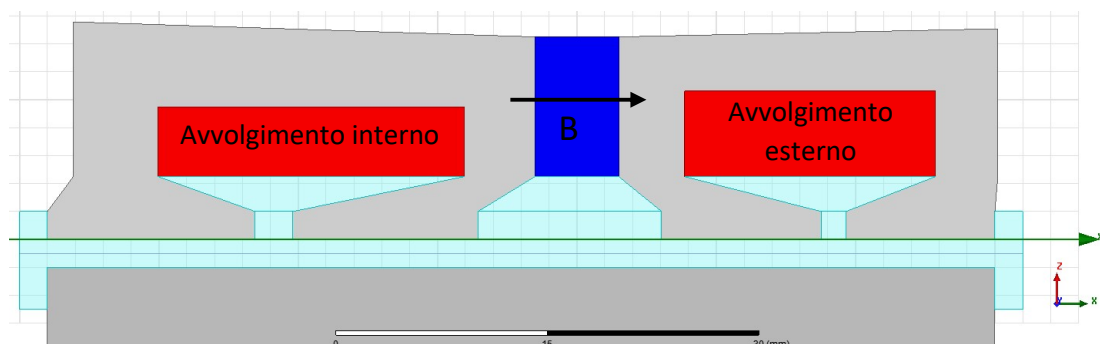


Figura 4.5: Modello cuscinetto superiore.

Le possibilità per la scelta del verso di corrente sono due, concordi o discordi. Effettuando delle analisi si è visto che con correnti discordi, si ha una densità di corrente e una saturazione del ferro più elevata, che implica una minore efficienza del sistema. La scelta quindi ricade su un verso di correnti concordi ed entranti, con i due avvolgimenti in serie.

Per l'avvolgimento inferiore non è necessario esaminare casistiche particolari, in quanto è presente un solo avvolgimento.

4.4 Dipendenza della forza dalla temperatura

Come già visto, c'è un legame non trascurabile tra la forza sviluppata dai magneti e la temperatura a cui lavorano. Il volano solitamente, per motivi di sicurezza, viene inserito in una cavità sotto il terreno, dove la temperatura non raggiunge valori elevati. Tuttavia per piccole applicazioni, si può inserire il volano in un armadio elettrico di un UPS, ad esempio, quindi è essenziale verificare il comportamento del sistema al variare della temperatura. Se inoltre i cuscinetti magnetici si trovano all'interno della camera sottovuoto, il calore per effetto Joule che sviluppano o che viene prodotto dalla macchina elettrica, è difficile da dissipare, in quanto l'unica possibilità di scambio termico è ottenuta con il solo irraggiamento.

Bisogna dunque modellizzare analiticamente la variazione di forza dei cuscinetti magnetici, che verrà indicata come ΔF , con la temperatura. Si può calcolare il valore medio della forza tra le due temperature limite 20 e 80 °C, cioè F_{medio} , la forza alla temperatura di 50°C (4.2). A questo valore dunque si dovrà poi sommare o sottrarre, un ΔF moltiplicato per il fattore k_{ϑ} , a seconda che ϑ sia al di sopra o sotto la temperatura media.

$$\vartheta_{medio} = \frac{\vartheta_{max} + \vartheta_{min}}{2} \quad (4.1)$$

$$F_{medio} = \frac{F_{\vartheta_{max}} + F_{\vartheta_{min}}}{2} \quad (4.2)$$

$$k(\vartheta) = \frac{\vartheta_{medio} - \vartheta}{\Delta\vartheta/2} \quad (4.3)$$

$$\Delta F = \frac{F_{\vartheta_{min}} - F_{\vartheta_{max}}}{k(\vartheta_{max}) - k(\vartheta_{min})} \quad (4.4)$$

Conoscendo tutte le variabili, si può ora scrivere l'equazione che definisce la forza in funzione della temperatura ϑ :

$$F(\vartheta) = F_{medio} + k(\vartheta) \Delta F \quad (4.5)$$

La funzione (4.2) viene quindi corretta dall'addendo $k(\vartheta) \Delta F$, e si ottiene la forza sviluppata a una data temperatura ϑ per uno specifico valore di traferro (4.5).

Il cuscinetto inferiore, non avendo magneti integrati, non risente di variazioni di temperatura. In seguito vengono presentati i valori di forza prodotti dai cuscinetti, in funzione della corrente e della posizione.

La forza sviluppata dal cuscinetto superiore (Figura 4.6), non è nulla al valore di corrente 0 A perché tiene in considerazione anche il magnete. Logicamente quella in grafico è il valore di forza della relazione (4.2), a cui bisogna aggiungere il valore di ΔF (Figura 4.7) come in (4.5).

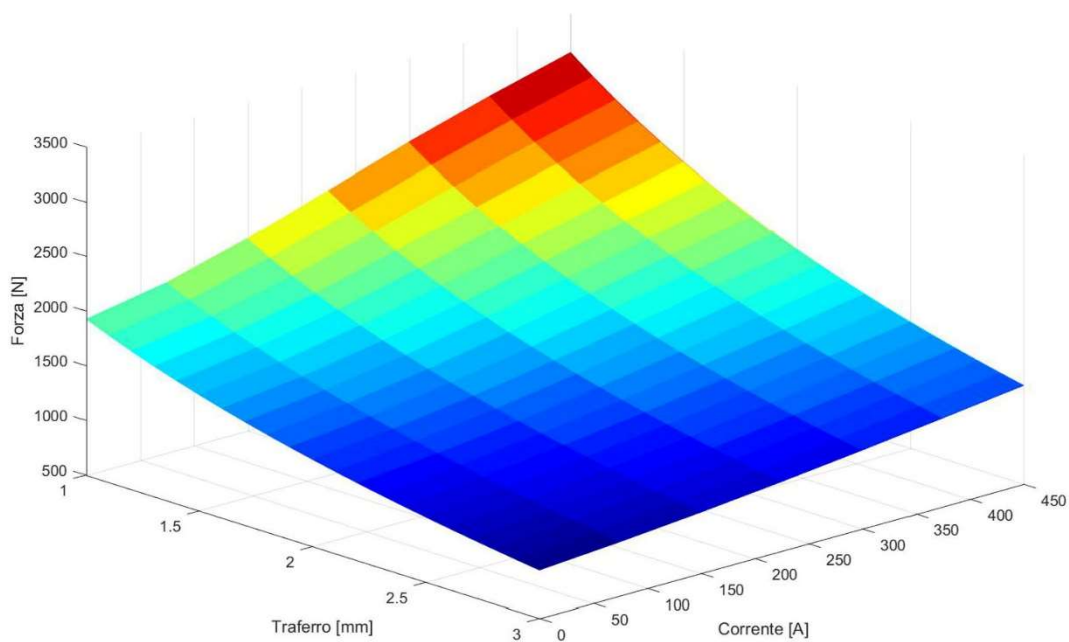


Figura 4.6: Forza sviluppata dal cuscinetto superiore alla temperatura di 50°C.

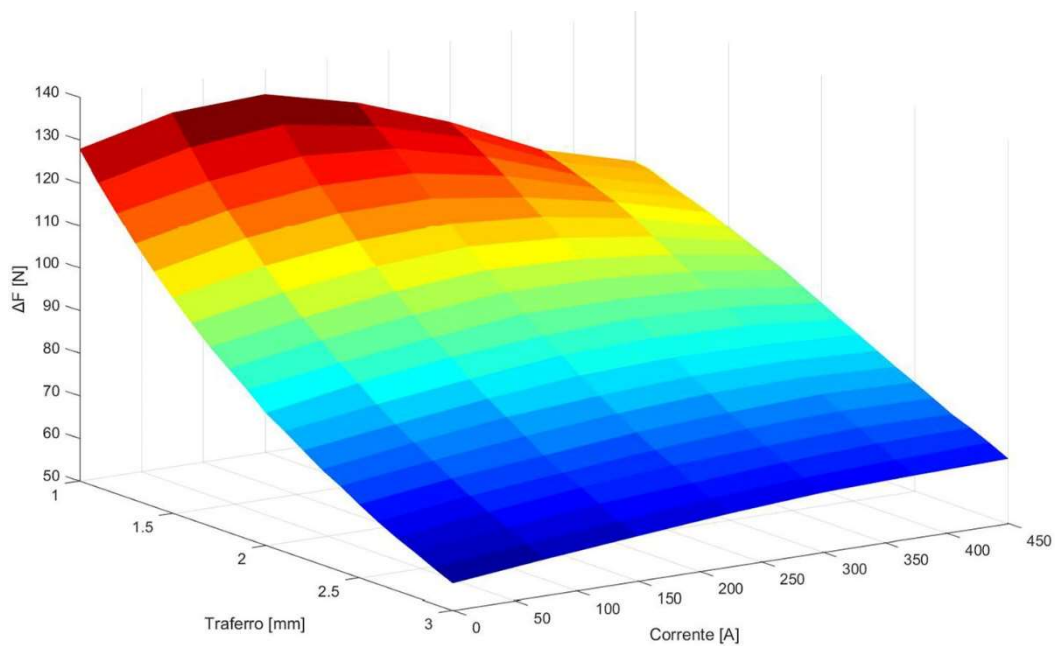


Figura 4.7: Valori di ΔF in funzione della corrente e della posizione.

Si può notare l'effetto della saturazione magnetica sull'andamento del ΔF (figura 4.7), spostandosi su un valore di traferro costante all'aumentare della corrente, dapprima il valore incrementale della forza aumenta, poi dopo i 200 A tende a diminuire.

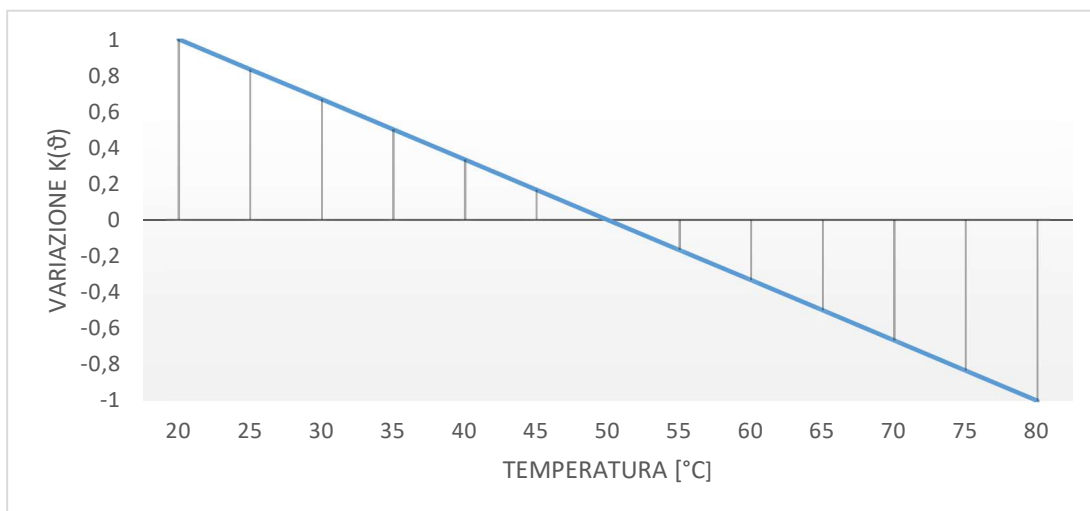


Figura 4.8: Variazione del coefficiente $k(\theta)$ in funzione della temperatura.

Per quanto riguarda il cuscinetto inferiore gli andamenti della forza sviluppata, si vedono in Figura 4.9. Non contenendo magneti permanenti la forza è nulla a corrente

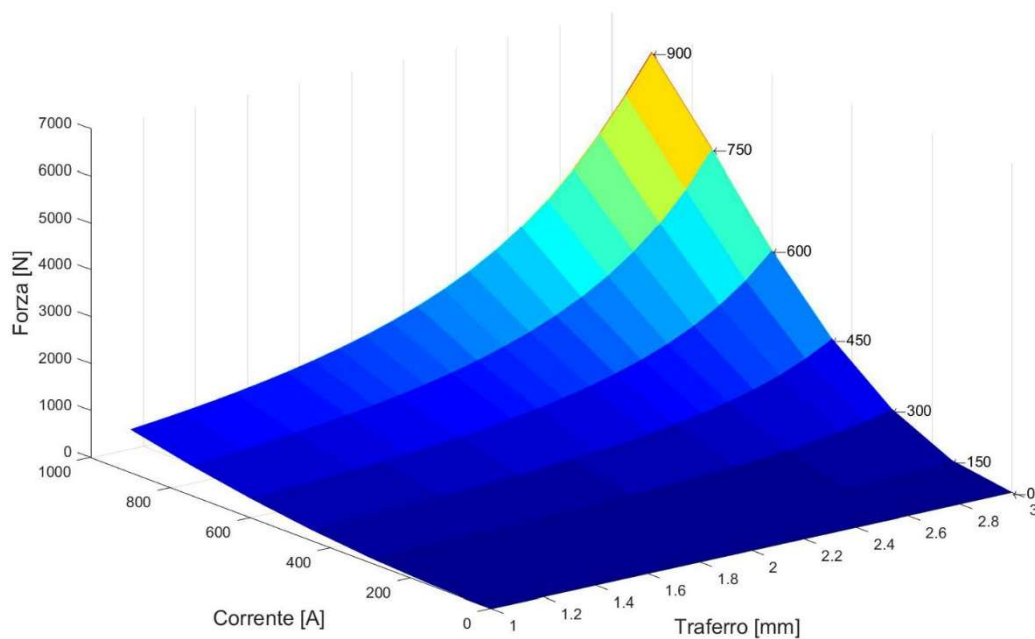


Figura 4.9: Forza sviluppata dal cuscinetto inferiore.

4.5 Calcolo dell'induttanza delle bobine

L'induttanza degli avvolgimenti, dipende dalla riluttanza del circuito magnetico. Nel caso dei volani, le linee di campo attraversano un traferro che può non essere costante, in condizioni dinamiche, per un possibile temporaneo sbilanciamento delle forze verticali.

Anche il valore di corrente che circola negli avvolgimenti incide sul valore di induttanza, in quanto dipende dalla saturazione del materiale ferromagnetico di cui sono composti i cuscinetti.

Bisognerà quindi implementare un sistema di controllo, che tenga in considerazione un'induttanza variabile con la posizione e la corrente che circola negli avvolgimenti, vedi 5.3.

Grazie al software Ansys Maxwell si è potuto calcolare l'induttanza dei due cuscinetti, tenendo presente che in quello superiore sono presenti due bobine mutuamente accoppiate percorse da corrente di verso concorde.

Si ottiene quindi:

$$L_{sup} = L_{int} + L_{ext} + 2M \quad (4.6)$$

Nelle figure 4.10 e 4.11 vengono rappresentati i valori delle induttanze dei cuscinetti, in funzione della corrente e della posizione.

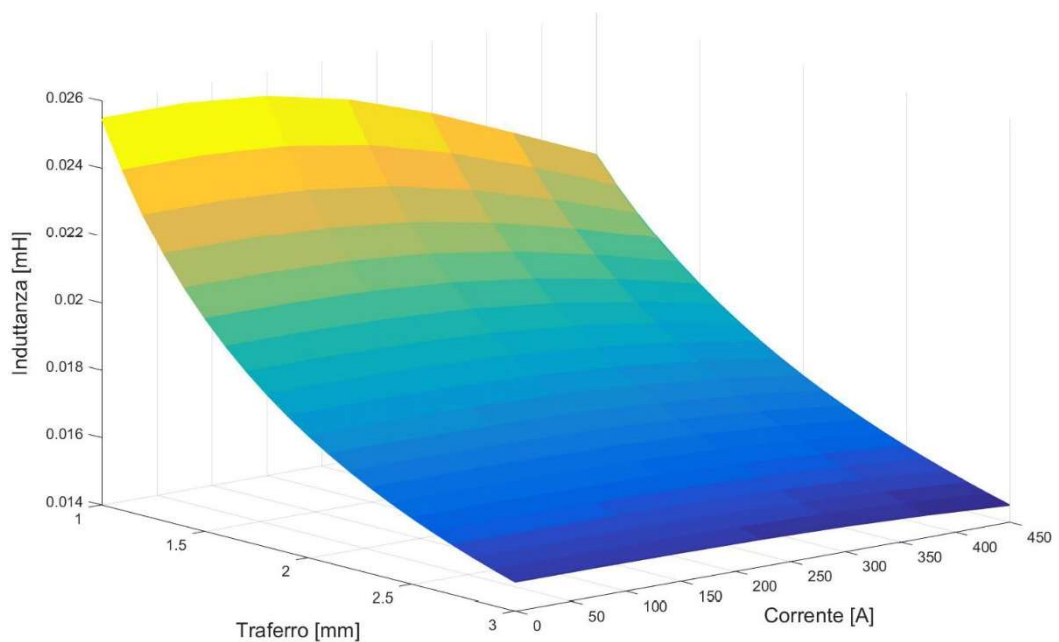


Figura 4.10: Valori di induttanza per l'avvolgimento superiore.

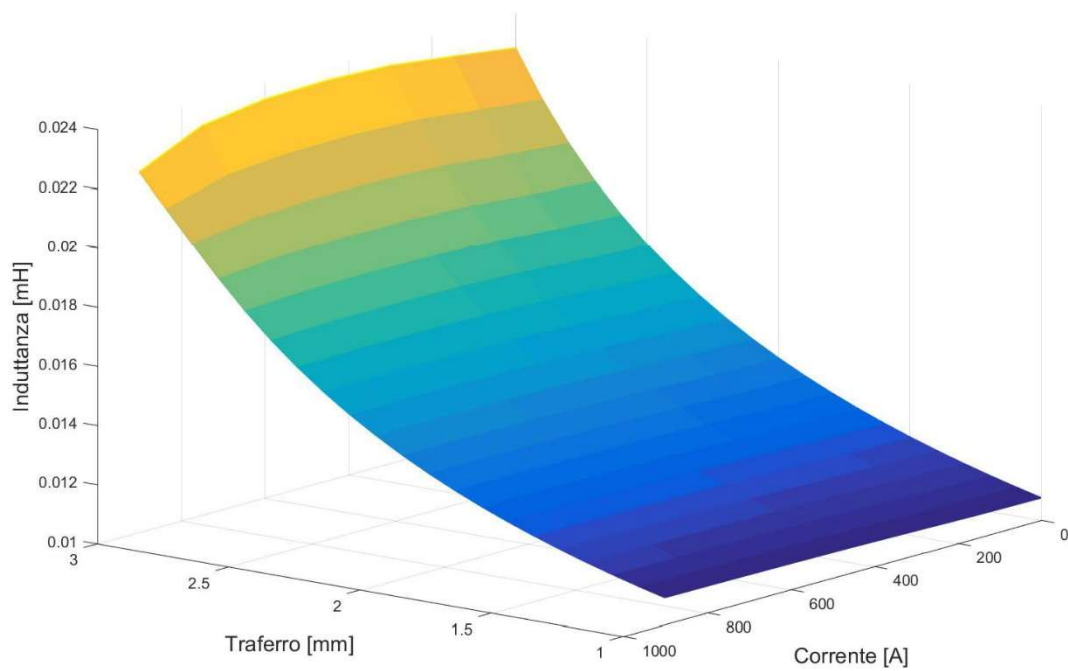


Figura 4.11: Valori di induttanza per l'avvolgimento inferiore.

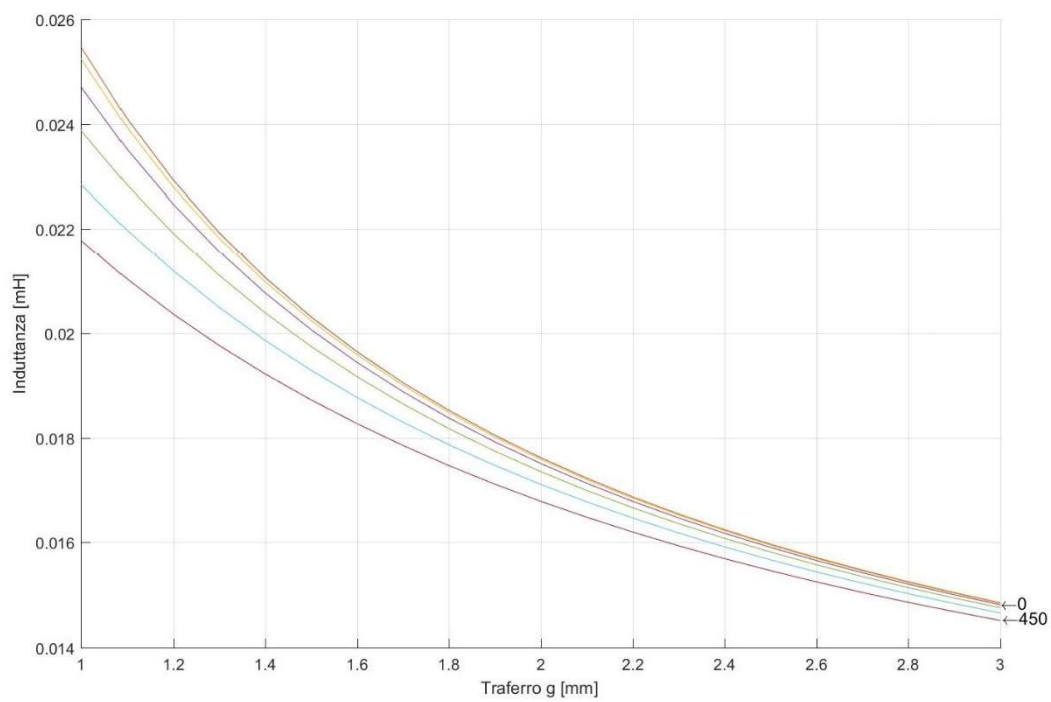


Figura 4.12: Valori dell'induttanza superiore al variare del traferro con corrente costante.

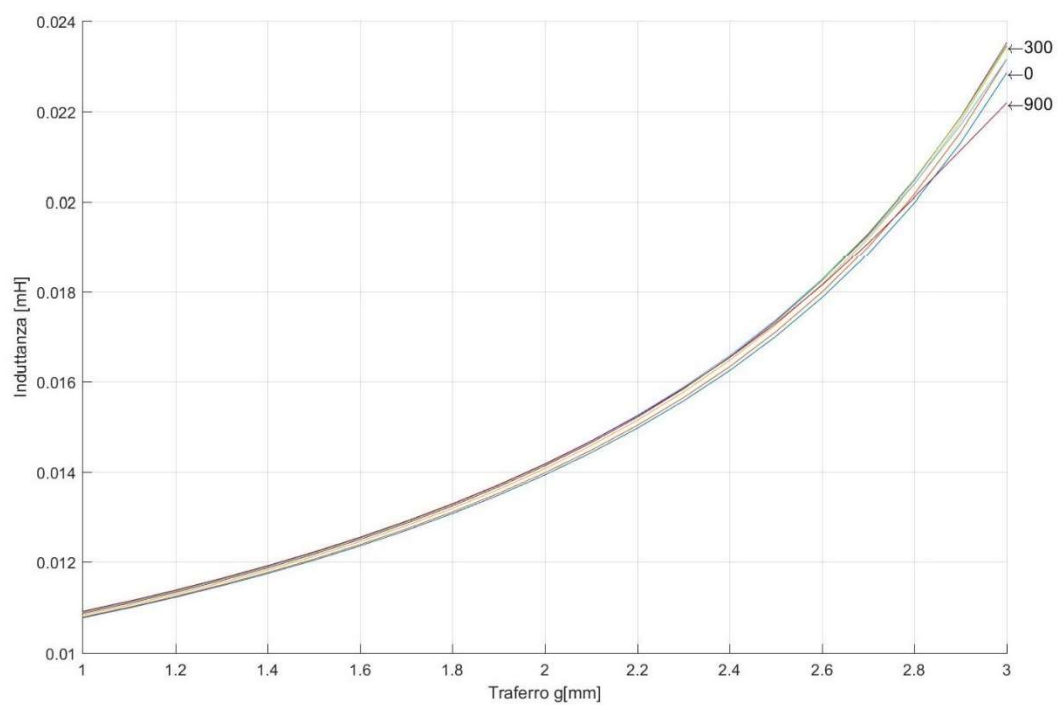


Figura 4.13: Valori dell'induttanza inferiore al variare del traferro con corrente costante.

5 Controllo della sospensione

Il controllo della sospensione è stato implementato con un software integrato in Matlab, ovvero Simulink. Questo dà la possibilità di modellare, simulare e analizzare sistemi dinamici, con l'utilizzo di diagrammi a blocchi. Risulta quindi semplice costruire il modello, modificarne i parametri, e visualizzare i risultati anche durante la simulazione.

Dalle considerazioni fatte nel capitolo 4, si può ora definire un sistema di controllo della posizione verticale del volano.

5.1 Il controllo

Il sistema di controllo principale si basa su due diversi controlli: controllo di posizione, controllo di corrente. Il controllo di posizione agisce tramite il segnale di un sensore, installato sulla parte fissa della macchina, con il compito di rilevare la distanza tra il cuscinetto (superiore o inferiore) e disco, ovvero fornire il valore di traferro. Una volta che si ha questa informazione, un controllore dovrà confrontarla con un riferimento (g^*), nel momento in cui il valore di riferimento non coincide con il valore misurato (g), il controllore invia un segnale di corrente (I^*) all'attuatore per attivare gli elettromagneti presenti nei cuscinetti, e ristabilire la posizione al valore di riferimento.

Nell'attuatore è presente il secondo controllo, quello di corrente, infatti per alimentare gli elettromagneti c'è bisogno di un convertitore statico che sia in grado di fornire una tensione di alimentazione in DC agli avvolgimenti. Il segnale di corrente proveniente dal controllore quindi, definisce il valore di corrente che bisogna applicare agli avvolgimenti per ristabilire il traferro di riferimento. Il controllo di corrente ha il compito di verificare che il segnale in ingresso (I^*) corrisponda con il vero valore di corrente applicato I , attraverso una retroazione. Una semplificazione del sistema di controllo la si può vedere in figura 5.1.

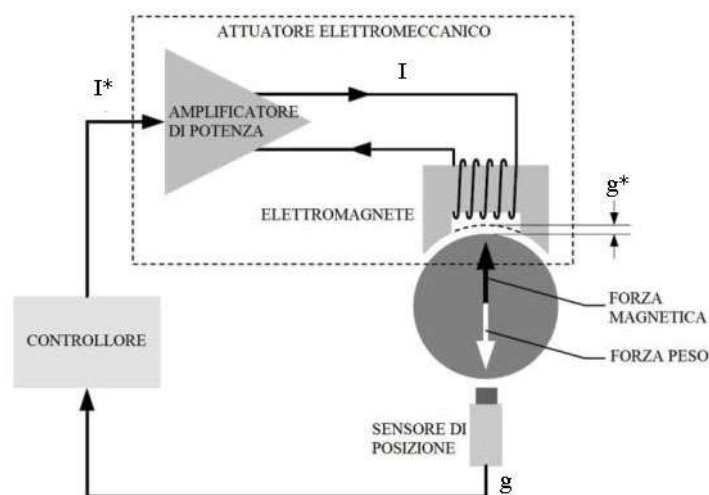


Figura 5.1: Schema di controllo semplificato.

È inoltre stato introdotto un terzo controllo, che viene definito “Integratore anti wind-up” che ha il compito di modificare il valore di riferimento di traferro. Questo si è reso necessario per una questione energetica, più che per il funzionamento vero e proprio del sistema. Il funzionamento viene spiegato approfonditamente in (5.6).

5.2 Forze agenti sul sistema

Il bilancio delle forze che regola la dinamica del moto verticale del volano comprende: la forza peso, la forza magnetica del magnete permanente, la forza magnetica degli elettromagneti e la forza di disturbo. Assumendo come riferimento la coordinata z riportata in Figura 4.1, l'equazione dinamica si può scrivere:

$$F_{tot} = F_{sup} - F_{inf} - F_p + \Delta F_{dist} = 0 \quad (5.1)$$

$$F_{sup} = F_{mag} + F_{emag} \quad (5.2)$$

$$F_p = Mg \quad (5.3)$$

Per F_{sup} si intende la totale forza sviluppata dal cuscinetto superiore data dalla somma della forza magnetica F_{mag} e dalla forza elettromagnetica superiore F_{emag} , F_{inf} la forza dell'elettromagnete inferiore, F_p la forza peso data dal prodotto di massa per accelerazione di gravità e ΔF_{dist} un eventuale forza di disturbo.

In condizioni di quiete, in accordo con il primo principio, l'equazione (5.1) si riduce a:

$$F_{mag} - Mg = 0 \quad (5.4)$$

Se dunque non si manifestano forze di disturbo, il volano rimane stabile in una posizione definita dalla temperatura a cui si trovano i magneti.

Ora si immagina di non avere un sistema di controllo attivo, e di non alimentare gli elettromagneti, nel momento in cui dovesse intervenire un qualsiasi ΔF_{dist} , la sommatoria delle forze (5.1) risulta non nulla (5.5).

$$F_{tot} = F_{mag} - F_p + \Delta F_{dist} \quad (5.5)$$

In questo caso la forza totale che agisce sul sistema, tenendo valida la (5.4), è proprio uguale alla forza di disturbo. Conoscendo quindi la F_{tot} si può ricavare l'accelerazione che ha impresso il disturbo sul sistema.

Dividendo la F_{tot} per la massa del volano e integrando, si ottiene lo spostamento che la forza ha impresso al disco.

$$a(t) = \frac{F_{tot}}{M} \quad (5.6)$$

$$v(t) = \int_t a(t) dt \quad (5.7)$$

$$\Delta z = \int_t v(t) dt \quad (5.8)$$

A questo punto si conosce la nuova posizione del volano, perché basta aggiungere il valore di (5.8) al riferimento di traferro g^* . Di fatto la (5.8) definisce l'errore di traferro, quindi questo valore viene poi elaborato dal controllore di traferro, in modo da far entrare in funzione i cuscinetti magnetici e riportare il volano nella posizione iniziale, si tratta dunque di ristabilire l'equilibrio della (5.1).

Logicamente questo metodo viene utilizzato, solo allo scopo di creare una simulazione numerica che si avvicini al comportamento reale del sistema; infatti nella realtà, l'errore di traferro, come già visto in 5.1, viene ricavato con un sensore.

Se si tiene in considerazione il valore di traferro superiore, allora Δz va sottratto al valore di riferimento:

$$g = g^* - \Delta z \quad (5.9)$$

È importante avere costantemente il valore di g , perché, come già visto in 4, ci sono molte variabili che vi dipendono.

Lo schema definitivo del sistema di controllo è riassunto in figura 5.2.

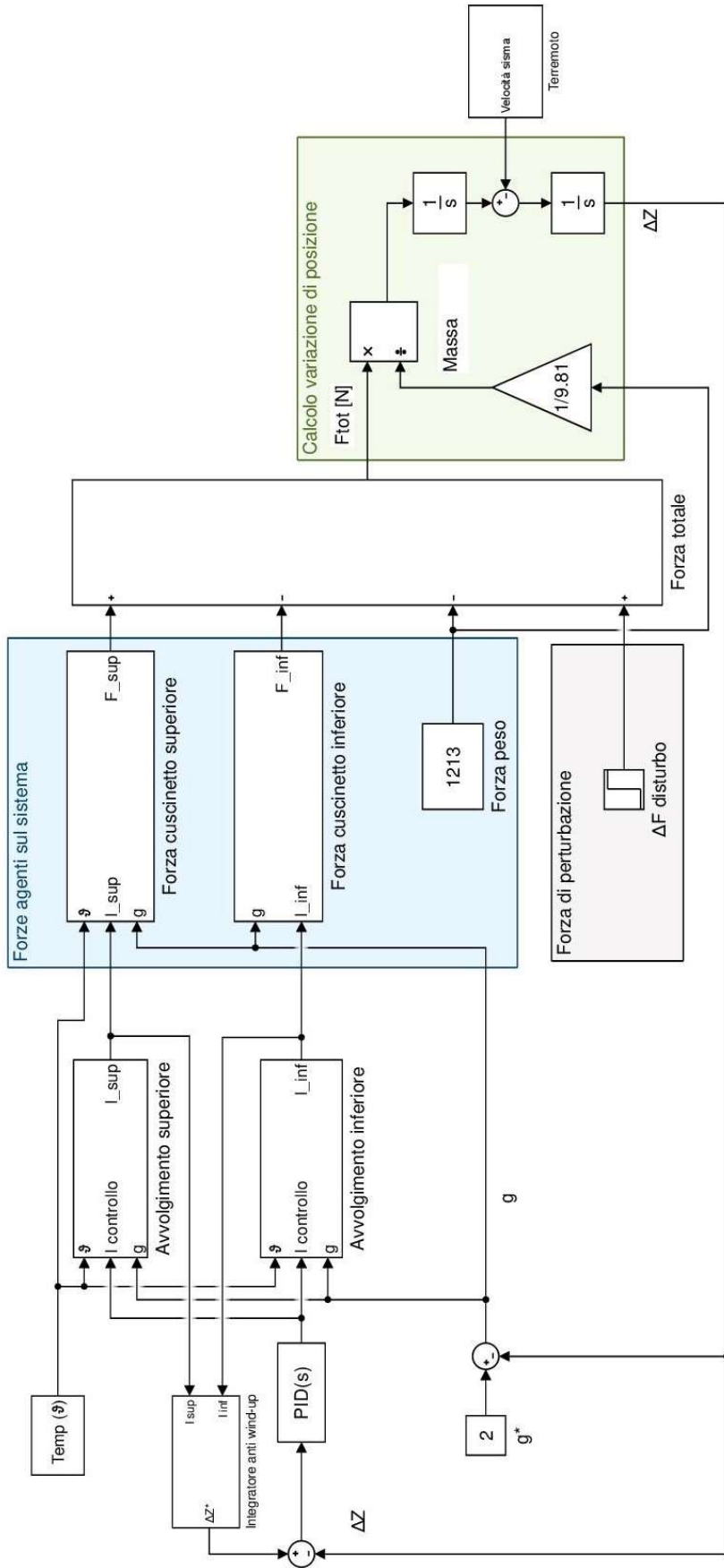


Figura 5.2: Schema di controllo del sistema di sospensione magnetica ibrida.

5.3 Sottosistema avvolgimento superiore e inferiore

Questo blocco ha il compito di simulare il convertitore che deve alimentare gli avvolgimenti dell'elettromagnete, e la dinamica delle costanti elettriche. Di fatto si tratta di un semplice controllo ad anello chiuso, in ingresso si ha un riferimento di corrente e in uscita il valore applicato.

La necessità di inserire un controllo di corrente, è dovuta a due principali motivi: la dinamica di risposta del convertitore e la dinamica delle costanti elettriche. In questo caso il convertitore lavora molto velocemente, può utilizzare un controllo in PWM o a isteresi, strategie che lavorano con costanti di tempo decisamente inferiori rispetto all'evoluzione delle correnti richieste dal sistema di controllo del traferro, e non è quindi necessaria una funzione di trasferimento. Per le costanti elettriche invece è necessaria.

Per definire la funzione di trasferimento del sistema elettrico, si può partire dall'equazione di tensione dell'avvolgimento:

$$v(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (5.10)$$

Dalla (5.10) poi si ricava la funzione $i(t)$ e ci si riconduce allo schema di figura 5.3.

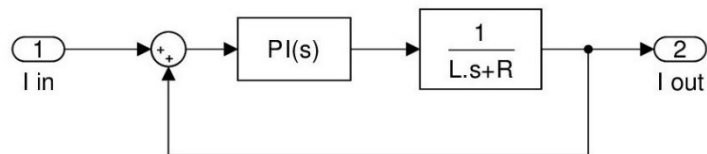


Figura 5.3: Tipico controllo ad anello di corrente.

Nel controllo è presente la funzione di trasferimento con le costanti elettriche degli avvolgimenti, induttanza L , resistenza R , e il controllore di tipo proporzionale-integrativo per annullare l'errore tra ingresso e uscita.

Nel caso in questione, il cuscinetto magnetico non presenta induttanza e resistenza costanti, quindi c'è bisogno di modificare lo schema di Figura 5.3 al fine di avere un'induttanza variabile con il valore di traferro e una resistenza variabile con la temperatura.

La variazione di resistenza degli avvolgimenti con la temperatura, è definita da un'equazione lineare:

$$R = \rho_{20} [1 + \alpha(\vartheta - 20)] \frac{l}{S} \quad (5.11)$$

Dove ρ_{20} è la resistività del rame a 20°C pari a 0.018 [$\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$], α è una costante che dipende dal materiale e vale 3.93E-03 [$^{\circ}\text{C}^{-1}$], ϑ è la temperatura in cui si trova l'avvolgimento, l la lunghezza totale dell'avvolgimento in [m] e infine S la sezione in [mm^2].

Per quanto riguarda l'induttanza, si è visto in 4.5 come varia a seconda del traferro e della corrente. Quindi si tratta di inserire nel software di simulazione i parametri di induttanza, corrente e traferro. Il blocco di Simulink che è in grado di elaborare due ingressi e dare in uscita il valore di induttanza, è il Lookup Table.

Tuttavia i dati di induttanza forniti dal software Ansys Maxwell, sono valori per spira, quindi si rende necessario calcolare il numero di spire dell'avvolgimento superiore N_{sup} e inferiore N_{inf} .

L'equazione (5.10) si può riscrivere in funzione dei nuovi parametri, prendendo in considerazione (5.11) e (4.6).

$$v(t)_{sup} = \rho_{20}[1 + \alpha(\vartheta - 20)] \frac{l_{sup}}{S_{sup}} (N_{sup} i_{sup}) + N_{sup} (L_{in} + L_{ext} + 2M) \frac{d(N_{inf} i_{inf})}{dt} \quad (5.12)$$

$$v(t)_{inf} = \rho_{20}[1 + \alpha(\vartheta - 20)] \frac{l_{inf}}{S_{inf}} (N_{inf} i_{inf}) + N_{inf} L_{inf} \frac{d(N_{inf} i_{inf})}{dt} \quad (5.13)$$

Le due equazioni (5.12) e (5.13), rispettivamente dell'avvolgimento superiore e inferiore, possono essere riscritte:

$$v(t)_{sup} = R_{sup} (N_{sup} i_{sup}) + N_{sup} L_{sup} \frac{d(N_{sup} i_{sup})}{dt} \quad (5.14)$$

$$v(t)_{inf} = R_{inf} (N_{inf} i_{inf}) + N_{inf} L_{inf} \frac{d(N_{inf} i_{inf})}{dt} \quad (5.15)$$

Si possono ora costruire i due blocchi di Simulink che governano le correnti negli avvolgimenti (Figura 5.4 e 5.5).

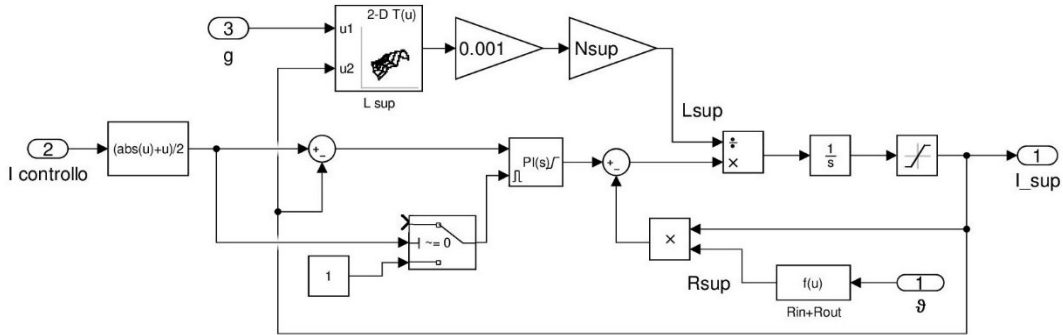


Figura 5.4: Controllo ad anello di corrente “Avvolgimento superiore”.

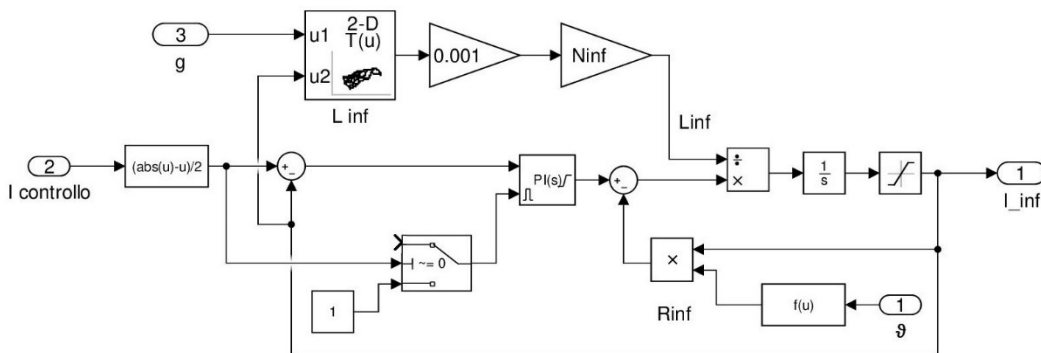


Figura 5.5: Controllo ad anello di corrente “Avvolgimento inferiore”.

Il riferimento di corrente, nello schema di figura 5.2 è unico, e può essere positivo o negativo, viene quindi distinto dai due blocchi (5.16) e (5.17).

$$\frac{abs(u)+u}{2} \quad (5.16)$$

$$\frac{abs(u)-u}{2} \quad (5.17)$$

Questi fanno in modo che, se il riferimento di corrente è positivo, si attiva il solo controllo superiore; mentre se è negativo si attiva solo il controllo inferiore. Tuttavia si è reso necessario inserire un reset, nei controlli PI, in modo da azzerare la parte integrale quando il riferimento di corrente si annulla, questo accorgimento assicura che non ci siano correnti concomitanti negli avvolgimenti.

La costante 0.001 serve per l’aggiustamento delle unità di misura, essendo i valori dell’induttanza nella Lookup Table espressi in [mH].

La corrente viene limitata da un saturatore tarato a 450 A per l’avvolgimento superiore, e 900 A per quello inferiore, come è stato dimensionato nel capitolo 4.

I due valori di tensione (5.14) e (5.15), devono poter essere dei valori realmente riproducibili da un convertitore; nei circuiti realizzati le due tensioni sono misurabili in uscita dai controllori PI. Si rende necessario quindi calcolare un numero di spire ottimale, in modo da non far elevare troppo la tensione che deve essere applicata dai convertitori.

I valori delle sezioni di cava sono pari a 110 mm² per quelle superiori e 200 mm² per quella inferiore, sono stati calcolati con un coefficiente di riempimento pari a 0.6.

A partire dai valori commerciali del diametro dei fili, si è scelto il numero di spire presenti in cava. Si sceglie un numero di spire in modo da non superare la tensione limite, in condizioni transitorie, del convertitore. Successivamente quando si è a conoscenza del numero di avvolgimenti, si può eseguire un test in Simulink utilizzando una forza di disturbo a gradino abbastanza elevata. Si misura poi la tensione in uscita dal controllore PI⁷, e si verifica che il picco massimo sia al di sotto del limite di tensione applicabile.

Per l’avvolgimento superiore, si è scelta in 4.3 una configurazione serie, quindi la corrente di cava deve essere dimezzata, ci sono 225 A per cava.

⁷ Per poter testare il sistema bisogna prima tarare i controllori, si veda 5.5.

Procedura di calcolo del numero di spire:

$$S_{filo} = \frac{D_{max}^2}{4} \pi \quad (5.18)$$

$$S_{Cu} = \frac{d^2}{4} \pi \quad (5.19)$$

$$N^* = \frac{S K_f}{S_{filo}} \quad (5.20)$$

$$I^* = \frac{NI}{N^*} \quad (5.21)$$

$$\delta = \frac{I^*}{S_{Cu}} \quad (5.22)$$

È sempre idoneo calcolare anche la resistenza degli avvolgimenti, in modo da verificare l'ordine di grandezza che risulta dai calcoli, infatti se si scelgono sezioni troppo piccole la resistenza aumenta. Un altro dato da prendere in considerazione è la densità di corrente, è conveniente cercare di ottenere valori non superiori a 5÷6 A/mm².

$$R = \rho_{20} \frac{l N^*}{S_{Cu}} \quad (5.23)$$

| | |
|-----------------|--|
| Kf | Coefficiente di riempimento |
| NI | Corrente di cava |
| d | Diametro della sezione di rame del filo smaltato |
| Dmax | Diametro massimo sezione del filo smaltato |
| S filo | Sezione totale filo smaltato |
| S Cu | Sezione della porzione di rame del filo smaltato |
| N* | Numero di spire calcolato |
| I* | Corrente dell'avvolgimento serie |
| δ | Densità di corrente |
| ρ ₂₀ | Resistività rame a 20°C |
| l | Lunghezza di una spira |

Una volta calcolato il valore di spire si inseriscono nella simulazione e si verifica la tensione di picco raggiunta, conviene fissare una tensione limite di 60 V. Per iterazioni, si sceglie il diametro più adeguato in modo che non si raggiungano valori troppo elevati (superiori a 2 mm) che complicherebbero la realizzazione dell'avvolgimento.

Le seguenti tabelle 5.1, 5.2, 5.3, riepilogano i dati definitivi calcolati per questo modello.

| Avvolgimento superiore interno | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|-------|-----|------|-------|--------------------|--------------------|-----------|------|----------------------|--------|
| Sezione | Kf | NI | d | Dmax | S filo | S Cu | N* | I* | δ | R 20°C |
| [mm ²] | [adm] | [A] | [mm] | [mm] | [mm ²] | [mm ²] | [n spire] | [A] | [A/mm ²] | [Ω] |
| 110 | 0,6 | 225 | 1,5 | 1,606 | 2,0257 | 1,7671 | 33 | 6,91 | 3,91 | 0,31 |

Tabella 5.1: Dati relativi alla cava interna dell'avvolgimento superiore.

| Avvolgimento superiore esterno | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|-------|-----|------|-------|--------------------|--------------------|-----------|------|----------------------|--------------|
| Sezione | Kf | NI | d | Dmax | S filo | S Cu | N* | I* | δ | R 20°C |
| [mm ²] | [adm] | [A] | [mm] | [mm] | [mm ²] | [mm ²] | [n spire] | [A] | [A/mm ²] | [Ω] |
| 110 | 0,6 | 225 | 1,5 | 1,606 | 2,0257 | 1,7671 | 33 | 6,91 | 3,91 | 0,39 |

Tabella 5.2: Dati relativi alla cava esterna dell'avvolgimento superiore.

Per l'avvolgimento superiore si hanno in totale 65 spire, con una resistenza di 0.7 Ω . Si nota subito che il prodotto della corrente I* per la resistenza totale dell'avvolgimento da un valore di 46 V inferiore al limite imposto di 60V. La verifica finale è comunque la simulazione. Se il valore di picco raggiunto dalla tensione è inferiore al limite, si è raggiunta la sezione più adeguata.

| Avvolgimento inferiore | | | | | | | | | | |
|------------------------|-------|-----|------|-------|--------------------|--------------------|-----------|-------|----------------------|--------------|
| Sezione | Kf | NI | d | Dmax | S filo | S Cu | N* | I* | δ | R 20°C |
| [mm ²] | [adm] | [A] | [mm] | [mm] | [mm ²] | [mm ²] | [n spire] | [A] | [A/mm ²] | [Ω] |
| 200 | 0,8 | 900 | 2 | 2,112 | 3,5033 | 3,1416 | 46 | 19,71 | 6,27 | 0,28 |

Tabella 5.3: Dati relativi all'avvolgimento inferiore.

Lo stesso procedimento è valido per i parametri dell'avvolgimento inferiore.

5.4 Sottosistema forza cuscinetto superiore e inferiore

Una volta che i riferimenti di corrente sono stati elaborati dai blocchi “Avvolgimento superiore” e “Avvolgimento inferiore”, vengono mandati nei blocchi che simulano la forza magnetica sviluppata dagli avvolgimenti: “Forza cuscinetto superiore” e “forza cuscinetto inferiore”.

I due sottosistemi sono diversi, perché come discusso in 4, la forza del cuscinetto superiore comprende sia la forza magnetica del magnete permanente, sia quella dell'elettromagnete. E oltre a una dipendenza dalla distanza tra il cuscinetto e il disco, la forza varia con la temperatura. È molto importante tenere in considerazione la temperatura di lavoro, perché se la macchina elettrica, adibita alla conversione elettromeccanica dell'energia, lavora ininterrottamente con continui cicli di carica/scarica, può trasmettere calore all'intelaiatura e quindi ai cuscinetti.

La costruzione del sistema rispecchia l'equazione (4.5), quindi si è calcolato con il software Ansys Maxwell la forza alla temperatura massima e minima, per i valori di traferro compresi tra 1 mm e 3 mm con passi di 0.1mm.

Con i dati forniti, si è ora in grado di costruire la (4.2) e la (4.4) per l'intervallo di traferro considerato 1÷3 mm. Una volta ricavati tutti i dati, si possono inserire nelle Lookup Table di Simulink F_{medio} e ΔF . Per i valori intermedi di temperatura si implementa la funzione (4.3).

Il sottosistema è visibile in Figura 5.6.

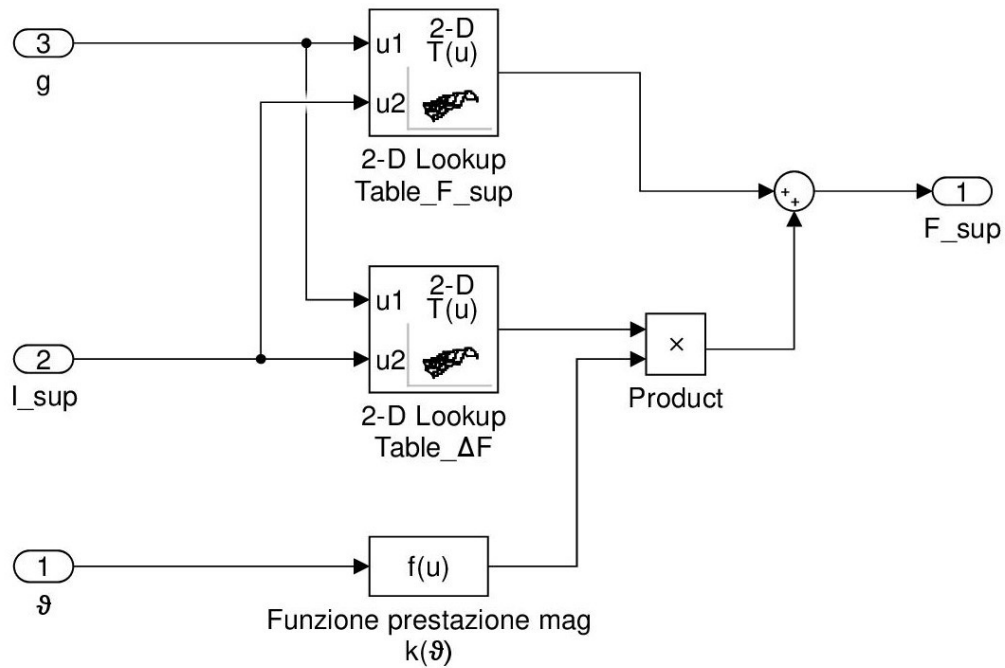


Figura 5.6: Sottosistema “Forza cuscinetto superiore”

La Lookup Table della forza relativa al cuscinetto inferiore non è condizionata direttamente dalla temperatura. Contiene quindi i dati calcolati attraverso Ansys Maxwell per i valori di traferro di 1÷3 mm con passi di 0.1 mm.

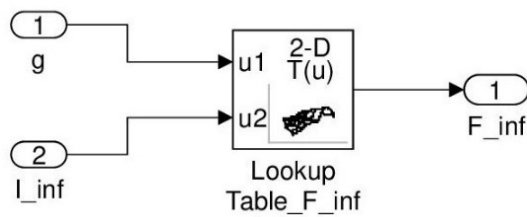


Figura 5.7: Sottosistema “Forza cuscinetto inferiore”

5.5 Controllo PID

Per i controlli industriali si fa largo utilizzo di controllori PID, in quanto hanno caratteristiche che li rendono adatti all'ambiente di lavoro e non solo:

- Sono in grado di regolare un'ampia gamma di processi;
- Sono semplici da tarare;
- Hanno un buon rapporto efficacia/prezzo;
- Sono robusti e affidabili;

La forma base del controllore comprende la somma di tre termini che sviluppano azioni diverse: azione proporzionale, azione integrale e azione derivativa.

$$u(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (5.24)$$

La (5.24) indica l'equazione del controllore PID in termini di trasformata di Laplace. Per meglio comprendere l'azione di controllo si fa ora un accenno al funzionamento dei singoli termini.

L'azione proporzionale lega il segnale d'ingresso con quello d'uscita attraverso una costante K_P , che prende il nome di guadagno proporzionale. Si tratta quindi di una regolazione molto semplice, effettua una correzione proporzionale dell'errore. Al crescere del fattore K_P la velocità di risposta del sistema migliora, si elimina più velocemente l'errore, ma può portare a delle instabilità con oscillazioni.

L'azione integrale invece, da un contributo proporzionale all'integrale dell'errore; la sua costante K_I è definita da:

$$K_I = \frac{K_P}{T_I} \quad (5.25)$$

L'uso dell'azione integrale, è necessario se si vuole eliminare l'errore a regime che deriva dal solo utilizzo dell'azione proporzionale. Il valore di questo, crescerà fintanto che rileva una differenza tra l'ingresso e l'uscita positiva, mentre diminuirà se è negativa.

L'effetto dell'integrazione dipende dalla costante di tempo T_I , infatti si avrà una maggiore efficacia con costanti di tempo ridotte. È necessario però non elevare troppo l'azione integrale, perché è vero che il sistema risponde più velocemente, ma si possono verificare delle forti oscillazioni che richiedono del tempo per smorzarsi.

L'ultima azione è quella derivativa, che fornisce la derivata dell'errore e la sua costante viene definita da:

$$K_D = K_P T_D \quad (5.26)$$

Sostanzialmente l'azione derivativa tiene conto di quanto rapidamente varia l'errore, e cerca di eliminarlo velocemente anticipando la futura azione correttiva. Quello che ne risulta in uscita è un aumento proporzionale alla velocità di variazione dell'ingresso.

La costante di tempo T_D regola la velocità di salita del segnale, e riduce quindi le oscillazioni del segnale.

Nel caso in questione si è scelto di controllare gli anelli di corrente con una configurazione tipo PI, mentre per il traferro un PID.

I valori di taratura scelti sono riportati nella tabella

| | PID | PI superiore | PI inferiore |
|----|-------|--------------|--------------|
| Kp | 30000 | 1 | 1 |
| Ki | 30000 | 0,1 | 0,25 |
| Kd | 4000 | | |

Tabella 5.4: Valori di taratura per i controllori.

Per la taratura esistono diversi metodi, tuttavia non sempre sono applicabili. Data l'elevata non linearità del sistema simulato, in questo caso conviene andare per tentativi, prima si tarano gli anelli di corrente e poi il controllo di traferro, il tutto senza mai inserire l'integratore anti wind-up.

Per gli anelli di corrente conviene testare il sistema a parte, quindi verificando che a un ingresso a gradino la corrente in uscita raggiunga il valore dell'ingresso.

Una volta tarati i PI degli anelli di corrente si passa al controllo di traferro. Si è operato con la medesima tecnica per il controllo di traferro, partendo però con dei valori delle costanti iniziali ricavate con una procedura implementata nel software.

In figura 5.8 viene riportato il valore di traferro a seguito di un disturbo a gradino sulla forza verticale, senza la costante integrativa e l'integratore anti wind-up inseriti.

Per analizzare l'effetto delle singole componenti del regolatore del traferro si è considerata una forza a gradino pari a -50 N (l'equivalente di circa 5 kg in più sulla massa rotante), che crea una evoluzione positiva del traferro. Il maggiore peso fa allontanare la massa dai cuscinetti superiori, e poi si stabilizza.

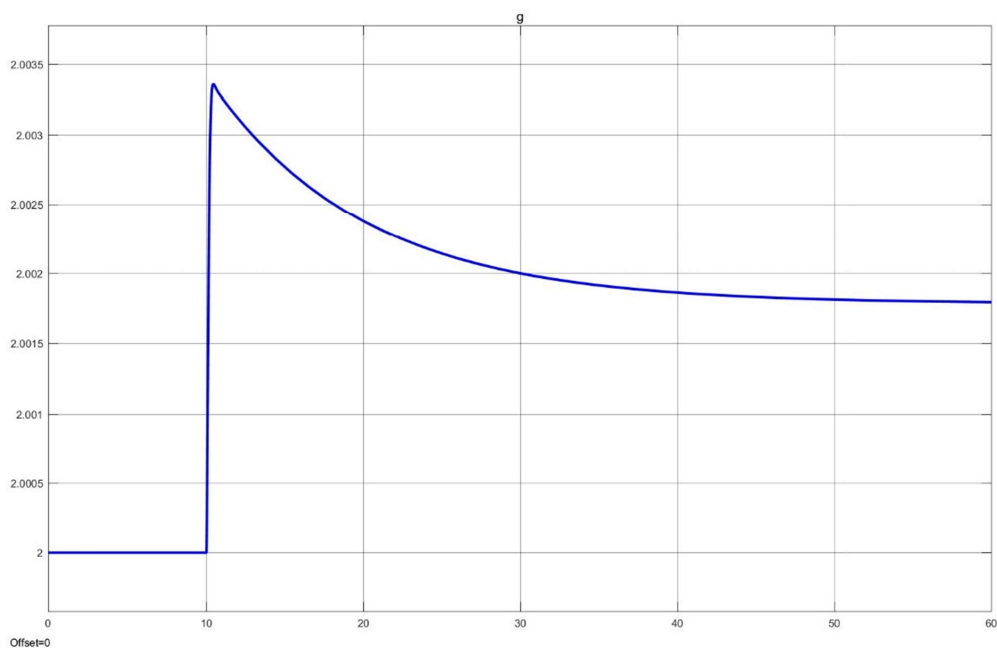


Figura 5.8: Andamento di traferro g [mm] senza l'azione correttiva dell'integrale da parte del controllo.

Quello che si vuole invece, è fare in modo che il disco torni nella posizione iniziale, solo inserendo la parte integrale si ottiene l'andamento desiderato (Figura 5.9).

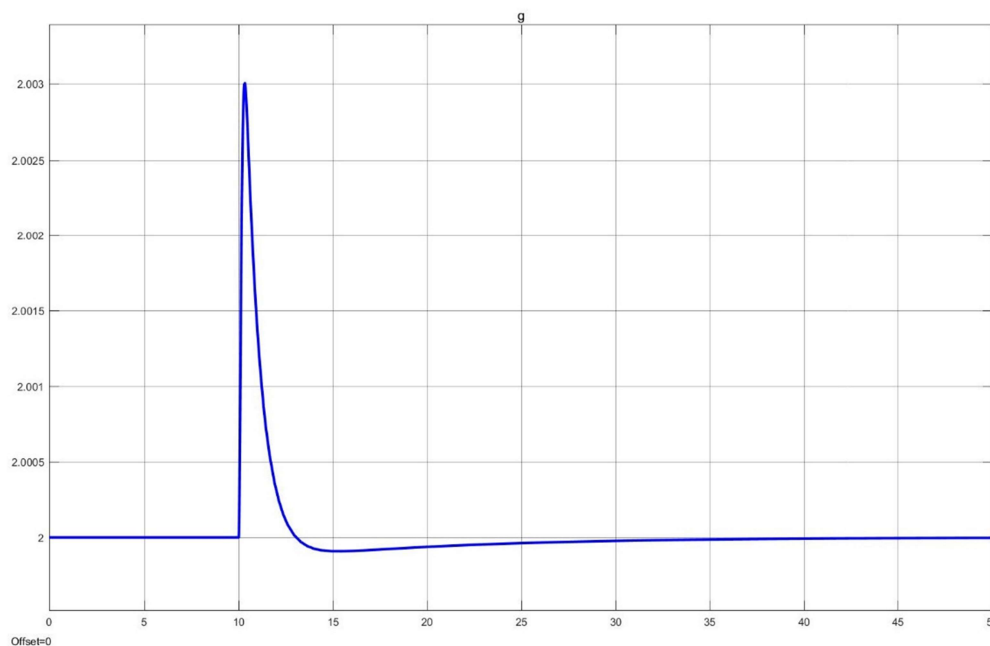


Figura 5.9: Andamento di traferro g [mm] con controllo PID inserito.

In questo modo si è ottenuto l'effetto desiderato, riportando il traferro al valore di riferimento. Evidentemente non basta ottenere la stabilizzazione del sistema senza rispettare le necessarie tolleranze tra volano e cuscinetto. Quindi è necessario che l'azione sia abbastanza rapida per limitare 'overshoot' e sia in grado di smorzare eventuali oscillazioni per limitare anche l'assorbimento di corrente dei cuscinetti.

Con questa configurazione per mantenere il volano alla quota di riferimento, mantenendo applicato il disturbo, deve essere mantenuta una corrente negli avvolgimenti (vedi figura 5.10) affinché gli elettromagneti producano la forza addizionale richiesta.

In termini di efficienza, questo comportamento penalizza eccessivamente il sistema di accumulo, tanto più che le perdite sarebbero presenti anche in assenza di azione di carica/scarica da parte del volano.

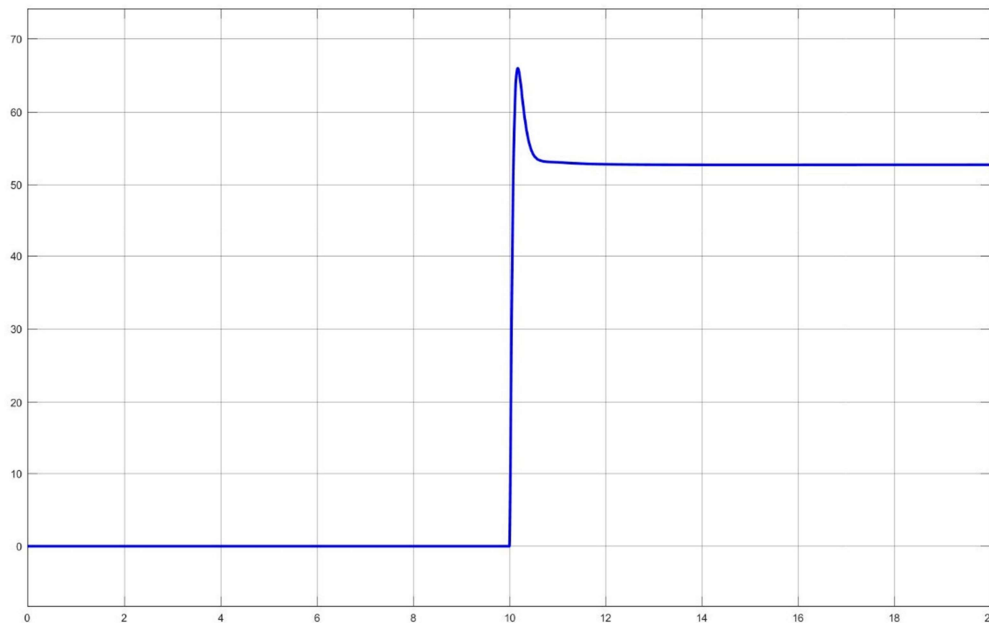


Figura 5.10: Corrente [As] avvolgimento superiore senza anti wind-up inserito.

Questo problema può essere superato attraverso una ridefinizione del riferimento del traferro (compatibile con le tolleranze meccaniche previste) che consenta di raggiungere una posizione stabile sfruttando la sola azione del magnete.

5.6 Integratore anti wind-up

L'integratore anti wind-up nasce per una questione di efficienza, perché il volano risulterebbe perfettamente stabilizzato anche senza questo controllo. Lo scopo di questa soluzione è di azzerare le correnti negli avvolgimenti per limitare il consumo energetico.

Si può pensare che difficilmente nella realtà esisterà un disturbo costante, ma invece può essere semplicemente una variazione di massa del disco, per usura o per una non perfetta fabbricazione.

La soluzione quindi è usare un sistema che cerchi di modificare il riferimento di traferro g perché, come visto nel capitolo 4, la forza del magnete permanente varia con il valore di traferro. Se ad esempio la massa del disco dovesse risultare maggiore, allora il riferimento di traferro dovrà tendere a valori inferiori ove la forza del magnete è maggiore e in grado di autosostenere la massa rotante. Allo stesso modo se il peso è inferiore si deve allontanare dal magnete.

Per ottenere la variazione di traferro, si inseriscono due controlli integrativi che rilevano il passaggio di una corrente nel rispettivo avvolgimento, e in uscita forniscono la correzione del riferimento di traferro (Figura 5.11). Il controllore agisce separatamente sui due rami viste le diverse caratteristiche elettriche dei due circuiti ed i diversi valori di corrente richiesti a parità di variazione di traferro.

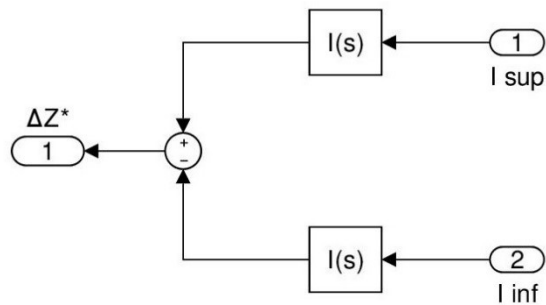


Figura 5.11: Sottosistema “Integratore anti wind-up”

Per capire meglio la funzione di questo controllo si prende come esempio la variazione di forza a gradino esaminata in 5.5. L’andamento della corrente nell’avvolgimento superiore, con l’integratore anti wind-up inserito, non rimane più costante come in Figura 5.10 ma diminuisce fino ad azzerarsi (Figura 5.12).

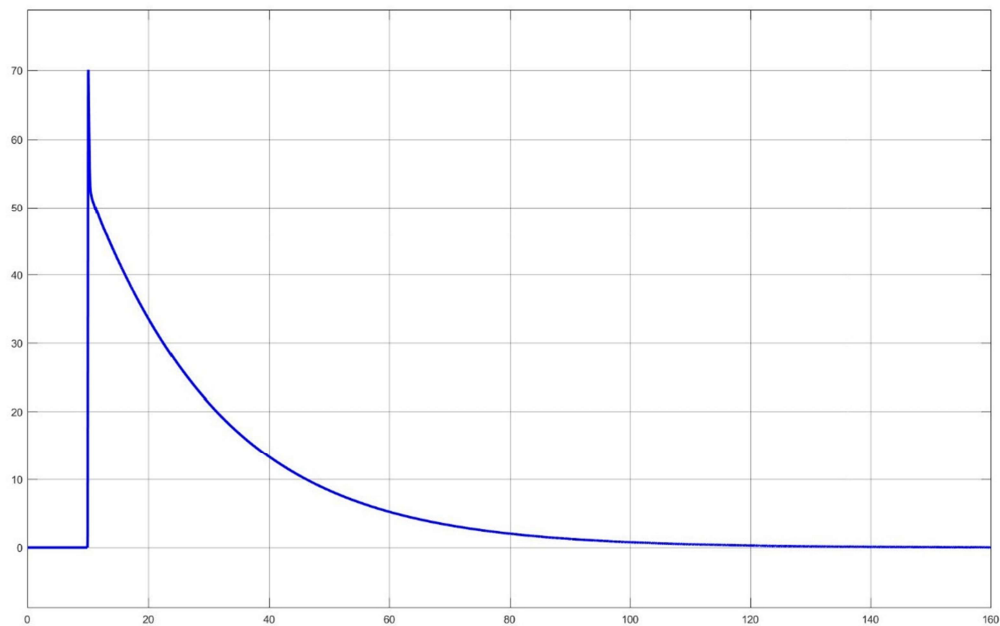


Figura 5.12: Corrente [As] avvolgimento superiore con anti wind-up inserito.

Il picco di corrente è visibile in Figura 5.13, e lo si raggiunge in 133 msec. Tale azione è necessaria per ottenere una risposta rapida alla variazione di traferro prodotta dal disturbo ed evitare quindi l’insorgere di condizioni di instabilità, come evidenziato nelle Figure 5.14 e 5.15.

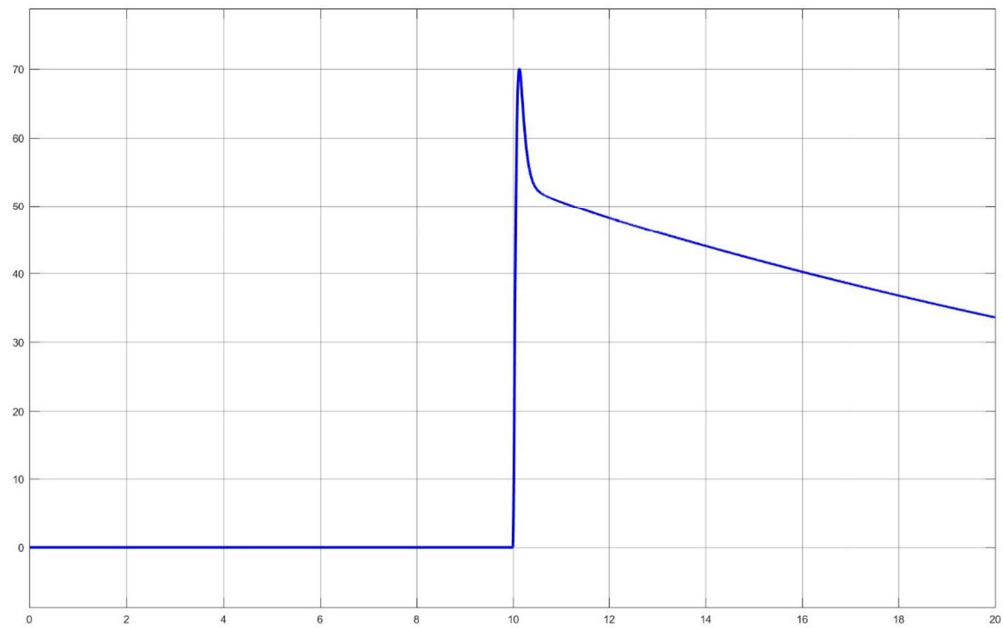


Figura 5.13: Particolare dei primi istanti, dall'applicazione della forza di disturbo, del picco di corrente [As] raggiunto dall'avvolgimento superiore.

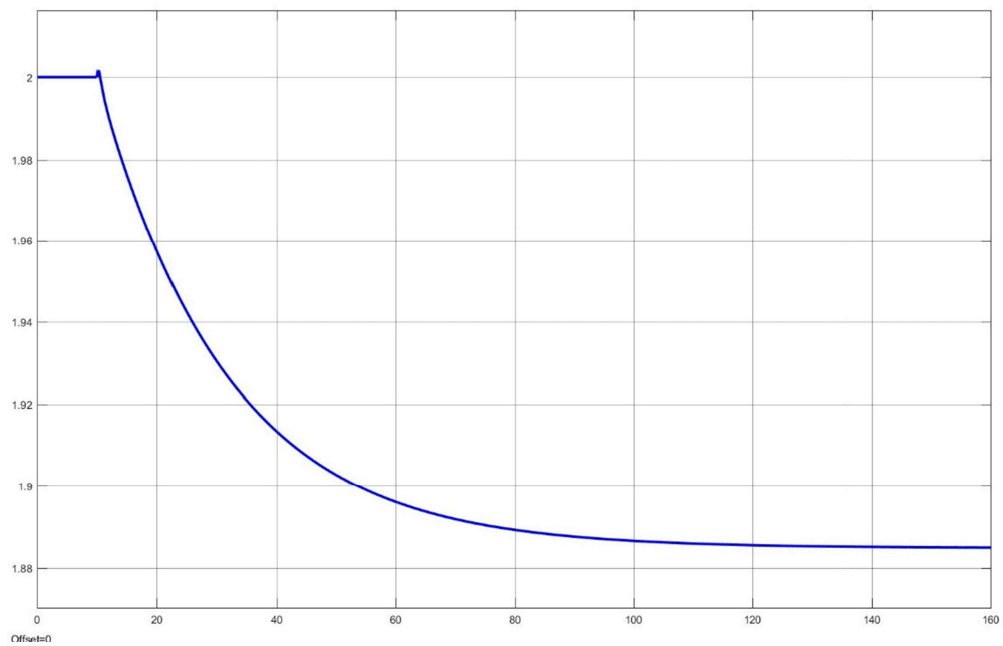


Figura 5.14: Andamento di traferro g [mm] con controllo anti wind-up inserito.

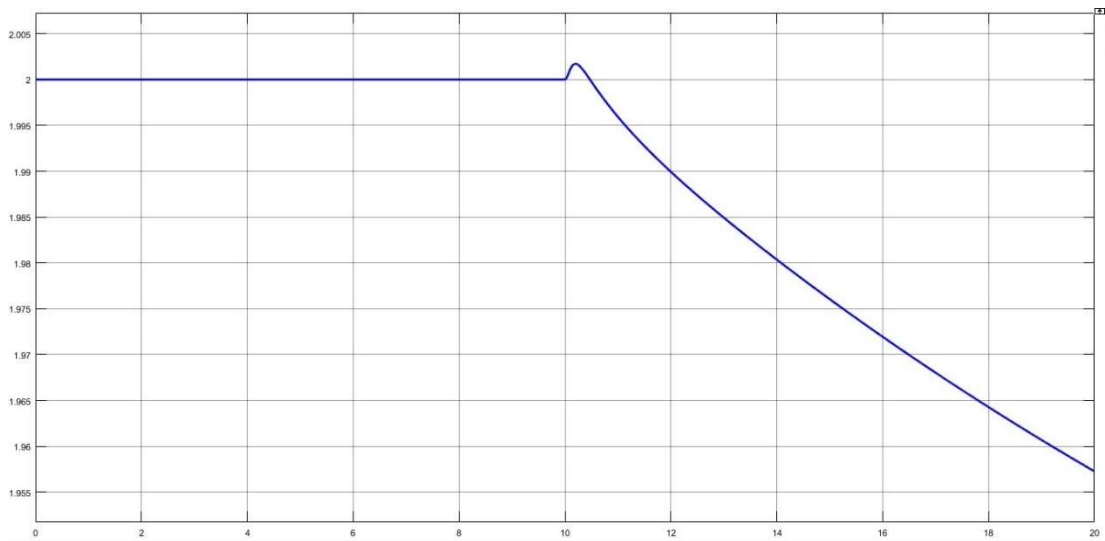


Figura 5.15: Particolare dei primi istanti, dall'applicazione della forza di disturbo, del valore di traferro g [mm].

In particolare la Figura 5.15 mostra che nei primi istanti il traferro tende ad aumentare, successivamente risente dell'azione di controllo PID che ristabilisce il valore di 2 mm e infine l'intervento del controllo anti wind-up che porta a una diminuzione del suo valore.

I valori utilizzati per gli integratori anti wind-up sono molto bassi, per evitare oscillazioni a regime, quello dell'avvolgimento superiore ha una costante di tempo pari a 0.0001, mentre quello inferiore 0.00005.

6 Test e valutazioni finali

Per verificare l'adeguatezza e le prestazioni del sistema di controllo, si è studiato il comportamento a seguito di variazioni di temperatura, presenza di una forza a gradino o di una variazione di traferro indotta da variazioni di posizione della struttura fissa, quest'ultima causata ad esempio da un evento sismico.

6.1 Comportamento alle variazioni di temperatura

Cercando di rispecchiare gli eventi che possono realmente accadere durante un normale funzionamento del sistema, si eseguono due diverse prove.

La prima consiste nel settare il sistema alla temperatura massima presupponendo, che nella realtà, la macchina elettrica sia sollecitata da continui cicli e perciò ha elevato la temperatura dei cuscinetti magnetici. Se nell'arco di un certo tempo il numero di cicli di carica/scarica diminuisce, allora la temperatura tende ad abbassarsi. Si implementa quindi una funzione temperatura che sia 80°C a inizio prova, e che nell'arco di 300 secondi (5 minuti) scenda a rampa fino a 20°C. Alla temperatura massima il valore di traferro è stabile al riferimento di 2 mm successivamente, quando la temperatura diminuisce, il valore di forza sviluppata dal cuscinetto magnetico superiore aumenta. Il controllo quindi reagisce cercando di allontanare la massa rotante dal magnete, assestandola a un valore di traferro pari a 2.367 mm (Figura 6.1).

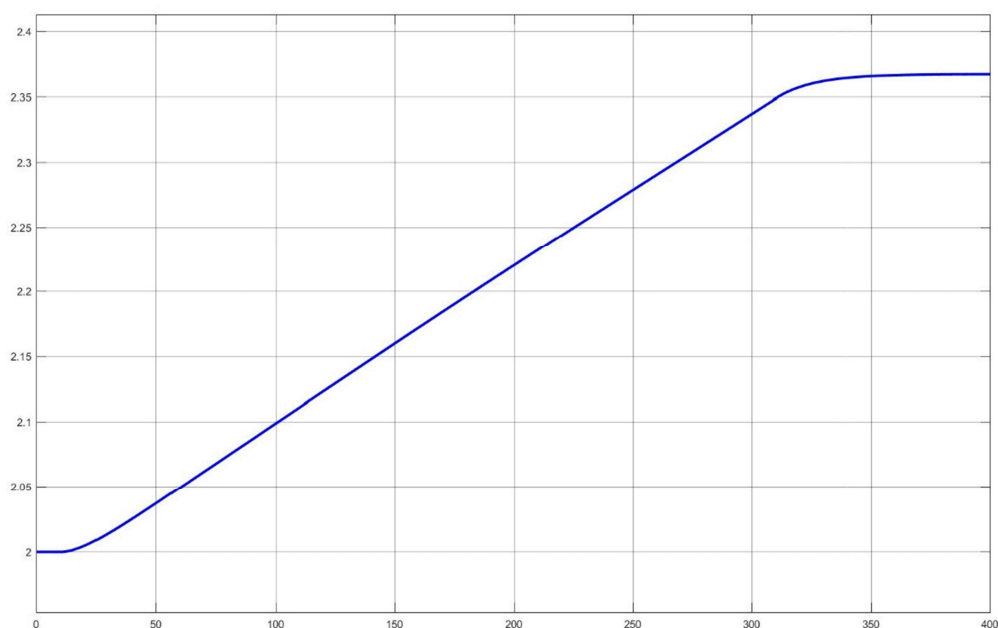


Figura 6.1: Andamento del valore di traferro g [mm] al variare della temperatura con una rampa di 300 sec da 80°C a 20°C.

Allo stesso modo si conduce la prova partendo dalla temperatura minima (20°C) e si ipotizza che la macchina elettrica, a causa di continui cicli di carica/scarica, porti la temperatura a salire a rampa fino a 80°C. Si mantiene sempre un intervallo di 300 secondi e si verifica l'evoluzione del valore di traferro che deve, in questo caso, diminuire (Figura 6.2).

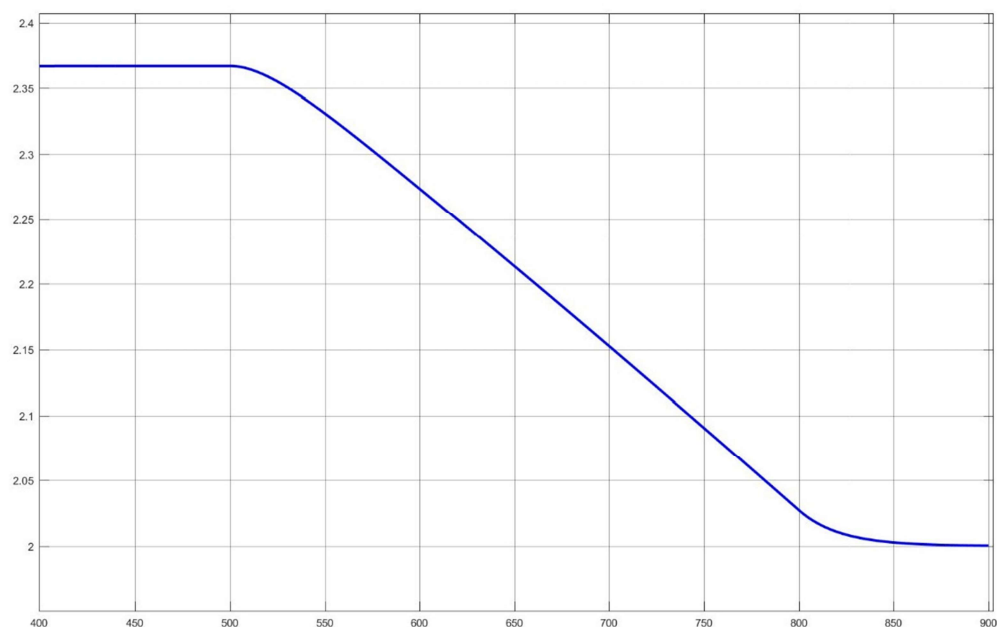


Figura 6.2: Andamento del valore di traferro g [mm] al variare della temperatura con una rampa di 300 sec da 20°C a 80°C.

Si nota come il sistema risponde bene alle variazioni di temperatura, posizionandosi al valore di traferro che permette di azzerare la corrente negli avvolgimenti.

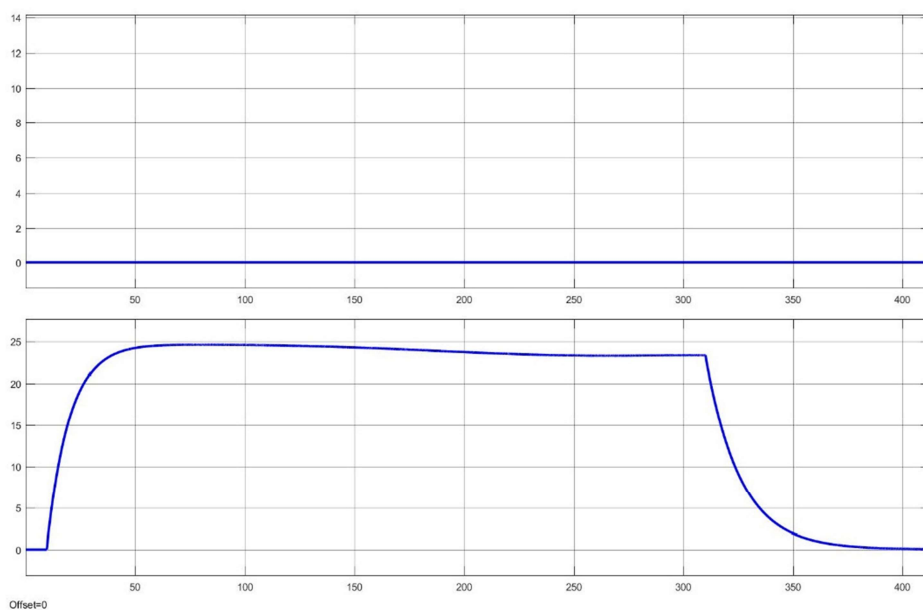


Figura 6.3: Andamenti delle correnti [As] negli avvolgimenti, rispettivamente superiore e inferiore, nel transitorio di temperatura da 80°C a 20°C.

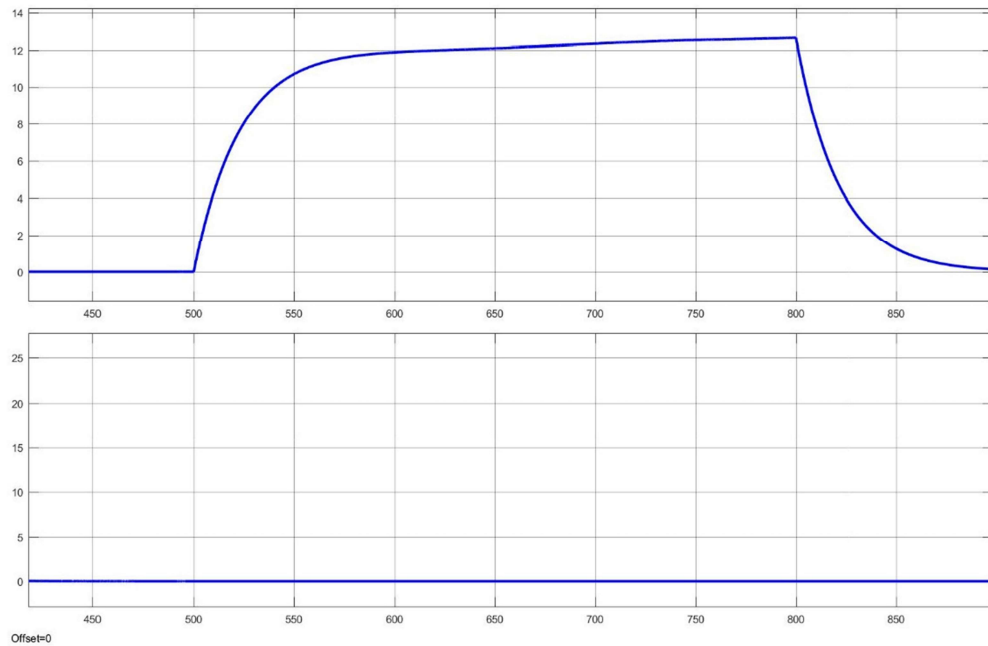


Figura 6.4: Andamenti delle correnti [As] negli avvolgimenti, rispettivamente superiore e inferiore, nel transitorio di temperatura da 80°C a 20°C.

Si possono verificare gli andamenti delle correnti negli avvolgimenti dalle Figure 6.3 e 6.4, si nota che la dinamica lenta permette di iniettare corrente in uno solo dei due avvolgimenti senza avere valori di picco elevati.

6.2 Comportamento alle forze di disturbo

Una parte di questo capitolo si è già introdotta in 5.6, si tratta ora di vedere gli andamenti del traferro con forze di disturbo contrarie alla forza peso, in modo da verificare anche il comportamento dell'avvolgimento inferiore.

La prova prevede di inserire una forza di disturbo a gradino, pari a 50 N, e monitorare gli andamenti del traferro e delle correnti, alla temperatura massima di 80°C.

Si nota in Figura 6.6, come già visto in 5.6, l'intervento nei primi istanti del disturbo del controllo di traferro che riporta al valore di riferimento la massa rotante, successivamente l'intervento dell'anti wind-up modifica il riferimento e azzerava le correnti nell'avvolgimento (Figura 6.7).

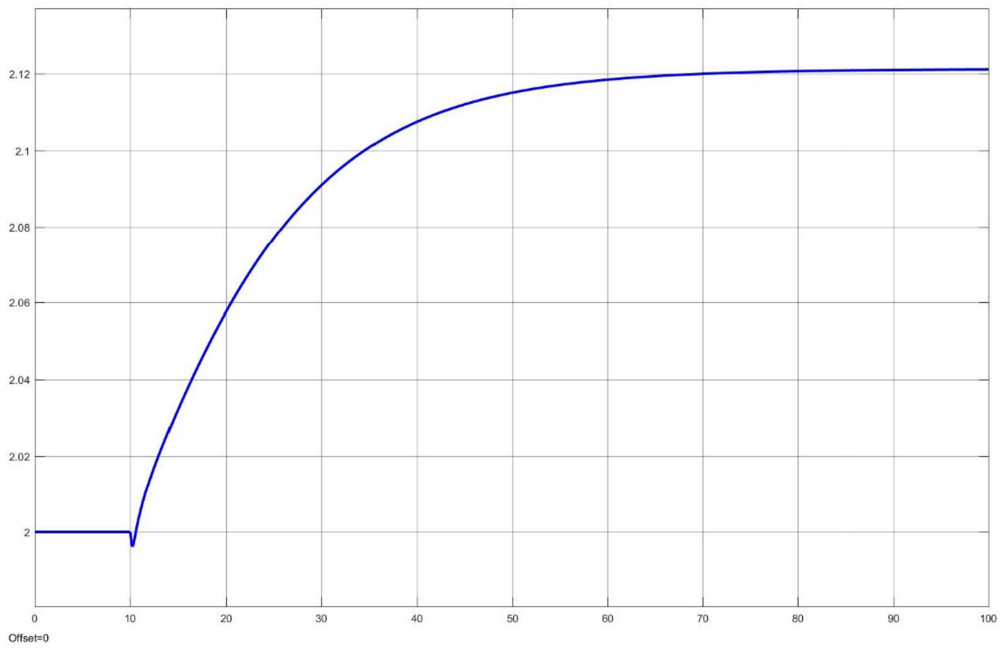


Figura 6.5: Variazione di traferro g [mm] a seguito di una forza di disturbo pari a 50 N.

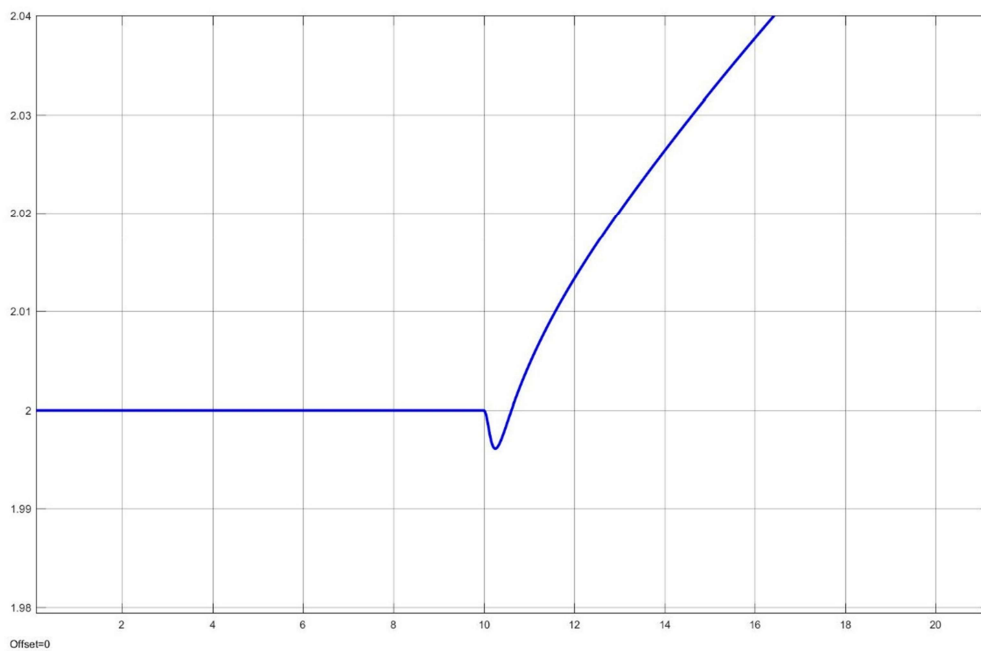


Figura 6.6: Particolare della variazione di traferro g [mm] nei primi istanti dall'applicazione del disturbo

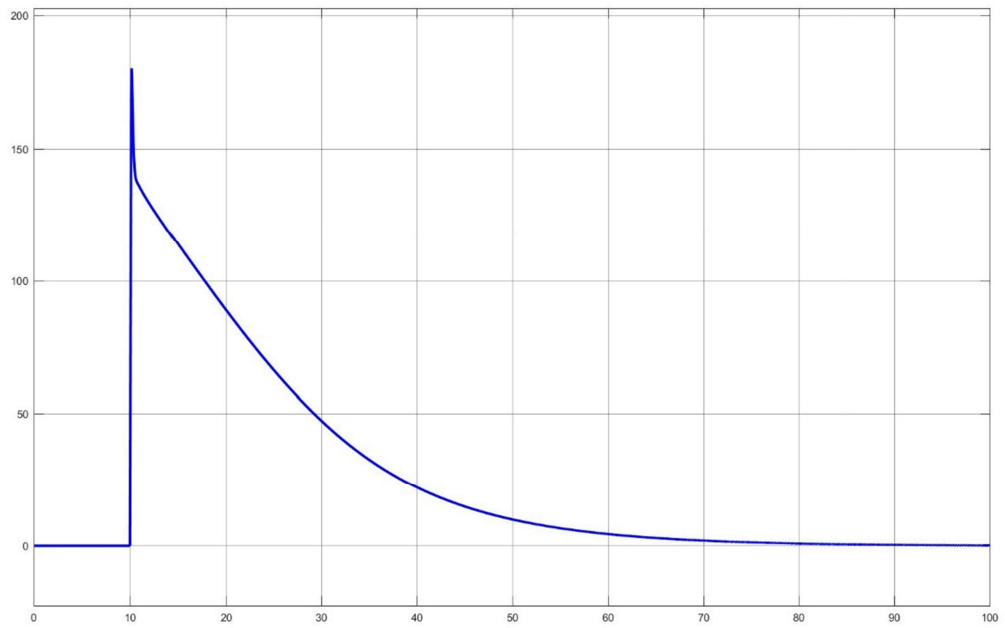


Figura 6.7: Andamento della corrente [As] nell'avvolgimento inferiore.

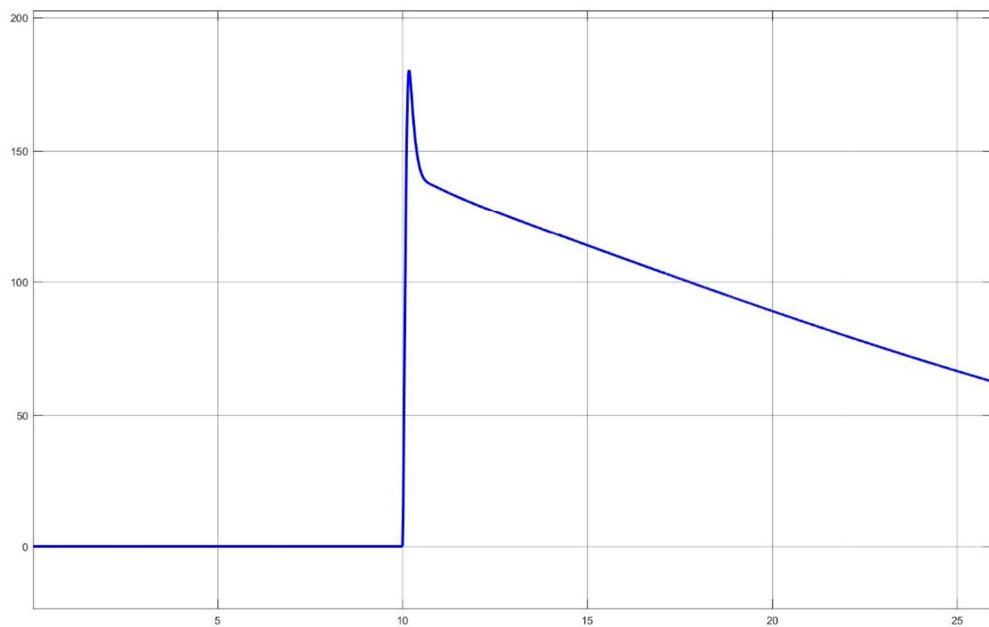


Figura 6.8: Particolare della variazione di corrente [As] nei primi istanti dall'applicazione del disturbo.

6.3 Comportamento ai disturbi di traferro

Quest'altra prova consiste nel far variare il valore di traferro a gradino, e di controllare che il sistema sia in grado di ristabilire il valore di riferimento.

Si eseguono due prove, una con variazione pari a 0.5 mm e una con -0.5 mm.

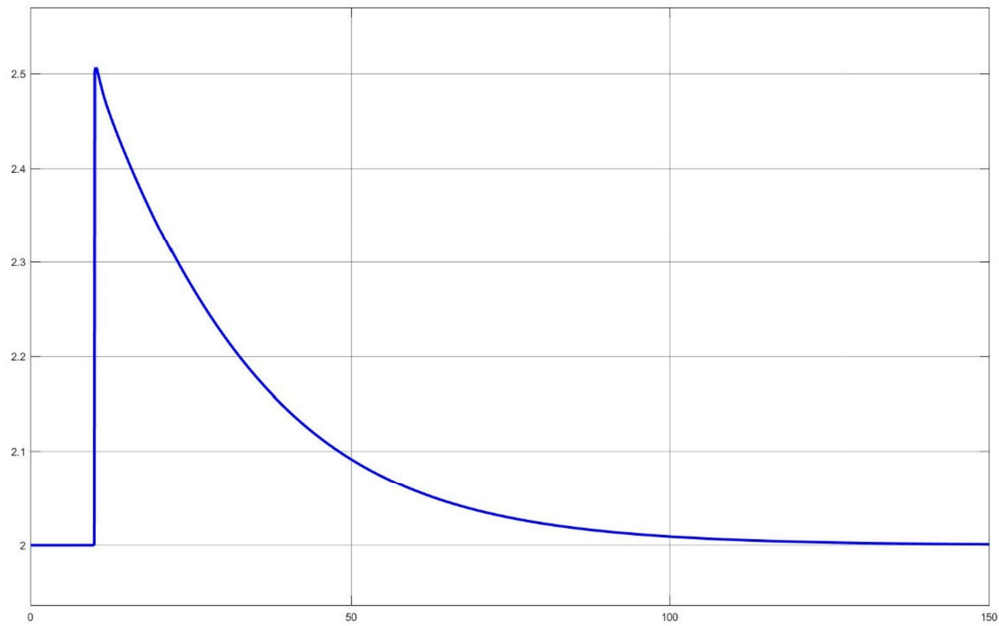


Figura 6.9: Variazione di traferro g [mm] a seguito di un disturbo pari a 0.5 mm.

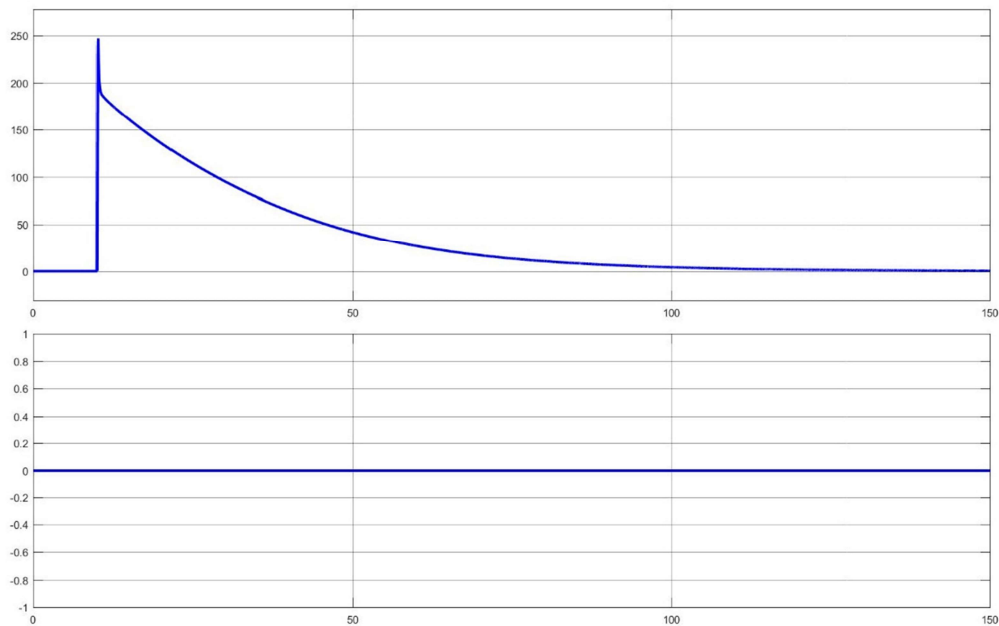


Figura 6.10: Variazione di corrente nell'avvolgimento [As], rispettivamente, superiore e inferiore a seguito di un disturbo di traferro pari a 0.5 mm.

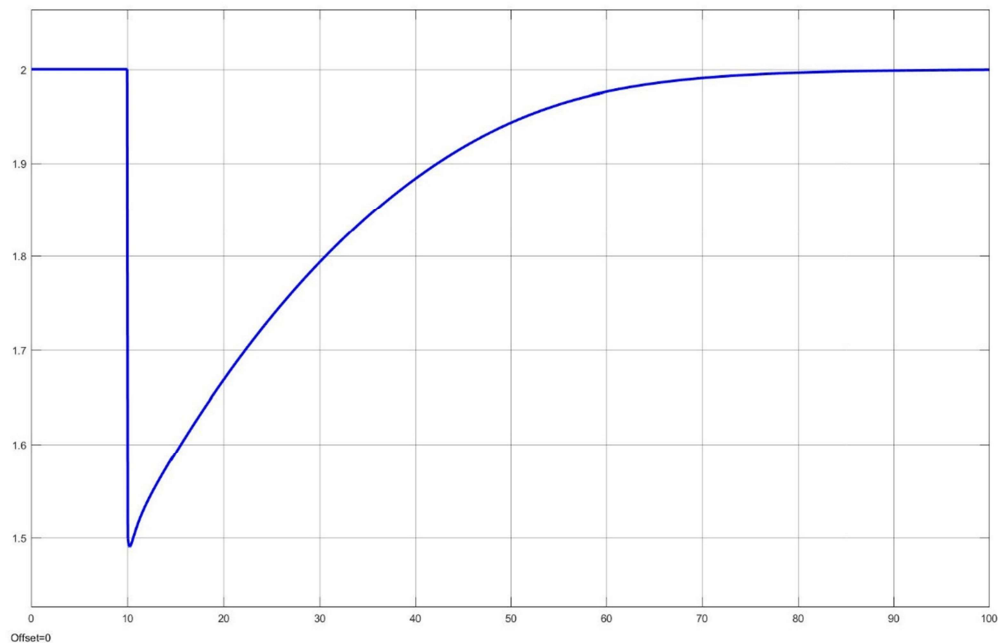


Figura 6.11: Variazione di traferro g [mm] a seguito di un disturbo pari a -0.5 mm.

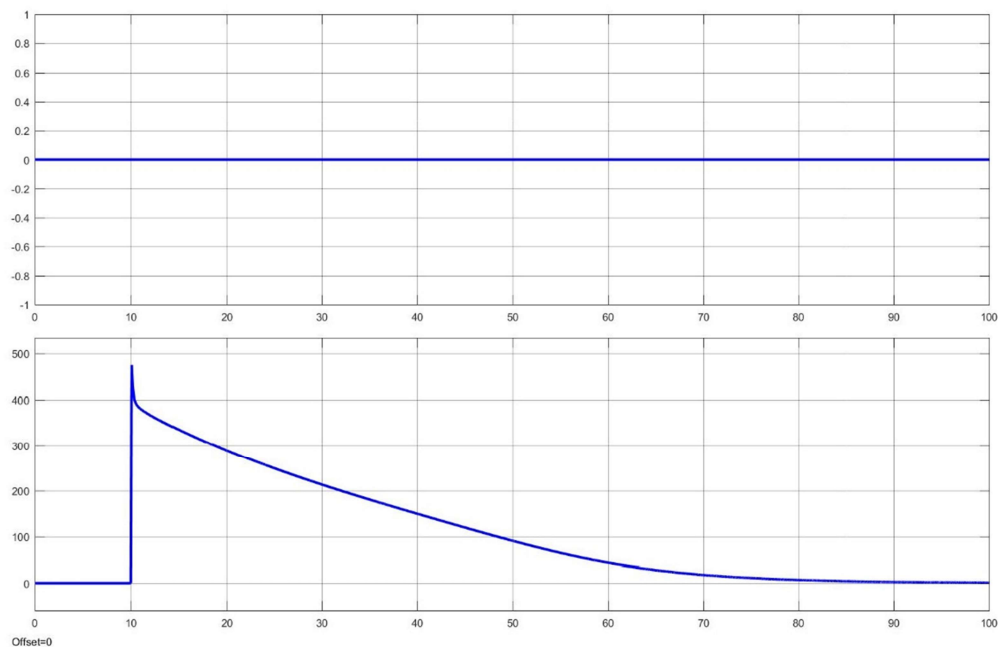


Figura 6.12: Variazione di corrente nell'avvolgimento [As], rispettivamente, superiore e inferiore a seguito di un disturbo di traferro pari a -0.5 mm.

In entrambi i casi il controllo ripristina il valore di traferro con una dinamica lenta, che assicura l'intervento di uno solo dei due cuscinetti.

6.3 Comportamento in caso di terremoto

Quest'ultimo test verifica che il sistema di controllo sia in grado di mantenere stabile la massa rotante, anche in caso di oscillazioni dovute a un sisma.

Il sisma provoca una oscillazione verticale dell'involucro esterno producendo una variazione di posizione relativa (e quindi di traferro) rispetto alla massa rotante.

I dati che si utilizzano per testare il controllo sono quelli del sisma che ha colpito L'Aquila nel 2009, con una magnitudo di 6.3 Richter.

Si deve quindi verificare che il controllo progettato non amplifichi le oscillazioni del sisma sulla massa rotante, e che infine ristabilisca il valore di traferro.

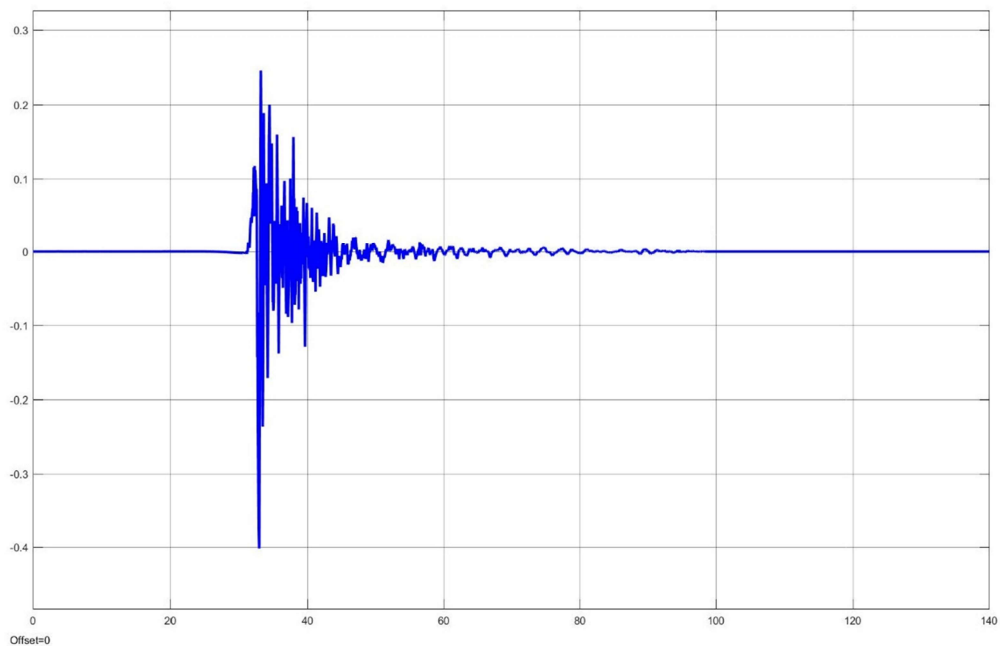


Figura 6.13: Valori di velocità [m/s] rilevati dai sismografi.

A fronte del disturbo di Figura 6.13 il sistema risponde con una variazione di traferro visibile in Figura 6.14.

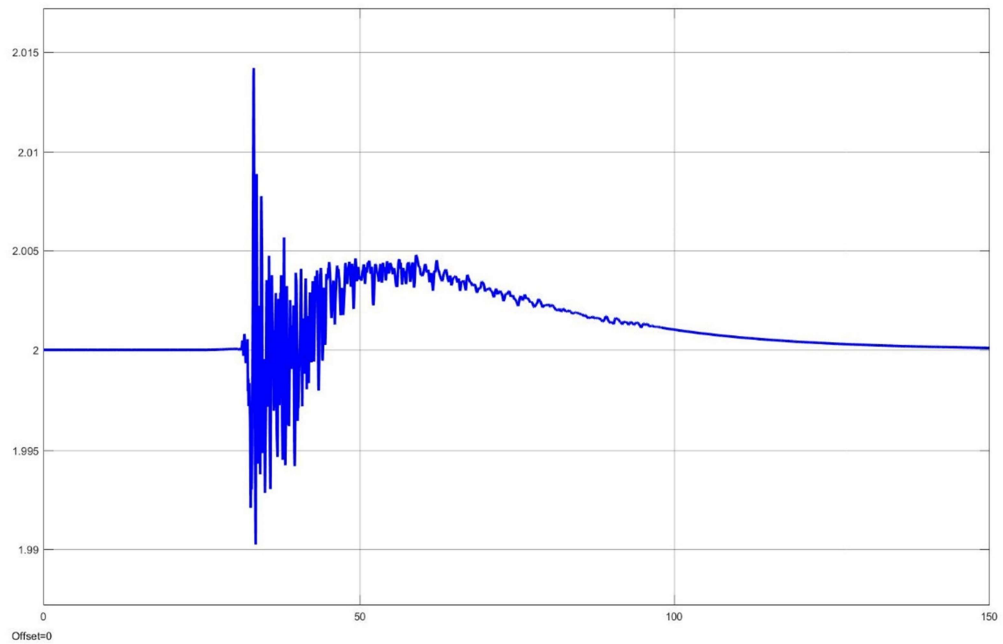


Figura 6.14: Variazione di traferro g [mm] a seguito del sisma.

Si nota come il controllo sia in grado di ristabilire la posizione della massa senza eccessivi spostamenti (Figura 6.14). Le correnti in questo caso circolano, inevitabilmente, in entrambi gli avvolgimenti come si può vedere in Figura 6.15.

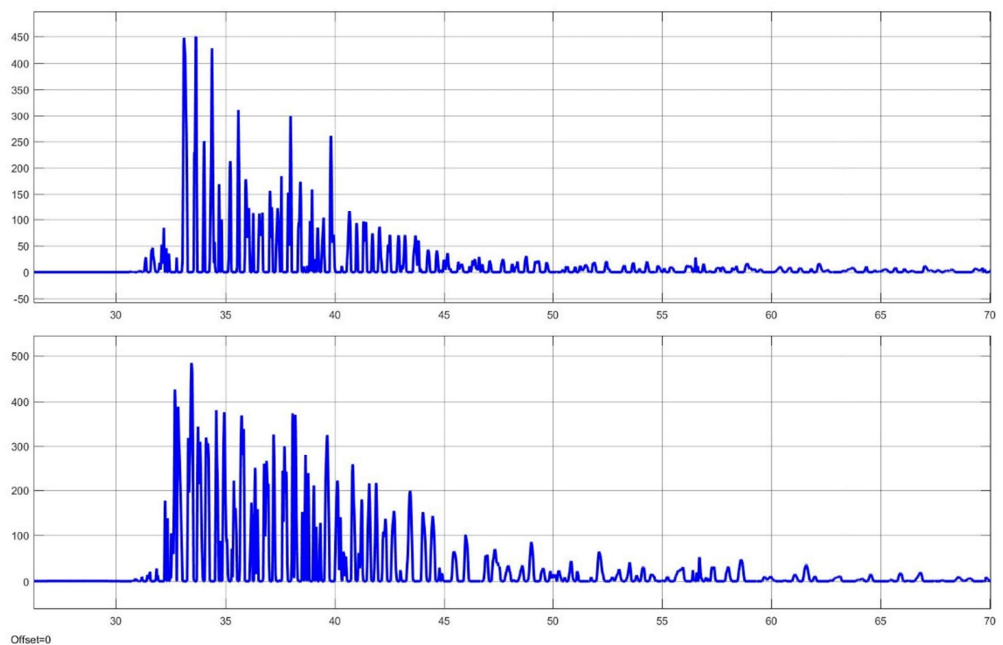


Figura 6.15: Variazione di corrente nell'avvolgimento [As], rispettivamente, superiore e inferiore a seguito del sisma.

7 Conclusioni

Si è visto come si renda necessario l'accumulo di energia elettrica per limitare l'impatto delle FRNP sulla rete. Tuttavia ancora oggi non ci sono delle linee guida in materia e nemmeno un meccanismo incentivante, che porterebbero una maggiore diffusione di sistemi di accumulo e soprattutto un abbattimento dei costi di produzione, che per l'accumulo cinetico è un punto cardine.

Con questo elaborato si è ottenuto un modello matematico di una sospensione magnetica ibrida, che tiene conto degli effetti di saturazione e variazione di temperatura. Inoltre si è implementato il modello del circuito di alimentazione e un sistema che è in grado di annullare le correnti a regime per ridurre le perdite di energia.

I risultati ottenuti sono il recupero della posizione di riferimento, e l'annullamento della corrente di avvolgimento limitando le oscillazioni di traferro.

I possibili sviluppi futuri riguardano un miglioramento dei tempi di intervento del sistema anti wind-up, l'implementazione di un modello del convertitore di alimentazione degli avvolgimenti e l'integrazione di un sistema di controllo radiale.

Bibliografia

- [1] «L'impatto delle FER nelle strategie di gestione del Sistema Elettrico Nazionale. Il caso della Sicilia,» L'Energia Elettrica, pp. 21-28, Gennaio-Febbraio 2014.
- [2] G. Testolin, «Controllori PID e tecniche "anti wind-up",» Tesi di laurea.
- [3] DOE Global Energy Storage Database, «Global project installation over time,» 2016. [Online]. Available: www.energystorageexchange.org.
- [4] «L'accumulo di energia elettrica,» in RSEview Riflessioni sull'energia, Il Melograno Editore, 2011.
- [5] «Powerthru,» [Online]. Available: www.power-thru.com.
- [6] R. Ostergard, «Flywheel energy storage a conceptual study,» Uppsala Universitet, Uppsala, Dicembre 2011.
- [7] OECD, «Renewable energy,» 2015. [Online]. Available: <https://data.oecd.org/energy/renewable-energy.htm>.
- [8] D. Meneghel, «Regolatori PID: tecniche di sintesi e problematiche implementative,» Tesi di laurea, 2009/2010.
- [9] M. Andriollo, E. Scaldaferro e A. Tortella, «Design optimization of the magnetic suspension for a flywheel energy storage application,» IEEE, 2015.
- [10] H. Liu e J. Jiang, «Flywheel energy storage: An upswing technology for energy sustainability,» Elsevier, ScienceDirect, 2006.
- [11] «Le fonti rinnovabili in Sicilia: impatti sul mercato zonale e sulla gestione del sistema elettrico,» L'Energia Elettrica, pp. 59-69, Settembre-Ottobre 2014.
- [12] G. Genta, Kinetic energy storage: Theory and practice of advanced flywheel systems, Butterworth & Co., 1985.
- [13] R. Peña-Alzola, R. Sebastián, J. Quesada e A. Colmenar, «Review of flywheel based energy storage systems,» IEEE, 2011.
- [14] «Flywheels for Electric Utility,» Palo Alto, California, EPRI, 1999.
- [15] «E-storage: Shifting from cost to value,» 2016. [Online]. Available: www.worldenergy.org.
- [16] EPRI-DOE, Handbook of Energy Storage for Transmission and Distribution Application, 2003.
- [17] E. Scaldaferro, «Progettazione e controllo di un cuscinetto magnetico per sistemi a volano,» Università degli Studi di Padova, Tesi Magistrale, Anno Accademico 2014/2015.

- [18] M. I. Daoud, A. Abdel-Khalik, A. Massoud, S. Ahmed e N. H. Abbasy, «On the development of flywheel storage systems for power system applications: a survey,» IEEE, 2012.
- [19] B. Bolund, H. Bernhoff e M. Leijon, «Flywheel energy and power storage systems,» Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, 2006.
- [20] «Beacon Power,» [Online]. Available: <http://beaconpower.com/>.
- [21] «ActivePower,» [Online]. Available: www.activepower.com.
- [22] GME, «Esiti dei mercati e statistiche,» 2016. [Online]. Available: www.mercatoelettrico.org/It.
- [23] GSE, «Energia da fonti rinnovabili in Italia,» 2016. [Online]. Available: www.gse.it/it/Statistiche.
- [24] BP, «Statistical Review 2016,» 2016. [Online]. Available: www.bp.com.