



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Università degli Studi di Padova

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

Modello per l'analisi dinamica di un volano con sospensioni magnetiche

Coordinatore:
Ch.mo Prof. Mauro Andriollo

Candidato:
Leonardo Melia

Anno Accademico 2018-2019

*“Alla mia famiglia che mi ha sempre sostenuto”
Grazie*

Sommario

Nonostante la tecnologia di accumulo cinetico a volano da sempre usata fin da prima della rivoluzione industriale abbia avuto un declino con lo sviluppo della rete elettrica si sta ora riscoprendo competitiva in molte applicazioni grazie alle migliorie nel campo delle scienze dei materiali, nell'elettronica di potenza che deve interfacciare alla rete, grazie all'introduzione di macchine elettriche veloci e ai migliorati sistemi di sospensione magnetica che vanno a sostituire ove conveniente i cuscinetti meccanici. Sulla scia di quest'ultimo filone di ricerca, si vuole, con il presente elaborato, indagare un diverso approccio di controllo della stabilità di un volano tramite cuscinetti magnetici che sarà svolto su un caso di studio di bassa potenza. L'intera trattazione sperimentale studia il nucleo del sistema di controllo che tenta, per mezzo di un algoritmo implementato in matlab, di ricreare la risposta del cuscinetto magnetico, in termini di forze e momenti nelle tre dimensioni, alla diversa posizione e orientamento del volano rispetto al sistema stesso.

Indice

1	Introduzione	1
2	Accumulo a confronto e applicazioni volano	5
2.1	Considerazioni tecniche	5
2.1.1	Caratteristiche dei sistemi ad accumulo a volano e le applicazioni	17
2.2	Considerazioni economiche	18
2.2.1	Total Capital Cost (TCC)	18
2.2.2	Life Cycle Cost (LCC)	18
3	Accumulo cinetico: i volani	23
3.1	Struttura e componenti	23
3.1.1	Struttura di rotore e principio di funzionamento	24
3.1.2	Componente elettromeccanica	26
3.1.3	Convertitore elettronico di interfacciamento con la rete elettrica .	26
3.1.4	Cuscinetti	29
3.1.5	Involucro di contenimento	29
4	Approssimazione dell'analisi 3D tramite i risultati ottenuti con analisi 2D assialsimmetrica	31
4.1	Caratterizzazione del sistema e modelli FEM 2D e 3D	31
4.2	Modellazione spostamento orizzontale	33
4.3	Calcolo delle forze di traslazione orizzontale e verticale	35
4.4	Calcolo dei momenti	37
4.5	Risultati	40
5	Rifinitura del modello magnetico	45
5.1	Calcolo parametri del circuito equivalente magnetico	46
5.2	Calcolo del coefficiente k	49
5.2.1	Espressione del flusso per settore 2D	49
5.2.2	Espressione del flusso per settore 3D	49
5.2.3	Espressione del coefficiente e verifica	50
6	Affinamento modello: coefficienti correttivi del flusso	53
6.1	Calcolo parametri preliminari	54
6.2	Calcolo dei coefficienti	55
6.2.1	Espressioni dei flussi 2D per espansione interna ed esterna 3D . .	55
6.2.2	Espressioni del flusso 3D per settore interno ed esterno 3D	57
6.2.3	Coefficiente e verifica	57
6.3	Ulteriori considerazioni	58

7 Conclusioni	61
Bibliografia	63

Elenco delle figure

1.1	andamento della produzione degli impianti fotovoltaici Italiani durante l'anno 2017 [1]	2
1.2	deployment rate [4]	3
2.1	tecnologie d'accumulo [5]	6
2.2	ALCC of EES systems considerando 250 cicli per anno e 8h di tempo di scarica [9]	21
2.3	ALCC of EES systems considerando 400 cicli per anno e 2h di tempo di scarica [9]	21
2.4	ALCC of EES systems considerando 1000 cicli per anno e massimo 15min di tempo di scarica [9]	21
3.1	struttura e componenti di un sistema a volano [8]	24
3.2	volano cilindro cavo [8]	25
3.3	tipiche sezioni trasversali di volano [8]	25
3.4	sistemi PEI [13]	28
3.5	convertitore Z-source più DC-AC [13]	29
4.1	modello 2D assialsimmetrico. dimensioni in [mm]	32
4.2	sezione del modello 3D del volano	32
4.3	sistema di riferimento per i calcoli relativi alla traslazione	33
4.4	sistema di riferimento per i calcoli relativi alla traslazione	33
4.5	approssimazione del movimento di traslazione	34
4.6	schema delle configurazioni simulate nel modello 2D, variazione della traslazione radiale dr e del traferro g	35
4.7	forza verticale per settore di angolo infinitesimo $d\vartheta$: $c_1 = 414.7$, $c_2 = -0.647$, $c_3 = -151.3$, $c_4 = 0.24$ e $c_5 = 20.1$	36
4.8	forza orizzontale per settore di angolo infinitesimo $d\vartheta$: $c_1 = 0.529$, $c_2 = -3.49$, $c_3 = 0.586$, $c_4 = 0.651$ e $c_5 = -0.10$	36
4.9	sistema di riferimento per i calcoli relativi ai momenti delle forze	37
4.10	piano di rotazione	37
4.11	approssimazione dell'espansione inclinata del volano. Generico piano verticale di orientazione radiale (segmento AB in nero spostamento reale, A'B in verde traslazione approssimante)	38
4.12	sistema di riferimento per i calcoli relativi ai momenti delle forze. T_β e $T_{\beta\perp}$ T_{s_v} e T_{s_r} convenzioni adottate per i calcoli del momento	39
4.13	linee di campionamento delle pressioni magnetiche poste ogni 45° dell'angolo ϑ	40
4.14	diagramma delle pressioni lungo la lunghezza radiale dell'interfaccia per $\vartheta = 0^\circ$	42

4.15	diagramma delle pressioni lungo la lunghezza radiale dell'interfaccia per $\vartheta = 90^\circ$	43
4.16	diagramma delle pressioni lungo la lunghezza radiale dell'interfaccia per $\vartheta = 180^\circ$	43
5.1	circuito magnetico per settore di angolo infinitesimo $d\vartheta$	45
5.2	vista linee di flusso e linee di integrazione 2D	46
5.3	circuito magnetico 2D-3D. Nel modello 2D i parametri dr_s e g_s sono costanti con ϑ e le $\mathcal{R}_{\text{traf}_s}$ sono tutte uguali, diverse tra loro invece nel caso 3D variando in dipendenza degli stessi parametri	47
5.4	relazione quadratica forze e flussi e linea di tendenza passante per lo zero	47
5.5	diagramma delle pressioni lungo la lunghezza radiale dell'interfaccia per $\vartheta = 0^\circ$, $k = 1.201$ $k^2 = 1.44$	51
5.6	diagramma delle pressioni lungo la lunghezza radiale dell'interfaccia per $\vartheta = 90^\circ$, $k = 0.976$ $k^2 = 0.952$	51
5.7	diagramma delle pressioni lungo la lunghezza radiale dell'interfaccia per $\vartheta = 180^\circ$, $k = 0.847$ $k^2 = 0.717$	52
5.8	legame f-B verificato per $\vartheta = 0^\circ$	52
6.1	ripartizione approssimata dei flussi del capitolo scorso e ipotesi in cui potrebbe essere mantenuta tale a rigore	53
6.2	circuito 2D	55
6.3	circuiti magnetici	56
6.4	diagramma delle pressioni lungo la lunghezza radiale dell'interfaccia per $\vartheta = 0^\circ$, $k = 1.201$ $k^2 = 1.44$ (permeabilità del ferro elevata)	59
6.5	diagramma delle pressioni lungo la lunghezza radiale dell'interfaccia per $\vartheta = 180^\circ$, $k = 0.847$ $k^2 = 0.717$ (permeabilità del ferro elevata)	59
6.6	componente tangenziale dell'induzione nelle espansioni magnetiche della sospensione con $\mu = 100000$	60
6.7	componente tangenziale dell'induzione nelle espansioni magnetiche della sospensione con caratteristica B-H del materiale steel-1008	60

Capitolo 1

Introduzione

I sistemi di accumulo energetico (ESS¹) sono ormai essenziali nell'idea di rete elettrica che il futuro ci pone davanti e servono soprattutto come un utile strumento per bilanciare produzione e consumo di energia elettrica. Storicamente questo si è fatto con l'idroelettrico che agisce già a valle di una produzione di energia di base, programmata tramite la previsione delle curve di domanda e data dalle centrali termoelettriche poco flessibili alle richieste di cambio repentino di produzione. L'idroelettrico è fondamentale per la regolazione primaria e secondaria della frequenza oltre che essere essenziale in caso di black out per la riaccensione del sistema elettrico, ma ad oggi non basta. Ricordiamo che la rete elettrica era stata concepita inizialmente per un flusso di potenza unidirezionale dalle grandi centrali verso i consumatori. Negli ultimi anni invece è cresciuto notevolmente l'apporto di Generazione Distribuita che in larga parte comprende impianti a fonte energetica rinnovabile non programmabile perciò con la caratteristica dell'aleatorietà. Questo rende ancora più difficile il bilanciamento istantaneo di domanda e offerta perchè la produzione ottenibile da queste risorse varia molto anche con la stagionalità se non addirittura di giornata in giornata. Si veda a questo proposito la figura 1.1 nella pagina seguente che dimostra chiaramente la stagionalità della generazione da fotovoltaico in Italia.

L'accumulo viene in aiuto, permette cioè il disaccoppiamento della produzione di energia dal suo consumo con la ricaduta positiva più evidente nel time-shift ovvero lo spostamento nel tempo di una fetta della domanda di energia da quando essa è maggiore a quando è minore in modo da mantenere una produzione più regolare per cui si ottiene un beneficio economico. Ad esempio, può risultare economicamente vantaggioso sia a livello del singolo investitore sia del sistema finanziario complessivo accumulare energia quando il prezzo è basso perchè c'è meno richiesta e rivenderla quando è elevato [2]. Ciò ottimizza oltretutto l'assetto delle centrali termoelettriche che evitano di essere spente nei periodi di calo della domanda; magari dovuto proprio ad un picco di produzione da fonti rinnovabili. I driver per lo sviluppo della tecnologia d'accumulo non vengono tuttavia esclusivamente da interessi correlati alla rete ma possono interessare per esempio i fornitori di sistemi per la power quality come i produttori dei sistemi UPS o altri portatori di interesse come il mondo dei trasporti su rotaia e non solo. Pertanto per applicazioni diverse si impiegano le tecnologie di accumulo più adatte con caratteristiche diverse. Alcuni dei più importanti incentivi allo sviluppo della tecnologia di accumulo sono per esempio le richieste dal mondo dell'auto ibrida, che oltretutto nell'idea di smart grid (V2G) sarà integrata come risorsa quando collegata in rete [3] e l'interesse alle problematiche nella gestione dei picchi di domanda e picchi di generazio-

¹Energy Storage Systems

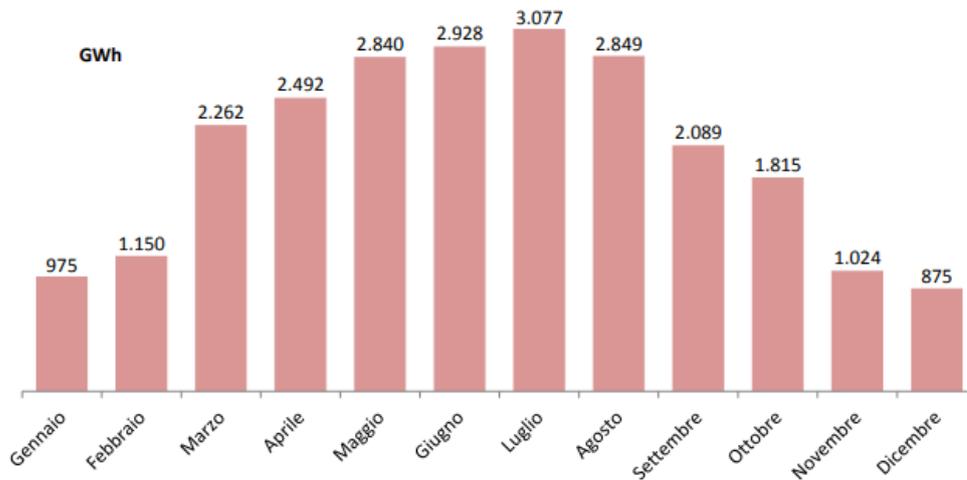


Figura 1.1: andamento della produzione degli impianti fotovoltaici Italiani durante l'anno 2017 [1]

ne nei programmi di demand response anche legate ai vincoli di capacità delle linee di trasmissione e legate al rischio finanziario di investire in nuova potenza di trasmissione unito alle sempre maggiori congestioni su alcune linee.

L'accumulo è inoltre incentivato dalle politiche per l'ambiente essendo indispensabile per usare al meglio le risorse di energia pulita che come già detto sono intermittenti e imprevedibili. Uno studio della International Energy Agency infatti ha presentato un suo Sustainable Development Scenario (SDS) completamente in linea con i target dell'accordo di Parigi i cui obiettivi sono di mantenere la crescita della media della temperatura mondiale sotto i 2°C rispetto ai livelli pre-industriali e impegnarsi a limitare l'aumento a 1,5°C. Per questo stima ogni anno, in termini di tecnologia implementata, quanto effettivamente il mondo segua il trend auspicato e riscontra nel suo ultimo report [4] che, esclusa la tecnologia di pompaggio idroelettrico (storicamente predominante e quanto mai matura), la restante parte di tecnologia di accumulo non ha subito una crescita nell'implementazione: un marcato rallentamento si è registrato tra gli anni 2016 e 2017 (pur verificandosi una cospicua riduzione del prezzo delle batterie ionilite) che invece è da scongiurare per il futuro in vista dell'obiettivo che vorrebbe un apporto di 80 GW di totale capacità di accumulo per il 2030 mostrato nella figura 1.2 nella pagina successiva.

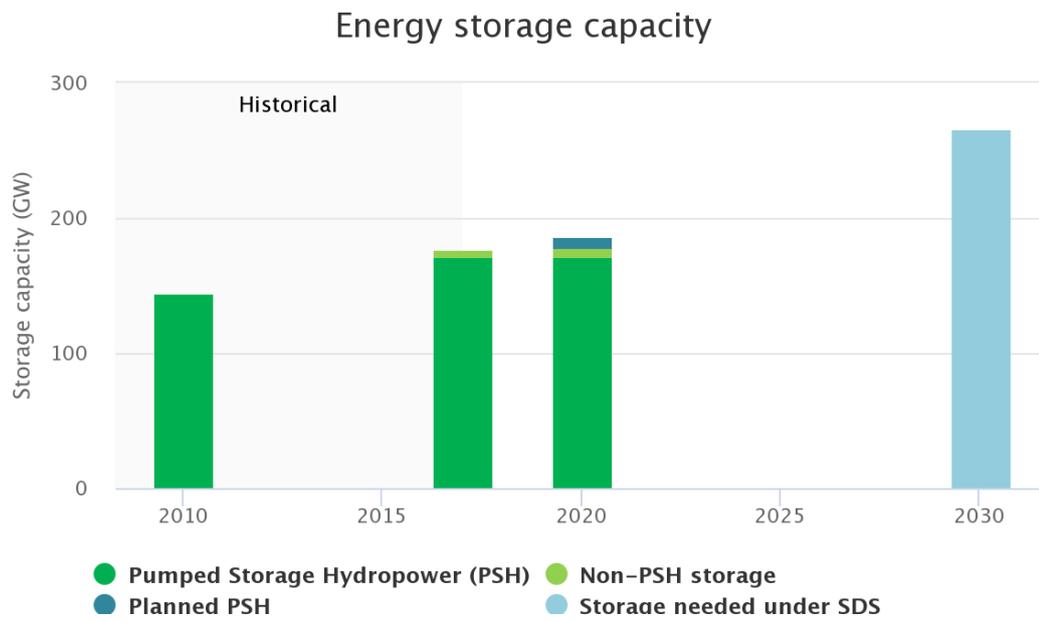


Figure 1.2: deployment rate [4]

Capitolo 2

Accumulo a confronto e applicazioni volano

2.1 Considerazioni tecniche

Nel panorama appena descritto appare evidente l'importanza dei sistemi di accumulo e le spinte molto forti che contribuiscono ad farne avanzare il progresso. In questo capitolo diamo un breve riepilogo sui diversi metodi di accumulo senza analizzarne le caratteristiche fisico-ingegneristiche ma facendo un più riassuntivo confronto dei parametri generali e passiamo poi a vedere dove la tecnologia volano sia stata implementata perchè competitiva. Si distinguono diverse tecnologie di accumulo raggruppabili in 5 macrocategorie: meccanica, termica, chimica, elettrochimica e elettrica. Ad oggi, come si è mostrato nell'introduzione, tuttavia la forma predominante è l'accumulo meccanico, che con il pompaggio idroelettrico (PHS) vede una percentuale di potenza installata in rete pari al 99% seguito dall'aria compressa (CAES) e batterie Ion-Li. Ora che andremo a confrontarle bisogna tenere in conto che tecnologie con alte perdite parassite come i volani e i supercondensatori tendono ad essere più utili per applicazioni in cui il tempo di carica-scarica è breve come nei servizi di power quality e regolazione dove si utilizzano a fronte delle loro migliori caratteristiche in densità di potenza. Se queste perdite sono ridotte (e.g. pompaggio idroelettrico) si possono considerare adatte ad un impiego per la gestione dell'energia a lungo termine con spostamenti di quantitativi energetici più dilazionati nel tempo. Ogni tecnologia infatti ha trovato il suo più appropriato contesto di utilizzo a seconda delle prestazioni più spiccate principalmente in densità di potenza e densità di energia, concetti che verranno affrontati in seguito. Se si vuole guardare a come vengono maggiormente sfruttate queste tecnologie o a come dovrebbero essere sfruttate, dato che diversi studi evidenziano ancora la difficoltà a effettuare un cambio di passo nell'implementazione sistematica di questa risorse, è d'obbligo riferirsi all'uso che se ne fa nel contesto della rete elettrica. Se ne è occupato già nel 2010 il dipartimento dell'energia americano (DOE) che, in uno studio [2] condotto per individuare benefici e potenziale di mercato di tale tecnologia, individua 17 applicazioni d'accumulo grid-related classificate nelle categorie Electric Supply, Ancillary Services, Grid System, End User/Utility Customer e Renewables Integration. Nelle tabelle 2.1 a pagina 7, 2.2 a pagina 8 e 2.3 a pagina 9, corrispondentemente ad ogni applicazione sono stati evidenziati dei valori standard intrinseci richiesti per potenza e la durata di scarica: due parametri chiave che aiutano a comprendere qual è la tecnologia meglio compatibile a seconda della circostanza. Le tabelle sono anche fornite di nota¹ che spiega brevemente

¹Nelle tabelle si fa riferimento a ISO: Independent System Operator

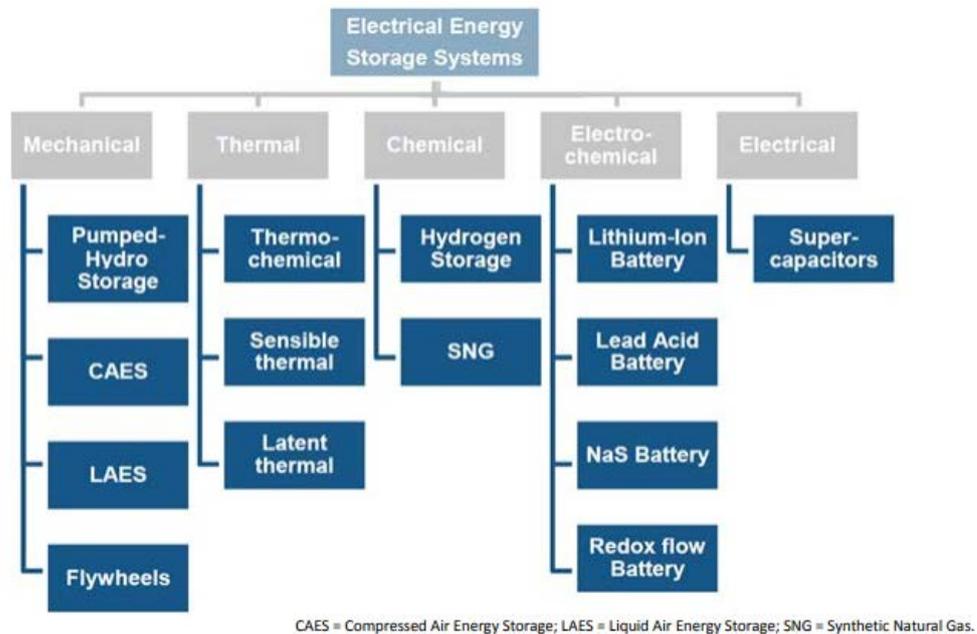


Figura 2.1: tecnologie d'accumulo [5]

le ipotesi per le stime fatte.

Le tabella successiva, 2.4 a pagina 10, riportata da uno studio comparativo del 2014 [6] classifica efficacemente le forme più comuni di immagazzinamento dell'energia aiutandoci ulteriormente a fare il punto su come vengano utilizzate e perchè, ovvero sulla base di parametri chiave tra cui quelli già richiamati che servono all'applicazione specifica e di cui ora si da la definizione:

- **Discharge duration:** la durata di scarica è definita come durata di tempo a cui il sistema di accumulo può scaricarsi (senza ricaricarsi) rimanendo alla sua **potenza nominale** ovvero alla potenza massima del sistema in normali condizioni operative².
- **Response Time:** è il tempo richiesto per passare dalla condizione di scarica nulla alla condizione di scarica più elevata ovvero per cambiare il regime di potenza da nullo a massimo in scarica. Ad un estremo, se il sistema di accumulo deve surrogare linee di trasmissione dell'energia ci si aspetta una risposta abbastanza veloce perchè in genere in risposta alla domanda di energia l'output delle linee cambia con velocità adeguata. Se invece sussidia sistemi di generazione, di solito con risposta relativamente lenta rispetto ai cambiamenti della domanda, questo parametro può essere meno vincolante. È inoltre legato al Ramp Rate, velocità di variazione della potenza. Il più delle volte la velocità di carica possibile è simile a quella di scarica, ed entrambe possono variare anche in dipendenza delle condizioni fisico chimiche del sistema e in certi casi sono limitate dal sistema di power conditioning.

²È possibile tuttavia scaricare ad una potenza maggiore per brevi periodi di tempo sapendo che si lavora ad un'efficienza più bassa e il sistema può risentirne. Si parla in questo caso di *storage emergency power capability*

Tabella 2.1: applicazioni di rete per l'accumulo [2]

Category 1 — Electric Supply
1. Electric Energy Time-shift
2. Electric Supply Capacity
Category 2 — Ancillary Services
3. Load Following
4. Area Regulation
5. Electric Supply Reserve Capacity
6. Voltage Support
Category 3 — Grid System
7. Transmission Support
8. Transmission Congestion Relief
9. Transmission & Distribution (T&D) Upgrade Deferral
10. Substation On-site Power
Category 4 — End User/Utility Customer
11. Time-of-use (TOU) Energy Cost Management
12. Demand Charge Management
13. Electric Service Reliability
14. Electric Service Power Quality
Category 5 — Renewables Integration
15. Renewables Energy Time-shift
16. Renewables Capacity Firming
17. Wind Generation Grid Integration

Tabella 2.2: valori standard assunti per la potenza [2]

#	Type	Storage Power		
		Low	High	Note
1	Electric Energy Time-shift	1 MW	500 MW	Low per ISO transaction min. (Can aggregate smaller capacity.) High = combined cycle gen.
2	Electric Supply Capacity	1 MW	500 MW	Same as above.
3	Load Following	1 MW	500 MW	Same as above.
4	Area Regulation	1 MW	40 MW	Low per ISO transaction min. Max is 50% of estimated CA technical potential of 80 MW.
5	Electric Supply Reserve Capacity	1 MW	500 MW	Low per ISO transaction min. (Can aggregate smaller capacity.) High = combined cycle gen.
6	Voltage Support	1 MW	10 MW	Assume distributed deployment, to serve Voltage support needs locally.
7	Transmission Support	10 MW	100 MW	Low value is for subtransmission.
8	Transmission Congestion Relief	1 MW	100 MW	Low per ISO transaction min. (Can aggregate smaller capacity.) High = 20% of high capacity transmission.
9.1	T&D Upgrade Deferral 50th percentile	250 kW	5 MW	Low = smallest likely, High = high end for distribution & subtransmission.
9.2	T&D Upgrade Deferral 90th percentile	250 kW	2 MW	Same as above.
10	Substation On-site Power	1.5 kW	5 kW	Per EPRI/DOE Substation Battery Survey.
11	Time-of-use Energy Cost Management	1 kW	1 MW	Residential to medium sized commercial/industrial users.
12	Demand Charge Management	50 kW	10 MW	Small commercial to large commercial/industrial users.
13	Electric Service Reliability	0.2 kW	10 MW	Low = Under desk UPS. High = facility-wide for commercial/industrial users.
14	Electric Service Power Quality	0.2 kW	10 MW	Same as above.
15	Renewables Energy Time-shift	1 kW	500 MW	Low = small residential PV. High = "bulk" renewable energy fueled generation.
16	Renewables Capacity Firming	1 kW	500 MW	Same as above.
17.1	Wind Generation Grid Integration, Short Duration	0.2 kW	500 MW	Low = small residential turbine. High = larged wind farm boundary.
17.2	Wind Generation Grid Integration, Long Duration	0.2 kW	500 MW	Same as above.

Tabella 2.3: valori standard assunti per il tempo di scarica [2]

#	Type	Discharge Duration*		
		Low	High	Note
1	Electric Energy Time-shift	2	8	Depends on energy price differential, storage efficiency, and storage variable operating cost.
2	Electric Supply Capacity	4	6	Peak demand hours
3	Load Following	2	4	Assume: 1 hour of discharge duration provides approximately 2 hours of load following.
4	Area Regulation	15 min.	30 min.	Based on demonstration of Beacon Flywheel.
5	Electric Supply Reserve Capacity	1	2	Allow time for generation-based reserves to come on-line.
6	Voltage Support	15 min.	1	Time needed for a) system stabilization or b) orderly load shedding.
7	Transmission Support	2 sec.	5 sec.	Per EPRI-DOE Handbook of Energy Storage for Transmission and Distribution Applications.[17]
8	Transmission Congestion Relief	3	6	Peak demand hours. Low value is for "peaky" loads, high value is for "flatter" load profiles.
9.1	T&D Upgrade Deferral 50th percentile	3	6	Same as Above
9.2	T&D Upgrade Deferral 90th percentile	3	6	Same as Above
10	Substation On-site Power	8	16	Per EPRI/DOE Substation Battery Survey.
11	Time-of-use Energy Cost Management	4	6	Peak demand hours.
12	Demand Charge Management	5	11	Maximum daily demand charge hours, per utility tariff.
13	Electric Service Reliability	5 min.	1	Time needed for a) shorter duration outages or b) orderly load shutdown.
14	Electric Service Power Quality	10 sec.	1 min.	Time needed for events ridethrough depends on the type of PQ challenges addressed.
15	Renewables Energy Time-shift	3	5	Depends on energy cost/price differential and storage efficiency and variable operating cost.
16	Renewables Capacity Firming	2	4	Low & high values for Renewable Gen./Peak Load correlation (>6 hours) of 85% & 50%.
17.1	Wind Generation Grid Integration, Short Duration	10 sec.	15 min.	For a) Power Quality (depends on type of challenge addressed) and b) Wind Intermittency.
17.2	Wind Generation Grid Integration, Long Duration	1	6	Backup, Time Shift, Congestion Relief.

*Hours unless indicated otherwise. Min. = minutes. Sec. = Seconds.

I dati infine proposti nelle tabelle 2.5, 2.6, 2.7, 2.8 e 2.9 da pagina 12 a 16 fotografano più in dettaglio le altre caratteristiche delle tipologie più comuni di accumulo, a compendio delle metriche più usate per valutare questi sistemi e complemento delle considerazioni già fatte sull'utilizzo di tali tecnologie, previo l'ausilio di alcuni concetti qui riportati:

- **Energy and power density:** densità di energia e densità di potenza sono relativamente l'ammontare di potenza erogabile per unità di volume e l'ammontare di energia immagazzinabile in unità di volume. Vengono invece chiamate energia e potenza specifica le quantità su unità di massa.
- **Storage System Round-trip Efficiency:** l'efficienza di ciclo di carica-scarica indica il rapporto tra la quantità di energia in uscita e quella in entrata. La carica e la scarica del sistema sono infatti due trasformazioni di energia e come tali sono soggette a perdite. Volendo essere precisi inoltre quando si confrontano due diversi sistemi di accumulo si dovrebbe considerare anche il sistema di power conditioning (o power conversion), nei rendimenti (perchè soggetto a perdite) così come nei costi. Tale sottosistema di elettronica di potenza interfaccia sistemi funzionanti in regimi diversi o gestiti a frequenze diverse, ad esempio la rete elettrica e un sistema di accumulo a batteria (conversione AC-DC).
- **Energy Retention and Standby Losses:** ritenzione di energia e perdite a vuoto o perdite dovute ad auto-scarica. È un concetto che si riferisce alla tendenza dei sistemi di perdere energia accumulata anche quando non in uso, misurato in velocità dal **Self-discharge rate**. È dovuto per esempio a reazioni chimiche nelle batterie, a perdite per attrito e meccaniche nei sistemi a volano, all'evaporazione nel pompaggio idroelettrico, alle perdite d'aria nei sistemi ad aria compressa, ecc.

I valori in evidenza per ogni parametro sono nella forma di **range** di valori, **deviazione standard** (σ), **media** (μ), **mediana** (\tilde{x}) e numero di campioni o **sample size** (n).

Tabella 2.5: caratteristiche tecniche a confronto [7]

Metric		Pumped Hydro.	Compressed Air	Flywheel
		range $\sigma/\mu/\xi/n$	range $\sigma/\mu/\xi/n$	range $\sigma/\mu/\xi/n$
Specific Energy	[Wh/Kg]	0.30–1.33	3.20–60.00	5.00–200.00
		0.48/0.87/0.78/6	19.89/28.50/30.00/11	56.94/58.16/30.00/19
Energy Density	[KWh/m ³]	0.50–1.33	0.40–20.00	0.25–424.00
		0.45/1.07/1.15/6	6.65/7.19/5.00/9	137.36/95.16/20.00/12
Specific Power	[W/Kg]	0.01–0.12	2.20–24.0	400.00–30,000.00
		0.05/0.05/0.04/4	12.10/16.13/22.20/3	8,631/6,592/3,250/12
Power Density	[KW/m ³]	0.01–0.12	0.04–10.00	40.00–2,000.00
		0.05/0.05/0.04/4	3.81/3.03/1.90/7	814.40/816.29/707.00/7
Efficiency	[%]	65.00–87.00	57.00–89.00	70.00–96.00
		7.13/76.59/80.00/17	12.28/68.30/70.00/23	6.31/89.36/90.00/22
Lifespan	[yr]	20.00–80.00	20.00–40.00	15.00–20.00
		23.14/49.20/45.00/12	8.66/30.00/30.00/9	2.89/17.50/17.50/4
Cycle Life	[cycles]	10,000–60,000	8,000–30,000	10,000–100,000
		19,070/29,000/20,000/7	9,712/16,000/12,000/7	35,667/41,100/20,500/10
Self-Discharge Rate	[%/day]	0.00	0.00	24.00–100.00
		0.00/0.00/0.00/5	0.00/0.00/0.00/4	39.92/64.61/72.00/7
Scale	[MW]	10.00–8,000.00	0.01–3,000.00	0.001–10.00
		1,998/1,542/800/28	792.14/467.72/150/33	4.62/1.96/0.20/25
Energy Capital Cost	[US\$/KWh]	1.00–291.20	1.00–140.00	200.00–150,000.00
		66.51/57.94/33.00/19	41.41/35.67/11.88/18	31,071/12,454/900/26
Power Capital Cost	[US\$/KW]	300.00–5,288.00	400.00–2,250.00	30.28–700.00
		1,133/1,414/1,000/25	412.19/649.55/500/21	149.29/296.14/290.0/16
Application		Very Large Scale Energy Management	Very Large Scale Energy Management	Medium Scale Power Quality
Technical Maturity		Very Mature/ Fully Commercialized	Proven/Commercializing	Mature/Commercializing
Environmental Impact		High/Medium	Medium/Low	Very Low

Tabella 2.6: caratteristiche tecniche a confronto [7]

Metric		Zinc Silver Oxide	Alkaline	Lead Acid	Lithium Ion
		range $\sigma/\mu/\bar{x}/n$	range $\sigma/\mu/\bar{x}/n$	range $\sigma/\mu/\bar{x}/n$	range $\sigma/\mu/\bar{x}/n$
Specific Energy	[Wh/Kg]	81.00–276.00	80.0–175.00	10.00–50.00	30.00–300.00
		73.45/146.13/115/8	37.33/137/145/5	11.7/29.8/30.0/13	65.2/143.9/150/29
Energy Density	[KWh/m ³]	4.20–957.00	360.00–400.00	25.00–90.00	94.00–500.00
		322.93/308.51/179/8	22.54/386/398/3	19.7/59.6/55.0/11	137/290/250/17
Specific Power	[W/Kg]	0.09–330.00	4.35–35.0	25.00–415.00	8.00–2,000.00
		131.31/76.37/9.00/6	14.9/17.2/14.6/4	119.7/195/190/10	612.4/606/365/22
Power Density	[KW/m ³]	0.36–610.00	12.35–101.70	10.00–400.00	56.80–800.00
		243.14/151.88/28/6	43.7/49.3/41.6/4	185.8/123/41.9/4	321.4/366.4/304/4
Efficiency	[%]	20.00–100.00	36.00–94.00	63.00–90.00	70.00–100.00
		34.25/68.75/77.50/4	25.5/73.0/81.0/4	8.56/76.9/76.0/15	8.5/89.8/90.0/17
Lifespan	[yr]	2.00–10.00	2.50–10.00	3.00–20.00	2.00–20.00
		2.76/5.00/5.00/6	2.97/5.10/5.00/5	5.58/8.33/5.50/12	6.88/10.13/10.0/8
Cycle Life	[cycles]	1–1,500	1–200	100–2,000	250–10,000
		593.51/408.50/100/6	109.82/73.7/20/3	736/1,053/1,100/18	3,036/1,018/1,500/19
Self-Discharge Rate	[%/day]	0.01–0.25	0.008–0.011	0.033–1.10	0.03–0.33
		0.11/0.09/0.02/5	0.001/0.009/0.009/4	0.36/0.33/0.22/8	0.11/0.158/0.166/9
Scale	[MW]	0.00–0.25	0.00–0.001	0.00–50.00	0.00–3.00
		0.13/0.12/0.10/3	0.0005/0.0003/0/3	14.18/10.34/8/12	1.20/0.93/0.15/8
Energy Capital Cost	[US\$/KWh]	3,167.00–20,000.0	100.00–1,000.0	50.00–1,100.00	200.00–4,000.00
		6,732/9,795/6,686/7	407.9/463/283/5	231.4/303/250/24	1,076/1,110/600/15
Power Capital Cost	[US\$/KW]	7,140,620–741,935	1,000–11,900	175.00–900.00	175.00–4,000.00
		4,524 K/3,941 K/ 3,941 K/2	5,994/5,008/2,125/3	209.1/383/300/15	1,446/2,325/1,950/9
Application		Very Small Scale Energy Management	Very Small Scale Energy Management	Small/Medium Scale Energy Management	Small/Medium Scale Energy Management
Technical Maturity		Very Mature/Fully Commercialized	Very Mature/Fully Commercialized	Very Mature/Fully Commercialized	Mature/Commercialized
Environmental Impact		Low	Medium	High	High/Medium

Tabella 2.7: caratteristiche tecniche a confronto [7]

Metric		Nickel Metal Hydride	Nickel Cadmium	Nickel Iron	Nickel Zinc
		range $\sigma/\mu/\bar{x}/n$	range $\sigma/\mu/\bar{x}/n$	range $\sigma/\mu/\bar{x}/n$	range $\sigma/\mu/\bar{x}/n$
Specific Energy	[Wh/Kg]	30.00–90.00	10.00–80.00	27.00–60.00	15.00–110.00
		20.2/66.5/73/14	20.5/45.3/45.0/16	14.3/43.1/45.0/7	29.7 /69.6/72.5/12
Energy Density	[KWh/m ³]	38.90–300.00	15.00–150.00	25.00–80.00	80.00–400.00
		96.8/185/180/10	53.7/95.5/100/10	22.6/50.0/55.0/5	109.3/236/245/8
Specific Power	[W/Kg]	6.02–1,100.00	50.00–1,000.00	20.57–110.00	50.00–900.00
		378/408/235/12	244/222/150/13	45.8/54.9/25.0/5	287/201/95/8
Power Density	[KW/m ³]	7.80–588.00	37.66–141.05	12.68–35.18	121.38–608.00
		259.4/383/467/4	43.0/89.5/89.6/4	11.5/25.4/28.4/3	195.6/309/218/5
Efficiency	[%]	50.00–80.00	59.00–90.00	65.00–80.00	80.00–89.00
		9.72/65.8/65.5/6	11.2/69.8/67.5/14	10.6/72.5/72.5/2	6.36/84.5/84.5/2
Lifespan	[yr]	2.00–15.00	2.00–20.0	8.00–100	1.00–10.00
		4.72/6.33/5.00/6	6.6/13.6/14.0/12	26.4/37.0/30.0/9	6.36/5.50/5.50/2
Cycle Life	[cycles]	300–3,000	300–10,000	1,000–8,500	100–500
		916/1,129/1,000/7	2,251/2,561/2,000/18	3,326/3,875 /3,000/ 4	191.5/350/400/4
Self-Discharge Rate	[%/day]	0.30–4.00	0.07–0.71	0.36–1.43	0.60–1.07
		1.27/1.16/0.83/7	0.23/0.34/0.25/12	0.39/0.80/0.71/6	0.25/0.79/0.71/3
Scale	[MW]	0.01–3.00	0.00–50.00	0–0.05	0.001–0.05
		2.11/1.51/1.51/2	20.2/17.1/5.0/14	0.02/0.02/ 0.019/6	0.026/0.02/0.006/2
Energy Capital Cost	[US\$/KWh]	200.00–729.00	330.00–3,500.0	444.27–1,316	250.00–660.00
		186.6/451/407/8	900/1,132/800/17	392/962 /1,044/4	153.3/398/340/6
Power Capital Cost	[US\$/KW]	270.00–530.00	270.00–1,500.0	8,167–16,312	270.00–530.00
		145.7/362/286/3	494/867/600/9	4,107/12.5K/13.1K/1	183.9/400/400/2
Application		Small Scale Energy Management	Small/Medium Scale Energy Management	Small/Medium Scale Energy Management	Very Small Scale Energy Management
Technical Maturity		Very Mature/Fully Commercialized	Very Mature/Fully Commercialized	Mature/Limited Development	Mature/Limited Development
Environmental Impact		High	High	Low	Low

Tabella 2.8: caratteristiche tecniche a confronto [7]

Metric		Sodium Sulphur	Sodium Nickel Chloride	Zinc Air	Iron Air
		range $\sigma/\mu/\bar{x}/n$	range $\sigma/\mu/\bar{x}/n$	range $\sigma/\mu/\bar{x}/n$	range $\sigma/\mu/\bar{x}/n$
Specific Energy	[Wh/Kg]	100.00–240.00	85.00–140.00	10.00–470.00	8.00–109.00
		44.72/145/135/10	16.7/112/117/10	165/227/150/15	28.9/68.1/70.0/9
Energy Density	[KWh/m ³]	150.00–345.00	108.00–190.00	22.00–1,673.00	100.00–1,000.0
		62.8/213/190/10	30.6/159.5/165/6	791/816.5/786/6	636.4/550/550/2
Specific Power	[W/Kg]	14.29–260.00	10.00–260.00	60.00–225.00	18.86–146.00
		86.5/176.0/230/9	76.5/143/150/9	56.1/117/100/9	54.7/81.7/81.0/4
Power Density	[KW/m ³]	1.33–50.00	54.20–300.00	10.00–208.00	250
		17.6/21.8/20.0/5	96.5/219.2/257/5	91.5/74.9/40.9/4	x/250/250/1
Efficiency	[%]	65.00–92.00	21.00–92.50	30.00 - 50.00	42.00–96.00
		8.1/81.5/85.0/21	34.2/72.1/87.5/4	9.60/44.25/48.5/ 4	20.2/66.5/62.5/8
Lifespan	[yr]	5.00–20.0	7.00–14.00	0.17–30.00	Long
		5.07/12.22/15.0/9	3.10/9.75/9.00/4	12.6/8.08/3.00/5	
Cycle Life	[cycles]	1,000–4,500	2,000–3,000	1.00–500.00	100–5,000
		1,222/2,771/2,500/12	500/2,500/2,500/3	251.2/234/200/3	1,580/1,089/400/9
Self-Discharge Rate	[%/day]	0.00–20.0	11.89–26.25	0.005–0.01	Small
		10.95/8.01/0.05/5	7.56/17.7/15.0/3	0.003/0.007/0.005/3	
Scale	[MW]	0.01–80.00	0.00–53.00	0.00–1.00	0.00–0.01
		22.6/13.1/4.5/16	21.5/12.3/0.30/7	0.41/0.17/0.008/6	0.005/0.006/0.006/5
Energy Capital Cost	[US\$/KWh]	150.00–900.00	100.00–345.00	10.00–950.00	10.00–150.00
		177.6/387/350/14	100.9/211/200/4	378/313/130/6	50.2/70.0/65.0/6
Power Capital Cost	[US\$/KW]	150.00–3,300.0	150.00–10,000	100.00–4,000.0	950
		1,121/1,736/1,850/13	4,615/3,613/2,150/4	1,567/1,533/975/6	x/950/950/1
Application		Medium/Large Scale Energy Management	Medium/Large Scale Energy Management	Very Small Scale Energy Management	Small Scale Energy Management
Technical Maturity		Proven/ Commercializing	Proven/ Commercializing	Mature/ Commercialized	Research/ Developing
Environmental Impact		Medium/Low	Medium/Low	Very Low	Very Low

Tabella 2.9: caratteristiche tecniche a confronto [7]

Metric		Superconducting	Supercapacitor
		range $\sigma/\mu/\bar{x}/n$	range $\sigma/\mu/\bar{x}/n$
Specific Energy	[Wh/Kg]	0.27–75.00	0.07–85.60
		21.43/11.79/5.00/11	20.62/16.36/10.00/25
Energy Density	[KWh/m ³]	0.20–13.80	1.00–35.00
		4.45/4.99/3.85/12	11.81/13.77/10.00/9
Specific Power	[W/Kg]	500.00–15,000.00	5.44–100,000.00
		6,570.77/5,600.00/2,000.00/5	20,154.00/8,930.44/3,500.00/24
Power Density	[KW/m ³]	300.00–4,000.00	15.00–4,500.00
		1,719.85/1,457.50/765.00/4	2,000.74/921.00/30.00/5
Efficiency	[%]	80.00–99.00	65.00–99.00
		5.72/92.45/95.00/11	9.63/91.33/95.00/12
Lifespan	[yr]	20.00–30.00	5.00–20.00
		5.77/25.00/25.00/4	5.35/11.43/10.00/7
Cycle Life	[cycles]	10,000–100,000	10,000–1,000,000
		40,865.63/68,000.00/90,000.00/5	364,649/302,308/100,000/13
Self-Discharge Rate	[%/day]	1.00–15.00	0.46–40.00
		6.25/7.50/7.00/3	16.43/18.64/20.00/7
Scale	[MW]	0.01–200.00	0.00–5.00
		48.55/23.56/8.00/22	1.29/0.52/0.02/23
Energy Capital Cost	[US\$/KWh]	500.00–1,080,000.00	100.00–94,000.00
		336,835/125,488/2,755/10	28,160/19,866/9,750/16
Power Capital Cost	[US\$/KW]	196.00–10,000.00	100.00–800.00
		2,412.70/981.56/325.00/16	226.46/321.00/300.00/10
Application		Medium/Large Scale Power Quality	Small/Medium Scale Power Quality
Technical Maturity		Proven/Commercializing	Proven/Commercializing
Environmental Impact		Low	Very Low

2.1.1 Caratteristiche dei sistemi ad accumulo a volano e le applicazioni

Le più comuni applicazioni per la tecnologia a volano nelle applicazioni grid-related sono, com'è anche facile vedere dalle tabelle, l'accumulo per *uninterruptable power supplies* (UPS) e i servizi di *power quality*. Per queste applicazioni le batterie elettrochimiche sono meno all'altezza perchè soffrono di un'insufficiente durata di vita (life cycle) dato che il numero di cicli per giorno è troppo alto. Questo non è necessariamente vero per gli UPS dove un sistema ibrido batteria-volano rimane la configurazione ottimale perchè mette assieme i pregi di entrambi. Nella power quality invece i disturbi elettrici come cali o buchi di tensione sono frequenti e di breve durata, la maggior parte dura infatti meno di 5 s. Questi disturbi sono più efficacemente gestiti dai sistemi a volano considerando il quasi istantaneo Response Time e la durata di vita maggiore. Per ottimizzare il sistema di rete e minimizzare la capacità installata, che ad oggi per far fronte alla difficile integrazione delle rinnovabili è sovradimensionata, è più utile un sistema di accumulo che possa essere usato molte volte al giorno per servire al time-shift³ della domanda. Infatti anche ipotizzando un ciclo al giorno, una batteria elettrochimica è improbabile che raggiunga i 10 anni di vita se non attentamente gestita sia termicamente sia elettricamente, in modo che il grado di scarica, in inglese *depth of discharge* (DOD), sia mantenuto basso. Molte volte per ovviare al problema si sovradimensionano le batterie in energia da due a cinque volte così da avere una buona quantità di energia prima di raggiungere un DoD troppo alto e non intaccare la durata di vita a spese di un consistente aumento dei costi di investimento. Vedremo invece nel prossimo paragrafo che, a parità di prestazioni l'analisi dei costi per l'intero ciclo di vita mostra che il sistema a volano è più vantaggioso anche se l'analisi fatta può essere leggermente sensibile⁴ al DoD nella scarica più o meno profonda delle batterie. I supercondensatori sono stati testati a loro volta per queste applicazioni ma a fronte circa degli stessi costi di installazione hanno una vita operativa nettamente minore⁵. In sintesi le caratteristiche del volano sono: un alto numero di cicli di vita (centinaia di migliaia), lunga durata di vita (più di 20 anni), fast response, alte efficienze, alto tasso di carica e scarica, bassissimi impatti ambientali e alta densità di potenza e di energia; fattori tra loro sono indipendenti⁶ e ottimizzati in relazione alla applicazione. Lo stato di carica non è affetto dall'usura del sistema o dalla temperatura, tuttavia l'autoscarica è molto più pesante che nelle altre tipologie di accumulo e questo rimane il principale svantaggio in cui si concentrano molti degli sforzi di miglioramento con risultati anche ottimistici. I volani hanno lunga vita e pochi costi di mantenimento, inoltre non si rovinano se si lavora a differenti tassi di carica e scarica, non sono sensibili alla DoD e non danno luogo ad emissioni nocive nel ciclo di vita. Anche il fine vita è semplice da gestire non avendo ripercussioni sull'ambiente. I volani possono sostituire le batterie in molte applicazioni avendo densità di potenza anche superiori di 8-10 volte, incluse quelle dei trasporti, dove i concorrenti sono i supercondensatori che soffrono di molto più basse densità di energia, e delle applicazioni spaziali dove sono già usati da tempo.

³L'interesse in questo nuovo paradigma di gestione dell'energia sarà anche sostenuto dall'implementazione delle tariffe Time of Use (ToU).

⁴Il risultato nelle analisi del ciclo di vita di una batteria può cambiare a seconda delle ipotesi sul DoD: se ogni ciclo ha un profondo grado di scarica la batteria ha una durata di vita più breve e ciò impatterà sui costi di ricambio della tecnologia)

⁵Fino ai 12 anni per i supercondensatori e più di 20 per i volani[8].

⁶Il power rating di un volano dipende dalla taglia della macchina elettrica che funge da motore e generatore per la conversione di energia elettromeccanica e dall'elettronica di potenza. L'energia è determinata dal rotore(volano).

2.2 Considerazioni economiche

I costi nelle tabelle del paragrafo precedente non riflettono appieno il reale costo complessivo della tecnologia perchè in molti casi, in letteratura ma in generale anche nell'applicazione pratica, non si è arrivati ad un metodo che poi si è utilizzato in maniera sistematica, come invece si dovrebbe fare almeno a livello di rete nazionale. Per meglio dire i metodi esistono, compresi quelli più complessi, ma ancora non c'è stata un'armonizzazione nell'utilizzo (i.e. un processo che uniformi le valutazioni di costo) e dei due metodi principali in letteratura: il *life cycle cost* (LCC) e il *total capital cost* (TCC) si utilizza spesso quello del *total capital cost*.

2.2.1 Total Capital Cost (TCC)

Il TCC valuta tutti i costi che vanno a coprire l'acquisto, l'installazione, il costo del sistema di conversione (PCS), i costi eventualmente dipendenti dall'energia stoccabile e i costi di *balance of power* (BOP) [9]. I costi del PCS sono tipicamente in (€/kW). I costi legati all'energia stoccabile includono quelli per costruire banchi di batterie o serbatoi (pensiamo a PHS o CAES) e sono espressi per unità di energia (€/kWh), di solito l'unità di misura con cui si spesa la tecnologia di accumulo. In questo modo il costo del PCS e dell'unità di accumulo sono disaccoppiati e si può stimarne il contributo esplicitamente. Per esempio per un impianto di pompaggio di una certa potenza i costi del PCS possono essere stimati senza considerare quelli per la costruzione del serbatoio. I costi di BOP infine possono essere espressi per unità di potenza (€/kW) o di energia (€/kWh) o con una quantità fissa in dipendenza dalla tecnologia considerata [10] e comprendono i costi per il progetto ingegneristico, i sistemi di interfaccia e integrazione alla rete (come i trasformatori), i costi per lo spazio e le strutture di accesso e tutti gli altri servizi e beni che non sono inclusi in PCS e legati all'energia stoccabile. Il costo TCC può essere calcolato per unità di potenza:

$$C_{\text{cap}} = C_{\text{PCS}} + C_{\text{BOP}} + C_{\text{stor}}h \quad (\text{€/kW}) \quad (2.1)$$

con h tempo di scarica espresso in ore. Se, presa una tecnologia come ad esempio il pompaggio idroelettrico, i costi per unità di potenza e energia sono circa uguali in molti studi, il tempo di scarica per installazioni diverse quasi sicuramente non lo è (vale a dire che potenza e energia in alcune tecnologie sono poco dipendenti o scollegate) e questo è uno degli elementi che rende il TCC non un numero fisso a tecnologia ma un valore entro un certo range. Il TCC può anche essere espresso in (€/kWh) se l'espressione (2.1) viene rapportata al tempo di scarica. Si tiene a far notare che si tratta sempre di prezzo rapportato al kWh della capacità di stoccaggio installata, essendo che questo metodo tiene conto dei costi fissi e non variabili. Si può inoltre dividere per il numero di cicli carica-scarica previsti nella vita della tecnologia ottenendo secondo alcuni un indicatore migliore per la valutazione dei costi (espresso in €/kWh - cycle), le tecnologie che avranno un numero di cicli più elevato vedranno il costo ridursi.

2.2.2 Life Cycle Cost (LCC)

Per fare un confronto più completo e realistico delle diverse tecnologie questo è sicuramente il metodo migliore perchè oltre a includere le valutazioni apportate dal metodo TCC tiene in conto tutte le spese operative e di manutenzione sia fisse che variabili (O&M), le sostituzioni, e lo smaltimento della tecnologia. LCC può essere presentato come *levelized annual cost* (€/kW yr), dove "levelized" significa che è stato aggiustato

per tenere conto dei costi futuri al tasso di sconto ipotizzato e del tasso di inflazione o, se si tiene conto delle ore operative in un anno facendo un semplice rapporto, può essere convertito in *revenue requirements* (€/kWh). Il primo rappresenta il costo totale della tecnologia nel suo ciclo di vita spalmato annualmente secondo i tassi di interesse. Il *revenue requirement* deriva dal primo e rappresenta quello che il gestore dovrebbe chiedere come minimo prezzo di acquisto per ogni kWh venduto, per coprire i costi totali finanziari del suo sistema o, detto in altri termini, il costo richiesto o allocato ad ogni unità accumulata in kWh che viene poi scaricata. Quest'ultimo però è più utile alle utility o ai grossi impianti che vendono energia e non è appropriato per i sistemi di power quality che possono essere operativi anche solo per pochi minuti in un anno. In alcuni studi ulteriori il prezzo dell'elettricità è escluso dall'analisi dei costi dei sistemi d'accumulo, per esempio in [11] si suggerisce un metodo per calcolare il cosiddetto *added cost by storing electricity*. In linea generale riassumiamo ora brevemente i passaggi fondamentali per fare l'analisi LLC descritti in [9, 12] e ne riportiamo le considerazioni finali. Annualizziamo il TCC per mezzo dei tassi di interesse e l'aspettativa di vita dell'impianto T :

$$C_{\text{cap,a}} = TCC \times CRF \quad (\text{€/kW yr}) \quad (2.2)$$

$$CRF = \frac{i(i+1)^T}{(i+1)^T - 1} \quad (2.3)$$

Annualizziamo i costi totali di O&M: annualizzando i costi fissi e moltiplichiamo quelli variabili (variabili rispetto al kWh) per n e h , rispettivamente il numero di cicli di scarica in un anno e la durata di scarica:

$$C_{\text{O\&M,a}} = C_{\text{fO\&M,a}} + C_{\text{vO\&M}} \times n \times h \quad (\text{€/kW yr}) \quad (2.4)$$

Il prezzo dell'elettricità ed eventualmente del combustibile (per i sistemi CAES) può essere tenuto in conto nei costi variabili O&M o essere separato. Annualizziamo i costi di sostituzione della tecnologia C_R che si assume avvengano ogni tot anni (t):

$$C_{\text{R,a}} = CRF \times \sum_{k=1}^r (i+1)^{-kt} \times \left(\frac{C_R \times h}{\eta_{\text{sys}}} \right) \quad (\text{€/kW yr}) \quad (2.5)$$

Dove η_{sys} è il rendimento del sistema (complessivo di sistema di conversione quindi AC-AC). Il costo dello smaltimento (*Disposal and Recycling costs*) che in molte analisi LCC viene tralasciato può essere annualizzato come il resto:

$$C_{\text{DR,a}} = C_{\text{DR}} \times \frac{i}{(i+1)^T - 1} \quad (\text{€/kW yr}) \quad (2.6)$$

Infine il costo complessivo annualizzato diventa il costo LCC e si compone in tal modo:

$$C_{\text{LCC,a}} = C_{\text{cap,a}} + C_{\text{O\&M,a}} + C_{\text{R,a}} + C_{\text{DR,a}} \quad (\text{€/kW yr}) \quad (2.7)$$

Si giunge inoltre al *levelized cost of electricity* (LCOE), costo dell'elettricità in uscita dove $n \times h$ sono le ore di utilizzazione in un anno:

$$LCOE = \frac{C_{\text{LCC,a}}}{n \times h} \quad (\text{€/kWh}) \quad (2.8)$$

Ricordando che dentro la definizione c'è anche il costo dell'elettricità che è specifica per zona di mercato, se si vuole arrivare ad un livello comparativo più generale si toglie la dipendenza da quest'ultimo:

$$LCOS = LCOE - \frac{\text{prezzo dell'elettricità nel mercato}}{\eta_{\text{sys}}} \quad (\text{€/kWh}) \quad (2.9)$$

La maggioranza dei riferimenti in letteratura riporta i costi delle tecnologie basate sul primo metodo. Il motivo probabilmente è che il prezzo LCC non può essere adeguatamente calcolato per l'assenza di dati di lungo periodo sull'utilizzo in applicazioni diverse per molte delle forme di accumulo. Per esempio la vita utile, il periodo e il costo di sostituzione della tecnologia a batteria in applicazioni di larga scala sono poco chiare, inoltre i costi di O&M dipendono in grossa misura dal regime operativo dell'impianto (e.g. *Cycle per day* e DoD), quindi dall'applicazione. Tuttavia i dati sui costi sono stati faticosamente raccolti dagli autori in [9] che hanno presentato tutte le fonti analizzate (anche se per mancanza di dati non si è tenuto conto dei costi di *Disposal and Recycling*) e hanno compiuto l'analisi LCC per tre grosse categorie di applicazioni, per semplificare e rendendo anche più sensata l'analisi:

- *bulk energy storage (energy arbitrage)*: potenze sopra i 10 MW, tempo di risposta in min. e tempo di scarica 4-8h, cicli per anno 250-300 e durata di vita 20 anni
- *T&D support*: potenze 1-10 MW, tempo di risposta in sec. - min. e tempo di scarica 0.5-2 ore, cicli per anno 300-400 e durata di vita 15 anni
- *frequency regulation*: potenze 0.1-2 MW, tempo di risposta in ms - s e tempo di scarica minore di 0.25 ore, cicli per anno +1000 e durata di vita 10 anni

Con le dovute assunzioni, di cui le più importanti: tasso di inflazione annuale al 2.5%, tasso di sconto 8% e prezzo dell'elettricità a 50 €/MWh si è giunti ai diagrammi 2.2, 2.3 e 2.4 a fronte. Si è scelto di esprimere il risultato in costo annualizzato ALCC tra tutte le modalità di presentazione del LCC⁷. Lo studio poi si addentra anche in considerazioni di sensibilità ai parametri che qui non riportiamo. Accenniamo solo che si modificano in opportuni range tasso di interesse, prezzo dell'elettricità e tempo di scarica, il cui range è diverso per ogni categoria ovviamente. In dipendenza soprattutto dell'ultimo parametro, per esempio, oltre ad un certo numero di ore cambia la classifica dei costi tra le batterie nell'analisi della prima categoria. Se osserviamo i risultati, per quanto riguarda le applicazioni della tecnologia a volano vediamo che pur avendo il costo capitale più alto sembrano essere favoriti a lungo termine, soprattutto nelle applicazioni con alto numero di cicli, perché vengono a pesare meno i costi di sostituzione. Bisogna dire che come TCC nell'articolo studiato [9] figurano molto promettenti anche supercondensatori (SCES) e superconductive magnetic energy storage (SMES) ma non possono essere generalizzati gli studi con un LCC analysis su applicazioni di larga scala in relazione alla rete, anche per mancanza di dati sui costi in letteratura che non siano costi capitali. C'è da dire che comunque i supercondensatori hanno densità di energia e durata di vita inferiori ai volani, cosa che non li rende adatti a questo tipo di studio comparativo. Tuttavia l'analisi dei costi LCC non dovrebbe essere l'unico criterio per la selezione di un sistema piuttosto che un altro, essendoci anche aspetti di impatto ambientale da considerare nella scelta di usare una tecnologia su larga scala e benefici e costi accessori da includervi. Inoltre, sebbene sia uno strumento quasi completo, LCC non tiene conto di altri fattori come per esempio la diversa scalabilità economica (il costo per kW e kWh può ridursi se il sistema di accumulo da installare cresce in potenza nominale e energia nominale).

⁷Le modalità tipiche sono: costo totale riportato al presente (€/kW), costo annualizzato (€/kW yr), LCOE (€/kWh) e LCOS (€/kWh).

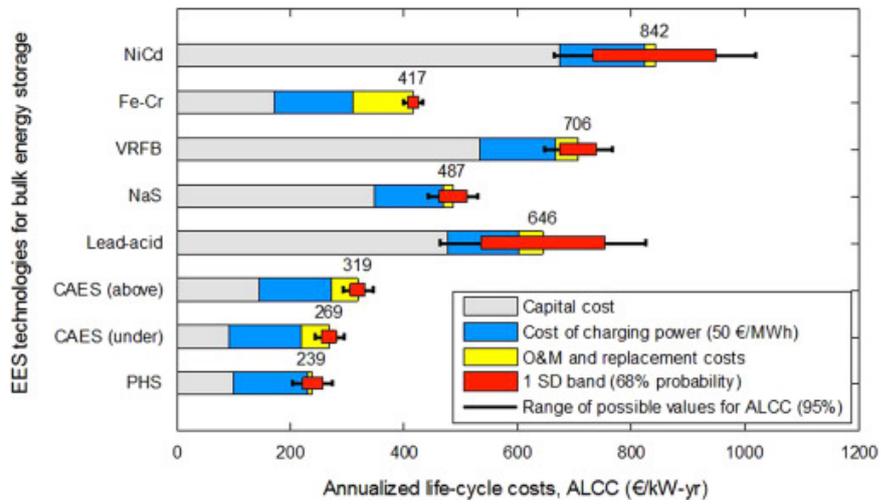


Figura 2.2: ALCC of EES systems considerando 250 cicli per anno e 8h di tempo di scarica [9]

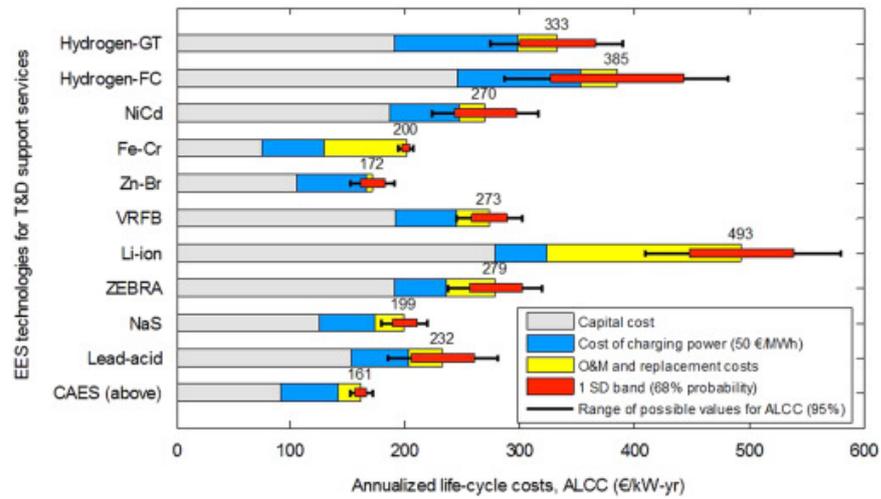


Figura 2.3: ALCC of EES systems considerando 400 cicli per anno e 2h di tempo di scarica [9]

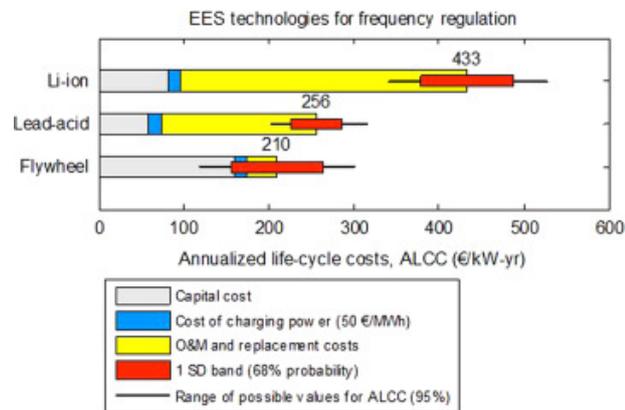


Figura 2.4: ALCC of EES systems considerando 1000 cicli per anno e massimo 15min di tempo di scarica [9]

Capitolo 3

Accumulo cinetico: i volani

La possibilità di accumulo di energia attraverso dispositivi inerziali è nota all'uomo da migliaia di anni ed è stata la prima forma di accumulo sfruttata nell'antichità. La più antica testimonianza dell'utilizzo di tali dispositivi risale al 2000 a.C. col nome di tornio (potter's wheel), composto semplicemente di una ruota in pietra che una volta messa in rotazione serviva per modellare i vasi in terracotta. Nel corso del tempo lo stesso principio si è adoperato coi mulini ad acqua e nei telai, ma si sviluppò solo con la rivoluzione industriale nel XVIII secolo con l'utilizzo della ghisa, che ne ridusse le dimensioni conservandone lo stesso momento di inerzia. In questo periodo storico, quando probabilmente fu coniato il termine "flywheel", venne quindi utilizzato in larga misura assieme alle macchine a vapore. Infatti verso la fine del secolo lo si utilizzava nelle navi e treni a vapore e nelle industrie come accumulatore energetico. Furono poi progettate diverse forme per il disco. Il vero progresso però si vide solo agli inizi del XX secolo quando furono attentamente analizzati gli stress rotazionali in relazione alla forma del rotore. Il primo esempio di sistema a volano nei trasporti fu il Gyrobus, prodotto in svizzera negli anni cinquanta. Negli anni sessanta e settanta il FESS (Flywheel Energy Storage System) venne proposto per i veicoli elettrici, l'accumulo di back up e le missioni spaziali e negli anni seguenti si sperimentarono i primi rotori in fibra composita. Già negli anni ottanta cominciarono a comparire le prime sospensioni magnetiche per rotori a bassa velocità. Il problema che si è posto nell'uso di questi dispositivi è senza dubbio la difficoltà di ridurre le perdite parassite che idealmente si vorrebbe fossero nulle, per permettere al sistema di mantenere l'energia immagazzinata, se non caricato o scaricato, consentendogli di continuare a girare indefinitamente senza assorbimento di potenza. Queste perdite sono giocoforza intrinseche del movimento che è sottoposto a forze d'attrito dell'aria circostante se non avviene nel vuoto e del sistema di supporto meccanico (cuscinetti a sfera o ad olio) che rallentano il sistema asportando energia che si trasforma in calore. Oramai sono però consolidate le tecnologie di sospensione magnetica, che mantengono il volano in completa levitazione, e il contenimento sotto vuoto pneumatico. Entrambe tendono ad annullare grossa parte delle perdite dovute ad autoscarica (standby losses) con il minore inconveniente di dover alimentare questi due sottosistemi di pompaggio del vuoto e di controllo della sospensione tramite elettromagneti.

3.1 Struttura e componenti

I sistemi a volano si basano sull'accumulo di energia meccanico-cinetica attraverso la messa in rotazione di una massa da parte di un motore, nel momento in cui si necessita

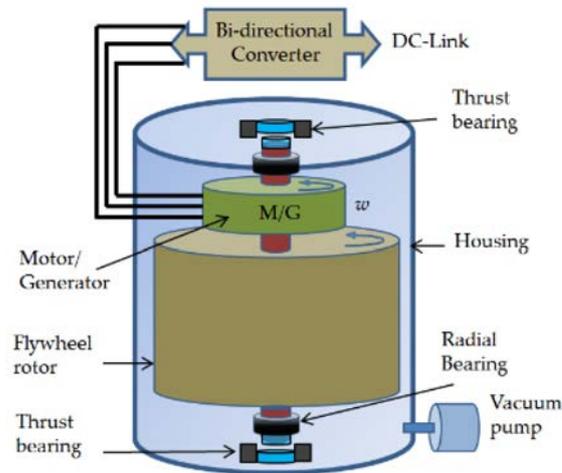


Figura 3.1: struttura e componenti di un sistema a volano [8]

di riconvertirla in elettrica si frena la rotazione tramite un generatore. Il sistema si compone della parte rotante (rotore), il motore-generatore, le sospensioni (bearings), l'elettronica di potenza di interfaccia e il contenimento (housing) che saranno affrontati nei prossimi paragrafi. Un tipico sistema a terra si presenta come in figura 3.1

3.1.1 Struttura di rotore e principio di funzionamento

L'energia immagazzinata in un volano è determinata dalla forma della rotore e dal materiale. È infatti linearmente proporzionale al momento di inerzia I e al quadrato della velocità angolare ω :

$$E = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (3.1)$$

Generalmente un volano accoppiato elettricamente lavora tra una ω_{\min} e una ω_{\max} per evitare un'eccessiva variazione di tensione e limitare il massimo della coppia al motore-generatore (MG). Il momento d'inerzia è funzione della massa del rotore e della sua forma:

$$I = \int r^2 dm \quad (3.2)$$

dove r è la distanza dall'asse di inerzia del punto materiale di massa dm . I volani sono spesso costruiti come cilindri pieni o cavi e la formula del momento d'inerzia diventa per questi relativamente:

$$I = \frac{1}{2} m r^2 \quad I = \frac{1}{2} m (b^2 - a^2) \quad (3.3)$$

dove la massa si può scrivere in funzione di altezza h e densità ρ . Il momento d'inerzia è determinato da:

$$I = \frac{1}{2} \pi \rho h (b^4 - a^4) \quad (3.4)$$

perciò:

$$E = \frac{1}{4} \pi \rho h \omega^2 (b^4 - a^4) \quad (3.5)$$



Figura 3.2: volano cilindro cavo [8]

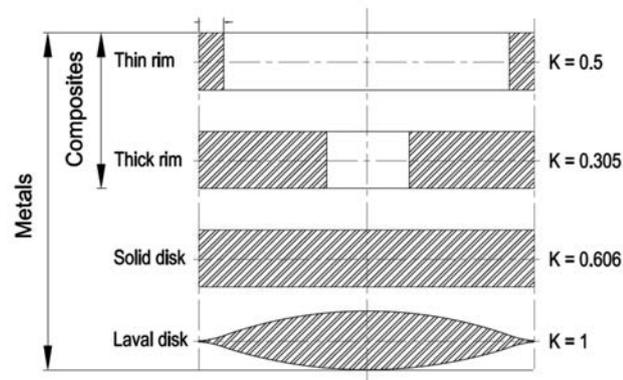


Figura 3.3: tipiche sezioni trasversali di volano [8]

La massima velocità a cui può girare è determinata dal limite di forza di trazione del materiale, si parla in tal senso di resistenza alla trazione σ ; mentre quella sperimentata dal materiale durante la rotazione nel caso di cilindro vuoto si determina con la (3.6)

$$\sigma_{\max} = \rho r^2 \omega^2 \quad (3.6)$$

diversa la formula per altre geometrie, ma sempre proporzionale a ρ e al quadrato della velocità periferica ($r\omega$). Inoltre si può tenere conto della differente geometria usando un fattore di forma K . Le formule più generali di densità di energia e energia specifica sono quindi

$$\frac{E}{m} = K \frac{\sigma_{\max}}{\rho} \quad [J/kg] \quad (3.7)$$

$$\frac{E}{V} = K \sigma_{\max} \quad [J/m^3] \quad (3.8)$$

La forma del rotore perciò influenza la velocità massima raggiungibile e di conseguenza l'energia immagazzinabile dal rotore. Si riportano i valori di k per i più comuni tipi di volano in figura 3.3. L'energia accumulabile, come visto in (3.1), dipende dal momento d'inerzia e dalla velocità che ha un apporto anche maggiore, questo ha spinto a cercare nuovi materiali e forme consentendo di arrivare ad un sistema a volano ad alta velocità. L'attuale distinzione vede i volani a bassa velocità (fino a 10000 rpm) e quelli ad alta

velocità (fino a 100000 rpm), i primi fatti con materiali più pesanti ma meno resistenti alla trazione, i secondi all'opposto usano materiali compositi e sono però molto più resistenti. Con le alte velocità entra in gioco anche la necessità di ridurre le perdite, che usando un supporto meccanico sarebbero spropositate vista la velocità, si usano perciò cuscinetti magnetici e questo contribuisce a farne aumentare il costo iniziale che può arrivare ad essere anche 5 volte quello di un volano a bassa velocità. Sta emergendo anche una classe di velocità intermedia che usa rotor in acciaio laminato e beneficia quindi di un costo minore riuscendo al contempo ad avere una buona densità di energia.

3.1.2 Componente elettromeccanica

La macchina elettrica svolge il ruolo di convertitore elettro-meccanico (o in qualche caso il rotore è lo stesso volano) e viene scelta a seconda dell'applicazione. La scelta cade su tre principali macchine: asincrono (IM), sincrónico a magneti permanenti (SPM) e a riluttanza (VRM). La macchina asincrona è la più adatta per le applicazioni di grossa potenza per la coppia più elevata e i bassi costi, ma non si accorda bene con le alte velocità oltre ad avere un complesso controllo e perdite Joule più elevate a causa degli avvolgimenti sul rotore. Solitamente per grandi potenze viene adottata una doppia alimentazione (doubly fed) in modo da ridurre la taglia dell'elettronica di potenza. La macchina a riluttanza è robusta, ha poche perdite e un range di velocità abbastanza ampio oltre ad avere un controllo più semplice della IM ad alte velocità, è caratterizzata però da un basso fattore di potenza e poca densità di potenza inoltre produce grossi ripple di coppia. Quella che si usa con maggiore frequenza è la macchina sincrónica a magneti permanenti (SPM), che presenta alte efficienze (non ha perdite al rotore) e alta densità di potenza con lo svantaggio principale nel costo per via dell'utilizzo dei magneti. In tabella 3.1 queste tipologie di macchine elettriche vengono confrontate più nel dettaglio.

3.1.3 Convertitore elettronico di interfacciamento con la rete elettrica

Per controllare la macchina elettrica la sua coppia e quindi la velocità è necessario collegarla alla rete tramite un convertitore bidirezionale di potenza (PEI¹) che cambi i parametri di tensione e frequenza. Le configurazioni adottate per i sistemi FESS sono varie e a seconda dell'applicazione possono essere DC-AC, AC-AC e AC-DC-AC. I cicloconvertitori a tiristore della famiglia AC-AC venivano usati in media tensione nelle applicazioni di grossa potenza con lo svantaggio di avere una grossa distorsione armonica (THD), un complesso controllo e un basso fattore di potenza (figura 3.4a). La tipologia di convertitori più usata nel FESS è la back to back (BTB). Si tratta di

¹Power Electronic Interface

Tabella 3.1: confronto delle macchine elettriche utilizzate in FESS [8]

Machine	Asynchronous	Variable Reluctance	Permanent Magnet Synchronous
Power	High	Medium and low	Medium and low
Specific power	Medium (-0.7 kW/kg)	Medium (-0.7 kW/kg)	High (-1.2 kW/kg)
Rotor losses	Copper and iron	Iron due to slots	Very low
Spinning losses	Removable by annulling flux	Removable by annulling flux	Non-removable, static flux
Efficiency	High (93.4%)	High (93%)	Very high (95.5%)
Control	Vector control	Synchronous: Vector Control. Switched: DSP	Sinusoidal: Vector control. Trapezoidal: DSP

Machine	Asynchronous	Variable Reluctance	Permanent Magnet Synchronous
Size	1.8 L/kW	2.6 L/kW	2.3 L/kW
Tensile strength	Medium	Medium	Low
Torque ripple	Medium (7.3%)	High (24%)	Medium (10%)
Maximum/base speed	Medium (>3)	High (>4)	Low (<2)
Demagnetization	No	No	Yes
Cost	Low (22 €/kW)	Low (24 €/kW)	Low (38 €/kW)
Advantages	Low cost	Robustness of temperature overheat	Low loss, high efficiency
	Simple manufacture	Overcurrent capability	High power density
	Technology-matured	Excitation coil can repeat adjustment	High load density
	Adjustable power factor	Lower loss at starting torque	High torque density
	No demagnetization	Easy to dissipate heat	Small volume, light quality
	High energy storage	Lower loss, higher efficiency	low rotor resistance loss
	No running loss	High power density	No field winding loss
			Flexible shape and size
			Simple control mode
			High reliability
Disadvantages	High slip ratio of rotor	Complex structure	poor robustness of temperature
	Limited speed	Difficult to manufacture	Demagnetisation
	Larger volume	Low power factor	High cost
	Low power to quality ratio	Torque ripple, vibration and noise	Materials fragile
	High losses, low efficiency	More outlet from machine	Difficult air gap flux-field adjustment
		Difficult to regulate speed	

una configurazione AC-DC-AC col condensatore allo stadio intermedio controllato con la tecnica PWM² (figura 3.4b). Per le applicazioni unite all'accumulo da eolico invece le configurazioni usate sono DC-AC, utilizzate anche nei sistemi *Uninterruptible Power Supply* (UPS), o BTB dal nodo di rete (figure 3.4c e 3.4d) con la variante potenziata BTB con Boost (figura 3.4e). Nelle applicazioni ad alta potenza e tensione per quanto riguarda la trasformazione DC-AC si preferisce usare inverter multilivello, in particolare Neutral Point Clamped (NPC) (figura 3.4g) In confronto ai convenzionali due livelli infatti hanno notevoli vantaggi tra i quali la minore distorsione armonica e la possibilità di generare tensioni più alte con minor $\frac{dv}{dt}$. Perciò viene utilizzato in tutte le configurazioni seguenti (figure 3.4h, 3.4i e 3.4j). Infine un'altra opzione per la conversione AC-AC prende il nome di *matrix converter* (MC) che converte direttamente i due stadi, senza lo stadio intermedio in corrente continua, tramite interruttori (switches) bidirezionali. Non essendoci il condensatore, ha una struttura molto compatta, tuttavia questo comporta anche un guadagno massimo di output limitato all'86% che può essere superato a costo di avere componenti armoniche indesiderate a bassa frequenza. Da ultimo si utilizza anche lo Z-source converter che si può adottare con ogni tipo di conversione e riduce la distorsione. Come regola generale, all'aumentare della frequenza di switching per inverter e raddrizzatori, sì, riducono ripple e armoniche in bassa frequenza, ma le perdite di switching aumentano, bisogna quindi cercare un compromesso o cercare di ridurre le armoniche tramite filtri al lato alternata.

²Gli interruttori vengono controllati tramite degli impulsi modulati in larghezza per produrre onde sinusoidali di frequenza variabile

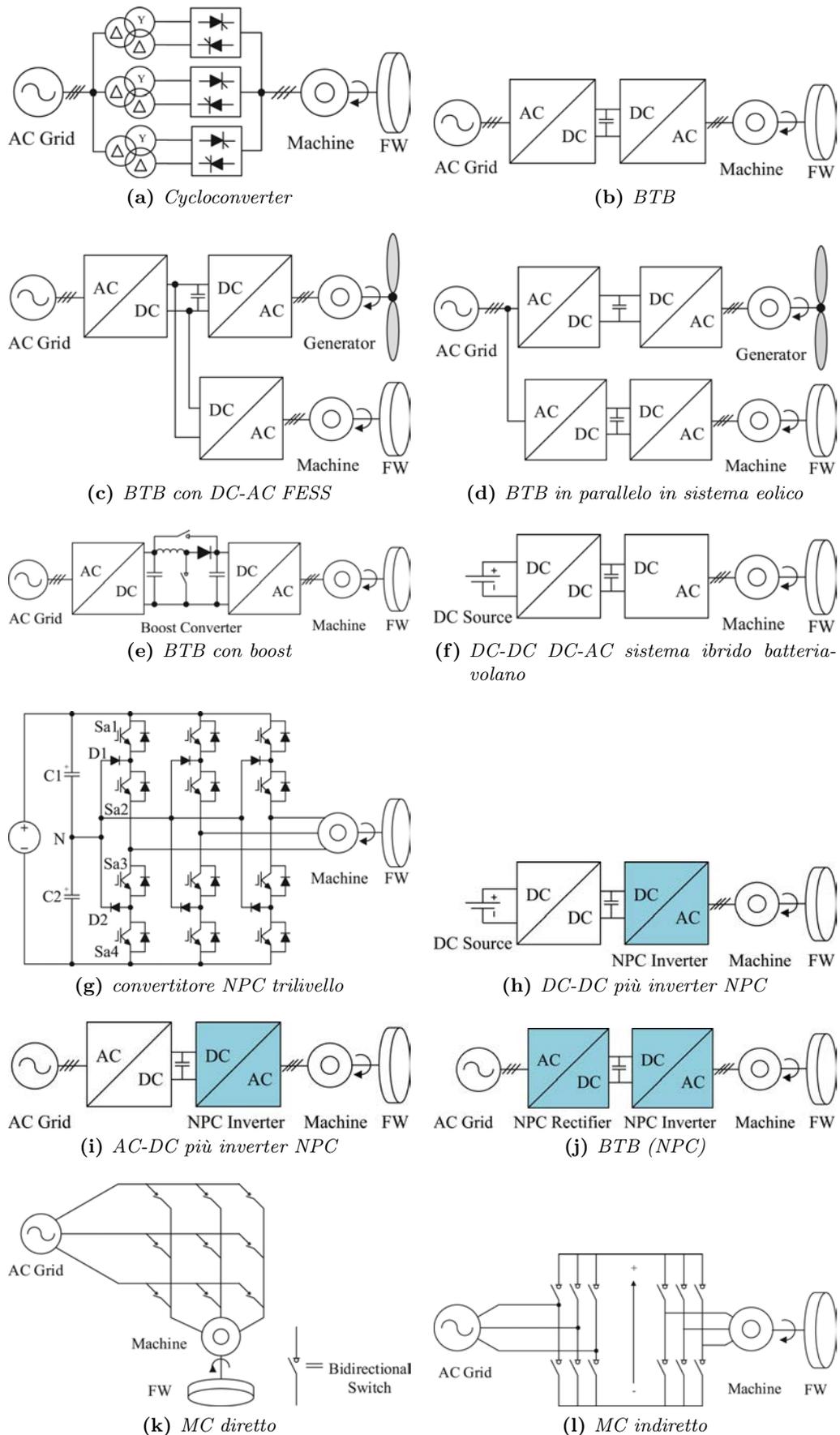


Figura 3.4: sistemi PEI [13]

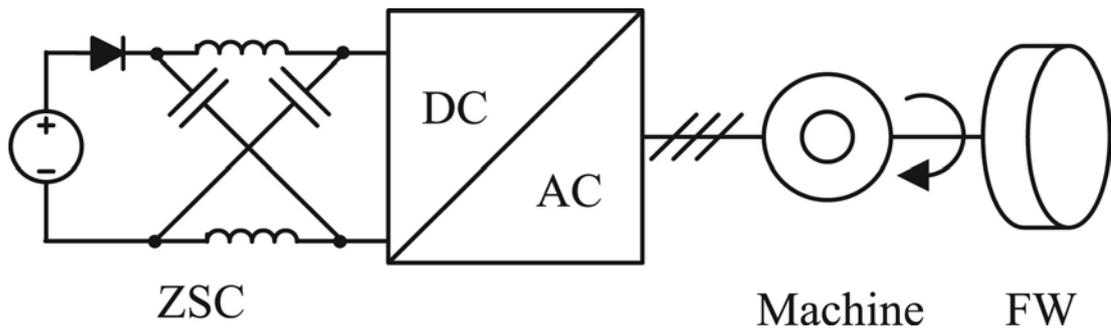


Figura 3.5: convertitore Z-source più DC-AC [13]

3.1.4 Cuscinetti

Rotore e volano, se elementi distinti, sono posti in rotazione e fanno parte di una struttura unica che comprende l'albero. I cuscinetti sono necessari per far sì che ci possa essere la rotazione relativa nei confronti della struttura fissa (statore) col minimo attrito e per mantenere la struttura rotante in asse. Il più semplice e tradizionale cuscinetto meccanico, dal costo favorevolmente basso, è però inadatto ai FESS che operano a velocità più elevate, inoltre richiede una attenta manutenzione anche a velocità ridotte e continuo bisogno di lubrificazione. Si è passati dunque all'utilizzare sempre più spesso cuscinetti magnetici, che da un lato non hanno perdite per attrito dall'altro possono diventare costosi e consumano energia per funzionare. Questo perché, se è vero che si può pensare ad un sistema di sospensione passivo che non richieda energia utilizzando magneti permanenti (PMB³), questo risulta intrinsecamente instabile. Studiato per avere la giusta forza ad una determinata distanza, la minima variazione di posizione cambia le forze in gioco. Perciò i sistemi sono più spesso ibridi con l'apporto ulteriore di elettromagneti che regolino le variazioni di forza dovute alla deviazione dall'assetto ottimale (AMB⁴) servendosi di un complesso sistema di controllo in retroazione. Un sistema siffatto riesce a mantenere un contenuto *life cycle cost*. Un altro sistema utilizzato è il *superconductive magnetic bearing* (SMB) che sfrutta le proprietà dei superconduttori ed è molto performante in quanto non produce attriti, è compatto e ha una lunga durata di vita. Purtroppo questi materiali per essere superconduttivi necessitano di un sistema di raffreddamento criogenico, fattore che ricade sul costo. Per ridurre parzialmente questo bisogno si ricorre anche a superconduttori con temperature critiche più alte,⁵ cioè con un comportamento superconduttivo a temperature meno estreme. Le perdite parassite con questo ultimo sistema si riducono sotto lo 0.2% all'ora dell'energia totale accumulabile mentre si attestano all'1% per i cuscinetti magnetici e al 5% per quelli meccanici [8].

3.1.5 Involucro di contenimento

La camera di contenimento svolge due principali funzioni: fornire un ambiente per la rotazione che sia privo d'aria per evitare attriti di questo tipo e il contenimento in caso di distruzione del rotore a velocità critiche. Se come già spiegato in 3.1 si arriva alla velocità critica per qualche motivo, la tensione a cui viene sottoposto il materiale è eccedente a quella di progetto e porta a rottura deflagrante: in parti di dimensioni

³Passive Magnetic Bearings

⁴Active Magnetic Bearings

⁵High Temperature Superconductor (HTS)

consistenti se il materiale è una lega metallica, in pezzi molto più piccoli se invece il materiale è composito.

Capitolo 4

Approssimazione dell'analisi 3D tramite i risultati ottenuti con analisi 2D assialsimmetrica

Lo studio si rivolge all'interazione tra un volano a flusso assiale e il cuscinetto magnetico ibrido deputato alla sua sospensione che perciò elimina il problema dell'attrito dovuto a contatto in fase di rotazione. Il sistema ibrido di sospensione è composto da un magnete permanente, dimensionato per sostenere tutta la massa rotante del volano, e da bobine di controllo poste sopra e sotto la massa rotante agenti in modo da bilanciare il sistema in caso di squilibrio delle forze verticali. Il volano, costituito da materiale ferromagnetico (acciaio), agisce direttamente da secondario per la richiusura del campo. L'obiettivo della tesi è quello di creare un algoritmo (scritto in matlab) che restituisca forze e momenti delle forze complessivi agenti sul volano agli input della sua posizione rototraslata relativa rispetto al sistema di sospensione. Si riuscirà tuttavia a prendere in esame la sola interazione del volano con il magnete permanente.

4.1 Caratterizzazione del sistema e modelli FEM 2D e 3D

Vediamo ora il sistema già descritto più nel dettaglio, esso presenta le caratteristiche qui riportate:

- *Potenza nominale:* $P_n = 20 \text{ kW}$;
- *Tempo di scarica:* 3-5 min;
- *Composizione volano:* AISI 4340;
- *Composizione gioghi del cuscinetto:* steel-1008;
- *Massa volano:* 123 kg;
- *Intervallo di velocità:* 7000-20000 rpm;
- *Fattore di forma:* 0.75;

Le dimensioni si riportano in figura 4.1 che raffigura il modello FEM 2D assialsimmetrico a disposizione nel software Ansys per campionare i dati. In figura 4.2 invece una sezione del modello 3D per la verifica dei risultati.

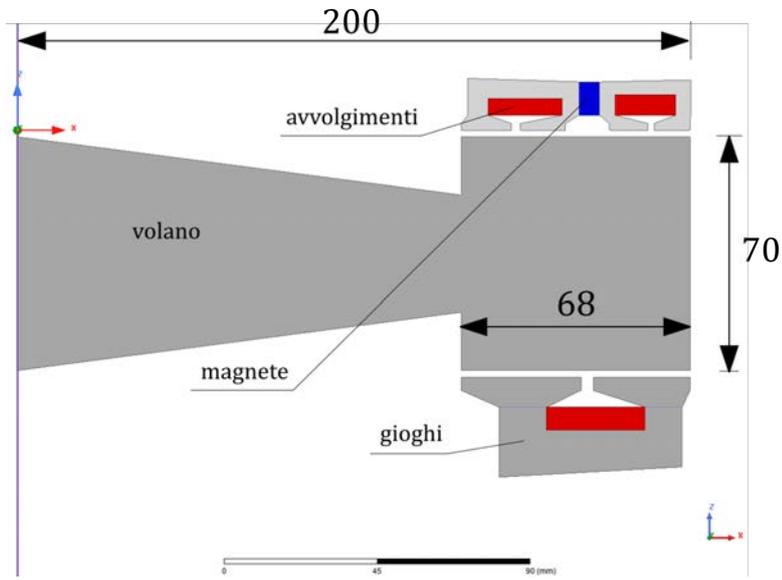


Figura 4.1: modello 2D assialsimmetrico. dimensioni in [mm]

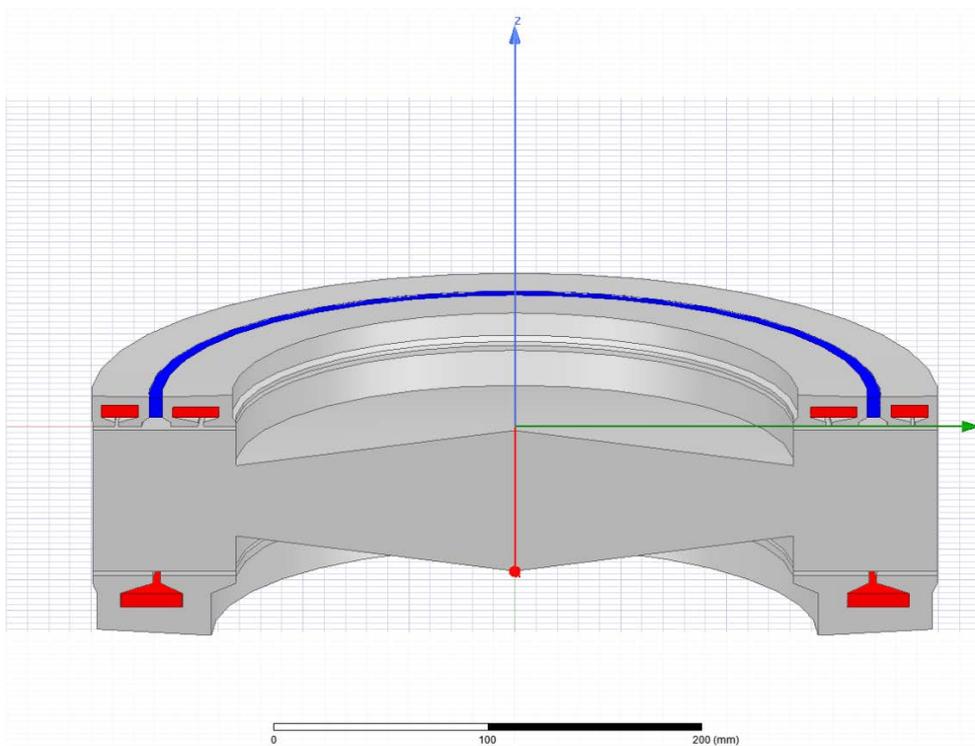


Figura 4.2: sezione del modello 3D del volano

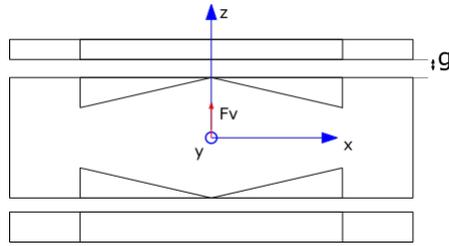


Figura 4.3: sistema di riferimento per i calcoli relativi alla traslazione

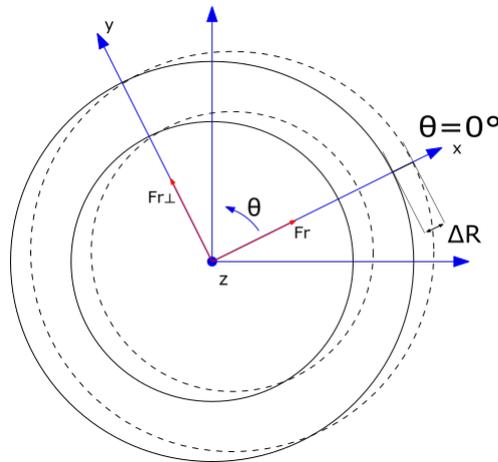


Figura 4.4: sistema di riferimento per i calcoli relativi alla traslazione

Si vuole studiare e modellizzare l'effetto del movimento del volano per tutti i gradi di libertà di spostamento che interessano la sospensione magnetica, ovvero quelli relativi alla traslazione e quelli relativi alla rotazione, ad esclusione della rotazione attorno all'asse z , che è ininfluente nel cambiamento dell'espressione e delle entità delle forze di sollevamento ed è riservato all'accumulo energetico essendo l'asse d'inerzia principale attorno cui il volano ruota a velocità elevatissime. Per farlo si sono introdotte alcune variabili e due sistemi di riferimento non assoluti. Il primo è tenuto orientato relativamente allo spostamento orizzontale del volano, che convenzionalmente sarà assunto lungo l'asse x (sistema di riferimento relativo alla traslazione). La Fig. 4.3 mostra schematizzato il sistema in sezione. La parte superiore e inferiore della figura rappresentano la parte statorica che comprende i gioghi in ferro, il magnete e le spire degli elettromagneti, la parte intermedia è il volano vero e proprio. Detto ciò, si intende modellizzare il sistema con un algoritmo che dovrà restituire i corretti valori di forze, momenti e induttanze qualunque sia l'assetto rototraslato del volano.

4.2 Modellazione spostamento orizzontale

Lo spostamento orizzontale del volano che noi misuriamo in termini di mm può avvenire secondo una direzione qualsiasi, per comodità computazionale abbiamo creato il primo sistema di riferimento mostrato in Fig. 4.4 che vede l'asse x essere nella stessa direzione dell'escursione massima della traslazione orizzontale rispetto alla posizione centrata iniziale. Si immagini ora di dover studiare il risultato complessivo in termini di forze magnetiche di sospensione create dal magnete e veicolate dai gioghi in ferro su questa configurazione tridimensionale traslata senza ricorrere ad una simulazione 3D. Questa

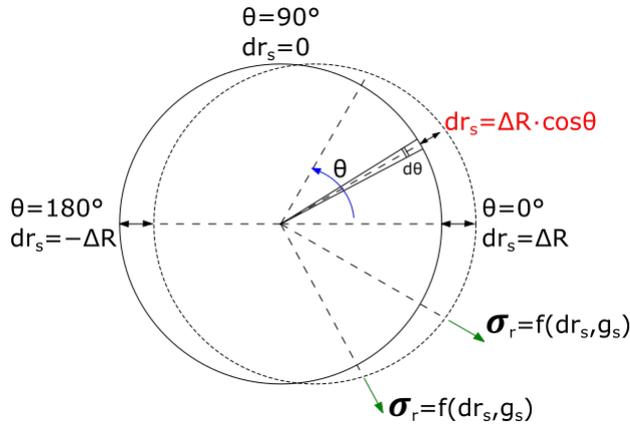


Figura 4.5: approssimazione del movimento di traslazione

richiederebbe uno sforzo computazionale elevato e un tempo di simulazione eccessivo che mal si presta a fare da base di dati per un algoritmo più generale. Per questo motivo si cerca la soluzione avendo a disposizione solo simulazioni bidimensionali, la base di dati saranno le soluzioni dei campi effettuate tramite Ansys Maxwell sul modello bidimensionale a simmetria cilindrica di asse z riportato in figura 4.1 a pagina 32. Come si può dedurre l'analisi di un modello bidimensionale implica che la soluzione sia relativa all'oggetto ottenuto dalla rotazione rispetto all'asse z di quanto raffigurato, invece ci si è serviti della soluzione simmetrica per andare a calcolare la forza esplicata sull'area del settore circolare di angolo infinitesimo $d\vartheta$ (si veda Fig. 4.5), a cui ci si riferirà come forza per *spicchio* o appunto per *setto*, abbreviata dal simbolo sigma $\vec{\sigma}$ nel seguito della trattazione. Si immagini infatti di approssimare il movimento di traslazione orizzontale schematizzato nella Fig. 4.4 nella pagina precedente come in Fig. 4.5.

L'algoritmo implementato si fonda sull'idea che ogni spicchio (radiale per definizione) di angolo $d\vartheta$ potesse avere una sua traslazione radiale dr_s (meglio parlare in questo caso di deformazione) in dipendenza dell'angolo ϑ . Nella direzione dello spostamento, l'escursione (stiramento, in quanto deformazione positiva) dalla configurazione centrata sarà massima e viene chiamata ΔR variando con andamento di funzione $\cos(\vartheta)$ lungo tutto il perimetro diventando anche negativa (compressione dello spicchio).

L'Ansys mette a disposizione uno strumento di post-processing chiamato field calculator tramite cui si è andato a calcolare la $\vec{\sigma}$ nel modello bidimensionale assialsimmetrico, scomposta in realtà nelle componenti radiali e verticali. Si parte dal vettore Edge force density [N/mm] (essenzialmente una pressione) di componenti x,y,z ovvero, essendo in simmetria cilindrica, $r,teta,z$ e dopo aver isolato le componenti verticali e orizzontali che chiamiamo f_r e f_z (la f_ϑ è nulla, siamo in simmetria) si procede per integrazione sulla superficie coperta dall'angolo $d\vartheta$ immaginario. Si deve tenere in considerazione che parlando di simmetria cilindrica i punti del modello più vicini all'asse di simmetria (con raggio minore) danno luogo, con l'angolo $d\vartheta$, ad aree minori rispetto a quelli più distanti. Da questa considerazione segue l'apporto all'interno dell'integrale di linea della funzione raggio. Basti pensare che la sola formula dell'area del settore circolare infinitesimo sarebbe $\int_{linea} r dr$

$$\sigma_r = \int_{linea} f_r r dr \quad \sigma_v = \int_{linea} f_z r dr \quad (4.1)$$

L'integrale di linea delle formule (4.1) è stato eseguito sul profilo del volano nel modello bidimensionale dove si esprime la Edge force density, anche se la pressione sarà quasi

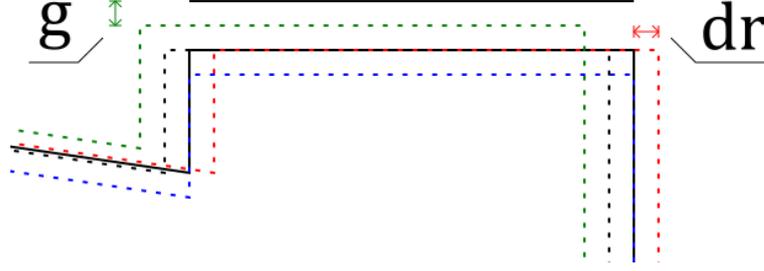


Figura 4.6: schema delle configurazioni simulate nel modello 2D, variazione della traslazione radiale dr e del traferro g

tutta concentrata nell'interfaccia tra poli magnetici e volano.

4.3 Calcolo delle forze di traslazione orizzontale e verticale

Gli integrali delle formule (4.1) sono stati fatti eseguire al software Ansys Maxwell nel caso bidimensionale per un insieme di 441 configurazioni campione, combinazioni di traferro g e deformazione dr nei limiti dello spostamento atteso/permesso. Si parla del range di valori che vanno da 1mm a 3mm per il traferro e -1mm a 1 mm per la deformazione radiale con uno step di 0.1mm per entrambi gli sweep ($g_n=2$ mm traferro nominale). Vediamo un esempio di come appaiono le configurazioni 2D simulate in figura 4.6. Dopodiché si è proceduto con un fitting polinomiale in due variabili nella forma $c_1 + c_2 dr + c_3 g + c_4 dr g + c_5 g^2$ per ottenere le funzioni analitiche $\sigma_r(g, dr)$, $\sigma_v(g, dr)$ che vediamo nelle figure 4.7 e 4.8 nella pagina seguente. Le due variabili da cui dipendono le funzioni possono in tutta generalità essere diverse per ogni spicchio di una configurazione rototraslata tridimensionale. Ogni settore che va ad approssimare il 3D infatti sarà solamente traslato e deformato avendo una propria distanza dal traferro (g_s) e una propria deformazione (dr_s) rispetto alla parte statorica e conseguentemente una diversa $\vec{\sigma}$. Si sono poi calcolate le forze compressive sul volano mostrate nelle Fig. 4.3 e 4.4, che sono orientate per convenzione secondo il sistema di riferimento relativo alla traslazione, previo il necessario cambio di variabili. Si noti infatti che l'integrale deve essere in $d\vartheta$ per fare una sommatoria delle forze di tutti i settori infinitesimi perciò si confonde le variabili 2D con quelle 3D dichiarando, per il momento, che $g = g_s = G$ e $dr = dr_s = \Delta R \cos(\vartheta)$ con G e DR parametri che saranno mantenuti tali nell'integrazione e scelti a posteriori in modo da avere le primitive $F_r, F_{r\perp}$ e F_v funzione solo dei parametri scelti per lo spostamento del volano.

$$F_r = \int_0^{2\pi} \sigma_r(\Delta R \cos(\vartheta), G) \cos(\vartheta) d\vartheta \quad (4.2)$$

$$F_{r\perp} = \int_0^{2\pi} \sigma_r(\Delta R \cos(\vartheta), G) \sin(\vartheta) d\vartheta \quad (4.3)$$

$$F_v = \int_0^{2\pi} \sigma_v(\Delta R \cos(\vartheta), G) d\vartheta \quad (4.4)$$

Si noti inoltre che nel caso di sola traslazione, anche qualora composta, la disposizione delle forze radiali lungo la superficie, qualunque valore assumano, sarà simmetrica rispetto all'asse x del s.d.r con componenti di asse y opposte e perciò l'espressione (4.3) dà risultato nullo.

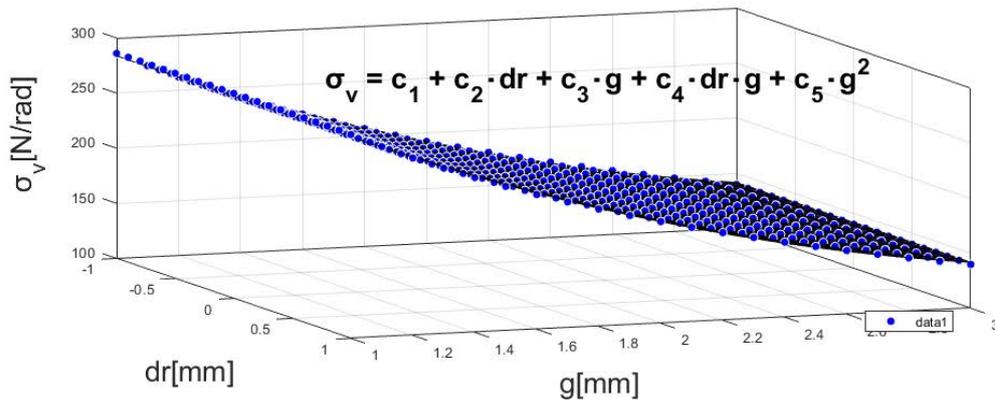


Figura 4.7: forza verticale per settore di angolo infinitesimo $d\theta$: $c_1 = 414.7$, $c_2 = -0.647$, $c_3 = -151.3$, $c_4 = 0.24$ e $c_5 = 20.1$

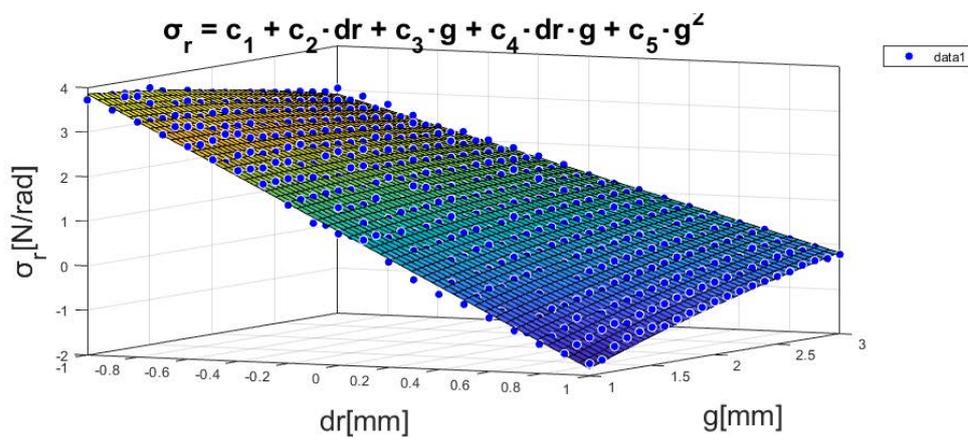


Figura 4.8: forza orizzontale per settore di angolo infinitesimo $d\theta$: $c_1 = 0.529$, $c_2 = -3.49$, $c_3 = 0.586$, $c_4 = 0.651$ e $c_5 = -0.10$

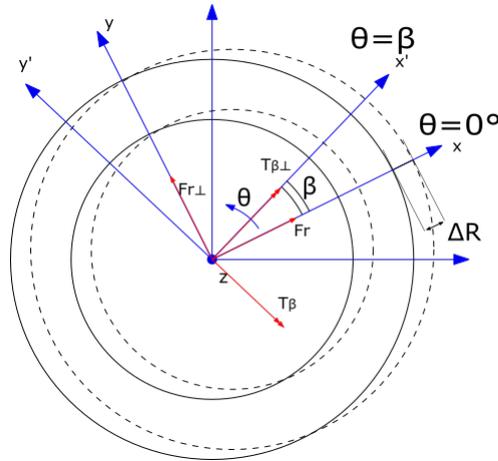


Figura 4.9: sistema di riferimento per i calcoli relativi ai momenti delle forze

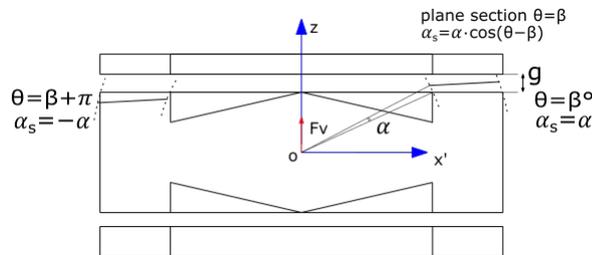


Figura 4.10: piano di rotazione

4.4 Calcolo dei momenti

Per il calcolo dei momenti si è voluto ripartire dal caso di sola rotazione del volano attorno ad un asse orizzontale (tilting) in modo che in fase di verifica venissero evidenziate subito eventuali criticità. La configurazione ruotata infatti è quella che dà più apporto in termini di sbilancio di forze complessivo sull'interfaccia poli magnetici-espansioni e conseguentemente di coppie che risultano avere un effetto destabilizzante. La rotazione a cui assegnamo il parametro angolare α (si veda Fig. 4.10) avviene attorno all'asse y' di un nuovo sistema di riferimento $x'y'z'$ relativo alla rotazione che non è quindi necessariamente coincidente con il sistema di riferimento xyz che si è usato nella trattazione delle forze. Questo sia per comodità computazionale sia perchè nel caso di configurazione spostata, composta sia da traslazione che da rotazione, queste possono avvenire su piani diversi e perciò diventa obbligatorio questo passaggio. Per chiarezza si veda in Fig. 4.9 che il sistema di riferimento relativo alla rotazione e perciò il piano virtuale su cui avviene la rotazione stessa è dipendente da un parametro angolare aggiuntivo non fissato a priori chiamato β , che indica la rotazione antioraria attorno a z del sistema di riferimento $x'y'z'$ appena introdotto rispetto al sistema di riferimento xyz relativo alla traslazione.

Essendo lo scopo sempre quello di approssimare il modello tridimensionale partendo dalla soluzione dei campi effettuata tramite Ansys Maxwell sul modello bidimensionale, approssimiamo una rotazione di un angolo α del modello tridimensionale tramite traslazione (e deformazione) di ogni singolo spicchio infinitesimo. Si prenda come riferimento la Fig. 4.10 e vediamo che una rotazione prevede che ogni punto del settore circolare infinitesimo si muova su un arco di circonferenza compiendo un angolo $\alpha_s = \alpha \cos(\vartheta)$ da cui si ottiene un'interfaccia polo magnetico-volano inclinata. Per riportare questo

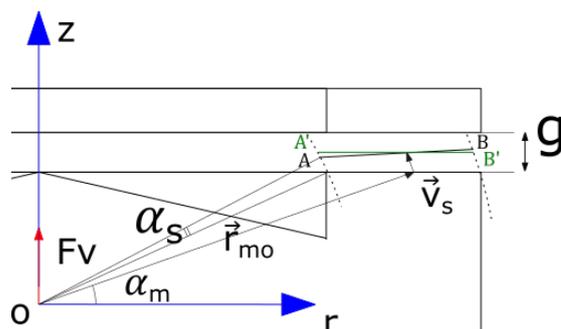


Figura 4.11: approssimazione dell'espansione inclinata del volano. Generico piano verticale di orientazione radiale (segmento AB in nero spostamento reale, A'B' in verde traslazione approssimante)

assetto ad una traslazione si deve tener conto della distribuzione della pressione magnetica sulla superficie dell'espansione del volano e della superficie stessa e verificare che la forza complessiva tra spicchio approssimato e spicchio reale non sia troppo differente. La pressione magnetica è legata all'induzione magnetica tramite legge quadratica¹ e cambia conseguentemente molto di più di B al variare del traferro. Nell'approssimazione che segue, in primo luogo si tiene conto della dipendenza quadratica dal raggio dell'area trovando il raggio medio r_m tra quello interno r_i ed esterno r_e a cui corrisponde l'uguaglianza tra le superfici interna S_i ($r_i \leq r \leq r_m$) ed esterna S_e ($r_m \leq r \leq r_e$), da cui:

$$\pi(r_m^2 - r_i^2) = \pi(r_e^2 - r_m^2)$$

e quindi:

$$r_m = \sqrt{\frac{r_e^2 + r_i^2}{2}} \quad (4.5)$$

Si considera poi la distanza r_{mo} tra il raggio medio e il baricentro O e si valuta il vettore spostamento \vec{v}_s (confondendolo con la tangente) generato dalla rotazione che interessa solo il raggio medio, in realtà assumendolo come vettore spostamento complessivo con cui si muove l'intero profilo dello spicchio infinitesimo nel generico piano verticale di orientazione radiale.

$$v_s = r_{mo} \tan(\alpha_s) \quad (4.6)$$

ottenendo la traslazione approssimata evidenziata in verde² nella figura Fig. 4.11. In questo modo inoltre la quota di pressione magnetica persa dal lato in cui la distanza traferro sarebbe minore viene bilanciata in buona misura dalla pressione guadagnata dal lato in cui la distanza sarebbe maggiore. Questa approssimazione permette di studiare la configurazione ruotata 3D tramite sommatoria dei contributi dei modelli 2D simulati nei range di traslazione già introdotti, infatti \vec{v}_s è funzione di ϑ così come le sue componenti:

$$dx_s = -v_s \sin(\alpha_m) \quad dz_s = v_s \cos(\alpha_m)$$

Prima di integrare le forze e i momenti, funzioni dei parametri 2D dr e g , sui 360° della struttura tridimensionale è necessario fare un cambio di variabili e riportare le funzioni forza in dipendenza dell'angolo ϑ , sulla base delle considerazioni precedenti. Nel caso più generale di rototraslazione del volano si assume che il cambio di variabili

¹La formula è quella della densità di energia $\frac{B^2}{2\mu_0}$

²Poco diversa dalla reale posizione ruotata riportata in nero

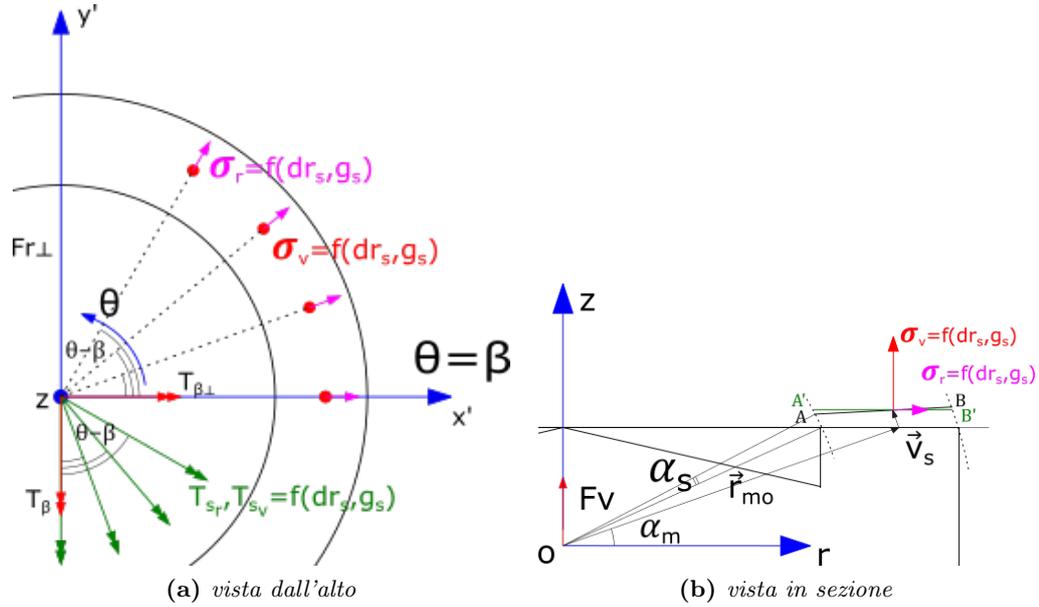


Figura 4.12: sistema di riferimento per i calcoli relativi ai momenti delle forze. T_β e $T_{\beta\perp}$, T_{s_v} e T_{s_r} convenzioni adottate per i calcoli del momento

che tiene conto della posizione dello spicchio infinitesimo nello spazio sia $g = g_s = G - dz_s$ per lo spostamento verticale $dr = dr_s = \Delta R \cos(\vartheta) + dx_s$ per quello radiale. Queste approssimazioni sono giustificate dalla piccola differenza tra gli spostamenti del raggio interno ed esterno per le modestissime rotazioni permesse e sono confermate anche dalle piccole differenze riscontrate nei risultati delle analisi agli elementi finiti. Per ottenere la forza verticale e orizzontale si rimanda alle eq. (4.2), (4.3) e (4.4) a pag 35; l'espressione integrale è la stessa, se non per il fatto che ora $\vec{\sigma}$ è funzione di tutti e 4 i parametri che identificano l'orientamento spaziale del volano: $\Delta R, G, \alpha, \beta$ oltre che di ϑ che ovviamente scompare a seguito dell'integrazione. In questo modo le forze ottenute dall'integrazione lasciano libertà di scelta degli input che vanno a decidere l'assetto del volano.

Per quanto riguarda le operazioni che seguono bisogna prima definire il momento delle forze rispetto al polo O (baricentro) per ogni settore circolare e poi essendo questi vettori diretti radialmente, integrarne le componenti dirette nelle direzioni evidenziate in Fig. 4.9. Ogni settore circolare è caratterizzato da una forza verticale diretta con l'asse z e una forza orizzontale radiale espresse dalle funzioni $\sigma_r(g, dr), \sigma_v(g, dr)$. Entrambe concorrono a creare momento: infatti applicando la formula del momento della forza $\vec{T} = \vec{b} \times \vec{F}$, tenendo conto delle convenzioni adottate in figura 4.12a, si ottiene:

$$T_s = T_{s_v} + T_{s_r} \quad (4.7)$$

con:

$$T_{s_v} = r_{mo} \sigma_v \cos(\alpha_m + \alpha_s) \quad (4.8)$$

$$T_{s_r} = -r_{mo} \sigma_r \sin(\alpha_m + \alpha_s) \quad (4.9)$$

con T_{s_v} e T_{s_r} le componenti di momento T_s , specifico per settore, dovute rispettivamente alle componenti verticale e radiale della forza. Il momento complessivo può essere determinato nelle sue due componenti T_β e $T_{\beta\perp}$ rispetto al sistema di riferimento $x'y'z$ (Fig. 4.9, Fig. 4.12a) integrando le componenti di T_s rispetto al medesimo sistema di riferimento. Essendo il vettore momento T_s corrispondente al generico settore, ortogonale

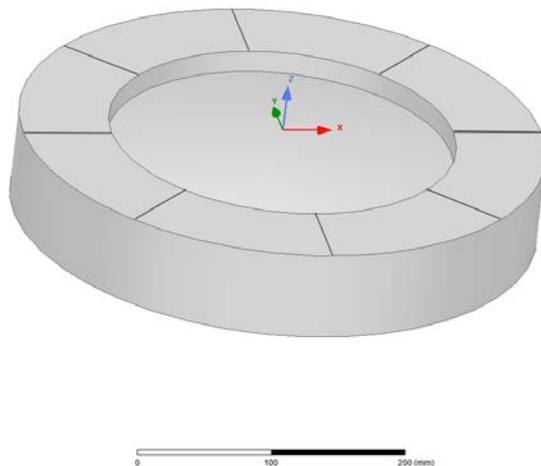


Figura 4.13: linee di campionamento delle pressioni magnetiche poste ogni 45° dell'angolo ϑ

al piano dove giacciono il settore stesso e la forza (Fig. 4.12a) si ricavano le componenti:

$$T_\beta = \int_0^{2\pi} T_s \cos(\vartheta - \beta) d\vartheta \quad T_{\beta\perp} = \int_0^{2\pi} T_s \sin(\vartheta - \beta) d\vartheta \quad (4.10)$$

4.5 Risultati

Con il metodo di approssimazione finora approntato i risultati non sono del tutto soddisfacenti, basti confrontare i risultati dei due casi base di sola traslazione e sola rotazione ottenuti dall'algorithm che si è creato a partire dal modello 2D, con quelli del modello 3D simulato in Ansys Maxwell (si veda Tab 4.1). Per ottenere dei risultati omogenei a livello di precisione le mesh dei modelli 2D e 3D sono state rifinite in modo da fornire gli stessi risultati nelle condizioni di simmetria assiale (volano coassiale con lo statore). Si è poi adottato il medesimo grado di rifinitura per le analisi 3D delle configurazioni spostate.

Come vediamo dalla tabella 4.1 a fronte, il caso centrato, a meno di differenze nella mesh, ci dice che le simulazioni danno risultati pressoché identici. Lo scarto tra i risultati dell'algorithm, riportati nella colonna AL, e quelli della simulazione 3D è contenuto per quanto riguarda la traslazione ma importanti se guardiamo la rotazione e non tanto nella F_v dove l'errore rimane al 2% ma nel calcolo del momento T_β . Si procede allora con un controllo sui valori degli integrandi delle formule (4.1) su cui si basa il resto dell'algorithm: considerata una semplice rotazione 3D con $\alpha = 0.2^\circ$ 3D, si è analizzata la distribuzione della Edge force density, in particolare la componente verticale f_z , sulla superficie del volano al traferro, lungo linee di campionamento radiali corrispondenti a diversi valori di ϑ (si veda Fig. 4.13).

Ognuna di queste linee corrisponde ad un settore di angolo $d\vartheta$ 3D (spicchio 3D) che viene sostituito dall'algorithm con un settore traslato opportunamente (come descritto in precedenza) ottenuto dalla simulazione assialsimmetrica 2D (spicchio 2D) di cui si è analizzato lo stesso andamento della Edge force density per poi andare a confrontarli. Nel caso preso in esempio si ha che l'andamento 2D che andremo a confrontare con quello 3D (curve azzurre nelle Fig. 4.14, 4.15 e 4.16 a pag. 42-43) per $\vartheta = 0^\circ$ sarà quello

Tabella 4.1: Risultati

ASSETTO		RISULTATI			
		2D	AL	3D	
Centrato nominale $\Delta R = 0\text{mm}$ $G = 2\text{mm}$ $\alpha = 0^\circ$ $\beta = 0^\circ$	(N)	F_r	10^{-13} (0)	0	0,033 (0)
		$F_{r\perp}$	-	0	0,024 (0)
		F_v	1212,7	1209,3	1208,6
	(Nm)	T_β	-	0	10^{-4} (0)
		$T_{\beta\perp}$	-	0	10^{-2} (0)
	Ruotato $\Delta R = 0\text{mm}$ $G = 2\text{mm}$ $\alpha = 0.2^\circ$ $\beta = 0^\circ$	(N)	F_r	-	0,56
$F_{r\perp}$			-	0	0,018 (0)
F_v			-	1231,4	1257,5
(Nm)		T_β	-	22,25	40,045
		$T_{\beta\perp}$	-	10^{-38} (0)	10^{-3} (0)
Traslato verticalmente $\Delta R = 0\text{mm}$ $G = 1.5\text{mm}$ $\alpha = 0^\circ$ $\beta = 0^\circ$		(N)	F_r	10^{-13} (0)	0
	$F_{r\perp}$		-	0	0,056(0)
	F_v		1457,8	1463,7	1452,3
	(Nm)	T_β	-	10^{-38} (0)	0,036 (0)
		$T_{\beta\perp}$	-	10^{-41} (0)	0,019 (0)
	Traslato orizzontalmente $\Delta R = 1\text{mm}$ $G = 2\text{mm}$ $\alpha = 0^\circ$ $\beta = 0^\circ$	(N)	F_r	-	-6,89
$F_{r\perp}$			-	0	-0,051 (0)
F_v			-	1209,3	1207,5
(Nm)		T_β	-	0,1531	0,835
		$T_{\beta\perp}$	-	10^{-41} (0)	0,0074 (0)

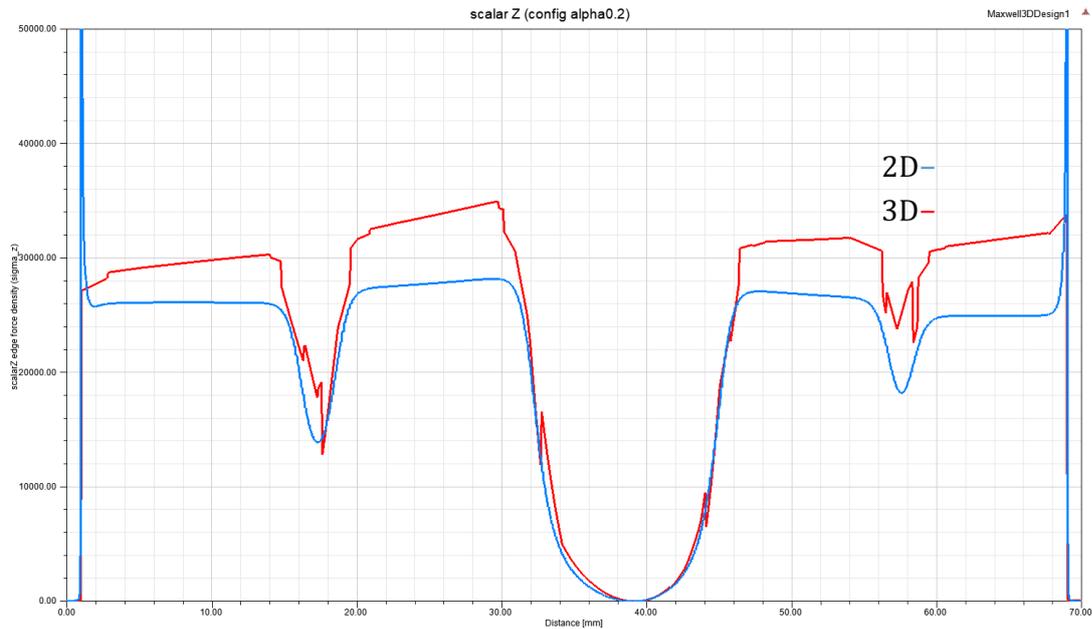


Figura 4.14: diagramma delle pressioni lungo la lunghezza radiale dell'interfaccia per $\vartheta = 0^\circ$

ottenuto dalla simulazione $dr = -0.1\text{mm}$ e $g = 1.4\text{mm}$, per $\vartheta = 90^\circ$ ci si riferisce alla simulazione nominale $dr = 0\text{mm}$ e $g = 2\text{mm}$ e per $\vartheta = 180^\circ$ alla simulazione $dr = 0.1\text{mm}$ e $g = 2.6\text{mm}$. Nelle figure appena richiamate osserviamo che il motivo per cui non si giunge ad un errore complessivo trascurabile è dovuto ad una differenza netta nell'entità dei valori di pressione magnetica. Gli spicchi a 0° gradi vedono una pressione maggiore di quella attesa, nel caso a 90° leggermente minore; invece dove il volano ha la distanza più grande in quanto traferro, a 180° , la pressione reale è minore di quella attesa.

È chiaro che non si è tenuto conto di una cosa fondamentale: il circuito magnetico tridimensionale è totalmente diverso dai modelli bidimensionali, come vedremo nel prossimo capitolo, e di conseguenza i risultati in termini di densità di flusso (induzione magnetica) e pressione magnetica. Per fare un altro esempio, se prendiamo due modelli tridimensionali diversi, ma con un magnete avente le stesse proprietà magnetica e identica sezione trasversale, che in corrispondenza di due angoli ϑ diversi hanno lo stesso settore infinitesimo con posizione nello spazio analoga (e.g. $dr = -0.63$ e $g = 1.7$) su questi settori non fluirà lo stesso flusso e perciò non si esplicherà la stessa forza come si è visto nel confronto appena fatto tra 2D e 3D.

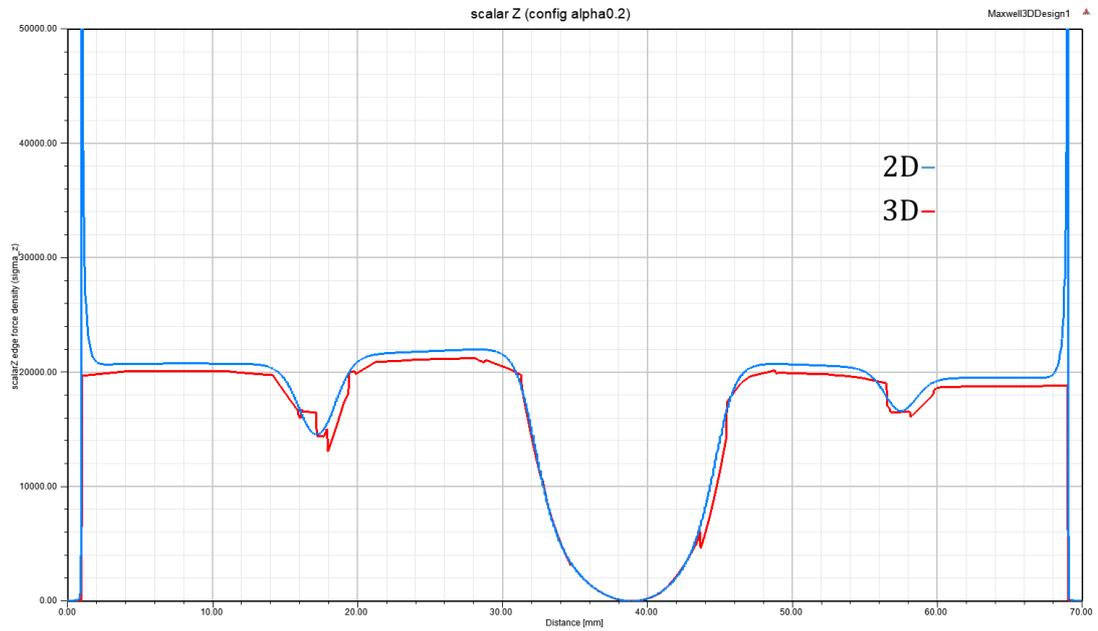


Figura 4.15: diagramma delle pressioni lungo la lunghezza radiale dell'interfaccia per $\vartheta = 90^\circ$

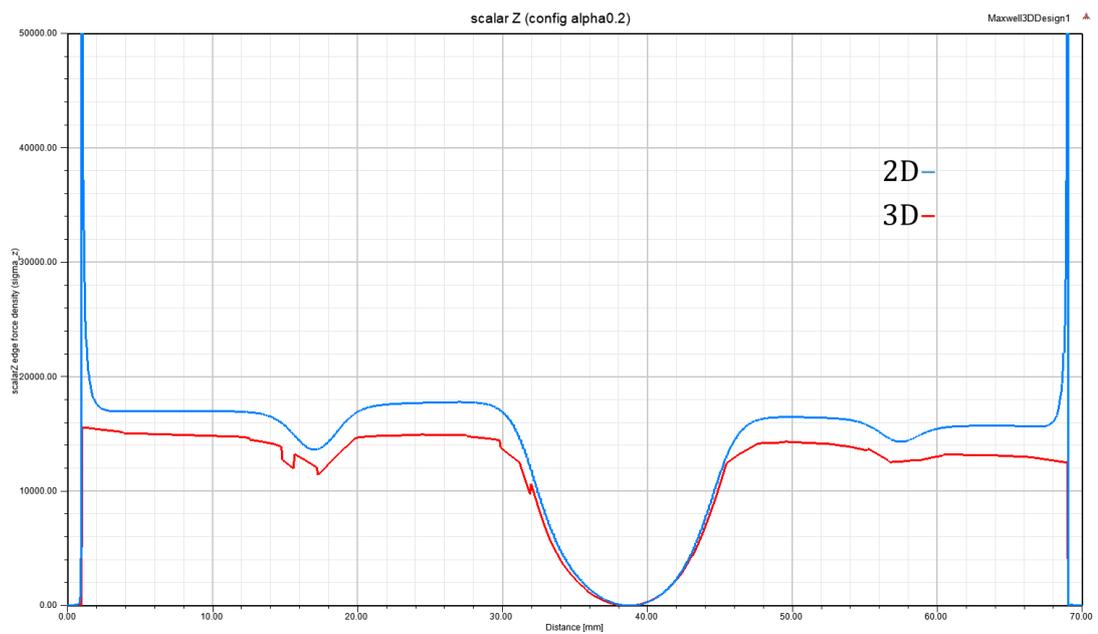


Figura 4.16: diagramma delle pressioni lungo la lunghezza radiale dell'interfaccia per $\vartheta = 180^\circ$

Capitolo 5

Rifinitura del modello magnetico

Avendo mostrato nel capitolo precedente la discrepanza tra i valori di forza nel modello 3D e in quelli 2D corrispondenti alla medesima sezione (flusso magnetico maggiore di quello atteso sui settori di angolo infinitesimo $d\vartheta$ con traferro minore e viceversa nel caso opposto) si cerca di giustificare tale discrepanza tramite un semplice circuito magnetico. Si prenda come riferimento la Fig. 5.1 che riporta il circuito magnetico di un solo settore,

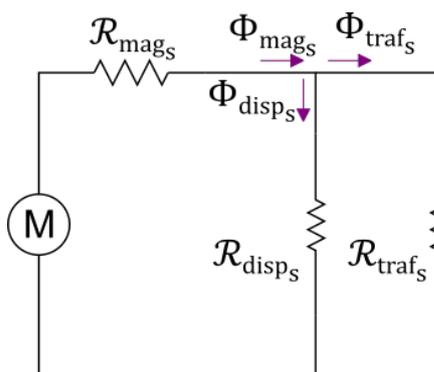


Figura 5.1: circuito magnetico per settore di angolo infinitesimo $d\vartheta$

composto da una sorgente di fmm M (magnete), dalla *riluttanza* del magnete $\mathcal{R}_{\text{mag}_s}$, dalla *riluttanza* che tiene conto dei flussi dispersi $\mathcal{R}_{\text{disp}_s}$ e dalla *riluttanza* al traferro $\mathcal{R}_{\text{traf}_s}$ (quest'ultima tiene conto che le linee di campo attraversano due volte il traferro). Questo circuito magnetico corrisponde all'andamento delle linee di flusso riportato nella Fig. 5.2 nella pagina successiva. I circuiti magnetici 2D e 3D globali 5.3 a pagina 47 sono in realtà formati dal parallelo delle riluttanze al traferro dei diversi spicchi, il cui valore, essendo un parametro geometrico, dipende solamente da dr_s e g_s ¹. Nel 2D, poichè simmetrico, tutte le riluttanze al traferro hanno lo stesso valore mentre nel 3D le riluttanze in parallelo sono diverse e dipendenti dai parametri sopracitati. A questo punto è facile intuire che mentre nel 2D il flusso totale si ripartisce nella stessa misura in tutti i settori di angolo infinitesimo, nel 3D, oltre ad essere di valore diverso per via della differente riluttanza complessiva², esso si ripartisce seguendo la legge del partitore dell'elettrotecnica: si distribuirà in quota maggiore sul percorso a riluttanza minore cioè dove il traferro è minore. Questo giustifica la discrepanza delle curve nell'analisi del capitolo precedente. Quello che è possibile ottenere dalla trattazione che segue, che

¹Soprattutto da quest'ultimo parametro

²Il flusso totale è differente per ogni casistica 3D o modello immaginario 2D che sia preso in considerazione per quanto appena detto

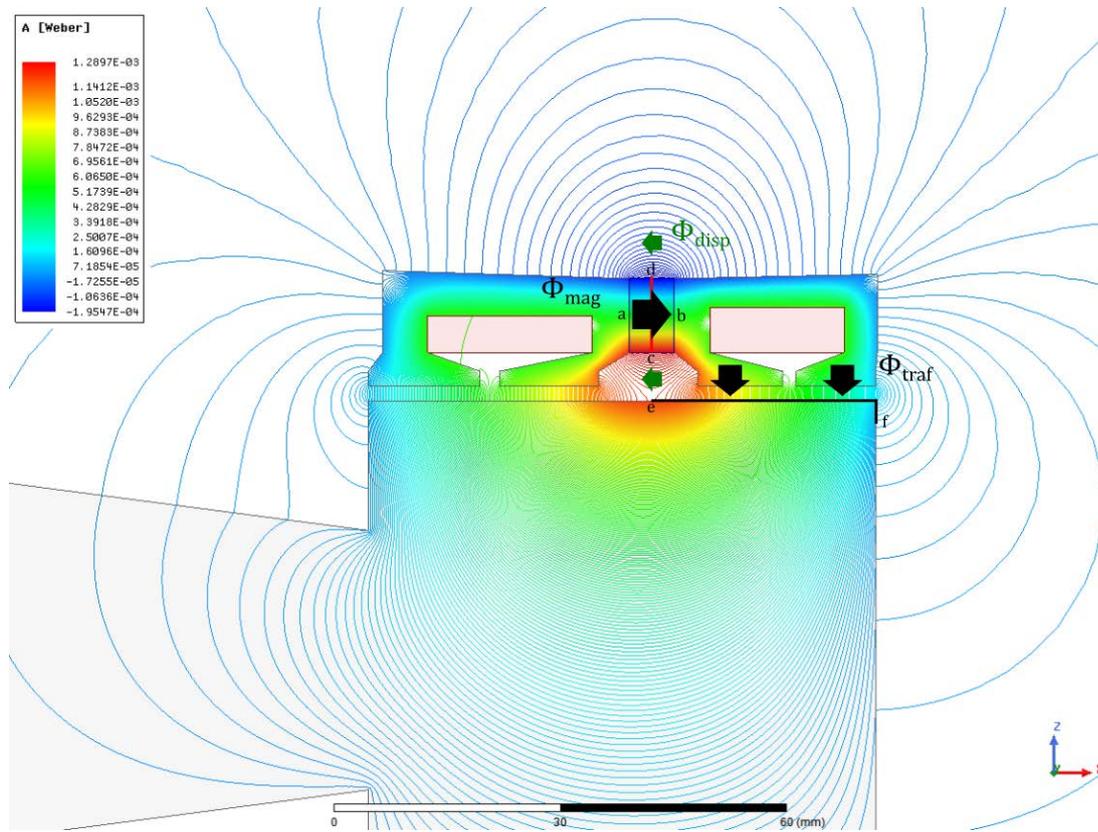


Figura 5.2: vista linee di flusso e linee di integrazione 2D

calcola le espressioni dei flussi per ogni spicchio nei casi bidimensionale e tridimensionale generici, è perciò l'espressione di un coefficiente moltiplicativo $k(\vartheta)$ correttivo del flusso, dato dal rapporto tra flusso di settore 3D e 2D al traferro, corrispondenti ovviamente allo stesso settore. Una volta ricavata l'espressione è ragionevole pensare che $k(\vartheta)^2$ sia correttivo della pressione magnetica e della forza magnetica. Questa ipotesi è più che verosimile perchè 1): il legame tra induzione B e pressione magnetica f è quadratico e puntuale sulla superficie del settore (la legge è quella della densità di energia magnetica) e 2): le curve di pressione magnetica rispettivamente di 3D e 2D viste in precedenza³, e allo stesso modo quelle di densità di flusso, a meno del fattore di proporzionalità hanno praticamente lo stesso andamento, per questo motivo si può affermare con buona approssimazione che $k(\vartheta)$ approssima bene anche il rapporto puntuale tra induzioni oltre che quello integrale dei flussi per settore. Lo si verifica anche sperimentalmente tramite il diagramma 5.4 nella pagina successiva che mette in relazione la forza verticale per spicchio σ_v e il flusso per spicchio Φ_{traf_s} per diversi valori di traferro g che mostra come la dipendenza quadratica dei valori puntuali si ripercuote senza grossi errori sulle grandezze integrali.

5.1 Calcolo parametri del circuito equivalente magnetico

Partiamo dal calcolare alcune grandezze sul modello 2D in Ansys che servono all'algoritmo per svolgere i passaggi successivi:

- la forzamagnetomotrice (f_{mm}) del magnete a vuoto

³Fig. 4.14, 4.15 e 4.16 a pag. 42-43

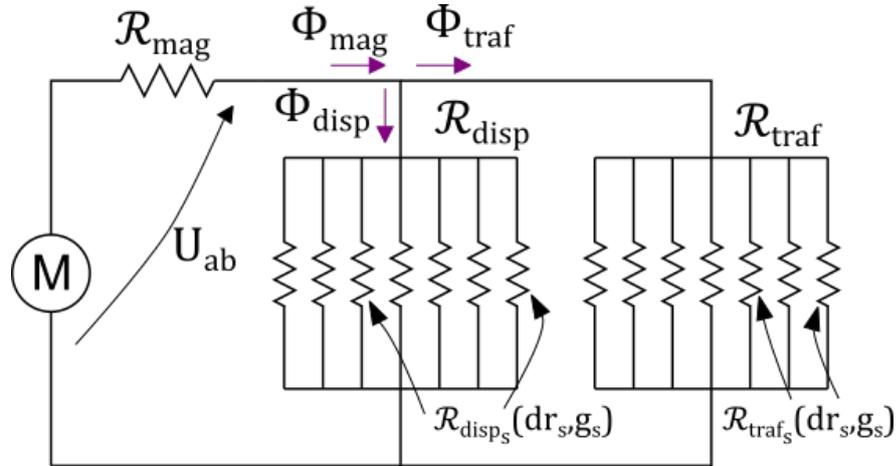


Figura 5.3: circuito magnetico 2D-3D. Nel modello 2D i parametri dr_s e g_s sono costanti con ϑ e le \mathcal{R}_{traf_s} sono tutte uguali, diverse tra loro invece nel caso 3D variando in dipendenza degli stessi parametri

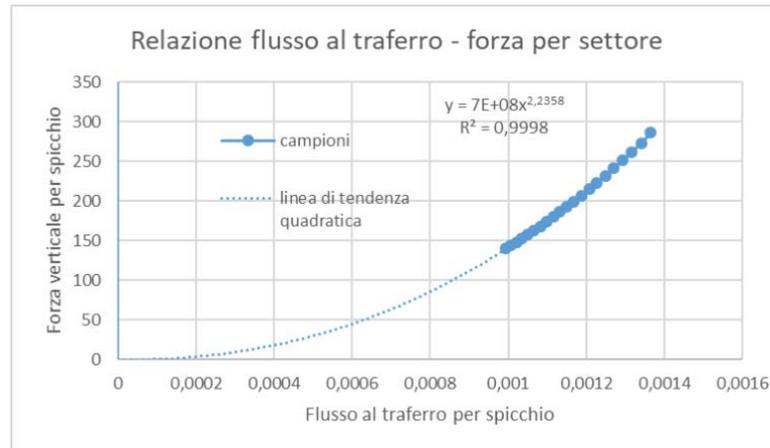


Figura 5.4: relazione quadratica forze e flussi e linea di tendenza passante per lo zero

- La tensione magnetica ai capi del magnete
- Il flusso al magnete
- il flusso al traferro

la fmm, che qui chiamiamo M per semplicità, è immediata da calcolare conoscendo il campo magnetico coercitivo del magnete H_c pari a $H_c = -837,99$ [kA/m] e la lunghezza del magnete $l = 6$ [mm] per cui:

$$M = H_c l = 5027.99 \text{ [A]}$$

La tensione magnetica $U_{ab} = \int_a^b H dl$, il flusso al magnete $\Phi_{mag} = \int_c^d B dS$ e il flusso al traferro $\Phi_{traf} = \int_e^f B dS$, sono stati calcolati sulle linee di integrazione⁴ mostrate in figura 5.2 per mezzo del Field calculator del software Ansys per ognuno dei casi simulati (la dipendenza è sempre per dr e g). L'elaborazione dei dati è stata svolta in alcuni script matlab dove si è fatto prima un fitting polinomiale dei valori ottenendo per U_{ab} ,

⁴Gli integrali di superficie sono stati fatti per mezzo di integral RZ nel field calculator

Φ_{mag} e Φ_{traf} funzioni analitiche nella forma $c_1 + c_2 dr + c_3 g + c_4 drg + c_5 g^2$ da cui poi si ricavano le riluttanze e permeanze tramite i passaggi qui riportati.

Sapendo che

$$U_{\text{ab}} = M - \mathcal{R}_{\text{mag}} \Phi_{\text{mag}}$$

Si ricava:

$$\mathcal{R}_{\text{mag}} = \frac{M - U_{\text{ab}}}{\Phi_{\text{mag}}} \quad (5.1)$$

Essendo inoltre:

$$\lambda_{\text{disp}} = \frac{1}{\mathcal{R}_{\text{disp}}} = \frac{\Phi_{\text{disp}}}{U_{\text{ab}}} = \frac{\Phi_{\text{mag}} - \Phi_{\text{traf}}}{U_{\text{ab}}} \quad (5.2)$$

e definita la riluttanza totale come:

$$\mathcal{R}_{\text{tot}} = \frac{M}{\Phi_{\text{mag}}}$$

essendo

$$\mathcal{R}_{\text{tot}} - \mathcal{R}_{\text{mag}} = \mathcal{R}_{\text{traf}} \parallel \mathcal{R}_{\text{disp}} = \frac{1}{\lambda_{\text{traf}} + \lambda_{\text{disp}}}$$

si ottiene

$$\lambda_{\text{traf}} = \frac{1}{\mathcal{R}_{\text{traf}}} = \frac{1}{\mathcal{R}_{\text{tot}} + \mathcal{R}_{\text{mag}}} - \lambda_{\text{disp}} \quad (5.3)$$

Dove $\mathcal{R}_{\text{mag}}, \lambda_{\text{disp}}, \lambda_{\text{traf}}$ sono ovviamente ancora funzione di dr e g parametri 2D. Si ricavano infine i parametri relativi al singolo settore identificati dal pedice "s" (in seguito definiti anche come specifici) necessari per analizzare il circuito magnetico 3D 5.3 nella pagina precedente. Essendo un parallelo $\lambda_{\text{traf}} = \sum_{k=1}^n \lambda_{\text{traf}_{s_k}}$ o, utilizzando le funzioni interpolanti $\lambda_{\text{traf}} = \int_0^{2\pi} \lambda_{\text{traf}_s} d\vartheta$. In condizioni di simmetria è ovviamente:

$$\lambda_{\text{traf}} = \lambda_{\text{traf}_s} 2\pi$$

ovvero:

$$\lambda_{\text{traf}_s} = \frac{\lambda_{\text{traf}}}{2\pi} \quad (5.4)$$

Lo stesso ragionamento si applica alla permeanza di dispersione λ_{disp}

$$\lambda_{\text{disp}_s} = \frac{\lambda_{\text{disp}}}{2\pi} \quad (5.5)$$

In questo modo abbiamo due funzioni che restituiscono il valore delle permeanze specifiche [H/rad], relative al settore di traferro g e spostamento radiale dr , valide quindi anche se si considera la configurazione 3D in cui g e dr variano con ϑ . Dopo il cambio di variabili già introdotto al paragrafo 4.4 riportiamo queste funzioni in dipendenza di ϑ e integriamo per avere la totale $\lambda_{\text{disp}3D}$ e $\lambda_{\text{traf}3D}$:

$$\lambda_{\text{traf}3D} = \int_0^{2\pi} \lambda_{\text{traf}_s} d\vartheta \quad (5.6)$$

$$\lambda_{\text{disp}3D} = \int_0^{2\pi} \lambda_{\text{disp}_s} d\vartheta \quad (5.7)$$

È facilmente intuibile che non vale la pena di applicare il medesimo procedimento a \mathcal{R}_{mag} , dato che la configurazione del magnete non varia e lo si può del resto facilmente verificare tramite la (5.1) che risulta computazionalmente costante. Infatti se supponiamo di lavorare con una caratteristica B-H del magnete linearizzata, come quella implementata nel software di simulazione, la riluttanza non cambia al variare del punto di lavoro del magnete⁵. Questo spiega perché, sebbene la tensione U_{ab} e il flusso Φ_{mag} abbiano valori diversi per le diverse combinazioni 2D, il risultato del calcolo di \mathcal{R}_{mag} non cambi e si possa quindi usare questo valore anche nel 3D. Se viceversa la caratteristica B-H del magnete non fosse lineare, il calcolo della riluttanza corrispondente non sarebbe stato così banale

5.2 Calcolo del coefficiente k

Dovendo correggere il valore del flusso ricavato per il singolo settore 2D con quello 3D ci serve il rapporto tra i due flussi in dipendenza di ϑ .

5.2.1 Espressione del flusso per settore 2D

Utilizzando la legge del partitore di corrente ci si può ricavare l'espressione del flusso per settore, legato, come già visto, a quelle pressioni e quelle forze per settore chiamate σ nelle equazioni (4.1) al paragrafo 4.2 ricavate col calcolatore dalle simulazioni 2D.

$$\begin{aligned}
 \Phi_{\text{trafs}2\text{D}} &= \frac{\lambda_{\text{trafs}}}{\lambda_{\text{traf}} + \lambda_{\text{disp}}} \Phi_{\text{mag}} = \frac{\lambda_{\text{trafs}}}{\lambda_{\text{traf}} + \lambda_{\text{disp}}} \frac{M}{\mathcal{R}_{\text{tot}}} = \\
 &= \frac{\lambda_{\text{trafs}}}{\lambda_{\text{traf}} + \lambda_{\text{disp}}} \frac{M}{\mathcal{R}_{\text{mag}} + \mathcal{R}_{\text{traf}} \parallel \mathcal{R}_{\text{disp}}} = \frac{\lambda_{\text{trafs}}}{\lambda_{\text{traf}} + \lambda_{\text{disp}}} \frac{M}{\mathcal{R}_{\text{mag}} + \frac{1}{\lambda_{\text{traf}} + \lambda_{\text{disp}}}} = \\
 &= \frac{\lambda_{\text{trafs}} M}{\mathcal{R}_{\text{mag}}(\lambda_{\text{traf}} + \lambda_{\text{disp}}) + 1} \tag{5.8}
 \end{aligned}$$

dove λ_{trafs} , λ_{traf} , λ_{disp} sono funzioni di ϑ , ΔR , G , α , β

5.2.2 Espressione del flusso per settore 3D

Utilizzando la legge del partitore applicata al circuito di figura 5.3 a pagina 47 riusciamo a trovare l'espressione del flusso per settore che tenga conto della corretta ripartizione

⁵Punto di lavoro che è combinazione di valori di campo magnetico H e induzione B a cui il magnete va a lavorare (potenzialmente diversa in ogni punto) e determinata dall'interazione col resto del circuito. La permeabilità, ovvero la pendenza della curva non cambia

dei flussi in un 3D generico.

$$\begin{aligned}
 \Phi_{\text{traf}_s 3D} &= \frac{\lambda_{\text{traf}_s}}{\lambda_{\text{traf} 3D} + \lambda_{\text{disp} 3D}} \Phi_{\text{mag} 3D} = \frac{\lambda_{\text{traf}_s}}{\lambda_{\text{traf} 3D} + \lambda_{\text{disp} 3D}} \frac{M}{\mathcal{R}_{\text{tot} 3D}} = \\
 &= \frac{\lambda_{\text{traf}_s}}{\lambda_{\text{traf} 3D} + \lambda_{\text{disp} 3D}} \frac{M}{\mathcal{R}_{\text{mag}} + \mathcal{R}_{\text{traf} 3D} \parallel \mathcal{R}_{\text{disp} 3D}} = \\
 &= \frac{\lambda_{\text{traf}_s}}{\lambda_{\text{traf} 3D} + \lambda_{\text{disp} 3D}} \frac{M}{\mathcal{R}_{\text{mag}} + \frac{1}{\lambda_{\text{traf} 3D} + \lambda_{\text{disp} 3D}}} = \\
 &= \frac{\lambda_{\text{traf}_s} M}{\mathcal{R}_{\text{mag}}(\lambda_{\text{traf} 3D} + \lambda_{\text{disp} 3D}) + 1} \tag{5.9}
 \end{aligned}$$

dove λ_{traf_s} è funzione di ϑ , ΔR , G , α , β mentre $\lambda_{\text{traf} 3D}$ e $\lambda_{\text{disp} 3D}$ sono funzioni dei soli parametri ΔR , G , α , β e **non** di ϑ essendo la permeanza complessiva al traferro.

5.2.3 Espressione del coefficiente e verifica

Il coefficiente correttivo è dato da:

$$k(\vartheta) = \frac{\Phi_{\text{traf}_s 3D}}{\Phi_{\text{traf}_s 2D}} = \frac{\mathcal{R}_{\text{mag}}(\lambda_{\text{traf}} + \lambda_{\text{disp}}) + 1}{\mathcal{R}_{\text{mag}}(\lambda_{\text{traf} 3D} + \lambda_{\text{disp} 3D}) + 1} \tag{5.10}$$

Prima di applicare il coefficiente correttivo alla configurazione generica si verifica se funziona per il caso specifico di sola rotazione già preso in esame ($\alpha = 0.2^\circ$ 3D). In particolare si riconfrontano le curve di pressione 3D lungo le linee di campionamento radiali corrispondenti a $\vartheta = 0^\circ$, $\vartheta = 90^\circ$ e $\vartheta = 180^\circ$ con le curve di pressione ottenute dal 2D nei casi corrispondenti a questi valori di teta, come già fatto nel capitolo precedente al paragrafo 4.5. Questa volta sono corrette del coefficiente $k(\vartheta)^2$ che, sostituendo tutti i parametri noti⁶, sarà un valore determinato per ogni ϑ .

⁶ $\Delta R = 0$, $G = 2$, $\alpha = 0.2$ e $\beta = 0$ misure in mm e gradi.

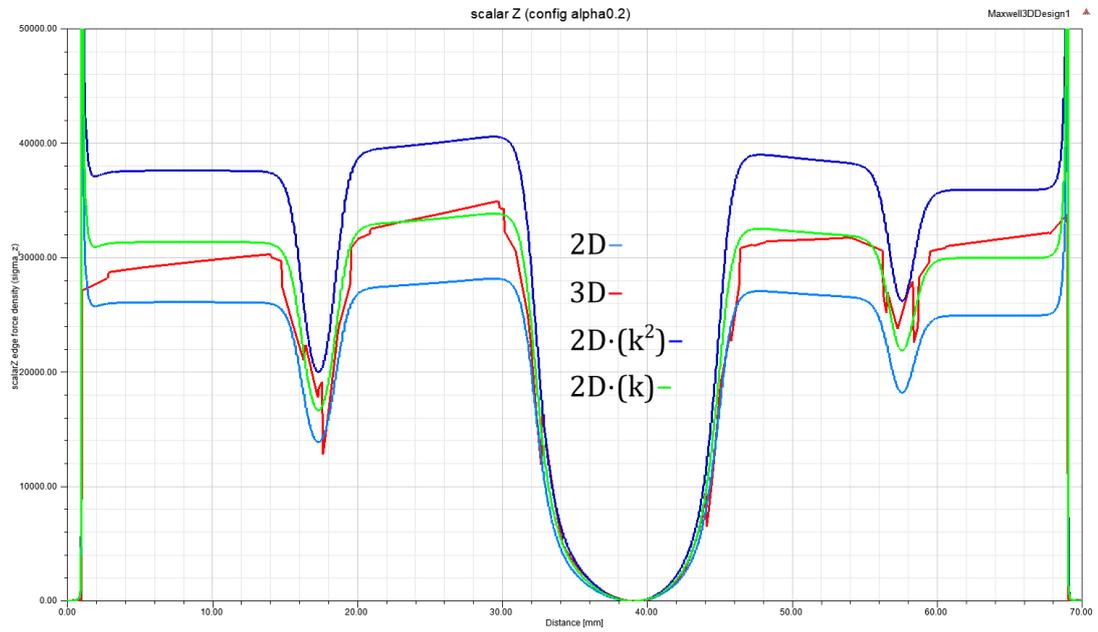


Figura 5.5: diagramma delle pressioni lungo la lunghezza radiale dell'interfaccia per $\vartheta = 0^\circ$,
 $k = 1.201$ $k^2 = 1.44$

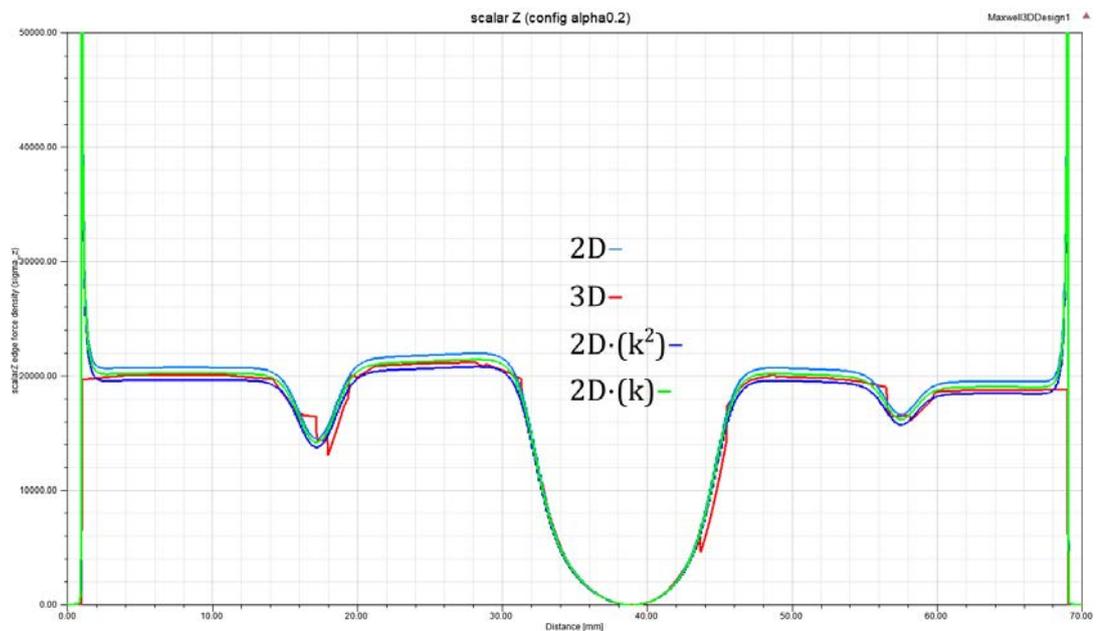


Figura 5.6: diagramma delle pressioni lungo la lunghezza radiale dell'interfaccia per $\vartheta = 90^\circ$,
 $k = 0.976$ $k^2 = 0.952$

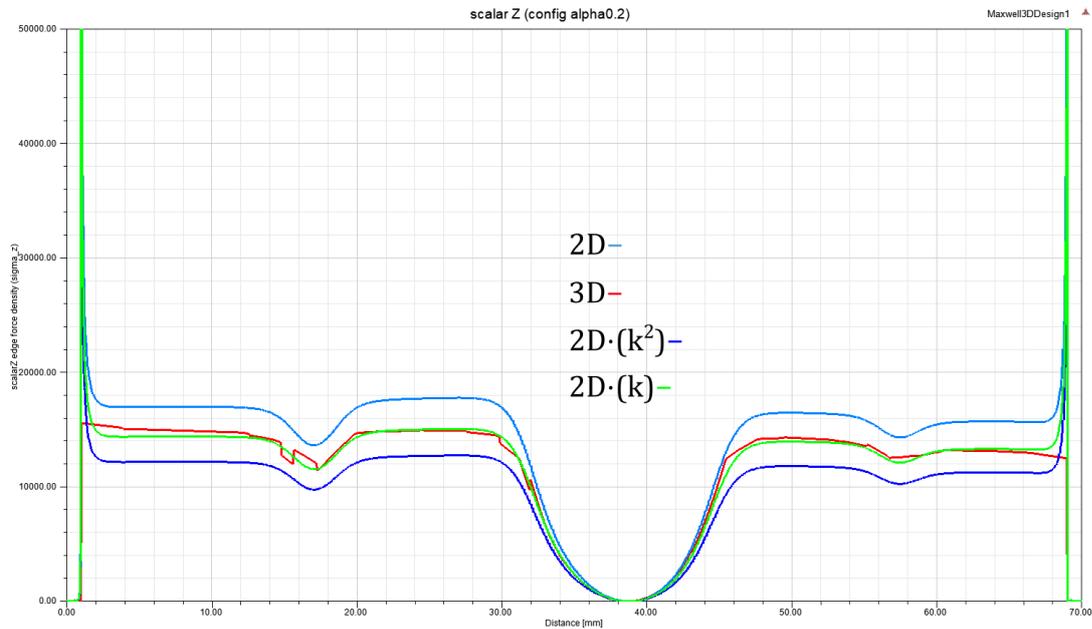


Figura 5.7: diagramma delle pressioni lungo la lunghezza radiale dell'interfaccia per $\vartheta = 180^\circ$, $k = 0.847$ $k^2 = 0.717$

Le figure mostrano che l'effetto della correzione applicando il coefficiente k^2 alle pressioni magnetiche è eccessivo. Risultati più corretti si otterrebbero usando piuttosto k cosa che però non ha un fondamento teorico. Pressioni magnetiche e flussi dovrebbero essere infatti legati da una legge quadratica in base all'espressione della densità di energia⁷:

$$f_z = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

Ciò è stato verificato con l'analisi FEM sul modello 3D per $\vartheta = 0$ che ha permesso di ricavare gli andamenti dell'induzione e della pressione elaborati e riportati in figura 5.8

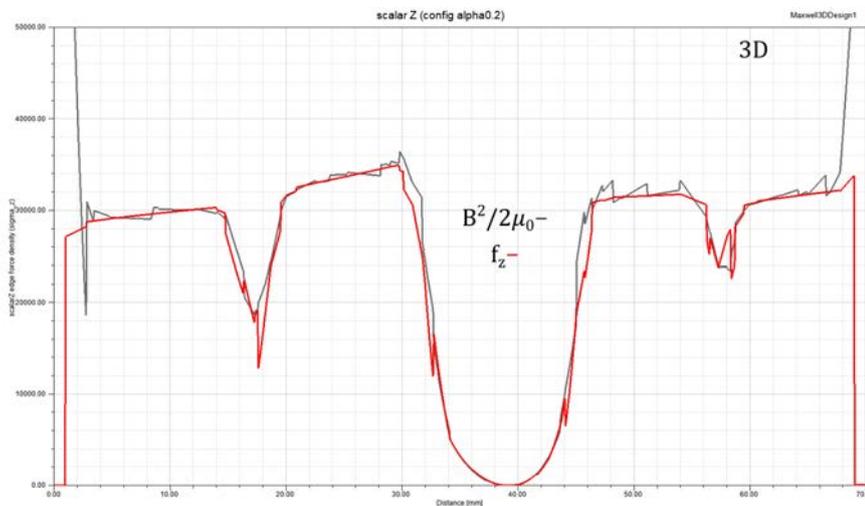


Figura 5.8: legame f-B verificato per $\vartheta = 0^\circ$

⁷ $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m]

Capitolo 6

Affinamento modello: coefficienti correttivi del flusso

Un tentativo di affinare il modello è stato separare le riluttanze al traferro in riluttanze di andata e ritorno del flusso dal volano perchè essendo questo inclinato nei casi di rotazione, al lato esterno e al lato interno le differenze nei valori di g possono ripercuotersi in quelli dell'induzione e quindi essere rilevanti in termini di forza se si pensa al legame quadratico. Al fine della riluttanza complessiva l'utilizzo del traferro medio dovrebbe compensare le differenze, mantenendo la riluttanza di spicchio complessiva circa uguale (quindi il circuito magnetico non ne risentirebbe particolarmente se fossero direttamente in serie magnetica come ipotizzato per la trattazione scorsa), ma il problema potrebbe risiedere nel fatto che nel circuito magnetico ipotizzato la riluttanza al traferro di ciascun settore è rappresentata con un unico elemento messo in parallelo con quelli di tutti gli altri settori. Sarebbe più corretto considerare il parallelo delle riluttanze al traferro delle espansioni esterne dei vari settori in serie con il parallelo delle riluttanze al traferro delle espansioni interne (figura 6.1). Separando più correttamente le riluttanze

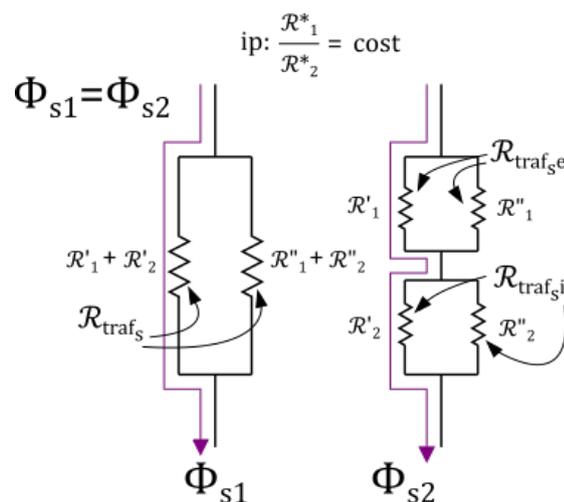


Figura 6.1: ripartizione approssimata dei flussi del capitolo scorso e ipotesi in cui potrebbe essere mantenuta tale a rigore

interne ed esterne il volano viene a costituire un nodo intermedio da cui il flusso si può redistribuire; solo se la suddivisione mantenesse un rapporto $\frac{\lambda_{traf_{si}}}{\lambda_{traf_{se}}}$ costante al variare di ϑ potremmo giustificare la semplificazione del paragrafo precedente (figura 6.1), ov-

viamente avendo inclinazioni diverse¹ questo non avviene. Finora il cambio di variabili pensato al paragrafo 4.4 era studiato per servirsi di un traferro medio $g = g_s = G - dz_s$ per approssimare l'inclinazione dell'intero spicchio. Ora serve un metodo diverso per ricavare il valore non della λ_{traf_s} ma di un $\lambda_{\text{traf}_{si}}$ e $\lambda_{\text{traf}_{se}}$ rispettivamente per l'espansione interna e quella esterna. Ovviamente questi valori si devono ricavare dal post processing 2D. L'idea è di approssimare la posizione dello spicchio del volano con una metà sottostante all'espansione interna e metà sottostante quella esterna che abbiano la stessa area. Entrambe le parti avranno un loro traferro rispettivamente g_{si} e g_{se} , e una propria distanza dalla posizione centrata dr_{si} e dr_{se} . Si complica a sua volta l'algoritmo del capitolo 4 che dovrebbe considerare non più solo la forza per settore $\vec{\sigma}$, ma due funzioni forza che diano rispettivamente il valore della forza per il lato interno ed esterno di quest'ultimo (in ogni caso da correggere tramite le considerazioni di questo capitolo sulla distribuzione dei flussi); funzioni forza ricavabili approssimativamente facendo $\frac{\vec{\sigma}(g, dr)}{2}$ e procedendo con il doppio cambio di variabili. Non ci si è tuttavia adoperati a modificare i vecchi script di composizione delle forze in tal senso perchè in attesa di validare questo nuovo approccio correttivo tramite Ansys.

6.1 Calcolo parametri preliminari

Il metodo utilizzato per calcolare $\lambda_{\text{traf}_{si}}$ e $\lambda_{\text{traf}_{se}}$ considera il circuito 2D in Fig. 6.2 a fronte (facendo un piccolo errore di approssimazione nella prossima trattazione non si considera la dispersione). Si parte dalle stesse funzioni interpolate del capitolo scorso ricavate dai valori del 2D perciò dipendenti da g e dr e si procede con il calcolo di \mathcal{R}_{mag} e \mathcal{R}_{tot} che rimane invariato. Questa volta però si ha che:

$$\mathcal{R}_{\text{tot}} = \mathcal{R}_{\text{mag}} + \mathcal{R}_{\text{traf}}$$

quindi:

$$\mathcal{R}_{\text{traf}} = \mathcal{R}_{\text{tot}} - \mathcal{R}_{\text{mag}}$$

da cui:

$$\lambda_{\text{traf}} = \frac{1}{\mathcal{R}_{\text{traf}}} = \frac{1}{\mathcal{R}_{\text{tot}} - \mathcal{R}_{\text{mag}}}$$

Una volta trovata la permeanza al traferro λ_{traf} la si divide per π anzichè 2π per trovare la permeanza specifica in metà espansione $\lambda_{\text{traf}_{s/2}} = \frac{1}{\mathcal{R}_{\text{traf}_{s/2}}}$. Infatti nel 2D le permeanze $\lambda_{\text{traf}_{s/2}}$ sono tutte uguali tra loro essendo tutti i punti dell'espansione caratterizzati dalla stessa distanza al traferro² e l'espressione della permeanza equivalente al traferro λ_{traf} , dato il circuito in figura, è banalmente:

$$\lambda_{\text{traf}} = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_{\text{traf}_{s/2}} 2\pi} + \frac{1}{\lambda_{\text{traf}_{s/2}} 2\pi}} = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_{\text{traf}_{s/2}} \pi}} = \lambda_{\text{traf}_{s/2}} \pi$$

da cui:

$$\lambda_{\text{traf}_{s/2}} = \frac{\lambda_{\text{traf}}}{\pi} \quad (6.1)$$

Avendo la funzione $\lambda_{\text{traf}_{s/2}}$ ancora funzione di g e dr , per ricondursi a $\lambda_{\text{traf}_{si}}$ e $\lambda_{\text{traf}_{se}}$ occorre fare un doppio cambio di variabili. Per ottenere la funzione $\lambda_{\text{traf}_{si}}$ si sostituiscono le variabili g e dr con g_{si} e dr_{si} mentre per ottenere $\lambda_{\text{traf}_{se}}$ si sostituiscono le stesse

¹ $\alpha = f(\vartheta)$

²Per ipotesi si ritiene trascurabile la variazione reciproca della riluttanza interna e esterna dei casi 2D con lo spostamento radiale

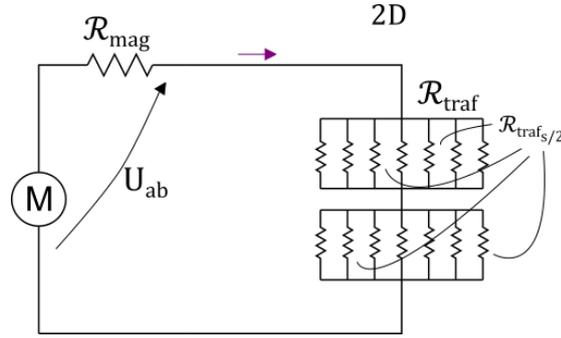


Figura 6.2: circuito 2D

con g_{se} e dr_{se} . Le nuove variabili sono funzioni di ϑ , ΔR , G , α , β e le considerazioni geometriche di tale cambio di variabili non sono dissimili da quelle al paragrafo 4.4 a pagina 37. La differenza è che ora, al posto del vettore spostamento di traslazione v_s che approssimava l'inclinazione del settore (unico e posizionato in r_m), si sono creati due vettori che approssimano diversamente la traslazione del lato dello specchio sotto l'espansione interna ed esterna: dopo aver ricavato r_m , si è arrivati a stabilire altri due raggi r_{me} r_{mi} ricavati nuovamente col principio dell'equivalenza delle aree rispettivamente nel tratto compreso tra r_m e r_e e in quello compreso tra r_i e r_m . In seguito, con considerazioni analoghe a quelle già viste, si arriva alle espressioni dz_{si} , dz_{se} , dx_{si} e dx_{se} che modificano distanza al traferro e spostamento radiale in funzione dell'angolo di tilting $\alpha_s = \alpha \cos(\vartheta)$. Si può scrivere perciò in modo simile a quanto fatto al paragrafo 4.4 a pagina 37:

$$g_{si} = G - dz_{si} \quad dr_{si} = \Delta R \cos(\vartheta) + dx_{si} \quad (6.2)$$

$$g_{se} = G - dz_{se} \quad dr_{se} = \Delta R \cos(\vartheta) + dx_{se} \quad (6.3)$$

Con le funzioni $\lambda_{traf_{si}} = \frac{1}{\mathcal{R}_{traf_{si}}}$ e $\lambda_{traf_{se}} = \frac{1}{\mathcal{R}_{traf_{se}}}$ così ottenute, ora funzioni di ϑ , si ricavano i valori delle permeanze equivalenti dei due paralleli nel 3D (Fig. 6.3c nella pagina successiva) che servono successivamente nelle formule di ripartizione dei flussi:

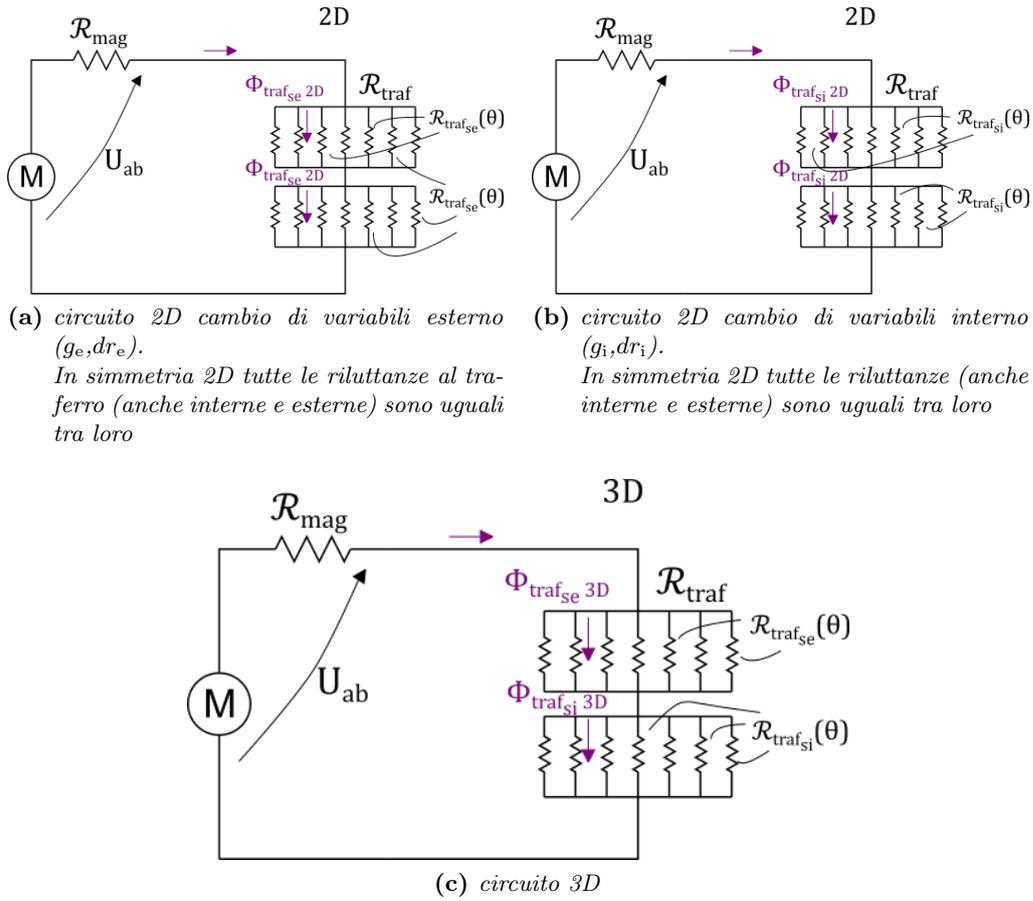
$$\lambda_{traf_e \text{ 3D}} = \int_0^{2\pi} \lambda_{traf_{se}} \quad e \quad \lambda_{traf_i \text{ 3D}} = \int_0^{2\pi} \lambda_{traf_{si}} \quad (6.4)$$

6.2 Calcolo dei coefficienti

6.2.1 Espressioni dei flussi 2D per espansione interna ed esterna 3D

I flussi 2D cercati sono quelli che si userebbero implicitamente se, in modo simile a quanto fatto nel capitolo 4, la composizione delle forze in gioco sull'intero volano, questa volta agenti separatamente su metà espansione (due forze per settore: interna ed esterna³), dipendesse direttamente dalle forze ricavate dalle simulazioni, senza nessuna correzione che consideri il parallelo del circuito magnetico 3D. I circuiti 2D da cui ottenere questi flussi perciò sono quelli in Fig. 6.3a e Fig. 6.3b nella pagina seguente.

³Si guardi l'introduzione al capitolo


Figura 6.3: circuiti magnetici

Riferendoci alla figura 6.3a possiamo dire:

$$\begin{aligned}
 \Phi_{\text{traf}_{se} 2D} &= \frac{\lambda_{\text{traf}_{se}}(\vartheta)}{\lambda_{\text{traf}_{se}}(\vartheta)2\pi} \Phi_{\text{mag}} = \frac{\lambda_{\text{traf}_{se}}(\vartheta)}{\lambda_{\text{traf}_{se}}(\vartheta)2\pi} \frac{M}{\mathcal{R}_{\text{tot}}} = \\
 &= \frac{\lambda_{\text{traf}_{se}}(\vartheta)}{\lambda_{\text{traf}_{se}}(\vartheta)2\pi} \frac{M}{\mathcal{R}_{\text{mag}} + \frac{1}{\lambda_{\text{traf}_{se}}(\vartheta)2\pi} + \frac{1}{\lambda_{\text{traf}_{se}}(\vartheta)2\pi}} = \frac{\lambda_{\text{traf}_{se}}(\vartheta)}{\lambda_{\text{traf}_{se}}(\vartheta)2\pi} \frac{M}{\mathcal{R}_{\text{mag}} + \frac{2}{\lambda_{\text{traf}_{se}}(\vartheta)2\pi}} = \\
 &= \frac{M\lambda_{\text{traf}_{se}}(\vartheta)}{\mathcal{R}_{\text{mag}}2\pi\lambda_{\text{traf}_{se}}(\vartheta) + 2} \tag{6.5}
 \end{aligned}$$

Riferendoci alla figura 6.3b:

$$\begin{aligned}
 \Phi_{\text{traf}_{\text{si}} 2\text{D}} &= \frac{\lambda_{\text{traf}_{\text{si}}}(\vartheta)}{\lambda_{\text{traf}_{\text{si}}}(\vartheta)2\pi} \Phi_{\text{mag}} = \frac{\lambda_{\text{traf}_{\text{si}}}(\vartheta)}{\lambda_{\text{traf}_{\text{si}}}(\vartheta)2\pi} \frac{M}{\mathcal{R}_{\text{tot}}} = \\
 &= \frac{\lambda_{\text{traf}_{\text{si}}}(\vartheta)}{\lambda_{\text{traf}_{\text{si}}}(\vartheta)2\pi} \frac{M}{\mathcal{R}_{\text{mag}} + \frac{1}{\lambda_{\text{traf}_{\text{si}}}(\vartheta)2\pi} + \frac{1}{\lambda_{\text{traf}_{\text{si}}}(\vartheta)2\pi}} = \frac{\lambda_{\text{traf}_{\text{si}}}(\vartheta)}{\lambda_{\text{traf}_{\text{si}}}(\vartheta)2\pi} \frac{M}{\mathcal{R}_{\text{mag}} + \frac{2}{\lambda_{\text{traf}_{\text{si}}}(\vartheta)2\pi}} = \\
 &= \frac{M\lambda_{\text{traf}_{\text{si}}}(\vartheta)}{\mathcal{R}_{\text{mag}}2\pi\lambda_{\text{traf}_{\text{si}}}(\vartheta) + 2} \tag{6.6}
 \end{aligned}$$

6.2.2 Espressioni del flusso 3D per settore interno ed esterno 3D

Ora se guardiamo la figura 6.3c possiamo scrivere l'espressione dei flussi che hanno luogo realmente grazie alle considerazione del parallelo nel caso 3D

$$\begin{aligned}
 \Phi_{\text{traf}_{\text{se}} 3\text{D}} &= \frac{\lambda_{\text{traf}_{\text{se}}}(\vartheta)}{\lambda_{\text{traf}_{\text{e}} 3\text{D}}} \Phi_{\text{mag} 3\text{D}} = \frac{\lambda_{\text{traf}_{\text{se}}}(\vartheta)}{\lambda_{\text{traf}_{\text{e}} 3\text{D}}} \frac{M}{\mathcal{R}_{\text{tot} 3\text{D}}} = \frac{\lambda_{\text{traf}_{\text{se}}}(\vartheta)}{\lambda_{\text{traf}_{\text{e}} 3\text{D}}} \frac{M}{\mathcal{R}_{\text{mag}} + \frac{1}{\lambda_{\text{traf}_{\text{i}} 3\text{D}}} + \frac{1}{\lambda_{\text{traf}_{\text{e}} 3\text{D}}}} = \\
 &= \frac{\lambda_{\text{traf}_{\text{se}}}(\vartheta)}{\lambda_{\text{traf}_{\text{e}} 3\text{D}}} \frac{M}{\mathcal{R}_{\text{mag}} + \frac{\lambda_{\text{traf}_{\text{i}} 3\text{D}} + \lambda_{\text{traf}_{\text{e}} 3\text{D}}}{\lambda_{\text{traf}_{\text{i}} 3\text{D}}\lambda_{\text{traf}_{\text{e}} 3\text{D}}}} = \\
 &= \frac{M\lambda_{\text{traf}_{\text{se}}}(\vartheta)}{\mathcal{R}_{\text{mag}}\lambda_{\text{traf}_{\text{e}} 3\text{D}} + \frac{\lambda_{\text{traf}_{\text{i}} 3\text{D}} + \lambda_{\text{traf}_{\text{e}} 3\text{D}}}{\lambda_{\text{traf}_{\text{i}} 3\text{D}}}} \tag{6.7}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Phi_{\text{traf}_{\text{si}} 3\text{D}} &= \frac{\lambda_{\text{traf}_{\text{si}}}(\vartheta)}{\lambda_{\text{traf}_{\text{i}} 3\text{D}}} \Phi_{\text{mag} 3\text{D}} = \frac{\lambda_{\text{traf}_{\text{si}}}(\vartheta)}{\lambda_{\text{traf}_{\text{i}} 3\text{D}}} \frac{M}{\mathcal{R}_{\text{tot} 3\text{D}}} = \frac{\lambda_{\text{traf}_{\text{si}}}(\vartheta)}{\lambda_{\text{traf}_{\text{i}} 3\text{D}}} \frac{M}{\mathcal{R}_{\text{mag}} + \frac{1}{\lambda_{\text{traf}_{\text{i}} 3\text{D}}} + \frac{1}{\lambda_{\text{traf}_{\text{e}} 3\text{D}}}} = \\
 &= \frac{\lambda_{\text{traf}_{\text{si}}}(\vartheta)}{\lambda_{\text{traf}_{\text{i}} 3\text{D}}} \frac{M}{\mathcal{R}_{\text{mag}} + \frac{\lambda_{\text{traf}_{\text{i}} 3\text{D}} + \lambda_{\text{traf}_{\text{e}} 3\text{D}}}{\lambda_{\text{traf}_{\text{i}} 3\text{D}}\lambda_{\text{traf}_{\text{e}} 3\text{D}}}} = \\
 &= \frac{M\lambda_{\text{traf}_{\text{si}}}(\vartheta)}{\mathcal{R}_{\text{mag}}\lambda_{\text{traf}_{\text{i}} 3\text{D}} + \frac{\lambda_{\text{traf}_{\text{i}} 3\text{D}} + \lambda_{\text{traf}_{\text{e}} 3\text{D}}}{\lambda_{\text{traf}_{\text{e}} 3\text{D}}}} \tag{6.8}
 \end{aligned}$$

6.2.3 Coefficiente e verifica

I coefficienti correttivi sono nella forma seguente:

$$\begin{aligned}
 k_i(\vartheta) &= \frac{\Phi_{\text{traf}_{\text{si}} 3\text{D}}}{\Phi_{\text{traf}_{\text{si}} 2\text{D}}} = \frac{M\lambda_{\text{traf}_{\text{si}}}(\vartheta)}{\mathcal{R}_{\text{mag}}\lambda_{\text{traf}_{\text{i}} 3\text{D}} + \frac{\lambda_{\text{traf}_{\text{i}} 3\text{D}} + \lambda_{\text{traf}_{\text{e}} 3\text{D}}}{\lambda_{\text{traf}_{\text{e}} 3\text{D}}}} \frac{\mathcal{R}_{\text{mag}}2\pi\lambda_{\text{traf}_{\text{si}}}(\vartheta) + 2}{M\lambda_{\text{traf}_{\text{si}}}(\vartheta)} = \\
 &= \frac{\mathcal{R}_{\text{mag}}2\pi\lambda_{\text{traf}_{\text{si}}}(\vartheta) + 2}{\mathcal{R}_{\text{mag}}\lambda_{\text{traf}_{\text{i}} 3\text{D}} + \frac{\lambda_{\text{traf}_{\text{i}} 3\text{D}} + \lambda_{\text{traf}_{\text{e}} 3\text{D}}}{\lambda_{\text{traf}_{\text{e}} 3\text{D}}}} \tag{6.9}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 k_e(\vartheta) &= \frac{\Phi_{\text{traf}_{se} \text{ 3D}}}{\Phi_{\text{traf}_{se} \text{ 2D}}} = \frac{M\lambda_{\text{traf}_{se}}(\vartheta)}{\mathcal{R}_{\text{mag}}\lambda_{\text{traf}_e \text{ 3D}} + \frac{\lambda_{\text{traf}_i \text{ 3D}} + \lambda_{\text{traf}_e \text{ 3D}}}{\lambda_{\text{traf}_i \text{ 3D}}}} \frac{\mathcal{R}_{\text{mag}}2\pi\lambda_{\text{traf}_{se}}(\vartheta) + 2}{M\lambda_{\text{traf}_{se}}(\vartheta)} = \\
 &= \frac{\mathcal{R}_{\text{mag}}2\pi\lambda_{\text{traf}_{se}}(\vartheta) + 2}{\mathcal{R}_{\text{mag}}\lambda_{\text{traf}_e \text{ 3D}} + \frac{\lambda_{\text{traf}_i \text{ 3D}} + \lambda_{\text{traf}_e \text{ 3D}}}{\lambda_{\text{traf}_i \text{ 3D}}}} \quad (6.10)
 \end{aligned}$$

Verifichiamo se funziona per il caso specifico di sola rotazione già preso in esame ($\alpha = 0.2^\circ$ 3D). I risultati non sono cambiati in maniera radicale e sono molto simili al $k(\vartheta)$ singolo. Risulta:

$$\begin{aligned}
 k_i(0^\circ) &= 1.17 & k_e(0^\circ) &= 1.22 \\
 k_i(90^\circ) &= 0.98 & k_e(90^\circ) &= 0.97 \\
 k_i(180^\circ) &= 0.86 & k_e(180^\circ) &= 0.83
 \end{aligned}$$

Non si riscontra quindi un sensibile miglioramento nella corrispondenza con i risultati dell'analisi 3D e l'origine della discrepanza va cercata altrove.

6.3 Ulteriori considerazioni

Finora è stata trascurata la caduta di tensione magnetica nelle parti ferromagnetiche, assunta trascurabile rispetto a quella in aria e nel magnete. Ciò è giustificato se si considerano i percorsi delle linee di flusso in una sezione radiale del volano. D'altro canto, in condizioni di non simmetria cilindrica nascono inevitabilmente delle componenti tangenziali di induzione legate ai diversi valori delle riluttanze in aria ed il percorso delle linee di flusso corrispondenti lungo la periferia del volano risulta mediamente molto più lungo di quello delle linee che si muovono in una sezione radiale. Da qui la supposizione che in tali frangenti la riluttanza delle parti ferromagnetiche possa incidere sensibilmente sulla ripartizione effettiva dei flussi. Il che spiegherebbe perchè c'è una modesta crescita del flusso nelle zone a traferro minore ma non così elevata come dispongono i risultati delle correzioni tentate che consideravano il ferro dei gioghi circondanti il magnete come un corto circuito magnetico. Se così fosse le espressioni a cui si è risaliti sono valide solo in quel caso. Per verificare se questo fattore gioca un ruolo fondamentale si è portata la permeabilità del ferro nel modello 3D a dei valori molto elevati e si sono confrontati i risultati ottenuti con l'algoritmo precedentemente sviluppato.

I risultati nelle figure 6.4 e 6.5 dimostrano in effetti che la corrispondenza è decisamente migliorata. I risultati in figura 6.6 e 6.7, relativi rispettivamente al caso di permeabilità molto elevata e materiale reale, evidenziano che il flusso che percorre il volano in direzione tangenziale è decisamente ridotto nel caso di materiale reale. Si passa infatti, relativamente ai due casi, da 1.6 [T] a 1 [T] nei punti in cui l'intensità è più elevata.

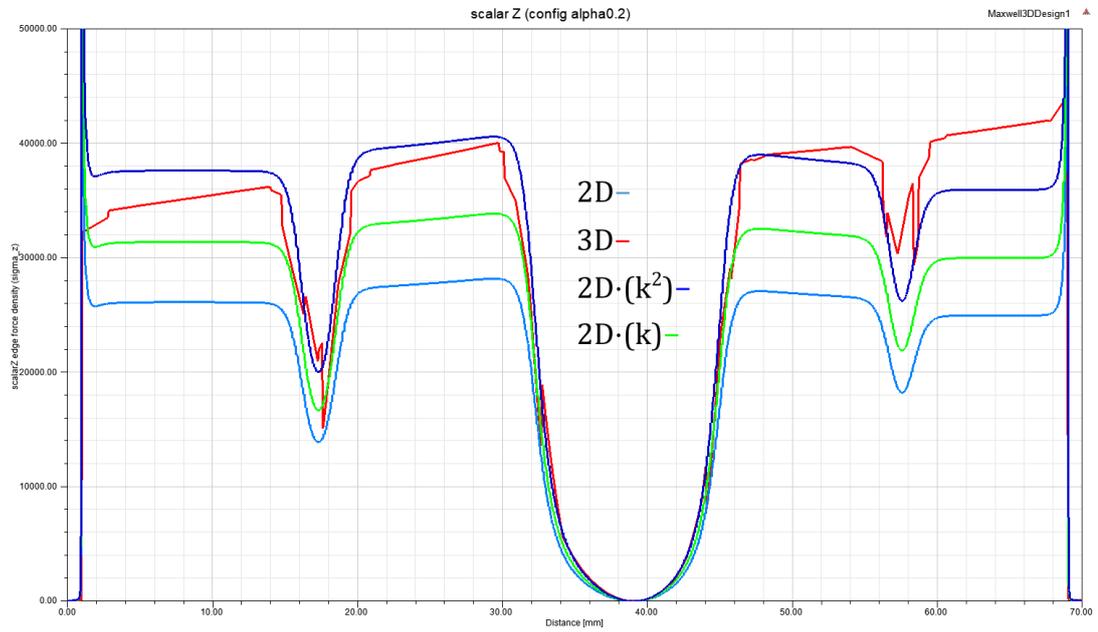


Figura 6.4: diagramma delle pressioni lungo la lunghezza radiale dell'interfaccia per $\vartheta = 0^\circ$, $k = 1.201$ $k^2 = 1.44$ (permeabilità del ferro elevata)

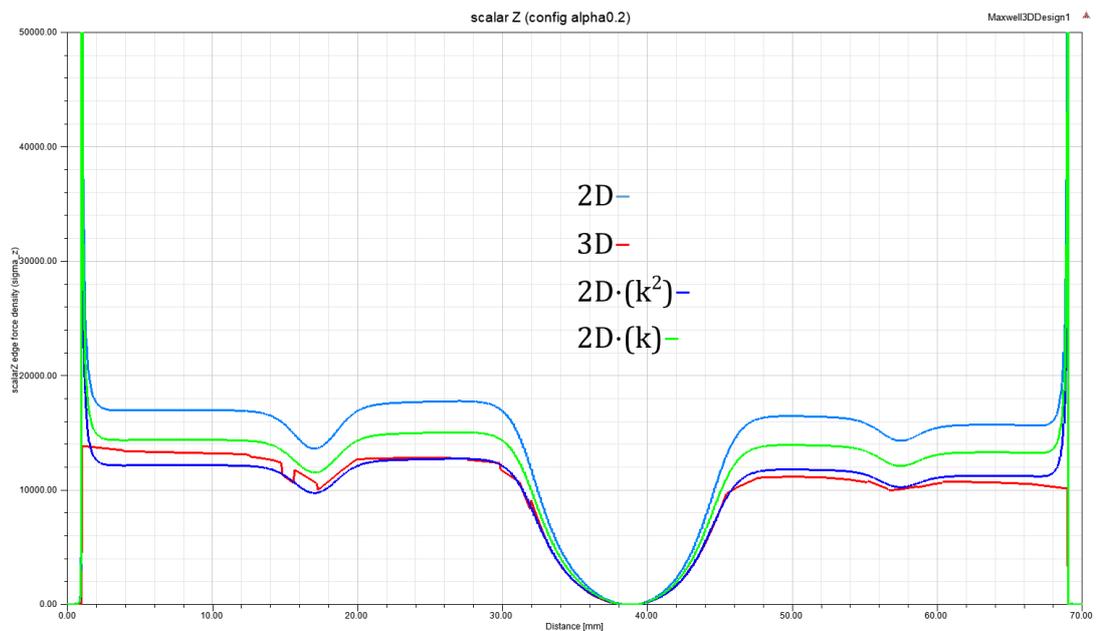


Figura 6.5: diagramma delle pressioni lungo la lunghezza radiale dell'interfaccia per $\vartheta = 180^\circ$, $k = 0.847$ $k^2 = 0.717$ (permeabilità del ferro elevata)

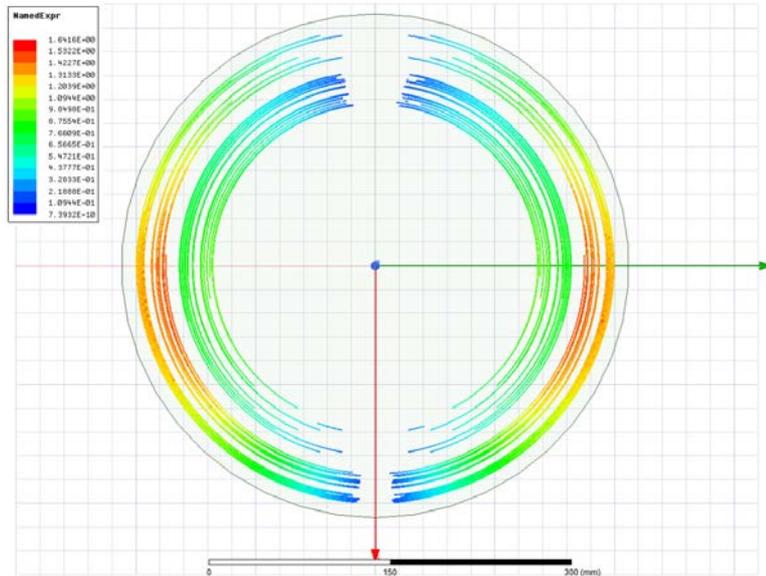


Figura 6.6: componente tangenziale dell'induzione nelle espansioni magnetiche della sospensione con $\mu = 100000$

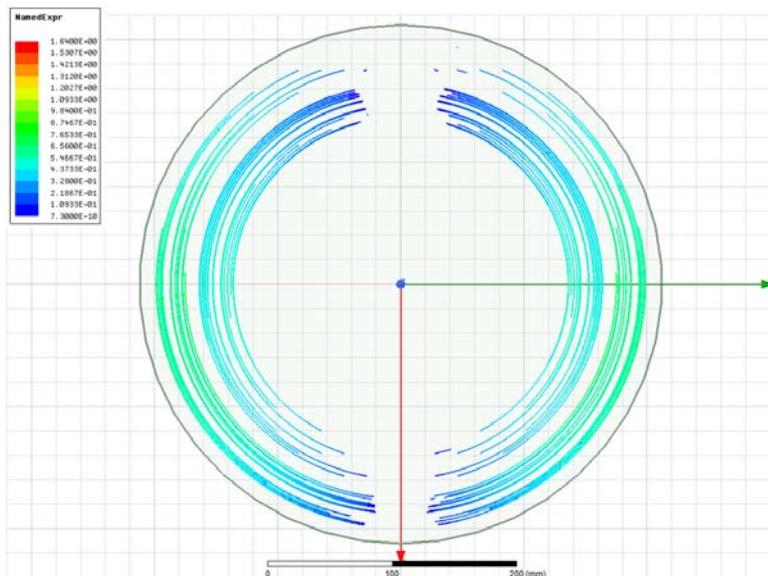


Figura 6.7: componente tangenziale dell'induzione nelle espansioni magnetiche della sospensione con caratteristica B-H del materiale steel-1008

Capitolo 7

Conclusioni

L'obiettivo di riuscire a modellizzare l'interazione elettromagnetica tra volano e statore per una qualsiasi disposizione tridimensionale reciproca utilizzando i risultati di un'analisi parametrica 2D in condizioni di simmetria cilindrica può dirsi nel complesso solo parzialmente raggiunto. Si sono tuttavia ottenuti risultati promettenti dato che l'algoritmo sviluppato permette di ricavare le componenti verticale e orizzontale della forza per un generico spostamento caratterizzato dai parametri ΔR , G , α , β . Variazioni del range dei parametri possono essere coperte variando semplicemente la campionatura dell'analisi 2D, ma possono essere evitate se il fitting si considera corretto anche per i valori fuori dai range interpolati. Nel caso di rotazione si è verificato che pesa notevolmente la riluttanza del circuito magnetico, che si traduce in un errore sulle forze verticali intorno al 2%; risulta altresì giustificato un errore molto più alto nel calcolo della coppia ribaltante e al modellizzazione del circuito magnetico può permettere di affinare la procedura di calcolo per tenere conto anche dell'effetto della riluttanza dei tratti ferromagnetici. Va anche detto che la coppia di ribaltamento può incidere tanto sull'instabilità della sospensione, da compensare con l'azione di cuscinetti magnetici, quanto sull'instaurarsi di fenomeni di precessione che dovrebbero tuttavia risultare attenuati dal naturale momento di inerzia del volano. Per l'analisi di questo circuito magnetico più complesso si dovrà presumibilmente fare ricorso a tecniche di risoluzione circuitale. Come ulteriore sviluppo, una volta riscontrata l'affidabilità del metodo con il solo magnete, si dovrà tener conto dell'influenza della corrente di avvolgimento, introducendo la corrente stessa come parametro nell'analisi 2D e come variabile da includere nelle funzioni interpolanti definite nel capitolo 4.

Bibliografia

- [1] *Solare Fotovoltaico - Rapporto Statistico 2017*. 2018. URL: <https://www.gse.it/dati-e-scenari/statistiche>.
- [2] Jim Eyer e Garth Corey. *Energy Storage for the Electricity Grid: Benefits and Market Potential Assessment Guide*. A Study for the DOE Energy Storage Systems Program. 2010. URL: <http://large.stanford.edu/courses/2015/ph240/burnett2/docs/SAND2010-0815.pdf>.
- [3] Francis Mwasilu et al. «Electric vehicles and smart grid interaction: A review on vehicle to grid and renewable energy sources integration». In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 34 (2014), pp. 501–516. ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.031>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114001920>.
- [4] *Energy storage Tracking Clean Energy Progress*. 2019. URL: <https://www.iea.org/tcep/energyintegration/energystorage/>.
- [5] *Energy storage - the role of electricity*. Commission Staff Working Document. 2017. URL: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/swd2017_61_document_travail_service_part1_v6.pdf.
- [6] P. Medina et al. «Electrical Energy Storage Systems: Technologies' State-of-the-Art, Techno-economic Benefits and Applications Analysis». In: *2014 47th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, gen. 2014, pp. 2295–2304. DOI: 10.1109/HICSS.2014.290. URL: <https://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/HICSS.2014.290>.
- [7] Siraj Sabihuddin, Aristides E. Kiprakis e Markus Mueller. «A Numerical and Graphical Review of Energy Storage Technologies». In: *Energies* 8.1 (2015), pp. 172–216. ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en8010172. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/8/1/172>.
- [8] Mustafa E. Amiryar e Keith R. Pullen. «A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications». In: *Applied Sciences* 7.3 (2017). ISSN: 2076-3417. DOI: 10.3390/app7030286. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/7/3/286>.
- [9] Behnam Zakeri e Sanna Syri. «Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis». In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 42 (2015), pp. 569–596. ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.011>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114008284>.

- [10] Susan M. Schoenung. *Characteristics and Technologies for Long-vs. Short-Term Energy Storage*. A Study for the DOE Energy Storage Systems Program. 2001. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.548.4507&rep=rep1&type=pdf>.
- [11] P. Poonpun e W. T. Jewell. «Analysis of the Cost per Kilowatt Hour to Store Electricity». In: *IEEE Transactions on Energy Conversion* 23.2 (giu. 2008), pp. 529–534. ISSN: 0885-8969. DOI: 10.1109/TEC.2007.914157.
- [12] Susan M Schoenung e William V Hassenzahl. «Long- vs. short-term energy storage technologies analysis : a life-cycle cost study : a study for the DOE energy storage systems program.» In: (2003). DOI: 10.2172/918358.
- [13] S.M. Mousavi G et al. «A comprehensive review of Flywheel Energy Storage System technology». In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67 (2017), pp. 477–490. ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.060>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116305597>.