POLITECNICO DI TORINO



Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica

Tesi di Laurea Magistrale

### Progetto ed ottimizzazione magnetic gear

**Relatori** Prof. Maurizio Repetto Ing. Cirimele Vincenzo

> Candidato Fabio Rancurello

Anno accademico 2017 - 2018

A miei nonni

Anyone who stops learning is old, whether at twenty or eighty. Anyone who keeps learning stays young. The greatest thing in life is to keep your mind young.

[Henry Ford]

## Indice

El	enco delle figure	IV							
Int	troduzione	1							
1	Cenni teorici 1.1 Principi generali	$\frac{3}{3}$							
2	1.2   Equazioni elettromeccaniche     Mappe semplificate	10							
	<ul> <li>2.1 Macchina analizzata</li></ul>	10 12 12 14 19							
3	Studio parametrico preliminare         3.1       Programmi utilizzati         3.2       Risultati caso spessore magneti permanenti variabile         3.3       Risultati caso spessore carrier variabile         3.4       Risultati caso entrambi gli spessori variabili	23 24 27 31 34							
4	Ottimizzazione         4.1       Pattern search: cenni di teoria         4.2       Impostazione del programma         4.3       Risultati	38 39 40 42							
5 B;	5 Conclusioni Bibliografia								
ום	Dibilografia								

## Elenco delle figure

1.2 Struttura magnetic gear coassiale	1	Struttura magnetic gear: (a) External type (b)Internal Type	3
1.3 Struttura ingranaggio epicicloidale	2	Struttura magnetic gear coassiale	4
2.1Struttura magnetic gear	3	Struttura ingranaggio epicicloidale	4
2.2 Struttura magnetic gear completa vista frontale . 2.3 Coppia Carrier Ring caso sun e carrier in movimer 2.4 Coppia Sun Carrier caso sun e carrier in movimer 2.5 Coppia Carrier Ring caso carrier e ring in movimer 2.6 Coppia Sun Carrier caso sun e ring in movimer 2.7 Coppia Carrier Ring caso sun e ring in moviment 2.8 Coppia Sun Carrier caso sun e ring in moviment 2.9 Mappa Tsc dell'ingranaggio con indicate $\tau_s \ e \ \tau_r$ . 2.10 Coppia Carrier Ring caso singola configurazione 2.11 Fluttuazione presente sulla cresta di Tsc caso ring 2.12 Fluttuazione presente sulla cresta di Tsc caso ring 2.13 Fluttuazione presente sulla cresta di Tsc caso sola 2.14 Fluttuazione presente sulla cresta di Tcr caso sola 3.1 Caratteristica magnetica materiale M-15 3.2 Modello Femm dove sono mostrate in rosso le o valutata l'induzione	1	Struttura magnetic gear	11
2.3 Coppia Carrier Ring caso sun e carrier in movimer 2.4 Coppia Sun Carrier caso sun e carrier in movimer 2.5 Coppia Carrier Ring caso carrier e ring in movimer 2.6 Coppia Sun Carrier caso carrier e ring in movimer 2.7 Coppia Carrier Ring caso sun e ring in movimento 2.8 Coppia Sun Carrier caso sun e ring in movimento 2.9 Mappa Tsc dell'ingranaggio con indicate $\tau_s \in \tau_r$ . 2.10 Coppia Carrier Ring caso singola configurazione 2.11 Fluttuazione presente sulla cresta di Tsc caso ring 2.12 Fluttuazione presente sulla cresta di Tsc caso ring 2.13 Fluttuazione presente sulla cresta di Tsc caso sola 2.14 Fluttuazione presente sulla cresta di Tsc caso sola 2.15 Luttuazione presente sulla cresta di Tsc caso sola 2.16 Caratteristica magnetica materiale M-15 3.1 Caratteristica magnetica materiale M-15 3.2 Modello Femm dove sono mostrate in rosso le o valutata l'induzione	2	Struttura magnetic gear completa vista frontale	11
2.4 Coppia Sun Carrier caso sun e carrier in movimen 2.5 Coppia Carrier Ring caso carrier e ring in movimer 2.6 Coppia Sun Carrier caso carrier e ring in moviment 2.7 Coppia Carrier Ring caso sun e ring in moviment 2.8 Coppia Sun Carrier caso sun e ring in moviment 2.9 Mappa Tsc dell'ingranaggio con indicate $\tau_s \in \tau_r$ . 2.10 Coppia Carrier Ring caso singola configurazione 2.11 Fluttuazione presente sulla cresta di Tsc caso ring 2.12 Fluttuazione presente sulla cresta di Tsc caso ring 2.13 Fluttuazione presente sulla cresta di Tsc caso sola 2.14 Fluttuazione presente sulla cresta di Tsc caso sola 2.14 Fluttuazione presente sulla cresta di Tsc caso sola 3.1 Caratteristica magnetica materiale M-15 3.2 Modello Femm dove sono mostrate in rosso le ovalutata l'induzione	3	Coppia Carrier Ring caso sun e carrier in movimento	15
2.5 Coppia Carrier Ring caso carrier e ring in movime 2.6 Coppia Sun Carrier caso carrier e ring in moviment 2.7 Coppia Carrier Ring caso sun e ring in moviment 2.8 Coppia Sun Carrier caso sun e ring in moviment 2.9 Mappa Tsc dell'ingranaggio con indicate $\tau_s \in \tau_r$ . 2.10 Coppia Carrier Ring caso singola configurazione 2.11 Fluttuazione presente sulla cresta di Tsc caso ring 2.12 Fluttuazione presente sulla cresta di Tsc caso ring 2.13 Fluttuazione presente sulla cresta di Tsc caso sola 2.14 Fluttuazione presente sulla cresta di Tsc caso sola 2.15 Luttuazione presente sulla cresta di Tsc caso sola 2.16 Caratteristica magnetica materiale M-15 3.1 Caratteristica magnetica materiale M-15 3.2 Modello Femm dove sono mostrate in rosso le ovalutata l'induzione	4	Coppia Sun Carrier caso sun e carrier in movimento	15
2.6 Coppia Sun Carrier caso carrier e ring in movimer 2.7 Coppia Carrier Ring caso sun e ring in movimento 2.8 Coppia Sun Carrier caso sun e ring in movimento 2.9 Mappa Tsc dell'ingranaggio con indicate $\tau_s \ e \ \tau_r$ . 2.10 Coppia Carrier Ring caso singola configurazione 2.11 Fluttuazione presente sulla cresta di Tsc caso ring 2.12 Fluttuazione presente sulla cresta di Tsc caso ring 2.13 Fluttuazione presente sulla cresta di Tsc caso sola 2.14 Fluttuazione presente sulla cresta di Tsc caso sola 2.15 Caratteristica magnetica materiale M-15 3.1 Caratteristica magnetica materiale M-15 3.2 Modello Femm dove sono mostrate in rosso le e valutata l'induzione	5	Coppia Carrier Ring caso carrier e ring in movimento	16
2.7 Coppia Carrier Ring caso sun e ring in movimento 2.8 Coppia Sun Carrier caso sun e ring in movimento 2.9 Mappa Tsc dell'ingranaggio con indicate $\tau_s \ e \ \tau_r$ . 2.10 Coppia Carrier Ring caso singola configurazione 2.11 Fluttuazione presente sulla cresta di Tsc caso ring 2.12 Fluttuazione presente sulla cresta di Tsc caso ring 2.13 Fluttuazione presente sulla cresta di Tsc caso sola 2.14 Fluttuazione presente sulla cresta di Tsc caso sola 2.15 Caratteristica magnetica materiale M-15 3.1 Caratteristica magnetica materiale M-15 3.2 Modello Femm dove sono mostrate in rosso le o valutata l'induzione	6	Coppia Sun Carrier caso carrier e ring in movimento	16
<ol> <li>Coppia Sun Carrier caso sun e ring in movimento</li> <li>Mappa Tsc dell'ingranaggio con indicate τ<sub>s</sub> e τ<sub>r</sub>.</li> <li>Coppia Carrier Ring caso singola configurazione</li> <li>Fluttuazione presente sulla cresta di Tsc caso ring</li> <li>Fluttuazione presente sulla cresta di Tsc caso ring</li> <li>Fluttuazione presente sulla cresta di Tsc caso sola</li> <li>Caratteristica magnetica materiale M-15</li> <li>Modello Femm dove sono mostrate in rosso le valutata l'induzione</li></ol>	7	Coppia Carrier Ring caso sun e ring in movimento	17
<ol> <li>Mappa Tsc dell'ingranaggio con indicate τ<sub>s</sub> e τ<sub>r</sub>.</li> <li>Coppia Carrier Ring caso singola configurazione</li> <li>Fluttuazione presente sulla cresta di Tsc caso ring</li> <li>Fluttuazione presente sulla cresta di Tsc caso ring</li> <li>Fluttuazione presente sulla cresta di Tsc caso sola</li> <li>Fluttuazione presente sulla cresta di Tsc caso sola</li> <li>Fluttuazione presente sulla cresta di Tsc caso sola</li> <li>Caratteristica magnetica materiale M-15</li> <li>Modello Femm dove sono mostrate in rosso le valutata l'induzione</li> <li>Coppia Tcr al variare dello spessore dei magneti</li> <li>Coppia Tsc al variare dello spessore dei magneti</li> <li>Densità di coppia sun carrier al variare dello spessore del carrier</li> <li>Coppia Tcr al variare dello spessore del carrier</li> <li>Densità di coppia carrier ring al variare dello spessore del carrier</li> <li>Coppia Tsc al variare dello spessore del carrier</li> <li>Coppia Tsc al variare dello spessore del carrier</li> <li>Densità di coppia carrier ring al variare dello spessore</li> <li>Loppia Tsc al variare dello spessore del carrier</li> <li>Coppia Tsc al variare dello spessore del carrier</li> <li>Densità di coppia carrier ring al variare dello spessore</li> </ol>	8	Coppia Sun Carrier caso sun e ring in movimento	17
<ul> <li>2.10 Coppia Carrier Ring caso singola configurazione</li> <li>2.11 Fluttuazione presente sulla cresta di Tsc caso ring</li> <li>2.12 Fluttuazione presente sulla cresta di Tsc caso sola</li> <li>2.13 Fluttuazione presente sulla cresta di Tsc caso sola</li> <li>2.14 Fluttuazione presente sulla cresta di Tsc caso sola</li> <li>3.1 Caratteristica magnetica materiale M-15</li> <li>3.2 Modello Femm dove sono mostrate in rosso le ovalutata l'induzione</li></ul>	9	Mappa Tsc dell'ingranaggio con indicate $\tau_s \in \tau_r$	18
<ul> <li>2.11 Fluttuazione presente sulla cresta di Tsc caso ring</li> <li>2.12 Fluttuazione presente sulla cresta di Tcr caso ring</li> <li>2.13 Fluttuazione presente sulla cresta di Tcr caso sola</li> <li>2.14 Fluttuazione presente sulla cresta di Tcr caso sola</li> <li>3.1 Caratteristica magnetica materiale M-15</li> <li>3.2 Modello Femm dove sono mostrate in rosso le ovalutata l'induzione</li></ul>	10	Coppia Carrier Ring caso singola configurazione	19
<ul> <li>2.12 Fluttuazione presente sulla cresta di Tcr caso ring</li> <li>2.13 Fluttuazione presente sulla cresta di Tsc caso sola</li> <li>2.14 Fluttuazione presente sulla cresta di Tcr caso sola</li> <li>3.1 Caratteristica magnetica materiale M-15</li> <li>3.2 Modello Femm dove sono mostrate in rosso le ovalutata l'induzione</li></ul>	11	Fluttuazione presente sulla cresta di Tsc caso ring movimento	20
<ul> <li>2.13 Fluttuazione presente sulla cresta di Tsc caso sola</li> <li>2.14 Fluttuazione presente sulla cresta di Tcr caso sola</li> <li>3.1 Caratteristica magnetica materiale M-15</li> <li>3.2 Modello Femm dove sono mostrate in rosso le ovalutata l'induzione</li></ul>	12	Fluttuazione presente sulla cresta di Tcr caso ring movimento	20
<ul> <li>2.14 Fluttuazione presente sulla cresta di Tcr caso sola</li> <li>3.1 Caratteristica magnetica materiale M-15</li> <li>3.2 Modello Femm dove sono mostrate in rosso le ovalutata l'induzione</li></ul>	13	Fluttuazione presente sulla cresta di Tsc caso solar movimento	21
<ul> <li>3.1 Caratteristica magnetica materiale M-15</li> <li>3.2 Modello Femm dove sono mostrate in rosso le ovalutata l'induzione</li></ul>	14	Fluttuazione presente sulla cresta di Tcr caso solar movimento	21
<ul> <li>3.2 Modello Femm dove sono mostrate in rosso le ovalutata l'induzione</li></ul>	1	Caratteristica magnetica materiale M-15	24
<ul> <li>valutata l'induzione</li> <li>3.3 Induzioni al variare dello spessore dei magneti</li> <li>3.4 Coppia Tcr al variare dello spessore dei magneti</li> <li>3.5 Coppia Tsc al variare dello spessore dei magneti</li> <li>3.6 Densità di coppia carrier ring al variare dello spess</li> <li>3.7 Densità di coppia sun carrier al variare dello spess</li> <li>3.8 Induzioni al variare dello spessore del carrier</li> <li>3.9 Coppia Tcr al variare dello spessore del carrier</li> <li>3.10 Coppia Tsc al variare dello spessore del carrier</li> <li>3.11 Densità di coppia carrier ring al variare dello spess</li> <li>3.12 Densità di coppia sun carrier al variare dello spess</li> </ul>	2	Modello Femm dove sono mostrate in rosso le circonferenze su cui si è	
<ul> <li>3.3 Induzioni al variare dello spessore dei magneti</li> <li>3.4 Coppia Tcr al variare dello spessore dei magneti</li> <li>3.5 Coppia Tsc al variare dello spessore dei magneti</li> <li>3.6 Densità di coppia carrier ring al variare dello spess</li> <li>3.7 Densità di coppia sun carrier al variare dello spess</li> <li>3.8 Induzioni al variare dello spessore del carrier</li> <li>3.9 Coppia Tcr al variare dello spessore del carrier</li> <li>3.10 Coppia Tsc al variare dello spessore del carrier</li> <li>3.11 Densità di coppia carrier ring al variare dello spess</li> <li>3.12 Dansità di coppia sun carrier al variare dello spess</li> </ul>		valutata l'induzione	26
<ul> <li>3.4 Coppia Tcr al variare dello spessore dei magneti</li> <li>3.5 Coppia Tsc al variare dello spessore dei magneti</li> <li>3.6 Densità di coppia carrier ring al variare dello spess</li> <li>3.7 Densità di coppia sun carrier al variare dello spess</li> <li>3.8 Induzioni al variare dello spessore del carrier</li> <li>3.9 Coppia Tcr al variare dello spessore del carrier .</li> <li>3.10 Coppia Tsc al variare dello spessore del carrier .</li> <li>3.11 Densità di coppia carrier ring al variare dello spess</li> <li>3.12 Dansità di coppia sun carrier al variare dello spess</li> </ul>	3	Induzioni al variare dello spessore dei magneti	28
<ul> <li>3.5 Coppia Tsc al variare dello spessore dei magneti</li> <li>3.6 Densità di coppia carrier ring al variare dello spess</li> <li>3.7 Densità di coppia sun carrier al variare dello spess</li> <li>3.8 Induzioni al variare dello spessore del carrier .</li> <li>3.9 Coppia Tcr al variare dello spessore del carrier .</li> <li>3.10 Coppia Tsc al variare dello spessore del carrier .</li> <li>3.11 Densità di coppia carrier ring al variare dello spess</li> <li>3.12 Densità di coppia sun carrier al variare dello spess</li> </ul>	4	Coppia Tcr al variare dello spessore dei magneti	29
<ul> <li>3.6 Densità di coppia carrier ring al variare dello spesa</li> <li>3.7 Densità di coppia sun carrier al variare dello spesa</li> <li>3.8 Induzioni al variare dello spessore del carrier</li> <li>3.9 Coppia Tcr al variare dello spessore del carrier .</li> <li>3.10 Coppia Tsc al variare dello spessore del carrier .</li> <li>3.11 Densità di coppia carrier ring al variare dello spesa</li> <li>3.12 Dansità di coppia sun carrier al variare dello spesa</li> </ul>	5	Coppia Tsc al variare dello spessore dei magneti	29
<ul> <li>3.7 Densità di coppia sun carrier al variare dello spess</li> <li>3.8 Induzioni al variare dello spessore del carrier .</li> <li>3.9 Coppia Tcr al variare dello spessore del carrier .</li> <li>3.10 Coppia Tsc al variare dello spessore del carrier .</li> <li>3.11 Densità di coppia carrier ring al variare dello spes</li> <li>3.12 Densità di coppia sun carrier al variare dello spes</li> </ul>	6	Densità di coppia carrier ring al variare dello spessore dei magneti	30
<ul> <li>3.8 Induzioni al variare dello spessore del carrier</li> <li>3.9 Coppia Tcr al variare dello spessore del carrier .</li> <li>3.10 Coppia Tsc al variare dello spessore del carrier .</li> <li>3.11 Densità di coppia carrier ring al variare dello spes</li> <li>3.12 Densità di coppia sun carrier al variare dello spes</li> </ul>	7	Densità di coppia sun carrier al variare dello spessore dei magneti	30
<ul> <li>3.9 Coppia Tcr al variare dello spessore del carrier .</li> <li>3.10 Coppia Tsc al variare dello spessore del carrier .</li> <li>3.11 Densità di coppia carrier ring al variare dello spessore 3.12 Densità di coppia sun carrier al variare dello spessore 3.13 dello spessore del carrier al variare dello spessore 3.14 Densità di coppia sun carrier al variare dello spessore 3.14 Densità di coppia sun carrier al variare dello spessore 3.14 Densità di coppia sun carrier al variare dello spessore 3.14 Densità di coppia sun carrier al variare dello spessore 3.14 Densità di coppia sun carrier al variare dello spessore 3.14 Densità di coppia sun carrier al variare dello spessore 3.14 Densità di coppia sun carrier al variare dello spessore 3.14 Densità di coppia sun carrier al variare dello spessore 3.14 Densità di coppia sun carrier al variare dello spessore 3.14 Densità di coppia sun carrier al variare 3.15 Densità di coppia sun carrier al variare 3.15 Densità di coppia sun carrier al variare 3.15 Densità di coppia sun carrier 3.15 Densità di coppia su</li></ul>	8	Induzioni al variare dello spessore del carrier	31
<ul> <li>3.10 Coppia Tsc al variare dello spessore del carrier .</li> <li>3.11 Densità di coppia carrier ring al variare dello spessore dello spesore dello spesore dello spesore dello spessore dello sp</li></ul>	9	Coppia Tcr al variare dello spessore del carrier	32
3.11 Densità di coppia carrier ring al variare dello spesi 3.12 Densità di coppia sun carrier al variare delle spesi	10	Coppia Tsc al variare dello spessore del carrier	32
3.12 Dongità di connia sun carrier al variare delle spese	11 1	Densità di coppia carrier ring al variare dello spessore del carrier	33
3.12 Densita di coppia sui carrier ai variare deno spese	12	Densità di coppia sun carrier al variare dello spessore del carrier	33
3.13Densità di coppia carrier ring al variare sia delle d	13	Densità di coppia carrier ring al variare sia delle dimensioni dei magneti sia	
1 1 .			

3.14	Densità di coppia sun carrier al variare sia delle dimensioni dei magneti sia del carrier	35
3 15	Connia Ter al variare sia delle dimensioni dei magneti sia del carrier	36
3 16	Coppia Tsc al variare sia delle dimensioni dei magneti sia del carrier	36
3.17	Peso della macchina al variare sia delle dimensioni dei magneti sia del carrier	37
3 18	Momento d'inerzia al variare sia delle dimensioni dei magneti sia del carrier	37
0.10	womento a merzia ai variare sia dene unicisioni dei magneti sia dei carrei	01
4.1	Rappresentazione a blocchi della ricerca tramite pattern search	40
4.2	Risultati della ricerca tramite pattern search con $\alpha = 0.1$	43
4.3	Vista frontale magnetic gear ottenuto dalla ricerca tramite pattern search	
	$\cos \alpha = 0.1  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  $	43
4.4	Risultati della ricerca tramite pattern search con $\alpha = 0.2$	44
4.5	Vista frontale magnetic gear ottenuto dalla ricerca tramite pattern search	
	$\cos \alpha = 0.2  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  $	44
4.6	Risultati della ricerca tramite pattern search con $\alpha = 0.3$	45
4.7	Vista frontale magnetic gear ottenuto dalla ricerca tramite pattern search	-
	$\cos \alpha = 0.3 \dots \dots$	45
4.8	Risultati della ricerca tramite pattern search con $\alpha = 0.4$	46
4.9	Vista frontale magnetic gear ottenuto dalla ricerca tramite pattern search	-
	$\cos \alpha = 0.4  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  $	46
4.10	Risultati della ricerca tramite pattern search con $\alpha = 0.5$	47
4.11	Vista frontale magnetic gear ottenuto dalla ricerca tramite pattern search	
	$\cos \alpha = 0.5  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  $	47
4.12	Risultati della ricerca tramite pattern search con $\alpha = 0.6$	48
4.13	Vista frontale magnetic gear ottenuto dalla ricerca tramite pattern search	
	$\cos \alpha = 0.6  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  $	48
4.14	Risultati della ricerca tramite pattern search con $\alpha = 0.7$	49
4.15	Vista frontale magnetic gear ottenuto dalla ricerca tramite pattern search	
	$\cos \alpha = 0.7  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  $	49
4.16	Risultati della ricerca tramite pattern search con $\alpha = 0.8$	50
4.17	Vista frontale magnetic gear ottenuto dalla ricerca tramite pattern search	
	$\cos \alpha = 0.8  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  $	50
4.18	Risultati della ricerca tramite pattern search con $\alpha = 0.9$	51
4.19	Vista frontale magnetic gear ottenuto dalla ricerca tramite pattern search	
	$\cos \alpha = 0.9  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  $	51
4.20	Risultati della ricerca tramite pattern search con $\alpha = 1.0$	52
4.21	Vista frontale magnetic gear ottenuto dalla ricerca tramite pattern search	
	$\cos \alpha = 1  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots  \dots $	52
4.22	Fronte di pareto ottenuto tramite i risultati dell'algoritmo di Pattern Search	53
	-	

### Introduzione

La finalità di questa tesi è esplorare le caratteristiche dell'ingranaggio magnetico ed eseguirne un'ottimizzazione, al fine di valutare una possibile implementazione pratica.

Tale dispositivo permette di trasferire il moto tra 2 o più assi mecccanici con un rapporto tra velocità fisso, senza incorrere nell'attrito meccanico. Presenta perciò un'efficienza più elevata del dispositivo meccanico. Altri vantaggi dati dal suo utilizzo sono: l'abbassamento del rumore trasmesso e la capacità del dispositivo di autoproteggersi in caso di superamento della coppia massima.

D'altro canto gli ingranaggi meccanici, grazie all'elevata forza locale data dall'azione dei denti, possono vantare valori di coppia trasferiti elevati nonostante le dimensioni ridotte.

Si è andato a studiare, quindi, se un riduttore magnetico può essere sostituito ad un ingranaggio meccanico. Si è fatto riferimento al documento [1] per quanto riguarda le caratteristiche da soddisfare con il riduttore magnetico. Tale riferimento è dovuto al fatto che si è considerata la possibilità di implementare un magnetic gear su un autoveicolo ibrido ed essendo la Toyota Prius una delle più comuni autovetture ibride in circolazione attualmente, la si è scelta come modello.

Risulta quindi che le dimensioni di contorno, in particolare il diametro interno, il diametro esterno e la profondità del magnetic gear, siano vincolate alla struttura del veicolo. Fissate le dimensioni fisiche e il rapporto di riduzione richiesto dal veicolo, si è provveduto ad un'indagine preliminare.

Una volta conclusa l'indagine esplorativa iniziale, il lavoro è proceduto con uno studio parametrico volto all'ottimizzazione della struttura rispetto le dimensioni dei suoi elementi chiave, mantenendo fisso il diametro interno della macchina.

Il lavoro è stato organizzato secondo la seguente tabella di marcia:

- Inizialmente si è effettuata una panoramica sul sistema da studiare dal punto di vista teorico. Si sono indagati gli aspetti che regolano il passaggio del moto tra i rotori e quali risultano essere le grandezze cardine dell'ingranaggio magnetico;
- Definita la teoria, si è passato all'analisi del sistema. Sono stati utilizzati programmi per ottenere una prima panoramica della risposta dinamica dell'ingranaggio magnetico;
- Si è passati quindi a valutare le prime modifiche sugli spessori degli elementi principali della macchina e il loro impatto sulle risposte meccaniche del sistema;

• Infine si è proceduto con uno studio, tramite algoritmo di ottimizzazione, volto a trovare, entro un range definito, la miglior configurazione possibile delle grandezze fisiche degli elementi in gioco.

Tale analisi è stata svolta in concomitanza con il dipartimento di ingegneria meccanica ed aerospaziale(DIMEAS) del Politecnico di Torino.

### Capitolo 1

### Cenni teorici

#### 1.1 Principi generali

I primi ingranaggi magnetici, o magnetic gears in inglese, risalgono agli anni '80 e presentavano una struttura tipica simile a quanto mostrato in Figura 1.1.

Il concetto alla base della struttura è: evitare l'attrito meccanico presente in un sistema ad ingranaggi, sostituendo l'accoppiamento mecccanico con un accoppiamento magnetico. Così facendo le perdite energetiche sul sistema risultano più basse e non si ha il rischio di danneggiare il dispositivo se si supera la coppia massima fornita ad uno dei rotori. In tal caso il sistema si auto protegge, innescando un fenomeno di slittamento tra le parti in movimento.

Le prime architetture sono state abbandonate poichè presentavano un basso fattore di accoppiamento tra i due alberi rotanti e perciò, a parità di dimensioni fisiche, il trasferimento del moto non risultava competitivo rispetto i sistemi meccanici presenti sul mercato.



Figura 1.1 Struttura magnetic gear: (a) External type (b)Internal Type

Recentemente, grazie a Kais Attallah, professore presso l'università di Sheffield in Inghilterra, la struttura della macchina è stata rivoluzionata. Nella pubblicazione [2] viene presentata una nuova struttura, la quale, grazie alla struttura più compatta, riesce a conseguire un più alto accoppiamento tra gli elementi rotanti.

La Figura 2.1 mostra la struttura interna della macchina magnetic gear di tipo coassiale citata precedentemente.



Figura 1.2 Struttura magnetic gear coassiale

La macchina è composta da:

- un rotore interno, composto da magneti permanenti e materiale ferromagnetico, anche detto sun;
- un rotore centrale composto da elementi ferromagnetici, opportunamente lavorati per ridurre le perdite, detto carrier;
- un rotore esterno, con composizione simile al sun ma speculare, detto ring;

Tali appellativi sono dovuti alla correlazione che può essere fatta tra i riduttori magnetici e gli ingranaggi di tipo epicicloidali(Figura 1.3). Esiste infatti una correlazione diretta tra le 2 tipologie di strutture e viene indagata nel documento [9].



Figura 1.3 Struttura ingranaggio epicicloidale

I parametri utili al fine dell'analisi per i riduttori magnetici sono coppia e momento d'inerzia.

Il momento d'inerzia è calcolato attraverso la formula:

$$J = \frac{1}{2} * (\rho_{steel} * (S_{elemento}) * L) * (R^2)$$
(1.1)

risultante dai principi di inerzia applicati alla struttura.

Nella formula (1.1):  $\rho_{steel}$  risulta essere la densità del ferro della macchina (non si differiscono gli elementi in ferro rispetto i magneti permanenti poichè si è teorizzata una densità simile tra i due materiali),  $S_{elemento}$  è la superficie dell'elemento cilindrico solido di raggio R e profondità L. La formula è stata ricavata da Wikipedia.

Per quanto concerne la coppia si è ricorso al tensore di stress di Maxwell:

$$T = \frac{L * r^2}{\mu_0} * \int_0^{2\pi} B_r(r,\theta) B_\theta(r,\theta) d\theta$$
(1.2)

Per comprendere il funzionamento degli ingranaggi magnetici è quindi necessario studiare i campi magnetici radiali e circonferenziali. Inizialmente si può semplificare il sistema considerando solamente un rotore con magneti permanenti e il rotore ferromagnetico.

L'induzione radiale è data dalla formula:

$$B_r(r,\theta) = \left(\sum_{m=1,3,5\dots} b_{rm}(r) cos(mp(\theta - \Omega_r t) + mp\Omega_0)\right)$$
  
\*  $\left(\lambda_{r0}(r) + (sum_{j=1,2,3\dots}\lambda_{rj}(r)cos(jn_s(\theta - \Omega_s t))\right)$  (1.3)

mentre la componente circonferenziali:

$$B_{\theta}(r,\theta) = \left(\sum_{m=1,3,5...} b_{\theta*m}(r)sin(mp(\theta - \Omega_r t) + mp\Omega_0)\right)$$
  
\*  $\left(\lambda_{\theta*0}(r) + (sum_{j=1,2,3...}\lambda_{\theta*j}(r)cos(jn_s(\theta - \Omega_s t)))\right)$  (1.4)

dove

- *p* è il numero delle coppie polari;
- $n_s$  è il numero di poli ferromagnetici;
- $\Omega_r$  velocità angolare dei magneti permanenti;
- $\Omega_s$  velocità angolare dei poli ferromagnetici;
- $b_{rm}$  coefficiente di Fourier per componenti radiali riferiti alla densità di flusso senza poli ferromagnetici;
- $b_{\theta*m}$  coefficiente di Fourier per componenti circonferenziali riferiti alla densità di flusso senza poli ferromagnetici;
- $\lambda_{rj}$  coefficiente di Fourier per componenti radiali riferiti alla densità di flusso con poli ferromagnetici;

•  $\lambda_{\theta*j}$  coefficiente di Fourier per componenti radiali riferiti alla densità di flusso con poli ferromagnetici;

Risolvendo le 2 formulazioni((1.3), (1.4)), risulta:

$$B_{r}(r,\theta) = \lambda_{r0} * \left(\sum_{m=1,3,5...} b_{rm}(r) cos(mp(\theta - \Omega_{r}t) + mp\theta_{0}) + \frac{1}{2} * \left(\sum_{m=1,3,5...} (\sum_{j=1,2,3...} \lambda_{rj}(r) b_{rm}(r) * cos((mp + jn_{s})(\theta - \frac{(mp\Omega_{r} + jn_{s}\Omega_{s})}{(mp + jn_{s})} * t) + mp\theta_{0}) + \frac{1}{2} * \left(\sum_{m=1,3,5...} (\sum_{j=1,2,3...} \lambda_{rj}(r) b_{rm}(r) * cos((mp - jn_{s})(\theta - \frac{(mp\Omega_{r} - jn_{s}\Omega_{s})}{(mp - jn_{s})} * t) + mp\theta_{0}))\right)$$
(1.5)

$$B_{\theta}(r,\theta) = \lambda_{\theta} 0 * \left(\sum_{m=1,3,5...} b_{\theta*m}(r) sin(mp(\theta - \Omega_{r}t) + mp\theta_{0}) + \frac{1}{2} * \left(\sum_{m=1,3,5...} (\sum_{j=1,2,3...} \lambda_{\theta*j(r)} b_{\theta*m}(r) * sin((mp + jn_{s})(\theta - \frac{(mp\Omega_{r} + jn_{s}\Omega_{s})}{(mp + jn_{s})} * t) + mp\theta_{0}) + \frac{1}{2} * \left(\sum_{m=1,3,5...} (\sum_{j=1,2,3...} \lambda_{\theta*j}(r) b_{\theta*m}(r) * sin((mp - jn_{s})(\theta - \frac{(mp\Omega_{r} - jn_{s}\Omega_{s})}{(mp - jn_{s})} * t) + mp\theta_{0})))\right)$$

$$(1.6)$$

Da (1.5) e (1.6) si può notare che il numero di coppie polari nello spazio armonico della distribuzione di densità di flusso prodotto da ogni magnete permanente risulta essere:

$$p_{m,k} = |mp + kn_s|$$
  

$$m = 1,3,5,...,\infty$$
  

$$k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3,..., \pm \infty$$
  
(1.7)

e la velocità angolare delle armoniche spaziali della densità di flusso è data da

$$\Omega_{m,k} = \frac{mp}{mp + kn_s} \Omega_r + \frac{kn_s}{mp + kn_s} \Omega_s \tag{1.8}$$

Analizzando la (1.8) si può notare che la velocità delle armoniche spaziali risultante dall'introduzione dei poli ferromagnetici $(k \neq 0)$ , è diversa dalla velocità delle armoniche del rotore da cui il campo magnetico viene modulato.

Ne consegue che, per trasmettere coppia tra due rotori, ad una diversa velocità di rotazione, il numero di coppie polari richiesto al secondo rotore, deve essere uguale al numero di coppie polari delle armoniche spaziali per cui k è diverso da 0.

Dato quindi che la combinazione m=1 ed k=-1 risulta avere la più alta armonica spaziale asincrona, allora, il numero di coppie polari risulta essere uguale a  $(n_s - p)$ .

Dal punto di vista costruttivo, si ha quindi la coppia massima possibile, a parità di dimensioni fisiche, con la relazione:

$$p_r = n_s - p_s \tag{1.9}$$

definendo  $p_s$  come numero di coppie polari del sun e  $p_r$  numero coppie polari del ring.

#### 1.2 Equazioni elettromeccaniche

Considerando il sistema completo dei sui tre elementi, si possono scrivere le relazioni elettro-meccaniche ed energetiche che regolano la macchina. Le equazioni elettromeccaniche che governano il moto dei rotori sono:

$$J_r \frac{d^2 \theta_r}{dt^2} = T_r - T_g(\frac{p_r}{n_s}) sin(p_r \theta_r + p_s \theta_s - n_s \theta_c)$$
(1.10)

$$J_s \frac{d^2 \theta_s}{dt^2} = T_s - T_g(\frac{p_s}{n_s}) sin(p_r \theta_r + p_s \theta_s - n_s \theta_c)$$
(1.11)

$$J_c \frac{d^2 \theta_c}{dt^2} = T_c + T_g sin(p_r \theta_r + p_s \theta_s - n_s \theta_c)$$
(1.12)

dove p,J, $\theta$  e T sono rispettivamente il numero di coppie polari, l'inerzia, la posizione angolare e la coppia esterna degli elementi, suddivisi in base al pedice:

- r indica il rotore con il numero più elevato di poli magnetici, ossia il ring;
- s indica il rotore con il minor numero di poli magnetici, ossia il sun;
- c indica il rotore privo di magneti, ossia il carrier.

Nel sistema  $T_g$  risulta essere la massima coppia trasferibile. Da tale formula è possibile osservare la relazione tra l'accellerazione angolare $(\frac{d^2\theta}{dt^2})$  dei vari elementi con le coppie e i momenti d'inerzia. Risuta quindi che un sistema con le formule (1.10),(1.11) e (1.12) sia fondamentale per determinare la velocità di rotazione degli elementi e poter definire una risposta dinamica completa del sistema.

Dal punto di vista energetico, invece, la formula che regola il sistema è data dalla legge di conservazione dell'energia applicata,ossia:

$$T_{s} * \omega_{s} + T_{c} * \omega_{c} + T_{r} * \omega_{r} + P_{Bsc} + P_{Bcr} + P_{Brs} + P_{fe} = 0$$
(1.13)

con:

- $T_s$  pari alla coppia nel sun;
- $\omega_s$  la velocità di rotazione del sun;
- $T_c$  pari alla coppia nel carrier;
- $\omega_c$  la velocità di rotazione del carrier;
- $T_r$  pari alla coppia nel ring;
- $\omega_r$  la velocità di rotazione del ring;
- $P_{Bsc}$  sono le perdite legate allo slittamento tra il sun e il carrier;
- $P_{Bcr}$  sono le perdite legate allo slittamento tra il carrier e il ring;
- $P_{Brs}$  sono le perdite legate allo slittamento tra il sun e il ring;
- $P_{fe}$  sono le perdite nel ferro causate dalle correnti parassite e dalle perdite legate all'isteresi magnetica;

Tale formula risulta utile poichè andando a combinare la (1.13) con la (1.9) si ottiene:

$$-p_s * \omega_s + n_s * \omega_c - p_r * \omega_r = 0 \tag{1.14}$$

Da questa, mantenendo fisso il carrier( $\omega_c = 0$ ), si può ottenere il rapporto di riduzione tra i 2 rotori:

$$G_{sr} = \frac{\omega_s}{\omega_r} = -(\frac{n_s}{p_s} - 1) \tag{1.15}$$

Considerando che (1.15) è negativo, è evidente che il sun e il ring hanno direzioni di rotazione opposte tra loro.

Tale espressione subisce una semplificazione se un rotore con magneti è mantenuto stazionario. In tal caso la coppia viene trasmessa con un rapporto pari a

$$G_r = \frac{n_s}{p} \tag{1.16}$$

La formula (1.17) permette un trattamento semplificato del design della macchina dal punto di vista meccanico.

Se viene fissato, invece, il rotore esterno( $\omega_r = 0$ ), si ottiene:

$$G_{sc} = \frac{\omega_s}{\omega_c} = \left(\frac{n_s}{p_s}\right) = -G_{sr} + 1 \tag{1.17}$$

da cui risulta che il solar e il carrier hanno il medesimo verso di rotazione.

Per concludere i cenni di teoria è bene citare il cogging torque. Questo elemento è di base presente sulle coppie agenti nel sistema, ma può essere minimizzato lavorando sul fattore  $C_T$ . Questo fattore è stato introdotto da Zhu e Howe in [5] e definisce l'impatto del ripple nel sistema. Se viene minimizzato, il sistema risulta avere ripple trascurabile rispetto i valori di coppia in gioco. Tal fattore vale:

$$C_T = \frac{2p_s * n_s}{lcm(2p_s, n_s)}$$
(1.18)

dove lcm indica il minimo comune multiplo tra i poli del rotore interno e il numero di poli sul carrier.

Si sono qui riassunti i principali elementi della teoria degli ingranaggi magnetici, per una trattazione più dettagliata si può fare riferimento alle pubblicazioni [2],[3],[4],[5] e [6].

### Capitolo 2

### Mappe semplificate

### 2.1 Macchina analizzata

Dopo aver definito la teoria che regola la macchina, si è definita la struttura di riferimento che è stata usata nelle simulazioni esplorative iniziali.

Dal sistema meccanico di riferimento erano pre-impostati i seguenti parametri:

- $G_r=2.6;$
- diametro interno= 28 mm;
- diametro esterno= 120mm;
- profondità= 30mm;

Tenendo conto di questi elementi si è andato a simulare un ingranaggio magnetico così costruito(Figura 2.1):

- raggio interno della macchina,  $R_0 = 14$  mm;
- raggio esterno totale della macchina,  $R_7 = 60$  mm;
- spessore del supporto ferromagnetico interno,  $R_1$ - $R_0$ = 9 mm;
- spessore del supporto ferromagnetico esterno,  $R_7$ - $R_6$ = 10 mm;
- spessore dei traferri,  $R_5$ - $R_4$ = $R_3$ - $R_2$ = 1,5 mm;
- spessore del carrier,  $R_4$ - $R_3$ = 8 mm;
- spessore dei magneti permanenti,  $R_2$ - $R_1$ = $R_6$ - $R_5$ = 8 mm;
- profondità macchina= 30 mm;
- numero di poli del  $sun(2p_s)$ : 10;
- numero di poli del carrier $(n_s)$ : 18;
- numero di poli del ring $(2p_r)$ : 26;

In Figura 2.2 è visibile la vista frontale della macchina ottenuta.



Figura 2.1 Struttura magnetic gear



Figura 2.2 Struttura magnetic gear completa vista frontale

#### 2.2 Strumenti di analisi

In questa prima parte del lavoro le strade percorribili per aver dei primi risultati di riferimento sul sitema erano molteplici.

Ricercando nella letteratura, si è potuto riscontrare un possibile metodo analitico nel documento [7]. In tal pubblicazione, gli autori presentano un insieme di sistemi numerici che, se correttamente impostati, dovrebbero fornire le induzioni e le coppie della macchina quando operativa. Tal metodo è però strettamente analitico e ciò limita le possibili implementazioni, questo ha portato allo scarto di questo metodologia.

Si è optato,quindi, per uno studio del sistema utilizzando il programma di simulazione agli elementi finiti Femm, attraverso comandi Lua in ambiente Matlab .

Il programma Femm permette di definire, risolvere e processare problemi planari, o assiali, di natura:

- magnetica;
- elettrostatica;
- relativa a scambi di calore;
- riferita a flussi di corrente.

Il programma si basa sull'uso del metodo degli elementi finiti, ossia la ricerca di soluzioni approssimate a problemi di natura differenziale, sostituendo alle derivate parziali opportuni sistemi di equazioni algebriche. Risulta uno strumento molto versatile e si è utilizzato il documento [8] per approfondire il suo funzionamento.

#### 2.3 Descrizione programma utilizzato

Per analizzare il comportamento della macchina in funzionamento dinamico, sono state analizzate tutte le posizione reciproche dei vari elementi rotanti. Da tali analisi si sono ricavate delle mappe che permettono di determinare, a seconda della coppia entrante e delle posizioni reciproche degli elementi, la risposta in uscita dal sistema. Questa possibilità risulta molto importante poichè rende possibile implementare il riduttore magnetico in modelli Simulink attraverso delle lookuptables.

La struttura del programma che si è utilizzzato in questa parte del lavoro segue il seguente iter:

- si imposta la configurazione del sistema(relazioni spaziali tra i vari elementi della macchina) e le caratteristiche dei vari materiali di cui è composta;
- si costruisce la macchina in Femm;
- si esegue la simulazione;
- i dati ottenuti vengono salvati in apposito file di testo con la seguente catalogazione:
  - posizione angolare del sun;

- posizione angolare del carrier;
- posizione angolare del ring;
- coppia tra sun e carrier (T sc);
- coppia tra carrier e ring (T cr);
- energia magnetica (Wm);
- vengono reimpostate le posizioni dei singoli elementi per analizzare il caso successivo: varia uno dei rotori di un predeterminato passo;
- si esegue nuovamente l'analisi e si salvano i risultati;
- si ripetono gli ultimi 2 passaggi fino al temine delle configurazioni da analizzare.

Come indicato nei risultati salvati, la coppia trasmessa è divisa tra coppia sun-carrier e coppia carrier-ring. Questo è dovuto al fatto che la coppia è calcolata tramite il tensore di stress di Maxwell nella fase di post simulazione da Femm nei 2 traferri della macchina. Risulta quindi calcolata su diversi percorsi nei 2 traferri e i valori finali forniti in uscita dal programma sono la media dei valori ottenuti dai singoli percorsi della zona. Tali valori devono essere riscalati sulla profondità L(in metri) della macchina per ottenere i valori effettivi di coppia dell'ingranaggio magnetico.

Femm simula una macchina con profondità fissa pari ad 1m e non è possibile cambiare tale parametro. Per tal motivo è richiesta la riscalatura di determinati parametri.

Per questa fase iniziale di lavoro, si è voluto utilizzare materiale con caratteristiche ideali, ossia prive del fenomeno della saturazione magnetica dei materiali. Sono stati utilizzati i materiali:

- *steel* utilizzato per le strutture ferromagnetiche: il giogo del sun, il carrier e il giogo del ring;
- magnet utilizzato per i magneti permanenti su sun e ring;
- air utilizzato per definire i traferri tra sun e carrier, tra carrier e ring;

I materiali steel e magnet sono stati definiti con le seguenti caratteristiche:

$$\mu_{rsteel} = 9000$$
  

$$\sigma_{steel} = 6[MS/m]$$
  

$$\mu_0 = 4 * \pi * 10^{-7}[H/m]$$
  

$$\mu_{rmag} = 1.05$$
  

$$H_c = \frac{1}{\mu_{rmag} * \mu_0} [A/m]$$
  

$$\sigma_{mag} = 0[MS/m]$$
  
(2.1)

Mentre per quanto riguarda air la caratteristica è memorizzata in Femm e presenta i seguenti valori:

$$\mu_{0} = 4 * \pi * 10^{-} 7[H/m]$$

$$\mu_{rair} = 1$$

$$H_{cair} = 0[A/m]$$

$$\sigma_{air} = 0[MS/m]$$
(2.2)

Risultano tutti essere materiali lineari e il loro utilizzo riduce notevolmente il tempo richiesto dal calcolatore per svolgere la singola simulazione.

La singola configurazione angolare richiede, su un computer con processore Intel(R) Core(TM) i7 -6700 CPU @3.40 GHz e RAM 16 GB, un tempo di circa 9 secondi. In base a tale tempistica è stato scelto il passo di incremento dell'angolo della posizione angolare dei rotori. Un'analisi completa con passo pari ad 1 grado e tutti e tre i rotori rotanti darebbe luogo ad una simulazione con un tempo di CPU inaccettabile (circa una decina d'anni).

Per sopperire a tal problema, l'analisi è stata portata avanti bloccando un rotore ad una posizione angolare fissa e suddividendo i casi a seconda degli elementi ruotanti. Inoltre il passo è stato implementato 2 gradi. Grazie a ciò i tempi di analisi del singolo caso si sono ridotti a 3 giorni e mezzo. I vari casi analizzati sono stati:

- caso sun e carrier in movimento con passo 2 gradi e ring fisso;
- caso carrier e ring in movimento con passo 2 gradi e sun fisso;
- caso sun e ring in movimento con passo 2 gradi e carrier fisso;

### 2.4 Risultati

Di seguito sono riportati i risultati delle simulazioni.

I grafici ottenuti sono tridimensionali, sugli assi vi sono le posizioni dei 2 elementi rotanti e la coppia ricavata.

Per una comprensione più diretta si è scelto di riportarli in modo planare nella tesi, scegliendo sugli assi le posizioni degli elementi in movimento. Per indicare i moduli della coppia, presenti sul terzo asse, si è fatto ricorso ad un codice colore definito dalla tabella cromatica a fianco dei grafici.

Nelle figure Figura 2.3 e Figura 2.4 sono indicati i risultati del caso sun e carrier in movimento con passo 2 gradi e ring fisso.

Nelle figure Figura 2.5 e Figura 2.6 sono indicati i risultati del caso carrier e ring in movimento con passo 2 gradi e sun fisso.

Nelle figure Figura 2.7 e Figura 2.8 sono indicati i risultati del caso sun e ring in movimento con passo 2 gradi e carrier fisso.



Figura 2.3 Coppia Carrier Ring caso sun e carrier in movimento



Figura 2.4 Coppia Sun Carrier caso sun e carrier in movimento



Figura 2.5 Coppia Carrier Ring caso carrier e ring in movimento



Figura 2.6 Coppia Sun Carrier caso carrier e ring in movimento



Figura 2.7 Coppia Carrier Ring caso sun e ring in movimento



Figura 2.8 Coppia Sun Carrier caso sun e ring in movimento

La prima caratteristica che salta agli occhi è relativa al modulo delle coppie. Risulta che i valori non sono comparabili con un ingranaggio meccanico. Tale constatazione è dovuta al fatto che le coppie sopportabili da una struttura puramente meccanica hanno un ordine di grandezza maggiore a parità di dimensioni. Per essere più concreti, l'ingranaggio che si vuole sostituire nell'autoveicolo ha coppie dell'ordine dei 230 Nm mentre il riduttore magnetico simulato ha valori massimi vicini alla decina di Nm. Risulta quindi impossibile una sostituzione mantenendo le stesse dimensioni di contorno dell'elemento.

Nei capitoli successivi verrà indagato come variano i parametri meccanici a seconda della crescita degli elementi chiave del magnetic gear. Tal analisi verrà portata avanti per ricercare l'ordine delle dimensioni fisiche di un riduttore magnetico con coppia comparabile a un ingranaggio epicicloidale.

Un'altra osservazione a cui i risultati hanno portato è la seguente: le coppie agenti sui vari rotori hanno un andamento sinusoidale rispetto le posizioni angolari dei rotori.

Questa periodicità dipende dalla struttura dell'ingranaggio.

Si può notare che il medesimo valore di coppia, in Figura 2.9 indicati con P', $P^1$  e P\*, si ripete, con lievi variazioni, a seconda della posizione angolare del rotore considerato.

Più precisamente, ogni  $\tau_s = 360/p_s = 72$  sugli assi rappresentanti il sun, mentre  $\tau_c = 360/n_s = 20$  se osserviamo gli assi relativi al carrier. Per quanto riguarda il ring:  $\tau_r = 360/p_r = 26.7$ .



**Figura 2.9** Mappa Tsc dell'ingranaggio con indicate  $\tau_s \in \tau_r$ 

Sfruttando questa caratteristica è stato possibile ridurre notevolmente il numero di casi da analizzare.

E' possibile ricostruire, infatti, l'intera mappa su<br/>i $360^\circ$ a partire dalla singola configurazione di uno de<br/>i2rotori.

Tale configurazione è ottenuta lanciando una simulazione con un passo sul ring pari a  $360/((0.5 * p_r)^2)$  e settando il carrier e il solar fissi.

Il ring viene impostato variante tra  $0 \, e \, 360/(0.5 * p_r)$ . Così facendo si ottiene la singola curva rappresentativa dell'andamento completo delle coppie, mostrata in Figura 2.10.



Figura 2.10 Coppia Carrier Ring caso singola configurazione

#### 2.5 Valutazione ripple

Per considerare la semplificazione fatta precedentemente valida è stata fatta la seguente ipotesi: il sistema presenta ripple trascurabile. Si è proceduto quindi a verificare la veridicità di tale ipotesi.

Innanzitutto si è indagato sulla presenza del ripple nel sistema simulato.

Per fare questo si è mantenuta la medesima macchina usata nelle simulazioni precedenti, ma si è bloccata la relazione tra le posizioni di sun e ring, in modo da ottenere sempre i medesimi valori di coppia nelle simulazioni, ma variando la posizione.

Sono stati implementati 2 programmi per svolgere le simulazioni:

• nel primo il ring si muove con passo di 1 grado( indicato dalla variabile m), mentre le posizioni angolari del sun variano rispetto le posizioni angolari del ring secondo la formula:

$$\theta_s = (292 - Gr * (m-1)) * pi/180; \tag{2.3}$$

• nel secondo il sun si muove di un grado a simulazione(n), mentre il ring è legato al sun dalla relazione angolare:

$$\theta_r = (112 - (1/Gr) * (n-1)) * pi/180; \tag{2.4}$$

Nelle formule Gr indica il rapporto di riduzione della macchina.

Le relazioni angolari utilizzate nei programmi, rappresentano una delle creste visibili nei grafici tridimensionali visibili nella Figura 2.7, ove la macchina presenta massima coppia trasferita tra carrier e ring.

Sono stati utilizzati 2 programmi per determinare se vi fossero relazioni tra il ripple e l'elemento trascinante.

Da tali simulazioni si sono ottenuti i risultati mostrati in Figura 2.11, Figura 2.12, Figura 2.13 e Figura 2.14.



Figura 2.11 Fluttuazione presente sulla cresta di Tsc caso ring movimento



Figura 2.12 Fluttuazione presente sulla cresta di Tcr caso ring movimento



Figura 2.13 Fluttuazione presente sulla cresta di Tsc caso solar movimento



Figura 2.14 Fluttuazione presente sulla cresta di Tcr caso solar movimento

I valori medi e l'ampiezza delle variazioni sono risultate:

• dal primo programma:

$$Tsc_{medio1} = -4.4776Nm$$

$$\Delta_{tsc1} = 0.0255Nm$$

$$Tcr_{medio1} = 11.6434Nm$$

$$\Delta_{tsc1} = 0.0255Nm$$
(2.5)

• dal secondo programma:

$$Tsc_{medio2} = -4.4543Nm$$

$$\Delta_{tsc2} = 0.021Nm$$

$$Tcr_{medio2} = 11.5879Nm$$

$$\Delta_{tsc2} = 0.0294Nm$$

$$(2.6)$$

Come si può notare i valori finali risultano differenti per qualche punto per mille. Da ciò possiamo constatare che non vi siano variazioni dovute a quale elemento venga preso come riferimento rotante. Inoltre dai grafici, Figura 2.11,Figura 2.12,Figura 2.13 e Figura 2.14, risulta che i valori ottenuti sono flottanti e non sembrano seguire un'apparente andamento sinusoidale.

Lo scostamento massimo dal valore medio riscontrato risulta di almeno 2 ordini di grandezza più piccolo delle dimensioni di coppia, per cui si è constatato che il ripple è pressoché ininfluente sulla coppia nel sistema. Tale constatazione ritrova riscontro rispetto quanto visto nel Capitolo 1.

In conclusione, la semplificazione relativa alle simulazioni necessarie per definire la mappa dinamica del sistema risulta valida.

### Capitolo 3

### Studio parametrico preliminare

Nel seguente capitolo si è analizzato come le variazioni sullo spessore dei magneti e del carrier impattano sul sistema, in particolare si è focalizzata l'attenzione su induzioni magnetiche e coppie.

Si è seguito il seguente iter:

- Dapprima si sono studiati gli effetti dati dalla variazione dello spessore dei magneti permanenti;
- Successivamente si è aumentato lo spessore del carrier mantenendo costante lo spessore dei magneti;
- Infine si è presa in considerazione una progressiva crescita sia dei magneti, sia del carrier.

I gioghi sul sun e sul ring sono stati tenuti costanti del medesimo valore dei gioghi della macchina studiata nel capitolo precedente.

Tutti i casi analizzati presentano un range, definito a priori, di valori entro cui far variare le dimensioni degli elementi.

#### 3.1 Programmi utilizzati

In tutti i casi analizzati per le analisi parametriche si è fatto riferimento ad una macchina dove sono stati impiegati materiali con curve di lavoro non lineari.

Questo ci ha permesso di tener conto della saturazione magnetica. Si è utilizzato il materiale M-15 Steel, con curve definite all'interno del programma Femm. La caratteristica è visibile in Figura 3.1, mentre la sua conducibilità elettrica vale:

$$\sigma_{M-15} = 1.9MS/m \tag{3.1}$$



Figura 3.1 Caratteristica magnetica materiale M-15

Il materiale M-15 Steel presenta, inoltre, una struttura laminata in piani di spessore 0.635mm.

Al fine di svolgere le varie simulazioni adatte ai casi di studio, sono stati scritti tre differenti programmi:

- uno relativo allo studio delle modifiche sui magneti;
- un secondo inerente alle variazioni del carrier;
- ed un terzo dedicato alle valutazioni degli effetti delle variazioni su entrambi gli elementi chiave dei magnetic gear.

Ogni programma segue il medesimo iter del programma utilizzato precedentemente per la valuatzione complessiva della risposta dinamica, ma si distinguono per variabili usate, casi studiati e risultati salvati.

Le configurazioni dei rotori analizzate sono limitate alla singola curva rappresentativa nei primi 2 programmi, mentre nel terzo si fissano le posizioni reciproche in modo da risultare sempre nel medesimo caso di massima coppia. Nei primi 2 programmi ad ogni simulazione si è provveduto a salvare i seguenti risultati su file di testo:

- $\theta_s$ , posizione angolare sun;
- $\theta_c$ , posizione angolare carrier;
- $\theta_r$ , posizione angolare ring;
- Tsc, coppia tra sun e carrier riferita alla posizione angolare definita dei rotori;
- *Tcr*, coppia tra carrier e ring riferita alla posizione angolare definita dei rotori;
- Wm, energia magnetica presente nella configurazione analizzata;
- Vm, volume della macchina analizzata;
- Weight, massa della macchina analizzata;
- *Magsize* (o *Carriersize* a seconda del programma) spessore dei magneti( o del carrier) nel caso in analisi;
- *B1,B2,B3,B4*, induzione massima su circonferenza analizzata per posizione rotori definita;

Per identificare l'andamento dell'induzione magnetica nelle varie zone sono stati scelti quattro contorni su cui analizzare la macchina. I raggi di tali sezioni risultano essere:

- presso il sun, in particolare a 2 mm di profondità all'interno del giogo(B1);
- presso il carrier, in particolare all'interno del carrier a 2 mm di distanza da ambo i bordi, sia quello interno(B2), sia quello esterno(B3);
- presso il ring, a distanza di 2 mm dai magneti permanenti(B4);

Queste circonferenze sono state scelte per poter identificare il passaggio, se presente, da funzionamento normale a funzionamento con materiale saturato negli elementi ferromagnetici e sono mostrate in Figura 3.2. 3-Studio parametrico preliminare



Figura 3.2 Modello Femm dove sono mostrate in rosso le circonferenze su cui si è valutata l'induzione

Nel terzo programma le posizioni dei rotori, essendo bloccate, non sono state memorizzate e i risultati sono stati catalogati in base agli spessori varianti. Risultano quindi memorizzati su file di testo:

- Carriersize;
- Magsize;
- *Tsc*;
- Tcr;
- Weight;
- Jeq;

Per calcolare il peso degli elementi si è usata una densità media pari a 7700  $[Kg/m^3]$  compatibile con il peso del materiale ferromagnetico e dei magneti permanenti utilizzati nella macchina simulata.

Di seguito sono riportati i risultati in base al caso.

#### 3.2 Risultati caso spessore magneti permanenti variabile

Le simulazioni coprono uno spessore dei magneti compreso tra i 5 mm e i 50 mm con passo di crescita pari a 2.5mm. Il carrier è stato impostato del medesimo valore della macchina studiata nel capitolo 2, ossia ha spessore pari ad 8mm.

In Figura 3.3 vengono mostrate le induzioni calcolate nelle 4 circonferenze. In B1 e B4, rappresentanti l'induzione nei pressi del ferro vicino ai magneti, si può notare che il materiale satura. Vi è una variazione di pendenza in prossimità dei 15mm di spessore dei magneti, quindi è giusto supporre che da tale spessore in avanti i gioghi sui ring e sul sun lavorino in saturaione. In B2 e in B3 sembra che il ferro nel carrier non saturi.

I grafici in Figura 3.4 e Figura 3.5 mostrano gli andamenti delle coppie massime tra i rotori (sun-carrier e carrier-ring) rispetto lo spessore dei magneti permanenti. Si può notare un aumento progressivo della coppia con un aumento di pendenza intorno ai 30mm sia per la coppia carrier-ring, sia per la coppia sun-carrier.

In Figura 3.6 e Figura 3.7 sono mostrate le densità di coppia e la loro evoluzione rispetto i magneti permanenti. Rispetto le coppie, la densità di coppia presenta un andamento simil logaritmico. L'abbassamento della pendenza, man mano che si procede ad aumentare lo spessore dei magneti, fa intuire che nonostante il guadagno di coppia ottenuto, si verifica un aumento più marcato del volume della macchina.

Si può intuire quindi che per ottenere coppie dell'ordine del centinaio di Nm, il magnetic gear richiede dimensioni, almeno per quanto riguarda i magneti, di molto superiori ai 50mm.



Figura 3.3 Induzioni al variare dello spessore dei magneti



Figura 3.4 Coppia Tcr al variare dello spessore dei magneti



Figura 3.5 Coppia Tsc al variare dello spessore dei magneti



Figura 3.6 Densità di coppia carrier ring al variare dello spessore dei magneti



Figura 3.7 Densità di coppia sun carrier al variare dello spessore dei magneti

#### 3.3 Risultati caso spessore carrier variabile

Le simulazioni coprono uno spessore dell'elemento compreso tra i 2 mm e i 22 mm con passo di 1mm. I magneti permanenti sono stati impostati del medesimo valore della macchina studiata nel capitolo 2, ossia hanno spessore pari ad 8mm.

I risultati ottenuti sono riportati in Figura 3.8, in Figura 3.9, in Figura 3.10, in Figura 3.11 e in Figura 3.12.

Gli andamenti sono molto diversi rispetto a quelli ottenuti nel paragrafo 3.2.

Si può notare che sia le coppie, sia la densità di coppia presentano un picco in concomitanza con 4mm di spessore del carrier per le densità di coppia e 6mm per le coppie. Una volta superato tal spessore, i valori di coppia procedono ad un abbassamento repentino fino ai 18mm di carrier. Da questo valore in avanti le coppie subiscono variazioni poco accentuate. Per quanto riguarda le densità di coppia, queste procedono, dopo aver raggiunto il picco, ad una riduzione costante. Tale andamento è giustificabile poiché il contributo del carrier alla coppia è minimo, come mostrato in Figura 3.9 e in Figura 3.10 le variazrioni sono di 0. 8 Nm nella Tcr e 0.4 Nm nella Tsc, mentre il volume risulta sempre crescente.

Interessante notare gli andamenti delle induzioni.

B1 e B4 sono pressoché costanti, mentre B2 e B3 presentano un picco sugli spessori iniziali seguito da un repentino abbassamento. Da notare il modulo di tale picco sulle induzioni: sono il 260% e il 230% dei valori sul ferro nei gioghi. Tale incremento è bene evidenziarlo nel caso si voglia dimensionare una macchina con spessore del carrier molto ridotto. Oltre al picco iniziale tali curve non presentano altre particolatà, tendendo anch'esse ad un valore pressochè costante all'aumentare dello spessore.



Figura 3.8 Induzioni al variare dello spessore del carrier



Figura 3.9 Coppia Tcr al variare dello spessore del carrier



Figura 3.10 Coppia Tsc al variare dello spessore del carrier



Figura 3.11 Densità di coppia carrier ring al variare dello spessore del carrier



Figura 3.12 Densità di coppia sun carrier al variare dello spessore del carrier

#### 3.4 Risultati caso entrambi gli spessori variabili

Nella parte finale di questa valutazione si sono eseguite simulazioni fissando le posizioni angolari dei vari elementi in modo che la coppia trasferita sia la massima possibile per tale macchina. I campi di studio degli spessori risultano i medesimi dei casi precedenti, ossia 5-50mm per i magneti e 2-22mm per il carrier.

I grafici ottenuti sono tridimensionali e, come per i grafici presentati nel capitolo 2, si è scelto di riportarli con una rappresentazione assiale. Sugli assi scelti vi sono le dimensioni geometriche varianti, mentre le variazioni sul terzo asse sono mostrate tramite le variazioni cromatiche. Al lato di ogni grafico è riportata una tabella dove è indicata la correlazione colore-ampiezza della grandezza sull'asse z.

I grafici in Figura 3.13 e in Figura 3.14 mostrano gli andamenti relativi alla densità di coppia ai traferri e si può notare che hanno il medesimo andamento con un unico picco nella zona 8mm di carrier e 47.5mm di magneti permanenti.

Nei grafici in Figura 3.15 e in Figura 3.16 sono mostrati gli andamenti delle coppie. Anche in questo caso l'andamento ha la stessa forma in ambo i casi. Il picco risulta unico e nei pressi di massimo spessore dei magneti e 8-10mm del carrier. Tale coppia massima risulta essere per Tcr poco sopra i 100 Nm, mentre la Tsc si avvicina ai 40 Nm. Tali dati confermano che per aver coppie paragonabili con il sistema puramente meccanico, le dimensioni da utilizzare sono molto maggiori rispetto quelle considerate.

Nei grafici in Figura 3.17 e in Figura 3.18 sono mostrati gli andamenti del peso e del momemnto d'inerzia al variare degli spessori. Anche per questi 2 parametri si presenta un solo picco massimo.



Figura 3.13 Densità di coppia carrier ring al variare sia delle dimensioni dei magneti sia del carrier



Figura 3.14 Densità di coppia sun carrier al variare sia delle dimensioni dei magneti sia del carrier



Figura 3.15 Coppia Tcr al variare sia delle dimensioni dei magneti sia del carrier



Figura 3.16 Coppia Tsc al variare sia delle dimensioni dei magneti sia del carrier



Figura 3.17 Peso della macchina al variare sia delle dimensioni dei magneti sia del carrier



Figura 3.18 Momento d'inerzia al variare sia delle dimensioni dei magneti sia del carrier

### Capitolo 4

### Ottimizzazione

Il passaggio finale del lavoro affrontato nella tesi è stata la ricerca degli spessori ideali degli elementi della macchina, al fine di conseguire la miglior macchina possibile mantenendo il diametro interno fisso e la profondità.

Essendo i magnetic gear una macchina con applicazioni strettamente meccaniche, i parametri di ricerca scelti sono stati la densità di coppia e il momento d'inerzia delle parti rotanti.

La prima va massimizzata, in modo tale da ritardare il più possibile il fenomeno dello slittamento, generato dal superamento della coppia massima trasferibile dall'ingranaggio magnetico.

La seconda va minimizzata, al fine di rendere più rapida e facilmente controllabile la risposta del sistema.

Questi 2 aspetti della macchina sono in contrasto tra loro. Una densità di coppia elevata la si può raggiungere aumentando i magneti presenti sulla macchina, mentre una bassa inerzia la si raggiunge esattamente nel modo opposto, ossia alleggerendo la macchina.

La funzione obiettivo risulta essere quindi di tipo multi-obiettivo.

Grazie ai risultati ottenuti precedentemente si è potuto notare che sia le coppie ai traferri, sia l'inerzia hanno un andamento con singolo picco massimo rispetto le variazioni degli spessori dei magneti e del carrier.

Tale osservazione ci ha permesso di scartare i metodi di ricerca di primo e secondo ordine, permettendoci di utilizzare un algoritmo di ricerca appartenente all'ordine zero, denominato Pattern Search.

#### 4.1 Pattern search: cenni di teoria

Il Pattern Search è un algoritmo finalizzato a minimizzare la funzione obiettivo  $S(\phi)$ dipendente da diverse variabili  $\phi = (\phi_1, \phi_2, ..., \phi_k)$ . Tali variabili vengono variate fino a quando il minimo di  $S(\phi)$  è ottenuto. La routine del pattern search imposta i parametri  $\phi$ , mentre una routine indipendente valuta l'evoluzione di  $S(\phi)$ .

Verrà ora descritta brevemente la routine del pattern search, ma prima bisogna definire alcuni concetti. Innanzitutto i valori di  $\phi$  che verranno usati possono essere interpretati come punti in uno spazio k-dimensionale. La procedura di andare da un punto su tale spazio, ad un altro è definito *movimento*. Un movimento può essere un successo, se il valore di  $S(\phi)$  decresce, oppure un fallimento.

Il pattern search esegue 2 tipi di movimenti: un movimento esplorativo e un movimento realizzativo.

La prima tipologia di movimento serve per definire il comportamento della funzione  $S(\phi)$ . Tale comportamento è definito unicamente dai risultati positivi o negativi delle mosse esplorative, ed i risultati sono riassunti in un "pattern", una trama, che indica la direzione probabile da seguire per ottenere un miglioramento della funzione. Nel nostro programma sono state usate delle mosse esplorative *semplici*, ossia ad ogni movimento solo una variabile  $\phi_n$  era variata.

Il secondo tipo di movimento è definito realizzativo poiché è basato sul "pattern" ottenuto precedentemente e consegue l'effettiva minimizzazione della funzione obiettivo. Una volta eseguito tal movimento, viene nuovamente studiato lo spazio k-esimo per ridefinire il "pattern".

Nella Figura 4.1, tratta da [11], è mostrato un power flow riassuntivo di come vengono eseguite le mosse esplorative. Brevemente: ad ogni mossa esplorativa una singola coordinata viene variata, incrementandola o abbassandone il valore di una precisa quantità. Se risulta un successo, tale modifica viene salvata, altrimenti si reimposta il punto base di partenza del ciclo. Questo viene fatto per tutte le  $\phi$  della funzione e il punto finale ottenuto diventa il nuovo punto base.

Il criterio di stop dell'algoritmo dipende dallo step utilizzato. Per ogni valore di step utilizzato, il metodo raggiungerà un impasse quando, non essendo più riuscito a definire un punto base, sarà necessario ridurre il salto da usare nelle mosse esplorative per poter continuare. La riduzione è finalizzata al poter proseguire con le simulazioni, ma una variazione eccessiva rallenterà l'algoritmo. Quindi il termine della ricerca si ha quando lo step è sufficientemente piccolo da aver definito il punto di minimo con una precisione accettabile. Generalmente il valore limite dello step è imposto sulla base di limiti pratici.

Se si vuole approfondire la comprensione dell'algoritmo di pattern search consultare il documento: [10].



Figura 4.1 Rappresentazione a blocchi della ricerca tramite pattern search

#### 4.2 Impostazione del programma

Essendo il Pattern Search un algoritmo volto ad ottimizzare una singola funzione obiettivo, i due obiettivi sono stati accorpati tramite un peso  $\alpha$ . Si è implementata la seguente funzione:

$$S(T_{\rho}, J_{eq}) = \alpha * \left(\frac{T_{\rho}}{T_{\rho * ref}}\right) - (1 - \alpha) \frac{J_{eq}}{J_{eqref}}$$

$$\tag{4.1}$$

Il fattore  $\alpha$  permette di andare a variare il peso della densità di coppia nella funzione obiettivo. Con un  $\alpha = 1$  si ricerca un sistema ottimizzato unicamente rispetto la massima densità di coppia, mentre un  $\alpha = 0.1$  porta ad un'ottimizzazione focalizzata sulla minor inerzia per il sistema. Sono state eseguite più simulazioni variando  $\alpha$  partendo da  $\alpha = 0.1$  fino ad arrivare ad  $\alpha = 1$  con un passo su  $\alpha$  pari a 0.1.

Ad ogni iterazioni si è provveduto a salvare le dimensioni degli elementi in prova. Solamente i traferri non hanno subito variazioni. Le dimensioni ricercate al variare di  $\alpha$  sono state:

- $th_{PM_s}$ , ossia lo spessore dei magneti al sun;
- $th_{PM_r}$ , ossia lo spessore dei magneti al ring;
- th<sub>poles</sub>, ossia lo spessore degli elementi ferromagnetici nel carrier;
- $th_{y_s}$ , ossia lo spessore del giogo del sun;
- $th_{y_r}$ , ossia lo spessore del giogo del ring;

Queste corrispondono alle variabili  $\phi$  definite in teoria. Al fine di limitare l'algoritmo di ottimizzazione si sono impostati dei limiti superiori ed inferiori per tali dimensioni. Le taglie limite risultano essere: 5mm minimo spessore considerato e 20mm massimo spessore.

I parametri degli spessori di partenza sono sempre stati impostati in tal modo:

- $th_{PM_s} = 0.0125 \text{ [m]}$
- $th_{PM_r} = 0.0125 \text{ [m]}$
- $th_{poles} = 0.0125 \text{ [m]}$
- $th_{y_s} = 0.0125 \text{ [m]}$
- $th_{y_r} = 0.0125 \text{ [m]}$

Questo valore pari 12.5mm risulta essere la dimensione media nel range scelto su cui indagare. Lo si è scelto in modo tale che il numero di iterazioni richieste dall'algoritmo, sia per casi con bassi  $\alpha$ , sia con  $\alpha$  più elevati, fossero risultati simili ad ogni ricerca.

#### 4.3 Risultati

In Figura 4.2 e Figura 4.3 sono presentati i grafici con gli andamenti dei parametri e la relativa struttrura della macchina che si è ottenuta dalla ricerca con  $\alpha = 0.1$ . Nelle figure successive, fino alla coppia Figura 4.20 e Figura 4.21, sono mostrati i risultati e le strutture ottenute al variare di  $\alpha$ .

Con  $\alpha = 0.1$  l'analisi risulta essere incentrata sull'inerzia e quindi la configurazione ottenuta presenta spessori minimi in quasi tutti i parametri. La coppia risultante in questo caso ha valore molto basso rispetto gli altri casi ed è dovuto in principal modo alla saturazione degli elementi ferromagnetici.

Se si osserva invece il caso con  $\alpha = 1$ , ovvero ricerca della massima densità di coppia possibile senza considerare l'inerzia nel sistema, lo spessore risulta massimo, ma non presenta una grandezza di coppia comparabile con quella di un ingranaggio epicicloidale.

In Figura 4.22 è visibile il fronte di Pareto rispetto la densità di coppia  $(T_{\rho})$  e il momento d'inerzia  $(J_{eq})$ . Tali parametri sono i medesimi usati nella funzione obiettivo e, come si può notare, aumentando  $\alpha$  la curva si evolve principalmente rispetto l'asse della densità di coppia.

Il fronte di Pareto mostrato in Figura 4.22 risulta essere l'insieme delle soluzioni non dominate ottenute, ossia risultano essere le migliori configurazioni possibili dei parametri del sistema. Se venisse effettuata un'ulteriore variazione di tali parametri entro il range a disposizione, porterebbe inevitabilmente ad un peggioramento della funzione obiettivo.

Oltre a queste informazioni, in figura sono appuntati i riferimenti sull' $\alpha$ , sulla coppia Tsc e del peso della machina riferiti ad ogni punto ottimale ottenuto.

Nella tabella 4.1 sono visibili i risultati delle varie simulazioni su tabella.



Figura 4.2 Risultati della ricerca tramite pattern search con $\alpha=0.1$ 



Figura 4.3 Vista frontale magnetic gear ottenuto dalla ricerca tramite pattern search con  $\alpha=0.1$ 



Figura 4.4 Risultati della ricerca tramite pattern search con $\alpha=0.2$ 



Figura 4.5 Vista frontale magnetic gear ottenuto dalla ricerca tramite pattern search con  $\alpha = 0.2$ 



Figura 4.6 Risultati della ricerca tramite pattern search con $\alpha=0.3$ 



Figura 4.7 Vista frontale magnetic gear ottenuto dalla ricerca tramite pattern search con  $\alpha = 0.3$ 



Figura 4.8 Risultati della ricerca tramite pattern search con $\alpha=0.4$ 



**Figura 4.9** Vista frontale magnetic gear ottenuto dalla ricerca tramite pattern search con  $\alpha = 0.4$ 



Figura 4.10 Risultati della ricerca tramite pattern search con $\alpha=0.5$ 



Figura 4.11 Vista frontale magnetic gear ottenuto dalla ricerca tramite pattern search con $\alpha=0.5$ 



Figura 4.12 Risultati della ricerca tramite pattern search con $\alpha=0.6$ 



Figura 4.13 Vista frontale magnetic gear ottenuto dalla ricerca tramite pattern search con  $\alpha=0.6$ 



Figura 4.14 Risultati della ricerca tramite pattern search con $\alpha=0.7$ 



Figura 4.15 Vista frontale magnetic gear ottenuto dalla ricerca tramite pattern search con  $\alpha=0.7$ 



Figura 4.16 Risultati della ricerca tramite pattern search con $\alpha=0.8$ 



Figura 4.17 Vista frontale magnetic gear ottenuto dalla ricerca tramite pattern search con  $\alpha = 0.8$ 



Figura 4.18 Risultati della ricerca tramite pattern search con $\alpha=0.9$ 



Figura 4.19 Vista frontale magnetic gear ottenuto dalla ricerca tramite pattern search con  $\alpha = 0.9$ 



Figura 4.20 Risultati della ricerca tramite pattern search con $\alpha=1.0$ 



Figura 4.21 Vista frontale magnetic gear ottenuto dalla ricerca tramite pattern search con  $\alpha = 1$ 



Figura 4.22 Fronte di pareto ottenuto tramite i risultati dell'algoritmo di Pattern Search

Alpha	Tsc	Tcr	Weight	Tdensity	Jeq
-	(Nm)	(Nm)	(kg)	(Nm/kg)	$(kgm^2)$
0,1	$-2,\!55$	$6,\!64$	$0,\!99$	$-2,\!57$	0,000461
0,2	$-4,\!6$	$11,\!97$	$1,\!36$	$-3,\!39$	0,000845
0,3	-6,32	$16,\!46$	$1,\!65$	$-3,\!83$	$0,\!001253$
0,4	-7.68	$19,\!97$	$1,\!88$	-4,09	$0,\!001622$
0,5	$-9,\!68$	25.19	$2,\!22$	$-4,\!37$	0,002281
0,6	-12,16	$31,\!67$	$2,\!64$	$-4,\!61$	0,003209
0,7	$-14,\!83$	$38,\!66$	$3,\!07$	$-4,\!83$	0,004346
0,8	$-16,\!61$	$43,\!28$	$3,\!36$	$-4,\!94$	$0,\!005171$
0,9	$-16,\!68$	$43,\!47$	$3,\!38$	$-4,\!94$	$0,\!005196$
1	-16,71	$43,\!56$	$3,\!38$	$-4,\!94$	$0,\!005211$

 $\textbf{Tabella 4.1} \ \text{Risultati ottenuti dalla simulazione}$ 

# Capitolo 5

### Conclusioni

Seppur il lavoro svolto sia stato solo una investigazione preliminare sulle proprietà e il design ottimale delle magnetic gear, i risultati presentati hanno permesso di desumere alcune interessanti conclusioni.

I valori di coppia ottenuti suggeriscono che la sostituzione dell'ingranaggio epicicloidale con un ingranaggio magnetico è possibile a condizione che venga ripensato completamente l'alloggiamento del dispositivo nella powertrain.

Inoltre, nonostante il fatto che l'ottimizzazione del riduttore magnetico sia stata eseguita solo su un range limitato di possibilità, è possibile fare delle conclusioni preliminari. La densità di coppia e il momento d'inerzia risultano essere due obiettivi in conflitto tra loro e, a seconda del peso che gli si vuole assegnare ai due parametri, i risultati dell'ottimizzazione differiscono molto. Se si ricerca una bassa inerzia, la coppia ne risente poichè i magneti risultano sottili e si incorre nella saturazione degli elementi ferromagnetici. Se invece ci si concentra sulla coppia, gli spessori crescono inevitabilmente. Come particolarità si osserva che, la macchina ottimizzata presenta differenti spessori dei magneti del sun e del ring. Dai risultati dell'ottimizzazione appare chiaro, che il riduttore magnetico presenta in ogni caso una densità di coppia di molto inferiore a quella della controparte meccanica. In particolare, nel presente lavoro, nessuna delle macchine ottenute è in grado di soddisfare i requisiti di coppia che sarebbero richieste in una applicazione automotive.

Bisogna comunque sottolineare che il magnetic gear è in grado di autoproteggersi in caso di superamento della coppia massima, per cui risulta più sicuro dell'ingranaggio meccanico. L'ingranaggio epicicloidale, infatti, non presenta tale possibilità, a meno di installare sul veicolo anche un dispositivo di frizione.

Un altro risultato conseguito con il lavoro eseguito è stato aver ricavato un metodo di analisi rapido ed attendibile per il conseguimento delle mappe di risposta dinamica dell'apparecchio.

### Ringraziamenti

Desidero ringraziare innanzitutto il professor Repetto che mi ha dato la possibilità di partecipare a questo progetto.

Un ringraziamento particolare va all'Ing. Vincenzo Cirimele per la sua costante disponibilità durante l'intera durata del lavoro.

Un'incalcolabile gratitudine va di certo alla mia famiglia poiché più di chiunque sa cosa hanno significato questi anni per me. Infatti, mi ha sempre sostenuto e motivato ed ha fatto in modo che questi anni fossero preziosi per la mia crescita personale, rendendomi fiero dei traguardi raggiunti.

Un grazie di cuore va a tutti i miei amici e colleghi con i quali ho condiviso questa parte fondamentale della mia vita.

Ringrazio, infine, tutti coloro che ho incontrato dentro e fuori dal Politecnico e che, anche se ci ho solo scambiato qualche parola, sono stati di aiuto e conforto nei momenti di bisogno.

### Bibliografia

- M. Olszewski Evaluation of 2004 Toyota Prius hybrid electric drive system, Oak ridge national laboratory,2006
- [2] K.Atallah, D. Howe A novel high performance magnetic gear, IEEE Trans. Magn, 2001.
- [3] K. Atallah, D. Howe, S.D. Calverley *Design, analysis and realisation of a high-performance magnetic gear*, IEEE Trans. Magn, 2004
- [4] K. Atallah, J. Wang, S.D. Calverley, S. Duggan Design and operation of magnetic continuously variable transmission, IEEE Trans. Magn, 2012
- [5] Zhu Z.Q., Howe D. Influence of design parameters on cogging torque in permanent magnet machines, IEEE Trans. Magn.,2000
- [6] G. Jungmayr, J. Loeffler, B. Winter, F. Jeske, W. Amrhein Magnetic Gear: radial force, cogging torque, skewing and optimization, IEEE Translation on industry application, 2016
- [7] T. Lubin, S. Mezani, A. Rezzoug Analitycal computation of the magnetic field distribution in a magnetic gear, IEEE Translation on magnetics, 2010
- [8] D. Meeker Finite Element Method Magnetics User's Manual, 2015
- [9] E. Gouda, S. Mezani, L. Baghli, A. Rezzoug *Comparative study between mechanical* and magnetic planetary gears, IEEE Translation on industry application,2011
- [10] R. Hooke, T.A. Jeeves "Direct search" solution of numerical and statistical problems, Westinghouse reaserch laboratories, Pittsburgh, Pennsylvania
- [11] C. Magele Deterministic Optimization Strategies, Graz University of Technology