



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA DELL'ENERGIA ELETTRICA

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA DELL'ENERGIA ELETTRICA

Studio della coppia elettromeccanica in un motore a riluttanza a cave frazionarie di piccola taglia

RELATORE: Prof. Nicola Bianchi

LAUREANDO: Andrea Voltan

ANNO ACCADEMICO 2014-15

Indice

Introduzione

Capitolo 1: Prove parametriche	1
1.1 Prove svolte sul rotore:	1
Primo ciclo simulazioni	4
Secondo ciclo simulazioni	7
Terzo ciclo simulazioni	13
Quarto ciclo simulazioni	20
Quinto ciclo simulazioni	25
Sesto ciclo simulazioni	32
Settimo ciclo simulazioni	37
1.2 Prove svolte sullo statore	47
Capitolo 2: Ottimizzazioni	
2.1 Ottimizzazione rotore a 4 barriere: angoli	60
2.2 Ottimizzazione rotore a 4 barriere: Spazi tra le barriere e angoli	64
2.3 Ottimizzazione rotore a 3 barriere	70
2.4 Ottimizzazione delle punte	74
2.4.1 Prima ottimizzazione	75
2.4.2 Seconda ottimizzazione	78
2.5 Ottimizzazione Statore	81
2.6 Unione tra statore e rotori ottimizzati	87
2.6.1 Unione con il rotore a 4 barriere	87
2.6.2 Unione con il rotore a 3 barriere	96
2.7 Seconda ottimizzazione del rotore	103
2.7.1 Ottimizzazione rotore a 4 barriere	103
2.7.1 Ottimizzazione rotore a 3 barriere	110
2.8 Unione con il rotore con le punte ottimizzate	116
2.8.1 Rotore a 4 barriere	117
2.8.2 Rotore a 3 barriere	119
2.9 Riepilogo risultati e conclusioni	122
Capitolo 3: Skewing	
3.1 Motore ottimo a 4 barriere	124
3.2 Motore ottimo a 3 barriere	125
3.3 Motore ottimo a 3 barriere con le punte ottimizzate	127
3.4 Riepilogo risultati e osservazioni	128
Capitolo 4: Analisi Armonica	
4.1 Analisi sui motori delle prove parametriche	130
4.2 Analisi dei motori ottenuti con le ottimizzazioni	137
4.2.1 Ottimizzazione degli angoli del rotore a 4 barriere	137
4.2.2 Analisi dei motori con angoli e spazi ottimizzati	141
4.2.3 Analisi dei rotori con le punte ottime(Seconda ottimizzazione)	143
4.2.4 Analisi dei motori ottimizzati a 3 barriere	145
4.2.5 Analisi delle combinaioni di statore e rotori ottimi	146
4.2.6 Analisi dei motori ottenuti con la seconda ottimizzazione dei rotori	153
4.2.7 Analisi dei motori con lo skewing del rotore	156
4.3 Osservazioni e conclusioni	162

Capitolo 5: Configurazione 9-6

5.1 Prove parametriche	163
5.2 Ottimizzazioni	178
5.2.1 Prima fase: Ottimizzazione angoli	178
5.2.2 Seconda fase: Ottimizzazione Spazi	182
5.2.3 Ottimizzazione dello statore e seconda ottimizzazione del rotore	185
5.2.4 Seconda ottimizzazione del rotore	190
5.3 Skewing	196
5.3.1 Motore ottenuto con la prima ottimizzazione del rotore	196
5.3.2 Motore ottenuto con la seconda ottimizzazione del rotore	197
5.4 Analisi armonica	199
5.4.1 Analisi dei motori delle prove parametriche	199
5.4.2 Analisi dei motori ottenuti con l'ottimizzazione del rotore	203
5.4.3 Analisi dei motori con lo skewing	209
5.5 Conclusioni	212

Capitolo 6: Lavoro sulle prestazioni

6.1 Prove di variazione dell'angolo α_{ie}	216
6.2 Confronto prestazioni	220
6.3 Osservazioni e conclusioni	227

Conclusioni	229
-------------	-----

Ringraziamenti

Bibliografia

Lista dei simboli utilizzati

Geometria del rotore

β_n = Angolo della punta della n – esima barriera,

le barriere vengono ordinate dall'alto in basso

β_{bt} = Angolo del taglio superiore

w_{nm} = Spazio tra la barriera n – esima e la barriera m – esima

w_{sb} = Spazio tra l'albero interno e la prima barriera presente

t_n = spessore della barriera n – esima

D_{sh} = Diametro dell'albero interno

D_{rest} = Diametro esterno del rotore

Geometria dello statore

Q_s = Numero di cave dello statore

L_{stk} = Lunghezza del motore

D_{est} = Diametro esterno dello statore

D_{slot} = Diametro agli slot di statore

D_i = Diametro interno dello statore

S_{slot} = Superficie dello slot di statore

w_{so} = larghezza apertura di cava

h_{so} = altezza apertura di cava

w_t = larghezza del dente di statore

h_s = altezza cava

w_s = larghezza cava

h_{bi} = altezza corona di statore

g = ampiezza traferro

X_{wedav} = Parametro correttivo dello spigolo alto di cava, viene aggiunto alla coordinata x

Y_{weav} = Parametro correttivo dello spigolo alto di cava, viene tolto alla coordinata y

X_{wedbv} = Parametro correttivo dello spigolo basso di cava, viene tolto alla coordinata x

Y_{wedbv} = Parametro correttivo dello spigolo basso di cava, viene tolto alla coordinata y

Y_{wsov1} = Parametro correttivo dei punti dell'apertura di cava, viene aggiunto alla coordinata y

Y_{pv} = Parametro correttivo della punta di cava, viene aggiunto alla coordinata y

Parametri elettrici

p = numero di coppie polari

α_{ie} = Angolo elettrico della corrente

n_c = numero di conduttori presenti in cava

I_p = valore della corrente di picco

Legenda dei grafici

Per quanto riguarda i grafici della coppia, questi presentano due linee: una blu che corrisponde alla coppia calcolata con il tensore degli sforzi di Maxwell e una rossa che corrisponde alla coppia calcolata con la formula. La differenza tra i due risultati sta nel fatto che la formula non tiene conto della saturazione e delle perdite, quindi la coppia risulta minore e meno precisa. Per quanto riguarda il capitolo sullo skewing, nel grafico che viene riportato per ogni motore, in blu viene riportata la coppia ottenuta con Maxwell nel motore senza skewing, mentre in nero viene riportata la coppia ottenuta con Maxwell nel motore con lo skewing del rotore.

Introduzione

I motori sincroni a riluttanza costituiscono un'estensione dei motori a magnete permanente, in particolare questi mantengono la stessa struttura rotorica e statorica, ma differiscono per l'assenza del magnete. La coppia che viene generata è totalmente costituita dalla riluttanza definita dalle barre presenti nel rotore. Per quanto riguarda la tipologia di avvolgimenti, nei motori sincroni a riluttanza sono sempre stati utilizzati degli avvolgimenti distribuiti. Questo tipo di soluzione non risulta ottimale né dal punto di vista costruttivo che da quello prestazionale, infatti la maggior lunghezza delle testate rende più difficile fare l'avvolgimento, aumenta le perdite Joule dello statore e diminuisce la densità di coppia. Il fatto di avere degli avvolgimenti frazionari di tipo concentrato è utile all'aumento della densità di coppia e al miglioramento delle prestazioni. In questa tipologia di motori un aspetto molto importante è il contenuto armonico, infatti le varie armoniche che interessano la coppia vanno ad influenzare direttamente le oscillazioni che determinano il ripple. Quest'ultimo aspetto sarà il centro dello studio che verrà svolto. In particolare si cercherà di determinare il legame tra la geometria del motore e le prestazioni, definendo nel dettaglio il comportamento del contenuto armonico al variare della geometria. Per fare questo, inizialmente verranno svolte delle prove parametriche che si concentreranno sulla variazione di singoli parametri geometrici. In seguito a queste prove, sulla base dei dati raccolti, verranno svolte delle ottimizzazioni geometriche atte a perfezionare le prestazioni dei motori analizzati e in particolare a migliorarne la percentuale di ripple. Lo studio che è stato svolto comprende anche un'analisi più dettagliata riguardo il legame tra le armoniche e la geometria. I motori che saranno ottimizzati geometricamente verranno poi analizzati con altre prove e saranno migliorati dal punto di vista prestazionale cercando il punto di funzionamento migliore. Una volta finalizzate le prestazioni, i motori migliori verranno paragonati con un motore standard e con un prototipo con le caratteristiche affini a quelle dei motori oggetto di studio. La geometria definita per il prototipo appena citato sarà anche la base utilizzata come partenza per le varie prove che verranno svolte. In particolare verrà utilizzato un motore con una geometria abbastanza affine a quella del prototipo, ma che differisce per alcuni parametri sia geometrici che elettrici. Il lavoro che è stato svolto è di tipo sperimentale, quindi tutte le prove verranno riportate in modo sintetico e puntato all'osservazione dei risultati e alla definizione della metodologia da utilizzare nell'ottimizzazione.

Capitolo 1: Prove parametriche

Come punto di partenza per le prove successive vengono svolte delle prove singole per poter definire l'influenza di ogni parametro sul ripple, sul valore della coppia media e sulla forma d'onda. Queste prove singole verranno svolte agendo in modo separato sia sul rotore che sullo statore. Per quanto riguarda il rotore, particolare attenzione andrà posta ai risultati della prova di variazione dell'angolo meccanico. Questa prova prevede di valutare la coppia facendo ruotare il rotore su un range pari al semipasso polare. Nel caso esaminato, ossia il motore 6/4, verranno fatte 30 simulazioni per ogni motore, infatti si andrà a variare l'angolo meccanico ruotando di un grado alla volta. Il risultato di questa prova fornisce una parte dell'andamento della coppia, in particolare il frangente che viene analizzato, poichè comprende il semipasso polare, si ripete più volte nell'arco dei 360°, ossia nella rotazione completa del rotore. Per quanto riguarda lo statore, al variare di ogni parametro verranno valutati i valori delle induzioni nella corona, nel dente e nello spigolo basso di ogni cava lungo tutto lo statore, in particolare per ogni parte elencata verranno presi 6 valori, uno per ogni cava, per un totale di 18 valori complessivi. In questo capitolo, per ogni prova fatta, vengono riportati i risultati più significativi per il miglioramento del ripple, della forma d'onda e della coppia media.

1.1 Prove svolte sul rotore

Dati utilizzati

Per ogni prova vengono utilizzati dei dati geometrici ed elettrici che rimangono costanti. Nelle prove svolte sul rotore viene utilizzato sempre lo stesso statore e si alimenta il motore sempre allo stesso modo. Qui di seguito vengono riportati solamente i dati che sono serviti nelle simulazioni (Tab1.1):

Tab 1.1 Dati geometrici

Dato	Valore
Q_s	6
L_{stk}	150 mm
D_{es}	150 mm
D_{slot}	118 mm
D_i	86 mm
w_{so}	3.44 mm
h_{so}	1.6 mm
w_t	20 mm
h_s	18 mm
w_s	29.7 mm
h_{pi}	12 mm
g	0.5 mm
D_{sh}	24 mm
S_{slot}	560 mm ²

Tab 1.2 Dati elettrici

Dato	Valore
p	2
n_c	52
α_{ie}	45°
k_{fill}	0.6
I_p	39 A

Tab. 1.3 Matrice di cava

Fase A	-0.5	0	0.5	-0.5	0	0.5
Fase B	0.5	-0.5	0	0.5	-0.5	0
Fase C	0	0.5	-0.5	0	0.5	-0.5

Parametri utilizzati

Per ogni motore analizzato, sia nelle prove analitiche che nelle ottimizzazioni verranno presi in considerazione due parametri, la percentuale di ripple (f_1) e un parametro sulla coppia media (f_2). Il primo parametro serve per valutare la quantità di ripple, in particolare tiene conto di quanto la coppia si distacca dal valore medio. Per calcolare questo parametro vengono presi il valore massimo, il valore minimo e il valore medio della coppia calcolata in ogni prova.

$$f_1 = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{avg}} * 100 \quad (1.1)$$

Il secondo parametro che si considera serve per valutare l'entità della coppia media, in particolare si calcola la differenza tra un valore limite e l'entità della coppia prodotta.

Il valore scelto come limite è 10 Nm, questo numero è stato scelto perchè è più alto della coppia che mediamente viene prodotta dai motori simulati consente di avere un parametro abbastanza grande da poter esser valutato con buona stima. La necessità di dover valutare questo parametro con tale espediente nasce dal fatto che per esaminare i risultati delle ottimizzazioni verrà utilizzato il fronte di pareto, quindi è necessario avere un parametro che più migliora più si avvicina all'origine dell'asse.

$$f_2 = 10 - T_{avg} \quad (1.2)$$

Prova sul prototipo di base

Come punto di partenza viene svolta una prova su un motore simile al prototipo che è stato analizzato nell'articolo scritto da Christopher Spargo, Barrie Mecrow e James Widmer, i dati sono simili a quelli del motore esaminato nell'articolo, in questo motore però il diametro del rotore è più piccolo e nella cava dello statore sono presenti meno conduttori. Analizzare un motore simile al prototipo dell'articolo consente di avere un riferimento per tutte le prove che verranno fatte successivamente e consente di avere dei risultati comparabili con quelli che verranno ottenuti nelle sperimentazioni che verranno fatte. Qui di seguito vengono tabulati i dati del motore.

Tab 1.4

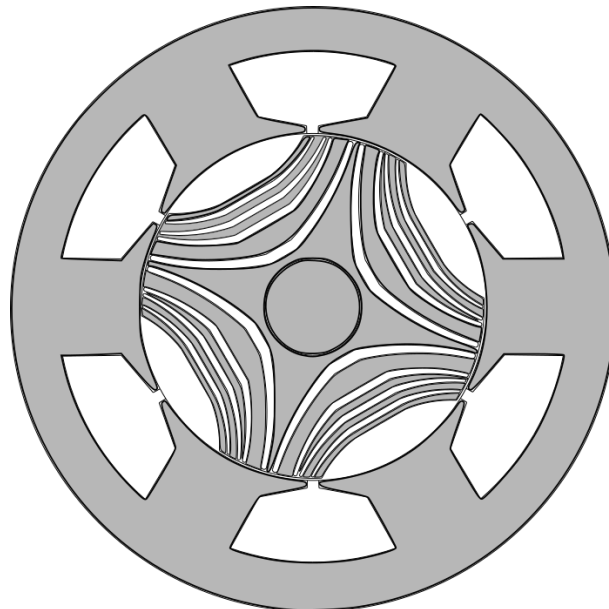
<i>Spessori</i>	
t_1	1.44 mm
t_2	1.62 mm
t_3	1.91 mm
t_4	2.69 mm
<i>Larghezza barre</i>	
l_1	7.2 mm
l_2	7.2 mm
l_3	7.8 mm
l_4	3.6 mm
<i>Spazi tra le barriere</i>	
w_{sb}	2.4 mm

w_{43}	6 mm
w_{32}	2.1 mm
w_{21}	1.8 mm
w_{bt}	1.5 mm
<i>Angoli</i>	
β_1	30°
β_2	34°
β_3	36°
β_4	43°
β_{bt}	27°

I risultati della prova confermano una forma d'onda simile a quella che è stata riportata nell'articolo. L'andamento è sinusoidale, presenta molta distorsione nei primi 20 gradi e configura due variazioni lente di coppia, una ogni 15 gradi. Per quanto riguarda la percentuale di ripple, nella modalità in cui è stata effettuata la prova, è pari al 114%. Un valore così alto è dovuto alla differenza che i valori massimo e minimo hanno rispetto al valore medio della coppia, le oscillazioni di coppia sono poche e con una variazione lenta ma tendono a distanziarsi molto dal valore medio. Il valore della coppia media, considerati la taglia del motore e il tipo di alimentazione, è abbastanza buono e in linea con gli standard. La forma d'onda e i valori dei parametri di ripple e coppia vengono riportati qui di seguito.

Tab. 1.5

% Ripple	Parametro coppia
114.183577	4.143620



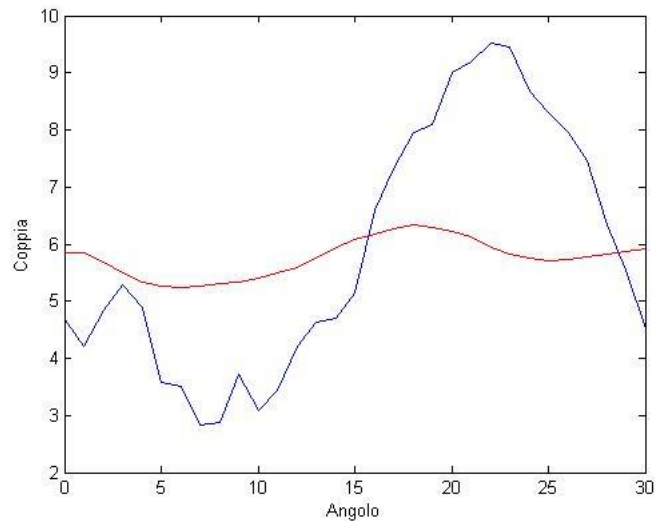


Fig. 1 Motore analizzato e relativo andamento della coppia

Una volta ottenuto un riferimento si può procedere con le prove successive, cercando di capire quali sono i parametri più significativi e quale sia il peso della loro influenza sul ripple, sulla coppia media e sulla forma d'onda della coppia in output. A tal proposito inizialmente verranno cambiati molto i dati del prototipo dell'articolo e verranno provati dei cambiamenti atti a giovare e migliorare le prestazioni del motore. Tutte le variazioni che verranno provate saranno giustificate e ne verrà analizzato il risultato.

Primo ciclo di simulazioni

Per questo primo ciclo di simulazioni di andrà a lavorare sulla differenza della conformazione delle barriere, in particolare si cercherà di capire l'influenza della barra orizzontale. Quello che si vuole migliorare è la concatenazione delle linee di flusso nel rotore, questo aspetto infatti è fondamentale per avere una buona forma d'onda per la coppia. Gli altri parametri, nelle due prove di questo ciclo verranno mantenuti costanti, in modo da enfatizzare di più la differenza che c'è tra la geometria delle barriere.

Prova 1.1

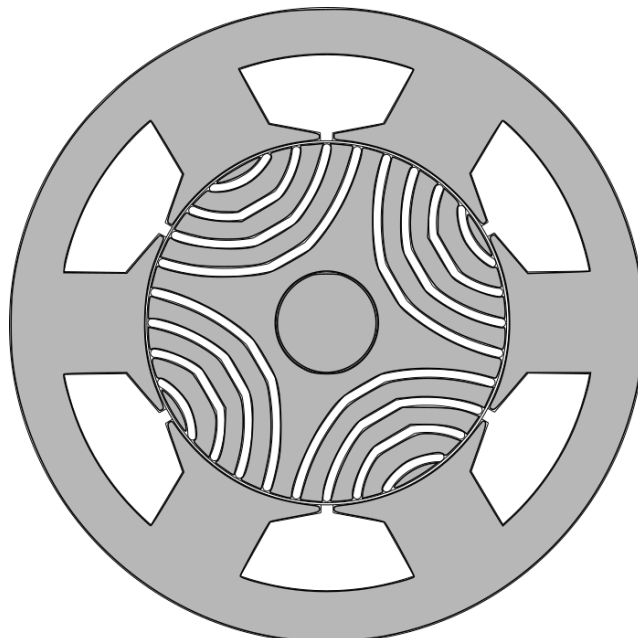
La prima analisi che viene svolta viene fatta su un motore molto diverso dal prototipo. La configurazione del rotore in questo caso viene stravolta per vedere quali sono gli andamenti di un motore non ottimizzato come lo era il precedente, almeno per quanto riguarda la geometria delle barriere. In questo motore, e nei primi motori che verranno presi in considerazione, non ci sarà il taglio superiore; questa scelta consente di avere più spazio di variazione per la caratterizzazione delle barriere e consente di avere più linee di flusso concatenate. La quarta barriera è stata disposta in una posizione molto alta e distaccata dall'albero interno, portando la posizione di tutte le altre barriere ad essere più compatta e localizzata verso il traferro; le barriere sono distanziate l'una dall'altra con spazi simili e abbastanza ampi, questo consente di avere dei canali che lasciano molto spazio per il passaggio delle linee di flusso. Ciascuna barriera è spessa 2 mm e presenta la stessa configurazione del prototipo, ossia una parte orizzontale e due archi laterali. Tale configurazione è stata utilizzata solo per le ultime tre barriere, infatti la prima barriera è troppo vicina al traferro e quindi la presenza della barra orizzontale, a causa degli spigoli molto stretti, avrebbe solamente causato un otacolo in più per

le linee di flusso, generando una zona con molta saturazione. Gli spessori e la larghezza delle barre è stata tenuta uguale per tutte le barriere in modo da rendere la configurazione più compatta e ripetitiva, agevolando la concatenazione delle linee di flusso. Gli angoli scelti per ogni barriera sono adattati in base agli altri parametri; avere barriere molto spesse e distaccate richiede che le punte debbano essere geometricamente affini con il resto della configurazione di ogni barriera, in particolare la barriera dev'essere tale da accompagnare l'andamento delle linee di flusso nel modo più fedele possibile e senza avere curvature troppo esagerate. Qui di seguito sono riportati i dati geometrici e i disegni del motore.

Tab. 1.6

<i>Spessori</i>	
$t_1 = t_2 = t_3 = t_4$	2 mm
<i>Larghezza barre</i>	
$l_1 = l_2 = l_3 = l_4$	5 mm
<i>Spazi tra le barriere</i>	
w_{sb}	5 mm
w_{43}	4 mm
w_{32}	3 mm
w_{21}	2 mm
w_{bt}	3 mm
<i>Angoli</i>	
β_1	10°
β_2	20°
β_3	30°
β_4	40°

I risultati delle prove sono molto scarsi, la variazione di coppia passa da 23 Nm a -23 Nm con una forma d'onda molto distorta che presenta un picco, positivo o negativo, ogni 5 gradi. Per quanto riguarda la concatenazione delle linee di flusso, queste, visto come sono localizzate le barriere, tendono ad essere più verso il traferro e passano principalmente negli spazi dalla seconda barriera in giù, lasciando praticamente vuota la zona attorno all'albero interno. Il maggiore ostacolo che si può notare, sono le barre orizzontali di ogni barriera, queste non seguono l'andamento delle linee di flusso e tendono a variarne la concentrazione.



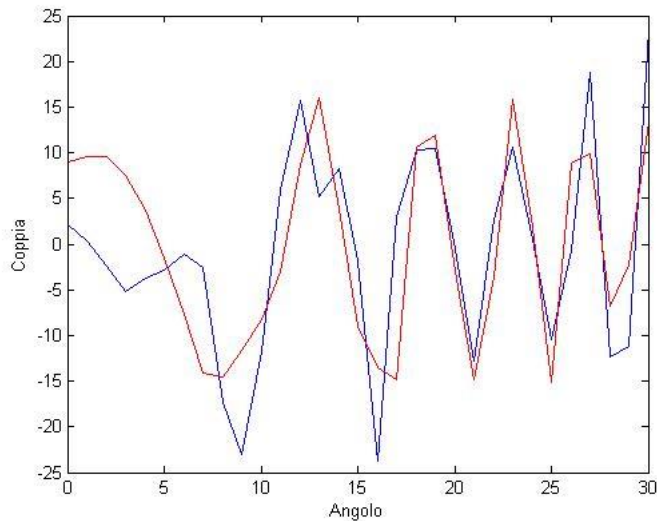
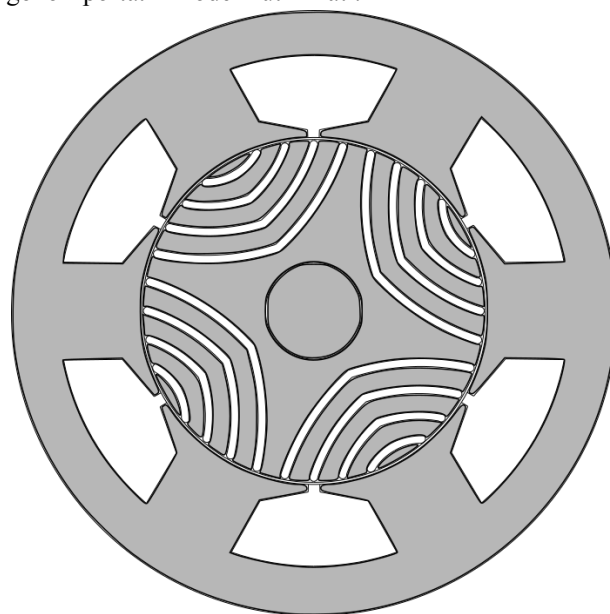


Fig. 1.1 Motore analizzato e relativo andamento della coppia

Prova 1.2

In seguito alla prova precedente la configurazione in questo caso viene variata solo nel disegno delle barriere. Come osservato in precedenza, la parte orizzontale delle barriere del motore precedente, tendevano ad ostacolare il naturale andamento delle linee di flusso, causando una variazione nella densità delle linee di flusso. Considerato questo aspetto allora in questa prova verranno eliminate le parti orizzontali in modo da vederne gli effetti sulla forma d'onda e sul concatenamento delle linee di flusso. La modifica che viene fatta non dovrebbe stravolgere i pessimi andamenti ottenuti con la prova precedente ma dovrebbe migliorare solo degli aspetti marginali. Qualora tale ipotesi venga confermata, la configurazione con le barre orizzontali verrà comunque utilizzata anche in prove successive, va infatti ricordato che nella prova precedente sono stati stravolti tutti i parametri del prototipo.

Di seguito vengono riportati i modelli utilizzati:



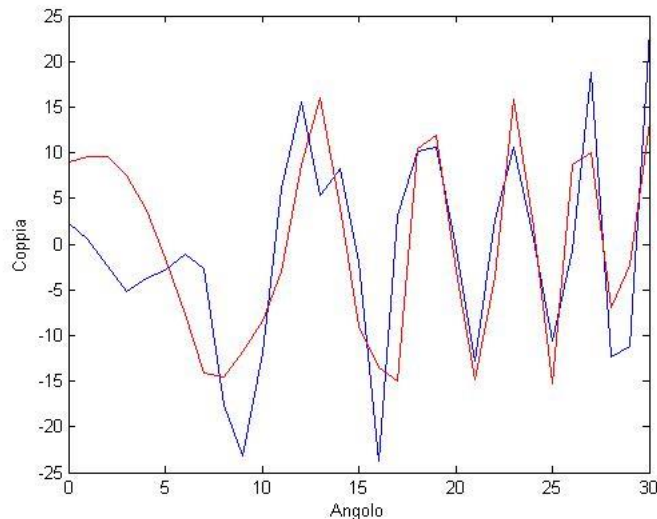


Fig. 1.2 Motore analizzato e relativo andamento della coppia

I risultati di questa prova rispettano le aspettative e sono molto simili ai precedenti, la forma d'onda è praticamente affine a quella precedente ma con una marcata differenza nei picchi positivi più alti, questi infatti si sono ridotti abbastanza e sono tutti sotto i 20 Nm. Tale miglioramento si può attribuire al fatto che in tale configurazione le linee di flusso tendano ad essere più concentrate nella zona delle barriere, in particolare nella zona più bassa, ossia quella dalla seconda barriera in giù. Come nel caso precedente le due zone che registrano la minor densità di linee di flusso sono quella intorno all'albero interno e quella attorno alla prima barriera. I risultati di tale prova suggeriscono di avvicinare la quarta barriera all'albero consentendo così aumentare la concentrazione delle linee di flusso attorno a questo. Tale accorgimento dovrebbe migliorare sia la forma d'onda che la quantità di ripple, per quanto riguarda il valore della coppia media, per ora viene tralasciato visto che i picchi registrati fin ora riguardano anche la parte negativa dell'asse delle ordinate. Oltre allo spostamento delle linee di flusso, si ritiene che la ricerca di una forma ottimale delle barriere possa giovare molto per il raggiungimento di buoni risultati, verranno quindi provate delle forme geometriche il più possibile affini all'andamento delle linee di flusso: ellissi o parabole.

Secondo ciclo di simulazioni

Per questo secondo ciclo di simulazioni si continua a confrontare le configurazioni con e senza le barre orizzontali e per il disegno delle barriere verrà introdotto l'utilizzo dell'ellisse al posto degli archi. Per quanto riguarda gli altri parametri, rispetto al ciclo precedente, verranno modificati molto gli spazi tra le barriere, in particolare verrà variato molto lo spazio tra la prima e la seconda barriera. Nelle configurazioni che prevedono la parte orizzontale verrà variata la larghezza di questa in modo da limitare la curvatura repentina che questa causa alle linee di flusso. Gli angoli e gli spessori delle barriere non saranno oggetto di modifiche.

Prova 2.1

In questa prova vengono mantenuti gli spessori e gli angoli uguali a quelli delle prove precedenti ma viene variata la spaziatura delle barriere, portando a 4 mm lo spazio che ogni barriera ha con le altre e riducendo lo spazio tra la quarta barriera e l'albero interno ad 1 mm. Questi cambiamenti così radicali sono in linea con le osservazioni fatte nella prova precedente. La configurazione che è stata designata per questo motore è tale da direzionare il più possibile le linee di flusso verso la parte interna del

rotore, cercando di creare un certo contrasto tra le spaziature ampie presenti tra le barriere e l'angolazione delle punte molto bassa, tale contrasto è incentivato dall'utilizzo delle barriere a punta e quindi prive della parte orizzontale. Le caratteristiche scelte per questa prova poiché condizionano in modo marcato l'andamento delle linee di flusso dovrebbero influenzare la forma d'onda assunta dalla coppia in uscita e migliorare anche il valore del ripple, infatti la vicinanza delle barriere con l'albero interno dovrebbe ridurre la diversa concentrazione tra le zone del rotore. Le barriere sono state collocate in modo da occupare il più possibile tutto lo spazio a disposizione in maniera omogenea e simmetrica, in base al risultato che verrà ottenuto sarà possibile capire quali sono le zone che dovranno essere occupate dalle barriere nelle prove future. Di seguito vengono riportati i dati della prova e il modello utilizzato.

Tab. 1.7

<i>Spessori</i>	
$t_1 = t_2 = t_3 = t_4$	2 mm
<i>Spazi tra le barriere</i>	
w_{sb}	1 mm
$w_{43} = w_{32} = w_{21} = w_{bt}$	4 mm
<i>Angoli</i>	
β_1	10°
β_2	20°
β_3	30°
β_4	40°

Il risultato ottenuto è ottimo, infatti la forma d'onda è praticamente priva di distorsioni ed ha un andamento sinusoidale che presenta un picco all'incirca ogni 13 gradi. Oltre al miglioramento della forma d'onda, anche la quantità di ripple, anche se ancora eccessiva, è notevolmente ridotta e vede la coppia andare da -3 Nm a 15 Nm con due picchi molto marcati ma che si ripetono poco nel corso della rotazione. Gli ottimi risultati ottenuti sono dovuti alla forma delle barriere, al cambiamento delle spaziature a soprattutto alla simmetria della disposizione degli elementi del rotore, infatti possibile notare l'ottima concatenazione delle linee di flusso e anche la loro distribuzione praticamente omogenea. Negli step successivi dovranno essere migliorati gli angoli, questi condizionano molto l'entrata delle linee di flusso nei canali tra le barriere. Osservando il modello analizzato si può notare come ci sia ancora troppo spazio non interessato da linee di flusso nella zona tra un gruppo e l'altro di barriere, un'altro angolo che va cambiato è quello della prima barriera, questo infatti è troppo basso e tende a stringere le linee di flusso nella zona più vicina al traferro. Un aspetto che va considerato è la distribuzione delle linee di flusso nei poli che concatenano due cave, in queste zone le prime due barriere non vengono minimamente interessate dal flusso e quindi causano una diminuzione del valore di coppia, in particolare si può notare il valore molto basso della coppia nei primi angoli di rotazione e la caduta del valore della coppia verso la parte finale della prova e quindi tra i 25 e i 30 gradi. Per migliorare questo aspetto una soluzione potrebbe essere quella di diminuire il ferro del rotore o di abbassare gli angoli delle barriere, questo espediente gioverebbe alla caduta di coppia ma potrebbe diminuire il valore medio e il valore massimo della coppia prodotta. In seguito verranno fatte delle prove per analizzare la soluzione appena proposta.

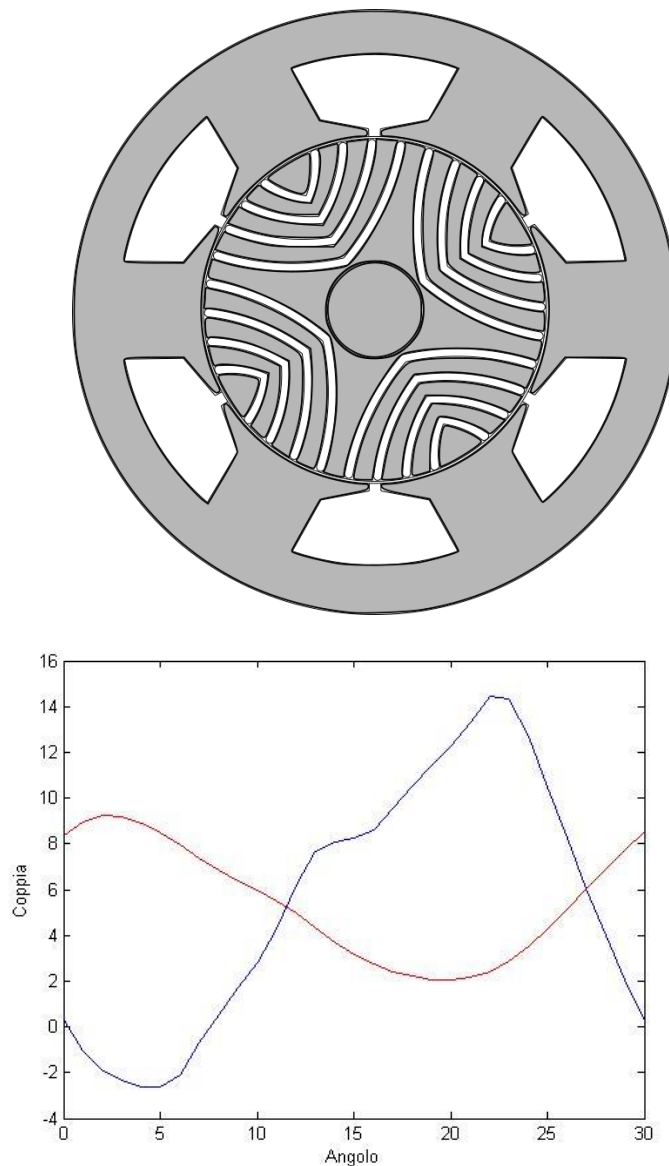


Fig.2.1 Motore analizzato e relativo andamento della coppia

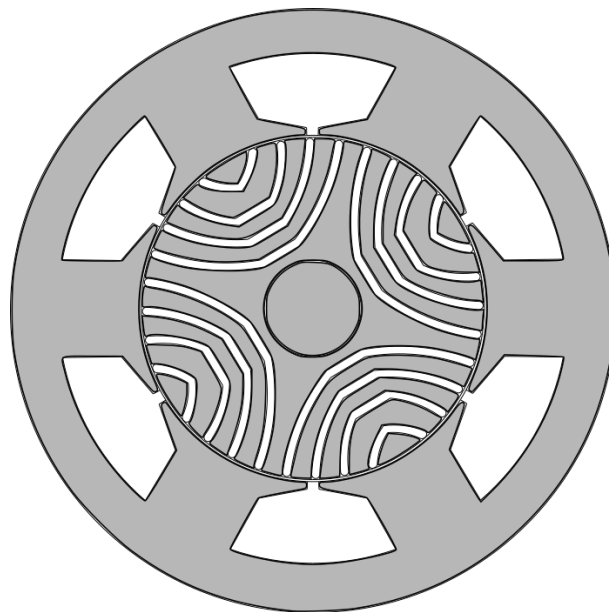
Prova 2.2

In questa prova vengono riprese le barriere che hanno la parte orizzontale e ne vengono modificati dei parametri, in particolare si riduce la larghezza della parte orizzontale. Questa riduzione dovrebbe ridurre anche la repentina variazione del percorso delle linee di flusso e quindi indirizzarle in modo più dolce, in particolare dovrebbe direzionare in modo migliore le linee che sono più vicine all'albero interno cercando di formare una sorta di quadrato attorno a questo. Oltre alla conformazione delle barriere viene modificata anche l'entità degli spazi cercando di renderli tutti omogenei e di aumentare lo spazio sotto la prima barriera, in modo da avere più spazio per le linee di flusso. Gli angoli delle punte e lo spessore delle barriere non vengono modificati per ora, infatti si preferisce lavorare sulla forma e la disposizione delle barriere. La configurazione di questo modello si distacca da quella della prima prova effettuandone alcuni aspetti che dovrebbero incidere molto sul risultato finale, vengono infatti applicati in parte i concetti utilizzati per la prova 2.1 adattandoli alla tipologia di barriere scelta. I dati e il modello utilizzati vengono riportati di seguito.

Tab. 1.8

<i>Spessori</i>	
$t_1 = t_2 = t_3 = t_4$	2 mm
<i>Larghezza barre</i>	
$l_1 = l_2 = l_3 = l_4$	2 mm
<i>Spazi tra le barriere</i>	
w_{sb}	2 mm
w_{43}	4 mm
w_{32}	4 mm
w_{21}	5 mm
w_{bt}	4 mm
<i>Angoli</i>	
β_1	10°
β_2	20°
β_3	30°
β_4	40°

I risultati ottenuti rivelano un miglioramento molto significativo e simile a quello della prova 2.1, la forma d'onda e il ripple sono migliorati allo stesso modo. Questo è dovuto all'affinità dei cambiamenti che sono stati apportati ai modelli analizzati, confermandone quindi l'influenza positiva che li caratterizza ma soprattutto la loro efficienza su modelli diversi tra loro. Come per il caso precedente i risultati più significativi sono stati ottenuti per la forma d'onda mentre per quanto riguarda il ripple questi sono solamente parziali e vanno migliorati ancora molto. L'efficacia di tali cambiamenti sarà la base per le prove successive e stabilisce una linea da seguire. Nella prova successiva a questa, come detto in precedenza, verrà provata una tipologia di barriere disegnata seguendo una forma diversa, questo dovrebbe giovare nel direzionare le linee di flusso. Come si è potuto vedere dalle prove svolte fin ora, direzionare nel modo migliore le linee di flusso è un aspetto che aiuta molto per lo scopo che ci si è proposti.



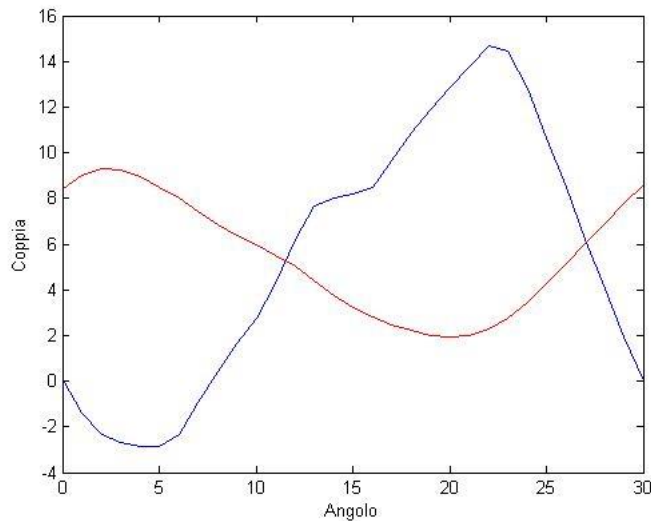


Fig. 2.2 Motore analizzato e relativo andamento della coppia

Prova 2.3

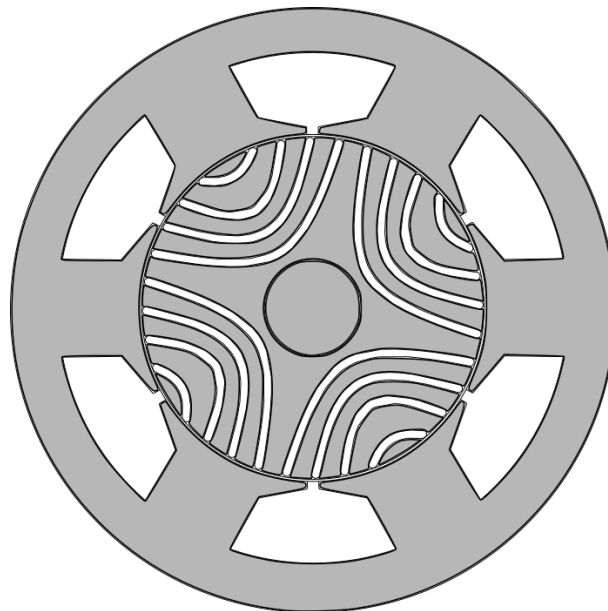
Dopo aver provato configurazioni diverse di spazi e spessori delle barriere si prova a modificare la tipologia di linea che disegna ciascuna barriera, in particolare vengono sostituiti gli archi con tratti ellittici. Utilizzare un tratto ellittico permette di disegnare delle barriere che meglio si adattano all'andamento delle linee di flusso e che non presentano spigoli o variazioni repentine. Nelle prime prove svolte verranno utilizzate delle barriere in cui è presente il tratto orizzontale, in questo caso però questo sarà più integrato nel resto della barriera e quindi non sarà in discontinuità con il resto della barriera. Per quanto riguarda gli altri parametri, viene provata la stessa configurazione di spazi, provata in precedenza, con qualche piccola variazione, in particolare viene aumentato molto lo spazio tra la seconda e la prima barriera, questo va in continuità con i ragionamenti fatti per le prove precedenti e serve per verificare la buona influenza che ha il concatenare le linee di flusso il più possibile verso l'albero interno. La larghezza delle barre orizzontali viene riportata a 5 mm per tutte le barriere, come nella prima prova che è stata fatta. Gli angoli e gli spessori delle barriere sono mantenuti uguali a quelli delle prove precedenti, questi due parametri verranno variati nelle prove successive. I risultati di questa prova dovrebbero essere simili ai buoni risultati ottenuti nelle due prove precedenti, infatti la configurazione degli spazi è simile e anche in questo caso è stata migliorata la forma delle barriere. Di seguito vengono riportati il modello e i dati utilizzati nella prova.

Tab. 1.9

<i>Spessori</i>	
$t_1 = t_2 = t_3 = t_4$	2 mm
<i>Larghezza barre</i>	
$l_1 = l_2 = l_3 = l_4$	5 mm
<i>Spazi tra le barriere</i>	
w_{sb}	3 mm
w_{43}	4 mm
w_{32}	4 mm

w_{21}	8 mm
w_{bt}	4 mm
<i>Angoli</i>	
β_1	10°
β_2	20°
β_3	30°
β_4	40°

I risultati ottenuti sono del tutto affini a quelli delle due prove precedenti, questo conferma le ipotesi e le osservazioni fatte fin ora riguardo l'influenza positiva che la forma delle barriere e la loro localizzazione ha sulla tipologia della forma d'onda e sulla quantità di ripple della coppia. Le distorsioni dovute ad armoniche di ordine superiore vengono eliminate dalla simmetria nella gestione degli spazi tra le barriere. Quello che non è ancora sufficiente è il miglioramento ottenuto per il ripple, questo è ancora troppo elevato e va anche intaccare il valore della coppia media portando la coppia a cambiare segno in alcuni tratti. Per migliorare questo aspetto verranno svolte alcune prove dove verrà modificata la tipologia di configurazione di spazi e forma delle barriere e in seguito si comincerà a modificare anche il valore degli angoli e lo spessore delle barriere cercando di portarsi verso la configurazione del prototipo. Per quanto riguarda il concatenamento delle linee di flusso vengono confermate le aspettative fatte e vengono osservati le stesse problematiche presenti nelle due prove precedenti, in tal senso sarà necessario lavorarci nelle configurazioni delle prove future cercando di ridurre le zone prive di flusso.



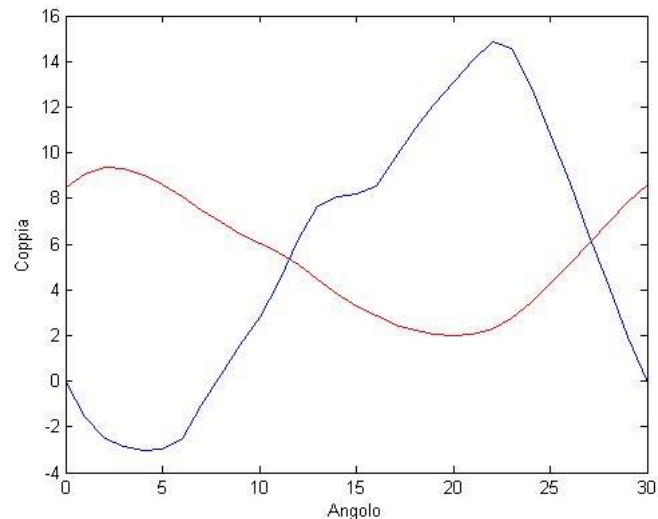


Fig. 2.3 Motore analizzato e relativo andamento della coppia

Terzo ciclo di simulazioni

In questo terzo ciclo di simulazioni verrà svolta una prova in cui verrà variata la geometria delle punte e verranno cambiati anche gli spessori delle barriere. Gli spazi tra le barriere verranno variati di poco e non verranno ancora cambiati gli angoli, questo è dovuto al fatto che, per ora, si è preferito puntare di più sulla variazione di un singolo parametro, in modo da notare meglio l'influenza che questo può avere.

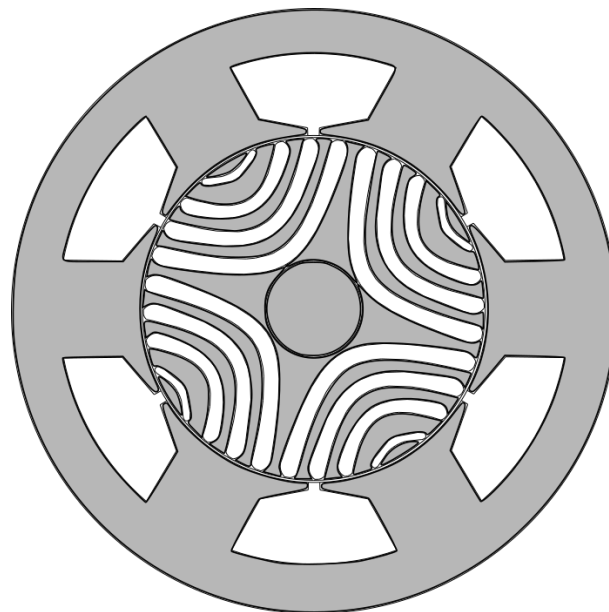
Prova 3.1

Per questa prova verranno modificate: la configurazione delle punte, gli spazi tra le barriere e gli spessori. Il cambiamento più marcato rispetto alle prove fatte in precedenza sta nel disegno della punta di ciascuna barriera, questa verrà disegnata come in figura 3.1. Come si può vedere la forma asimmetrica della punta consente a questa di dividere le linee di flusso che la interessano guidandole e direzionandole meglio. Tale accorgimento dovrebbe ridurre la distorsione della forma d'onda in uscita, eliminando certe armoniche causate proprio da una variazione troppo forzata delle linee di flusso. Oltre alle punte anche il resto della barriera è stato disegnato in modo da guidare meglio le linee di flusso, questo è stato fatto costruendo una barriera priva di parte orizzontale e con una parte centrale più stondata. La forma delle barriere utilizzata in tale prova è la cosiddetta forma a macaone. Per quanto riguarda gli spessori delle barriere, viene aumentato lo spessore delle barriere più vicine all'albero interno e si lascia uguale alle prove precedenti quello della prima barriera. Questo accorgimento serve per ridurre l'impatto della prima barriera rispetto alle altre e per vedere l'effetto che ha lo spessore delle barriere nel valore della coppia. La configurazione utilizzata per questa prova presenta delle barriere più spesse e quindi dei valori di riluttanza più alti, questo aspetto dovrebbe aumentare il valore della coppia. Vengono variati anche gli spazi tra le barriere, la variazione è fatta in continuità con le prove precedenti e quindi si avrà un maggior spazio tra la prima e la seconda barriera, mentre tra le altre barriere lo spazio sarà più o meno costante. I dati e il modello utilizzati per la prova sono riportati qui di seguito.

Tab. 1.10

<i>Spessori</i>	
t_1	2 mm
t_2	3 mm
t_3	3.5 mm
t_4	4 mm
<i>Spazi tra le barriere</i>	
w_{sb}	1 mm
w_{43}	4 mm
w_{32}	4 mm
w_{21}	6 mm
w_{bt}	2 mm
<i>Angoli</i>	
β_1	10°
β_2	20°
β_3	30°
β_4	40°

I risultati della prova mostrano un leggero improvement per quanto riguarda il valore della coppia, questo infatti è aumentato leggermente nel suo picco positivo mentre è rimasto praticamente uguale in quello negativo. Conseguenza di questo aumento è un leggero peggioramento del ripple che rimane su livelli molto alti, le aspettative per questa prova non prevedevano un miglioramento molto marcato di questo parametro. Un'altro aspetto che è peggiorato è la forma d'onda, questa presenta delle distorsioni che prima non erano presenti, in particolare tra i 5° e i 10° gradi c'è una piccola oscillazione e tra i 15° e i 20° gradi è leggermente aumentata la distorsione già presente in precedenza. Il peggioramento registrato non è da attribuire alla nuova forma delle punte ma allo spessore delle barriere, infatti analizzando l'andamento delle linee di flusso si può notare come questo sia in armonia con la forma geometrica della punta ma come sia forzato nella curvatura da un eccessivo spessore delle barriere. Questa forzatura si può notare anche nel resto della barriera, le linee di flusso tendono ad essere strozzate nel canale tra le barriere e non vengono ben concatenate.



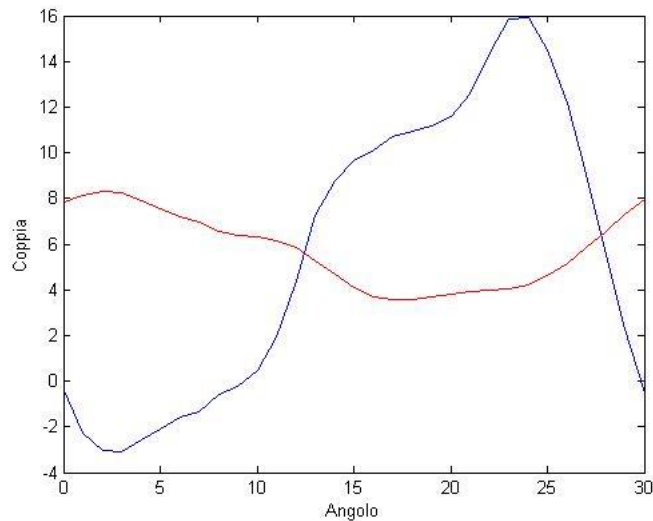


Fig. 3.1 Motore analizzato e relativo andamento della coppia

Prova 3.2

Per questa prova si utilizza l'ellisse per la costruzione delle barriere e si cerca di avere una configurazione il più possibile simmetrica sia per gli spessori che per gli spazi. A tal proposito verrà ricalcata la stessa configurazione analizzata nel ciclo precedente, cambiando in questo caso lo spessore delle barriere, in particolare verranno utilizzate barriere più grosse. Rispetto alla prova precedente la differente spaziatura e la forma diversa delle barriere dovrebbe avere meno effetti negativi sulla forma d'onda e dovrebbe incrementare ulteriormente il valore della coppia. In questo caso la simmetria nelle punte delle barriere risente meno del maggior spessore delle barriere. Va inoltre considerata la simmetria nei parametri, questa dovrebbe aver una maggior influenza sulla distribuzione delle linee di flusso. Un'altro elemento di discontinuità con la prova precedente è l'utilizzo dell'ellisse, questo dovrebbe consentire alle barriere di guidare in modo più armonioso le linee di flusso. Qui di seguito vengono riportati i dati e il modello utilizzati per la prova.

Tab.1.11

<i>Spessori</i>	
t_1	2 mm
t_2	4 mm
t_3	4 mm
t_4	4 mm
<i>Spazi tra le barriere</i>	
w_{sb}	1 mm
w_{43}	4 mm
w_{32}	4 mm
w_{21}	4 mm
w_{bt}	2 mm
<i>Angoli</i>	
β_1	10°
β_2	20°
β_3	30°
β_4	40°

I risultati ottenuti sono in linea con le aspettative, l'aumento della coppia causa un incremento del ripple che risente dell'aumento dei picchi sia nella parte positiva che negativa. In questo caso però la forma d'onda non presenta la stessa entità di distorsioni che la caratterizzavano in precedenza e risulta essere più pulita e sinusoidale. Il concatenamento delle linee di flusso è molto buono ma risulta peggiore rispetto ai modelli precedenti per quanto riguarda la densità delle linee di flusso nei poli che concatenano due cave. Questo problema è causato dallo spessore delle barriere e causa l'eccessivo ripple. Le linee di flusso tendono ad esser spinte verso l'albero interno, questo succede in modo più marcato rispetto ai casi precedenti e potrebbe essere uno degli aspetti da tenere in considerazione per il miglioramento della forma d'onda sia per la distorsione che per il numero di oscillazioni. Nelle prove successive verrà esaminato meglio questo aspetto.

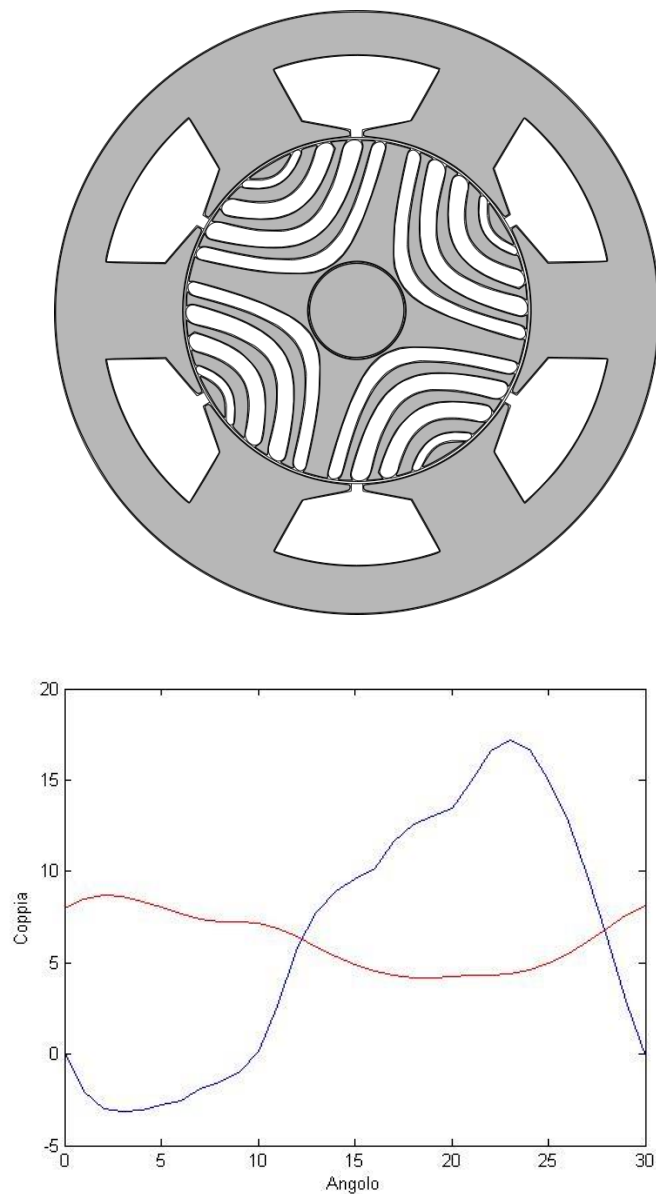


Fig.3.2 Motore analizzato e relativo andamento della coppia

Prova 3.3

In questa prova si utilizzano gli stessi spazi tra barriere e spessori della prova precedente con la differenza che questa volta le barriere sono quelle con la barra orizzontale, questa variazione influisce sulla disposizione che assumeranno le linee di flusso nel rotore. Il fatto di mantenere gli altri parametri invariati rispetto alla prova precedente consente di avere un maggior responso riguardo le differenti caratteristiche prodotte dalle diverse geometrie e come queste vengano influenzate dal maggiore spessore delle barriere. Per questa prova le barre vengono tenute tutte ad una larghezza di 5 mm, riavvicinandosi quindi alle caratteristiche del primo ciclo di prove. Questo viene fatto per verificare la buona influenza che la simmetria dei parametri ha sulla forma d'onda della coppia. Il motore di questa prova dato il maggior ingombro delle barriere dovrebbe aumentare il valore della coppia e quindi causare un incremento di ripple accompagnato da una miglior forma d'onda. Oltre alla forma delle barriere è stata leggermente modificata anche la configurazione delle punte, queste sono state rese leggermente più asimmetriche creando una via di mezzo tra le precedenti e il macaone. Questo leggero cambiamento, dato lo spessore delle barriere, non dovrebbe avere molta influenza ma dovrebbe comunque risultare migliore rispetto alle prova dov'è stata utilizzata la configuraione a macaone. Di seguito vengono riportati i dati e il modello utilizzati.

Tab.1.12

<i>Spessori</i>	
t_1	2 mm
$t_2 = t_3 = t_4$	4 mm
<i>Larghezza barre</i>	
$l_1 = l_2 = l_3 = l_4$	5 mm
<i>Spazi tra le barriere</i>	
w_{sb}	1 mm
w_{43}	4 mm
w_{32}	4 mm
w_{21}	4 mm
w_{bt}	2 mm
<i>Angoli</i>	
β_1	10°
β_2	20°
β_3	30°
β_4	40°

I risultati non rispettano del tutto le aspettative, soprattutto per quanto riguarda la forma d'onda. Il valore dei picchi di coppia è leggermente aumentato e di conseguenza anche il ripple è aumentato, questo è in linea con le aspettative. Quello che non rispetta le aspettative è la forma d'onda, questa in linea di massima rispetta l'andamento che ci si aspettava ma presenta delle leggere oscillazioni, nell'intervallo tra i 5° e i 20°, che sono frutto di armoniche di ordine molto elevato. Il cambiamento della geometria delle punte, in accordo con i risultati ottenuti in precedenza, ha influenzato la presenza di queste oscillazioni, questo è dovuto al modo in cui le linee di flusso entrano nel rotore, in particolare la curvatura di entrata dettata dalla presenza delle barriere. Quest'aspetto si lega poi alla geometria del resto della barriera e agli altri parametri influenzando l'andamento generale della forma d'onda. Questo lo si può notare dal confronto tra le varie prove.

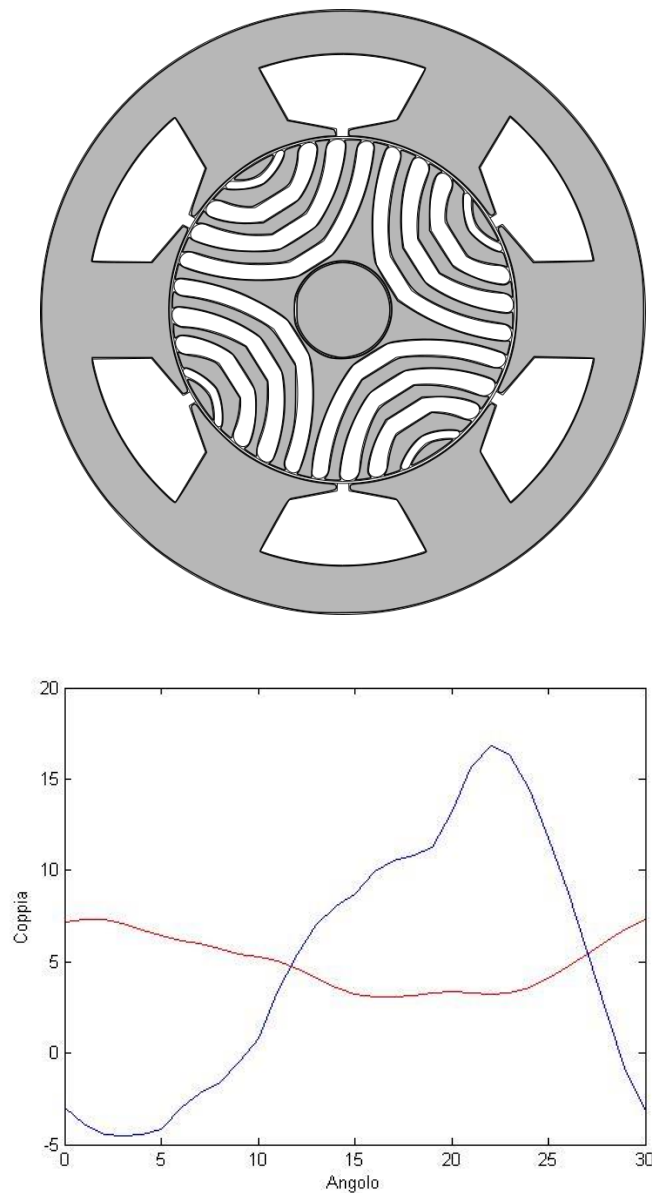


Fig. 3.3 Motore analizzato e relativo andamento della coppia

Prova 3.4

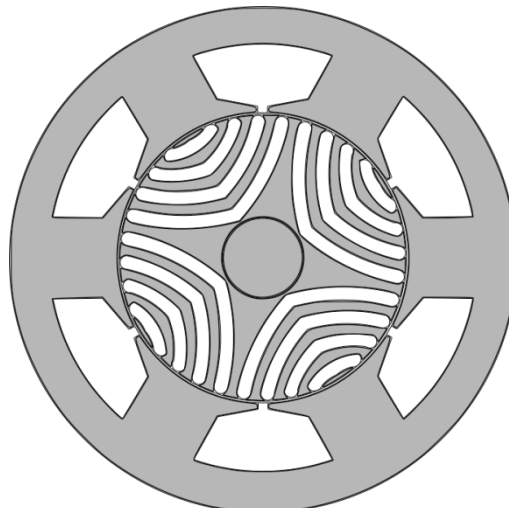
Anche per questa prova vengono mantenuti i parametri uguali a quelli delle due prove precedenti ma vengono cambiati la geometria delle barriere e lo spessore della prima barriera. In questo caso si utilizzano le barre curve senza variare la conformazione delle punte, che vengono tenute simmetriche e tonde. Un'osservazione particolare va fatta per la forma della prima barriera, in questo caso il fatto di tenere gli spessori e gli spazi tra le barriere tutti a 4 mm fa sì che la prima barriera abbia una piccola punta presente nella parte superiore. Questo dettaglio non viene corretto per verificare l'entità delle oscillazioni che causa e quindi capire che livello armonico viene influenzato. La consapevolezza che questa forma insolita della prima barriera causi delle distorsioni è data dall'ostacolo che questo causa per le linee di flusso. Il risultato di questa prova andrà a determinare la forte influenza che la forma delle barriere ha sulle oscillazioni della coppia. Oltre all'aspetto appena descritto sarà interessante notare la differenza tra questa configurazione e quella ad ellisse della prova 3.2 nel guidare le linee di flusso verso l'albero interno. La forma in questo caso è più appuntita e tende a creare dei canali più

diretti verso la parte più interna del rotore, infatti la forma ad ellisse presenta una maggiore curvatura. L'effetto di questi dettagli geometrici è limitato dallo spessore delle barriere ma comunque influenza, anche se in piccola parte, il risultato. Di seguito vengono riportati i dati e il modello utilizzati nella prova.

Tab.1.13

<i>Spessori</i>	
$t_1 = t_2 = t_3 = t_4$	4 mm
<i>Spazi tra le barriere</i>	
w_{sb}	1 mm
$w_{43} = w_{32} = w_{21}$	4 mm
<i>Angoli</i>	
β_1	10°
β_2	20°
β_3	30°
β_4	40°

I risultati ottenuti confermano quanto è stato ipotizzato, infatti nella forma d'onda della coppia ci sono maggiori oscillazioni soprattutto tra i 10° e i 20° questo è dovuto alla forma della prima barriera che ostacola le linee di flusso. Non ci sono sostanziali cambiamenti per quanto riguarda il valore dei picchi di coppia e per quanto riguarda il ripple. Le linee di flusso anche in questo caso vengono direzionate verso l'albero centrale ma, rispetto alla configurazione ad ellisse, è possibile registrare una densità inferiore nella parte centrale del rotore, questo è dovuto alla configurazione delle barriere e agli angoli delle punte che tendono a trattenere maggiormente le linee di flusso nella parte superiore e che riducono il canale tra i vari gruppi di barriere. I risultati di questo ciclo di prove portano a far pensare che l'influenza della forma delle barriere vada ad agire su armoniche di valore più basso mentre la forma delle punte agisca di più su armoniche di ordine maggiore. Questo aspetto verrà analizzato ed eventualmente confermato in seguito alle prove successive. In tutte le prove di questo ciclo il maggior spessore delle barriere non ha portato particolari giovamenti al livello di ripple e ha peggiorato l'effetto positivo portato dalla variazione di altri parametri. Nei cicli di prove svolti fin ora sono stati variati dei parametri che principalmente vanno a modificare la forma d'onda e che modificano di poco la quantità di ripple o il valore della coppia media. Nelle prove successive verrà cambiata la configurazione degli angoli, verranno utilizzate delle barriere più fine e verrà analizzata l'influenza del taglio superiore. Tutti gli aspetti appena citati saranno variati in aggiunta ai parametri cambiati fin ora ponendo particolare attenzione ai risultati di tutte le prove svolte.



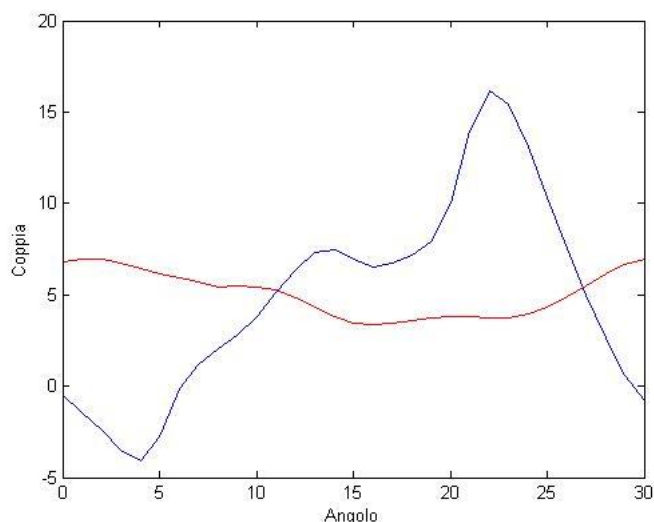


Fig. 3.3 Motore analizzato e relativo andamento della coppia

Quarto ciclo di prove

In questo quarto ciclo di prove si comincia a cambiare la configurazione degli angoli e ad introdurre il taglio nella parte superiore del rotore. Tutti questi cambiamenti portano i modelli simulati ad avere delle caratteristiche simili a quelle del prototipo di base.

Prova 4.1

Per la prima prova di questo ciclo viene simulato un motore con le barre curve e il taglio superiore. L'introduzione di questa configurazione necessita di dover apportare dei cambiamenti nelle caratteristiche utilizzate fin ora, soprattutto per quanto riguarda gli angoli della punta delle barriere. Dalle prove precedenti si è potuto constatare che il direzionamento delle linee di flusso verso la parte centrale del rotore porta dei miglioramenti alle prestazioni in termini di ripple e di forma d'onda. Per agire sotto tale aspetto vengono aumentati gli angoli di tutte le barriere, questo consente di portare la concatenazione delle linee di flusso nella parte più bassa del rotore. L'aumento degli angoli delle barriere permette di avere molto spazio per l'introduzione del taglio nella parte superiore e consente di ridurre le zone a bassa densità di flusso registrate fin ora. Considerando l'ultimo aspetto descritto, si cerca di avvicinare il taglio superiore alla prima barriera, consentendo così, la riduzione delle zone prive di linee di flusso, presenti nei poli che concatenano due cave, e l'aumento della densità generale di tutte le linee di flusso concatenate. Per quanto riguarda gli spazi tra le barriere, questi sono stati ridistribuiti in continuità con i cambiamenti degli angoli, in particolare è stato aumentato lo spazio tra la terza e la quarta barriera in modo da accogliere meglio le linee di flusso che sono guidate verso quella zona. Gli spessori delle barriere sono stati ridotti sia per limitare gli effetti negativi causati da uno spessore maggiore che per aumentare gli spazi per la nuova configurazione del rotore. Tutte le modifiche apportate sono in linea con i risultati precedenti e dovrebbero migliorare di molto le prestazioni. La forma d'onda della coppia potrebbe risentire di armoniche di ordine alto, questo è dovuto sia alla perdita della simmetria tra i parametri che alla vicinanza dei gruppi di barriere che la nuova configurazione impone. Di seguito vengono riportati i dati e il modello utilizzati.

Tab. 1.14

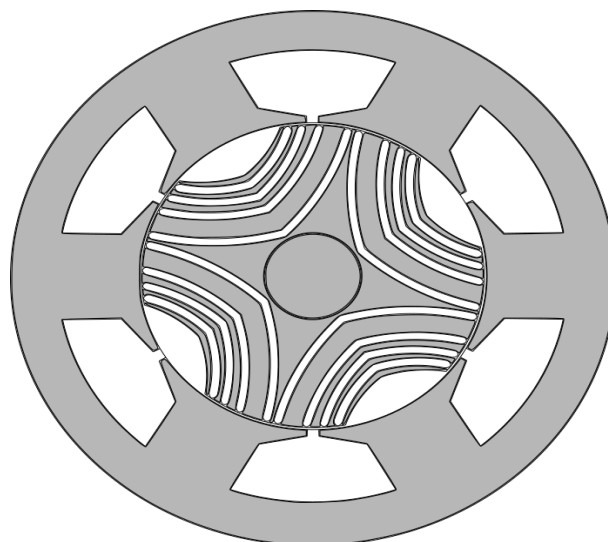
<i>Spessori</i>	
$t_1 = t_2 = t_3 = t_4$	2 mm

<i>Spazi tra le barriere</i>	
w_{sb}	1 mm
w_{43}	6 mm
w_{32}	2 mm
w_{21}	2 mm
w_{ht}	2 mm
<i>Angoli</i>	
β_1	22°
β_2	27°
β_3	33°
β_4	43°
β_{ht}	20°

I risultati sono in linea con le aspettative e mostrano un grosso miglioramento per quanto riguarda il ripple e il valore della coppia media, eliminando le oscillazioni che portavano la coppia a valori negativi. Questo fatto denota la grossa influenza che hanno sia gli angoli delle barriere che il taglio superiore sulle armoniche di ordine più basso. Per quanto riguarda la forma d'onda questa è notevolmente cambiata, soprattutto nel numero di oscillazioni presenti nell'intervallo analizzato, questo infatti è raddoppiato rispetto alla forma precedente. Lungo la forma d'onda si possono notare distorsioni con ordine armonico abbastanza basso. Nel complesso si può ritenere che le prestazioni abbiano ricevuto un notevole improvement, infatti la notevole riduzione del ripple fa sì che un numero maggiore di oscillazioni sia comunque compensato dalla minore entità dei picchi. Nei casi precedenti le oscillazioni di coppia erano molto più lente ma più deleterie nei confronti della coppia media prodotta, infatti portavano la coppia a cambiare segno in certi intervalli. Il migliore concatenamento dovuto alla configurazione del rotore fa sì che quasi tutte le linee di flusso si concentrino tra la quarta e la terza barriera. Alcune linee vengono direzionate verso l'albero interno ma comunque in modo limitato rispetto alle prove precedenti, questo è dovuto all'angolo molto stretto presente tra i vari gruppi di barriere e al fatto che le linee vengono quasi tutte guidate tra le ultime due barriere. In questo caso, poiché la coppia non cambia mai segno è possibile calcolare i due parametri f_1 ed f_2 .

Tab. 1.15

% Ripple	Parametro coppia
72.554792	4.111853



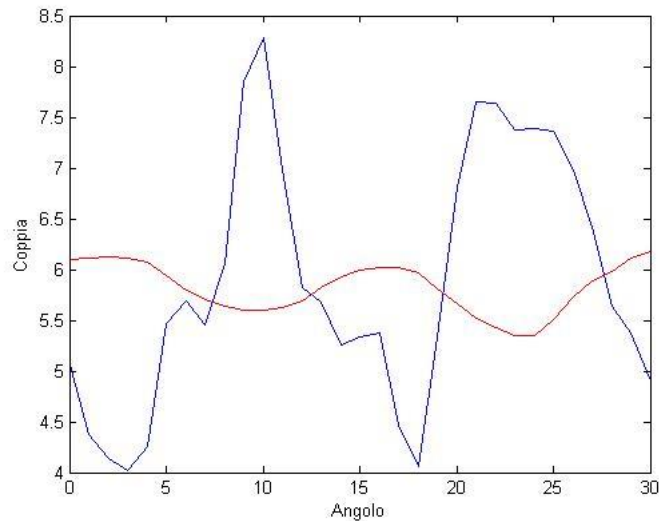


Fig. 4.1 Motore analizzato e relativo andamento della coppia

Entrambi i parametri sono migliorati molto rispetto al prototipo di base, questo miglioramento dovrà essere integrato con una miglior forma d'onda. A tal proposito nelle prove successive sarà necessario lavorare sugli aspetti già esaminati nelle prime prove integrandoli nella variazione della configurazione utilizzata in questa prova.

Prova 4.2

Per questa prova vengono utilizzate ancor le barre curve ma viene cambiata la forma del taglio superiore, introducendo una parte orizzontale. Il resto della configurazione viene mantenuto uguale a quella della prova precedente salvo per lo spazio tra la prima barriera e il taglio che viene aumentato da 2 a 4 mm per avere una forma che incanala in modo più diretto le linee di flusso senza schiacciare troppo le linee di flusso contro la prima barriera. L'introduzione di questa forma del taglio serve per vedere che effetto essa può avere sulla forma d'onda e sul valore della coppia. L'introduzione di questa dissimmetria dovrebbe peggiorare la forma d'onda e aumentare il ripple, infatti la concatenazione delle linee di flusso dovrebbe risultare peggiore soprattutto nella zona della prima barriera. il risultato di questa dovrebbe fornire un utile riferimento sull'influenza del taglio superiore e sul suo effetto nei parametri analizzati. Di seguito vengono riportati i dati e il modello utilizzati per la prova.

Tab.1.16

<i>Spessori</i>	
$t_1 = t_2 = t_3 = t_4$	<i>2 mm</i>
<i>Spazi tra le barriere</i>	
w_{sb}	<i>1 mm</i>
w_{43}	<i>6 mm</i>
w_{32}	<i>2 mm</i>
w_{21}	<i>2 mm</i>
w_{bt}	<i>4 mm</i>
<i>Spessore taglio superiore</i>	
l_{bt}	<i>5 mm</i>
<i>Angoli</i>	
β_1	<i>22°</i>
β_2	<i>27°</i>
β_3	<i>33°</i>

β_4	43°
β_{nr}	20°

I risultati sono in linea con le aspettative ed evidenziano l'influenza della differenza tra la forma del taglio superiore e delle barriere del rotore. Il ripple è peggiorato quasi del 10% mentre il valore della coppia media è peggiorato solo di poco. L'aspetto più interessante riguarda la forma d'onda, questa presenta meno oscillazioni rispetto alla prova precedente ma è ricca di distorsioni e si allontana da un andamento sinusoidale. I risultati esaminati sono la diretta conseguenza del peggiore concatenamento delle linee di flusso che, come previsto, riduce gli effetti benefici portati da certi parametri utilizzati per la prova. Rispetto alla configurazione delle linee di flusso della prova precedente, si può notare un peggioramento che è diretta conseguenza del peggior concatenamento di flusso nella zona della prima barriera. Nella parte più interna del rotore vengono indirizzate meno linee di flusso, e nella zona sottostante i poli che concatenano due cave, la parte che non è interessata da linee di flusso è aumentata. Questi due aspetti sono la causa di un aumento del ripple e della distorsione presente nella forma d'onda della coppia. Per le prove successive sarà necessario tener conto della simmetria della configurazione e della forma di barriere e taglio superiore.

Tab.1.17

% Ripple	Parametro coppia
79.849072	4.135810

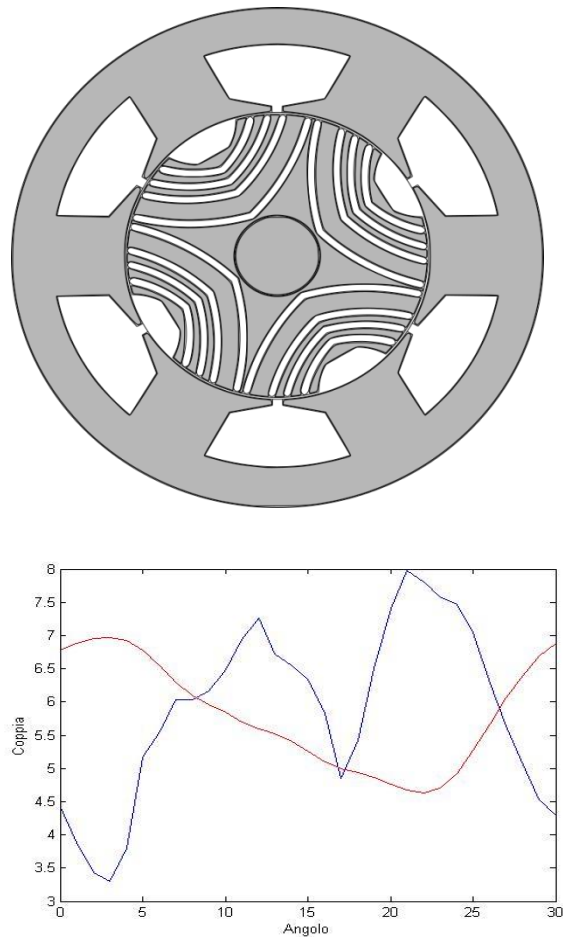


Fig. 4.2 Motore analizzato e relativo andamento della coppia

Prova 4.3

In questa prova viene costruito un motore con una simmetria geometrica, taglio e barriere con la stessa forma, ma con un dissimmetria per quanto riguarda lo spessore delle barriere. La forma geometrica utilizzata per le barriere è quella dell'ellisse mentre per il taglio superiore viene utilizzata la forma con la barra orizzontale e un angolo molto alto. Le barriere vengono disegnate leggermete più spesse per verificare l'influenza sulla forma d'onda, in particolare su armoniche di ordine abbastanza alto. L'unica barriera che non è stata modificata è la terza barriera, questa infatti, se fosse stata ingrossata, avrebbe ridotto di troppo i canali sovrastanti e sottostanti. La forma delle barriere e del taglio superiore dovrebbero eliminare le distorsioni viste nelle prove precedenti. Il valore della coppia dovrebbe subire un leggero aumento con conseguente peggioramento del ripple. Gli spazi tra le barriere sono praticamente invariati rispetto a quelli delle prove precedenti ad eccezione della distanza tra l'albero interno e la prima barriera, questo spazio è stato aumentato per ingrandire la parte interna del canale presete tra i vari gruppi di barriere. Di seguito vengono riportati i dati e il modello utilizzati per la prova.

Tab.1.18

<i>Spessori</i>	
$t_1 = t_2 = t_4$	3 mm
t_3	2 mm
<i>Spazi tra le barriere</i>	
w_{sb}	2 mm
w_{43}	6 mm
w_{32}	2 mm
w_{21}	2 mm
w_{bt}	2 mm
<i>Spessore taglio superiore</i>	
l_{bt}	5 mm
<i>Angoli</i>	
β_1	29°
β_2	33°
β_3	36°
β_4	43°
β_{bt}	27°

Analizzando i risultati si può vedere che il modello presenta un aumento elevato di ripple che però è dovuto alla quantità di distorsione presente e non ad un aumento della coppia, questa infatti è leggermente diminuita. L'andamento generale della forma d'onda è simile a quello visto per il prototipo ma in questo caso si registrano più distorsioni, soprattutto nella prima metà della curva. Le distorsioni della curva si possono ricondurre al diverso spessore delle barre che è stato utilizzato per questa prova, infatti i canali delle prime due barriere si sono ridotti molto e concatenano meno linee di flusso. In generale la densità e la concatenazione delle linee di flusso risulta peggiorata rispetto ai modelli precedenti.

Tab.1.19

% Ripple	Parametro coppia
100.920177	4.143571

Per eliminare le distorsioni e migliorare il concatenamento delle linee di flusso, nelle prove successive si protenderà verso l'utilizzo di barriere tutte uguali e con uno spessore non troppo elevato. Nelle prove di questo ciclo si è esaminato l'effetto di una nuova configurazione e si è potuto confermare l'influenza di certi parametri sul livello di distorsione e sulla forma d'onda della coppia. Nei cicli

successivi, oltre a lavorare sulle varie configurazioni viste fin ora, si cercherà di lavorare per il miglioramento dei risultati raggiunti con il motore a barre curve. Quest'ultimo, sebbene presenti più oscillazioni rispetto al prototipo, risulta avere una quantità minore di ripple e quindi tende a rimanere più vicino ad un valore medio di coppia prodotta.

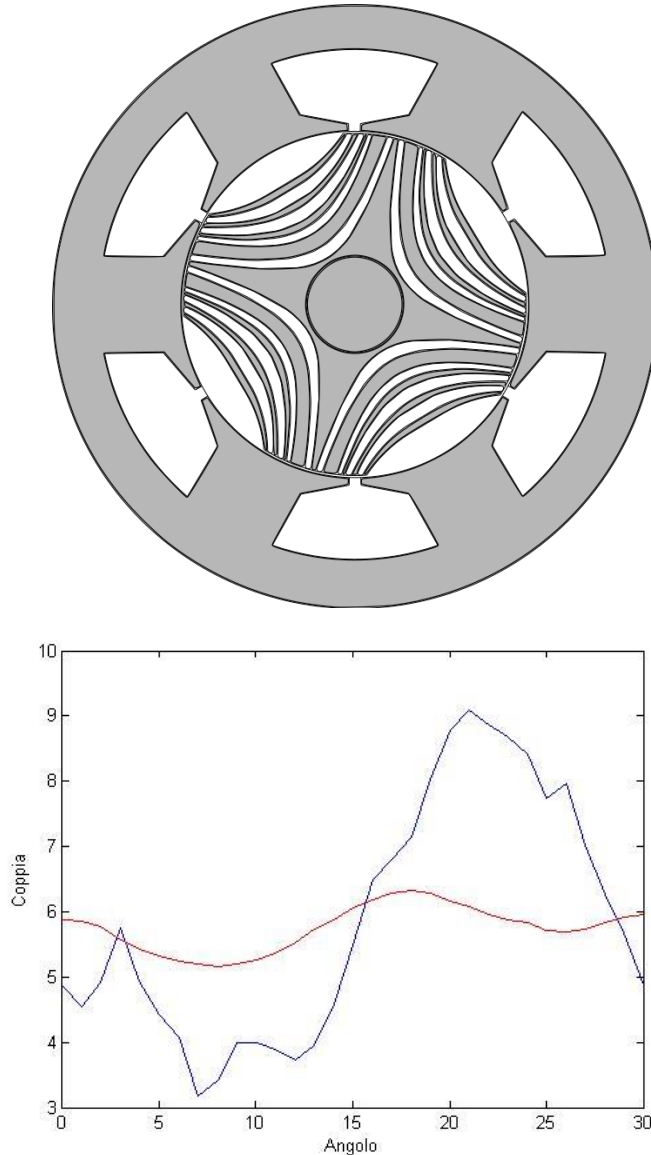


Fig.4.3 Motore analizzato e relativo andamento della coppia

Quinto ciclo di simulazioni

In questo ciclo di simulazioni si agirà sugli angoli del taglio e della prima barriera, questo viene fatto per cercare di migliorare il livello di distorsione della forma d'onda e ridurre il ripple. Nelle quattro prove di questo ciclo si cercherà di esaminare configurazioni diverse del taglio superiore, in particolare verranno provati angoli molto alti e angoli molto bassi. I risultati di questo ciclo consentiranno di determinare l'influenza di questo parametro e di capire quale intervallo utilizzare per le ottimizzazioni future.

Prova 5.1

In questa prova per il taglio superiore si utilizza un angolo molto alto, portando così all'aumento anche dell'angolo della prima barriera. I restanti angoli vengono abbassati leggermente per poter adattare meglio la forma delle barriere all'andamento delle linee di flusso. Per quanto riguarda gli spazi tra le barriere non vengono fatte variazioni, mentre per lo spessore delle barriere si torna ad utilizzare la configurazione che prevede lo stesso spessore per tutte le barriere. In generale il modello utilizzato, salvo per la forma delle barriere, è molto simile al prototipo e quindi l'andamento della coppia dovrebbe ricalcare quello già visto per il prototipo. In questo caso la struttura del rotore risulta essere molto stretta, quindi è possibile che siano presenti delle distorsioni causate da qualche parametro non del tutto ottimizzato. I dati e il modello utilizzati per la prova vengono riportati qui di seguito.

Tab.1.20

<i>Spessori</i>	
$t_1 = t_2 = t_3 = t_4$	2 mm
<i>Spazi tra le barriere</i>	
w_{sb}	1 mm
w_{43}	6 mm
w_{32}	2 mm
w_{21}	2 mm
w_{bt}	2 mm
<i>Angoli</i>	
β_1	20°
β_2	33°
β_3	38°
β_4	43°
β_{bt}	27°

I risultati sono in linea con le aspettative e sono molto vicini a quelli del prototipo di base, la differenza sostanziale è nella forma d'onda, in questo caso sono presenti molte più distorsioni. Questo è dovuto alla configurazione non del tutto ottimizzata, infatti dal modello si può notare come la concatenazione delle linee di flusso sia disturbata soprattutto nella zona tra il taglio superiore e la prima barriera. La stessa cosa vale per la zona più interna del rotore, questa tende ad essere troppo chiusa ed ad impedire alle linee di flusso di concatenare la zona vicino all'albero. Nelle prove successive sarà necessario modificare la configurazione di alcuni spazi e spostare le barriere. Un altro aspetto da migliorare sarà lo spazio tra il taglio superiore e la prima barriera, infatti questa zona influenza molto le distorsioni della forma d'onda della coppia.

Tab.1.21

% Ripple	Parametro coppia
115.436897	4.879281

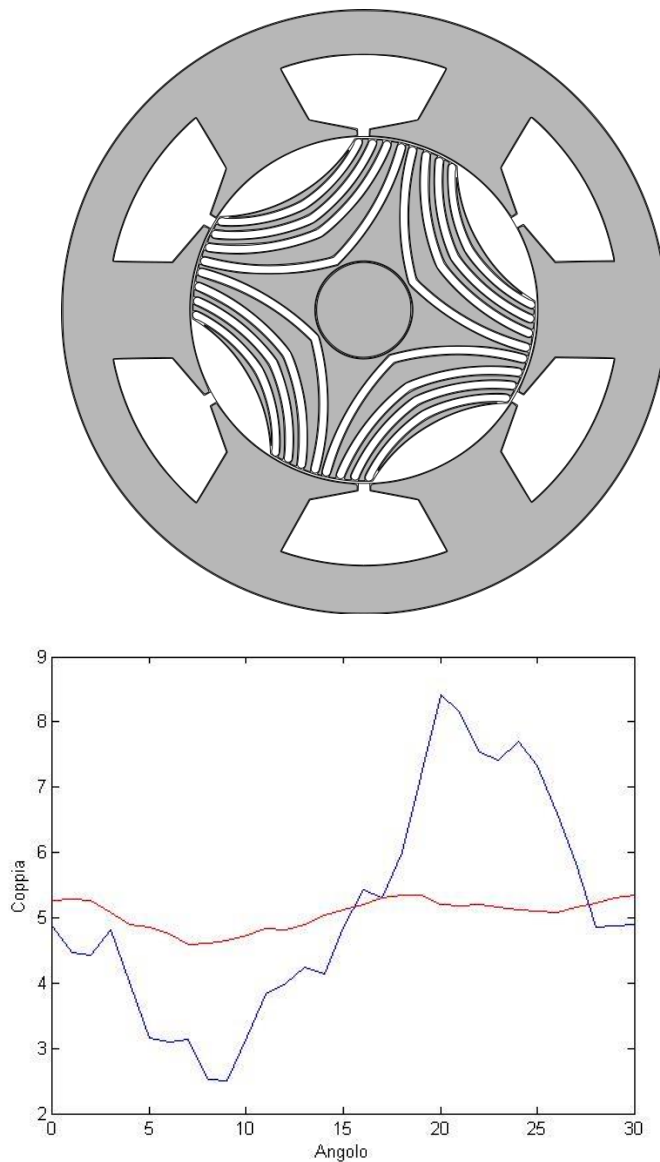


Fig.5.1 Motore analizzato e relativo andamento della coppia

Prova 5.2

In questa prova viene utilizzata una configurazione opposta a quella della prova precedente, in particolare si usa un angolo del taglio superiore molto basso, con il conseguente abbassamento di tutti gli angoli delle altre barriere. La configurazione degli spazi vede una riduzione dello spazio tra la quarta e la terza barriera mentre gli spessori rimangono invariati rispetto alla prova precedente. La configurazione designata in questa prova, in continuità con i risultati ottenuti in precedenza, dovrebbe ridurre il ripple ma aumentare le oscillazioni e la distorsione della forma d'onda della coppia in uscita. Il fatto di aver introdotto il taglio superiore e di aver ridotto lo spazio tra questo e la prima barriera dovrebbe portare ad una riduzione sia del ripple che delle distorsioni, infatti si avvicina di più alla tendenza mostrata fin ora dalle linee di flusso. In questo caso il distacco tra le prime tre barriere e la quarta barriera dovrebbe direzionare maggiormente le linee di flusso verso la parte interna del rotore. La riduzione dello spazio tra la quarta e la terza barriera, vista la riduzione degli angoli delle prime tre barriere non risulta gravoso per la densità di flusso concentrata in questo spazio. Di seguito vengono riportati i dati e il modello utilizzati per la prova.

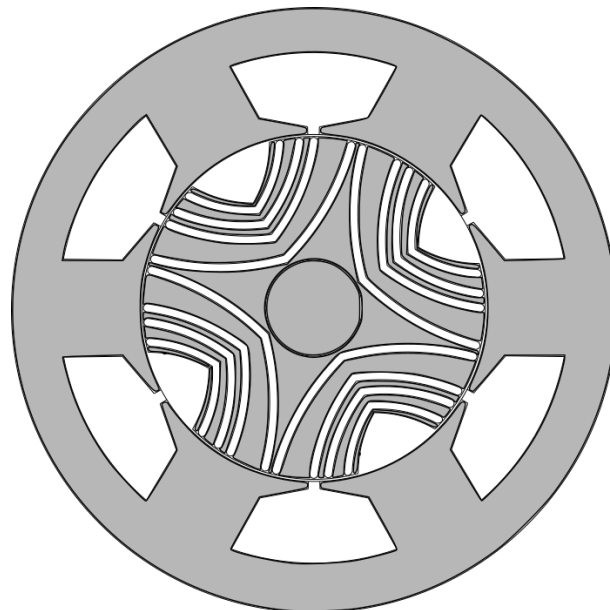
Tab.1.22

<i>Spessori</i>	
$t_1 = t_2 = t_3 = t_4$	2 mm
<i>Spazi tra le barriere</i>	
w_{sb}	1 mm
w_{43}	4 mm
w_{32}	2 mm
w_{21}	2 mm
w_{ht}	2 mm
<i>Angoli</i>	
β_1	18°
β_2	25°
β_3	30°
β_4	43°
β_{ht}	15°

I risultati rispecchiano una riduzione del ripple accompagnata da una leggera riduzione del valore di coppia media, questo è dovuto alle oscillazioni più ridotte. La forma d'onda è ancora molto distorta e presenta più picchi positivi rispetto alle prove precedenti, questo allontana la forma d'onda da un andamento sinusoidale e fa sì che la coppia, tra i 5 e i 25 gradi, tenda ad avere variazioni veloci in eccesso per poi scendere in modo più netto oltre i 30 gradi (lo stesso andamento si vede nei primi 5 gradi, questo è dovuto alla ripetitività che ha la forma d'onda ogni 30 gradi). Il risultato di questa prova è da comunque da tenersi valido, infatti, nonostante la forma d'onda molto distorta, una riduzione dell'entità delle oscillazioni porterebbe ad avere una coppia in uscita praticamente costante.

Tab.1.23

% Ripple	Parametro coppia
63.040045	4.544622



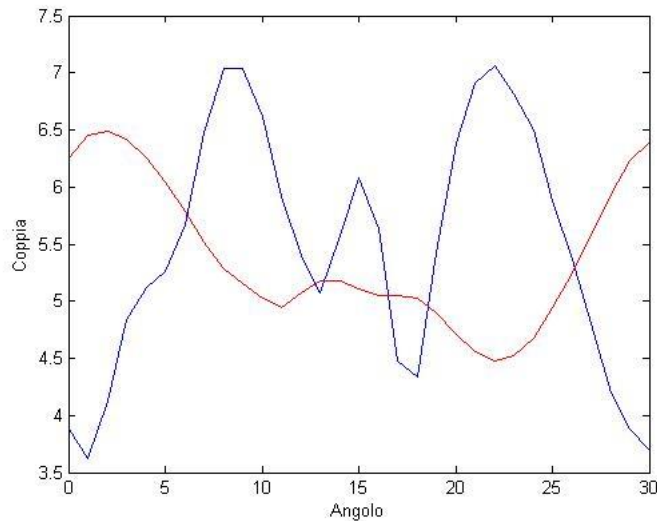


Fig.5.2 Motore analizzato e relativo andamento della coppia

Il concatenamento delle linee di flusso è buono ma risente ancor di qualche difetto dovuto ad una configurazione non ottimale di certi parametri. Il vuoto di linee di flusso che era presente nei modelli analizzati in precedenza è presente in misura maggiore rispetto ai motori con un taglio superiore più profondo. Il fatto di non avere un taglio nella parte superiore aumenta la quantità di ferro del rotore e causa una distribuzione non omogenea delle linee di flusso.

Prova 5.3

In questa prova si utilizzano con la forma di ellisse e con la barra orizzontale. La configurazione è simile a quella del prototipo ma con gli angoli delle barriere cambiati e presi in un valore intermedio a quelli analizzati fin ora. Lo scopo di tale prova è vedere quale influenza possa avere, in termini di ripple e di forma d'onda, l'utilizzo di una configurazione intermedia a quelle usate fin ora. Nelle prove precedenti i motori con gli angoli delle barriere più bassi, cioè con una configurazione con il taglio superiore meno profondo, tendono ad avere ripple più basso ma più oscillazioni e distorsione nella forma d'onda della coppia, viceversa quando gli angoli sono più alti la forma d'onda risulta più pulita ma con oscillazioni di coppie molto più ampie. L'utilizzo di una configurazione intermedia dovrebbe fornire una forma d'onda che accomuna le caratteristiche notate fin ora nelle altre prove. La configurazione degli spazi e degli spessori delle barriere è affine a quelle usate in precedenza e si adatta il più possibile all'andamento delle linee di flusso. Certi aspetti di tale configurazione devono essere ancora modificati per ottenere un andamento ottimale, questo però sarà lo scopo delle ottimizzazioni che seguiranno a queste prove parametriche. di seguito vengono riportati i dati e il modello utilizzati per la prova.

Tab.1.24

<i>Spessori</i>	
$t_1 = t_2 = t_3 = t_4$	2 mm
<i>Larghezza barre</i>	
$l_1 = l_2 = l_3 = l_4 = l_{bt}$	5 mm
<i>Spazi tra le barriere</i>	
w_{sb}	1 mm
w_{43}	6 mm
w_{32}	2 mm
w_{21}	2 mm

w_{bt}	2 mm
<i>Angoli</i>	
β_1	22°
β_2	27°
β_3	33°
β_4	43°
β_{bt}	20°

I risultati verificano le ipotesi fatte e confermano l'andamento osservato fin ora, in particolare la forma d'onda in uscita è molto distorta fino ai 20° ma di base conserva l'andamento ottenuto con il prototipo di base. Anche la percentuale di ripple e il valore della coppia sono in linea con le aspettative e confermano l'influenza del valore degli angoli sul ripple, il valore medio della coppia e la distorsione nella forma d'onda. In questa prova la configurazione degli angoli tendeva di più verso valori bassi, per questo la percentuale di ripple si è abbassata pur aumentando la distorsione della forma d'onda.

Tab.1.25

% Ripple	Parametro coppia
90.555842	4.326527

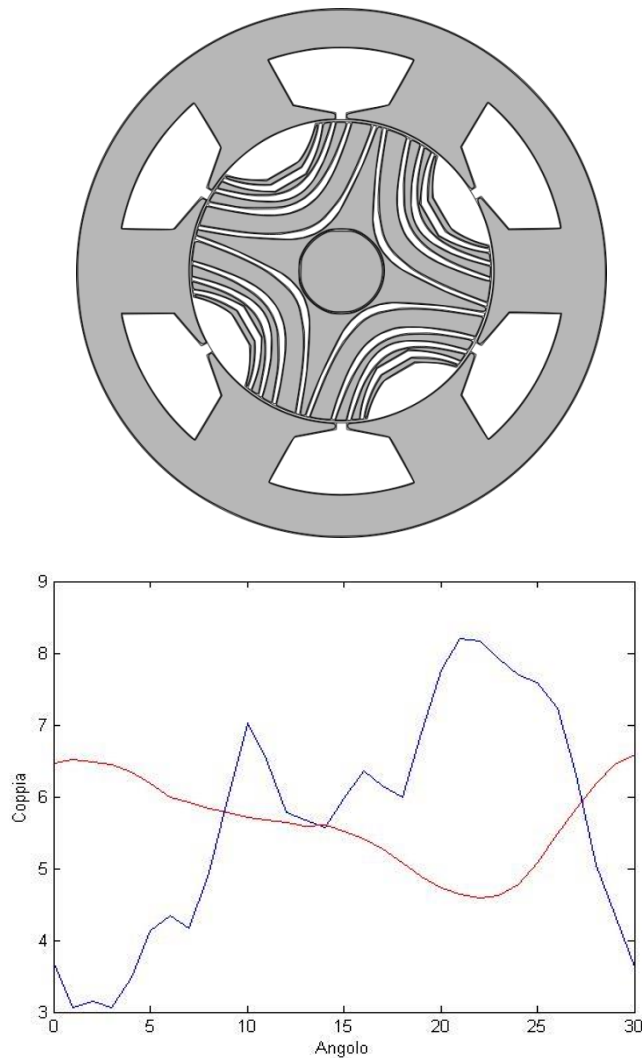


Fig. 5.3 Motore analizzato e relativo andamento della coppia

Prova 5.4

Per questa prova si utilizza la stessa configurazione della prova 5.2 ma non viene fatto il taglio superiore. Il fatto di eliminare del tutto il taglio superiore serve per capire al meglio quale influenza questo abbia sulla forma d'onda della coppia e su valore del ripple. La configurazione cambia soprattutto nella zona della prima barriera dove, la maggior quantità di spazio, verranno concatenate molte più linee di flusso. Qui di seguito viene riportato il modello utilizzato.

I risultati ottenuti sono in linea con le aspettative e ricalcano quelli ottenuti nei primi cicli di prove. In questo caso però il livello di distorsione tra i 5° e i 20° gradi è molto inferiore per via della diversa configurazione degli angoli delle barriere. Analizzando la concatenazione delle linee di flusso si può notare che nel primo e nel terzo gruppo di barriere vengono concatenate quasi tutte le linee di flusso. Questo succede in tutte le configurazioni provate fin ora, ma influenza maggiormente quelle dove il taglio superiore è assente o è poco profondo causando un aumento di ripple e delle oscillazioni di coppia.

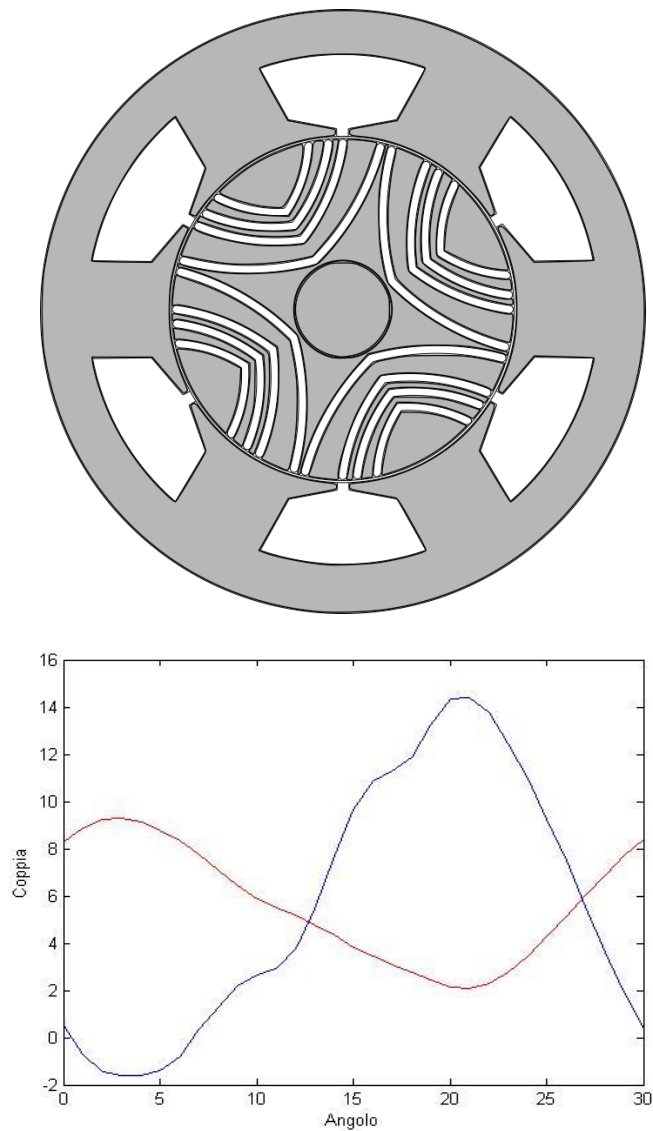


Fig.5.4 Motore analizzato e relativo andamento della coppia

Sesto ciclo di prove

In questo ciclo di prove vengono provate delle piccole variazioni alle configurazioni già viste. Queste prove saranno fondamentali nella definizione dei range utilizzati per le ottimizzazioni.

Prova 6.1

In questa prova si utilizza la configurazione a barre curve, viene ridotto lo spazio tra la terza e la seconda barriera e si aumenta lo spazio tra il taglio superiore e la prima barriera. Per quanto riguarda la configurazione degli angoli si abbassano gli angoli della terza e della seconda barriera e si alza quello della prima. Non viene apportata alcuna modifica agli spessori delle barriere. La configurazione del rotore utilizzata per questa prova apporta dei piccoli cambiamenti, alle configurazioni già viste in precedenza, in linea con le osservazioni fatte fin ora. In particolare si cerca di migliorare la posizione di certe barriere, come la prima e la terza, in modo da ottenere una miglior concatenazione delle linee di flusso. Qui di seguito vengono riportati i dati e il modello utilizzati per la prova.

Tab.1.26

<i>Spessori</i>	
$t_1 = t_2 = t_3 = t_4$	2 mm
<i>Spazi tra le barriere</i>	
w_{sb}	1 mm
w_{43}	5 mm
w_{32}	1 mm
w_{21}	2 mm
w_{bt}	3 mm
<i>Angoli</i>	
β_1	18°
β_2	25°
β_3	30°
β_4	43°
β_{bt}	12°

I risultati riportano un peggioramento sotto tutti gli aspetti, sia la distorsione che gli altri parametri sono peggiorati molto. Gli aspetti fondamentali di questo peggioramento sono da attribuire all'angolo del taglio superiore troppo basso e allo spazio molto ridotto che è presente tra la terza e la seconda barriera. Il fatto di abbassare molto l'angolo del taglio superiore migliora molto la concatenazione delle linee di flusso attorno alla prima barriera ma contestualmente aumenta lo spazio privo di linee di flusso nella parte di rotore sotto ai poli che concatenano due cave. Questo aspetto, come già esaminato in precedenza, affligge molto la percentuale di ripple e aumenta la distorsione. Per quanto riguarda lo spazio tra la seconda e la terza barriera, il fatto di avere un canale molto ridotto causa una forzatura nelle linee di flusso e ne riduce la quantità concatenata. L'elevata distorsione della forma d'onda è causata dall'asimmetria delle linee concatenate nel rotore, queste tendono a concatenarsi solo nella parte più interna, lasciando libero il resto. La maggiore densità di linee di flusso che mediamente viene registrata nella parte interna del rotore può risultare benevola nel caso in cui anche il resto del rotore, in particolare la parte superiore, presenti una buona densità media.

Tab.1.27

% Ripple	Parametro coppia
121.869984	4.491622

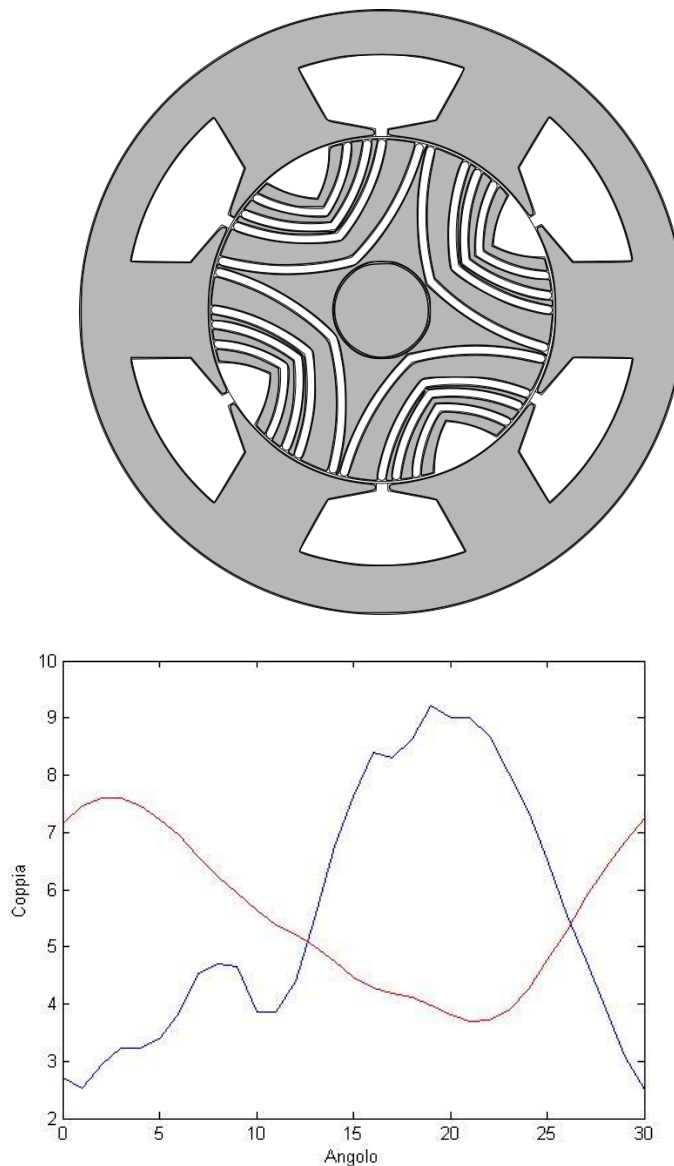


Fig.6.1 Motore analizzato e relativo andamento della coppia

Prova 6.2

Per questa prova si utilizzano le barriere a forma di ellisse e viene utilizzata una configurazione particolare del taglio superiore. L'angolo di quest'ultimo viene ridotto molto per cercare di concatenare meglio le linee di flusso più vicine alla cava e aumentare la densità di flusso presente attorno alla prima barriera. Assieme al cambiamento così repentino del taglio superiore, viene creata una divisione più marcata tra le due barriere superiori e quelle inferiori. Questo viene fatto avvicinando gli angoli delle rispettive barriere e ridisegnando gli spazi di conseguenza. Questa configurazione delle barriere è in leggera discontinuità con le configurazioni precedenti, soprattutto per la miglior spaziatura tra la seconda e la terza barriera. Visto il basso valore dell'angolo del taglio superiore la forma d'onda della coppia dovrebbe presentare molte oscillazioni, tuttavia la configurazione delle prime due barriere dovrebbe migliorare la concatenazione delle linee di flusso in questa zona e ridurre le distorsioni causate da armoniche di ordine elevato. La percentuale di ripple potrebbe risentire della separazione creata tra le due coppie di barriere, quindi ci si aspetta un aumento dell'entità delle oscillazioni. Di seguito vengono riportati i dati e il modello utilizzati per la prova.

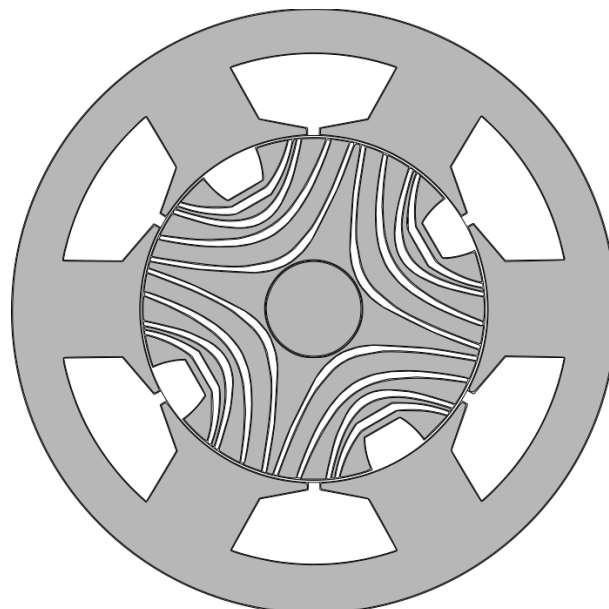
Tab.1.28

<i>Spessori</i>	
$t_1 = t_2 = t_3 = t_4$	2 mm
<i>Larghezza barre</i>	
$l_1 = l_2 = l_3 = l_4 = l_{bt}$	5 mm
<i>Spazi tra le barriere</i>	
w_{sb}	1 mm
w_{43}	6 mm
w_{32}	2 mm
w_{21}	3 mm
w_{bt}	2 mm
<i>Angoli</i>	
β_1	22°
β_2	25°
β_3	35°
β_4	43°
β_{bt}	10°

I risultati ottenuti rispettano le ipotesi fatte riguardo la forma d'onda ma disattendono quelle fatte per la percentuale di ripple. La forma d'onda presenta molte oscillazioni, ma nel complesso risente meno delle distorsioni causate da armoniche di ordine alto. Un peggioramento sostanziale si ha nella percentuale di ripple, questa è aumentata in modo marcato e allontana molto la coppia dal valore medio. La concatenazione delle linee di flusso rispecchia i risultati ottenuti e risente molto dell'asimmetria generale definita dal distacco tra le coppie di barriere dei vari gruppi. La forma del taglio superiore invece ha permesso di concatenare al meglio le linee di flusso più vicine alle cave ma ha contestualmente contribuito a peggiorare la densità generale presente nel rotore. Nelle ottimizzazioni successive verrà analizzato meglio questo aspetto.

Tab.1.29

% Ripple	Parametro coppia
117.821266	4.764550



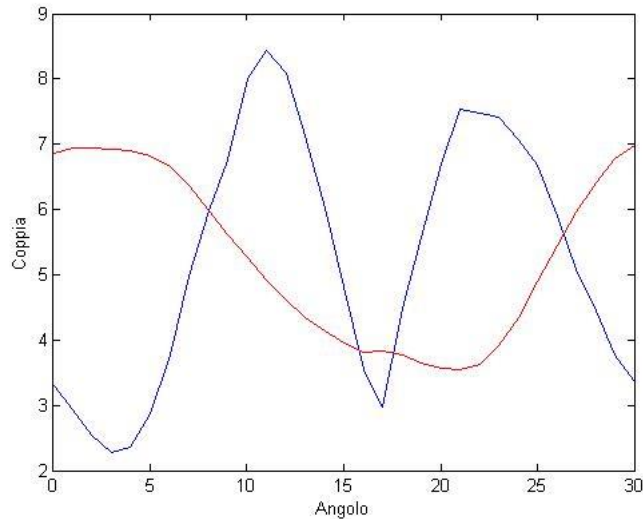


Fig.6.2 Motore analizzato e relativo andamento della coppia

Prova 6.3

Per questa prova si utilizza un motore simile al prototipo di base ma con delle variazioni in tutti i parametri considerati fin ora. La configurazione degli angoli rende più omogenea la disposizione delle barriere, generando una disposizione più simmetrica e in linea con l'andamento delle linee di flusso. Gli spazi tra le barriere privilegiano quello tra la quarta e la terza barriera e fanno in modo che tra le altre barriere lo spazio sia uguale. Questa designazione degli spazi, assieme alla configurazione molto compatta che caratterizza il rotore di questa prova, consente di ridurre le zone che non concatenano linee di flusso. Gli spessori delle prime tre barriere sono pari a 2 mm mentre quello della quarta barriera viene aumentato leggermente per cercare di aumentare l'influenza di quest'ultima sul direzionamento delle linee che solitamente tendono a concatenarsi nella zona vicino all'albero interno. Le caratteristiche utilizzate dovrebbero portare ad un maggior afflusso nella zona superiore del rotore e ad una contestuale riduzione delle linee presenti nella parte interna. Questo cambiamento della distribuzione delle linee dovrebbe giovare molto al ripple ma potrebbe ripercuotersi sulla forma d'onda causando delle distorsioni. Lo scopo principale di questa prova è quello di ridurre la percentuale di ripple cercando di utilizzare una configurazione più compatta. I risultati ottenuti fin ora hanno sempre riportato che questo tipo di configurazione produce una forma d'onda più pulita ma alterata da una percentuale eccessiva di ripple. Qui di seguito vengono riportati i dati e il modello utilizzati nella prova.

Tab.1.30

<i>Spessori</i>	
$t_1 = t_2 = t_3$	2 mm
t_4	3 mm
<i>Larghezza barre</i>	
$l_1 = l_2 = l_3 = l_4 = l_{bt}$	5 mm
<i>Spazi tra le barriere</i>	
w_{sb}	1 mm
w_{43}	6 mm
w_{32}	1.5 mm
w_{21}	2 mm
w_{bt}	2 mm
<i>Angoli</i>	

β_1	32°
β_2	35°
β_3	38°
β_4	43°
β_{bt}	25°

I risultati ricalcano le ipotesi fatte e uniscono le caratteristiche viste fin ora. La percentuale di ripple si è ridotta rispetto alle prove precedenti e presenta una forma d'onda della coppia simile a quella ottenuta per il prototipo ma coplita da una maggiore distorsione causata da armoniche di ordine elevato. Per quanto riguarda la coppia media, anche questa è migliorata molto e risente della riduzione dell'entità delle oscillazioni della coppia. In generale i risultati ottenuti possono ritenersi soddisfacenti, infatti costituiscono la base per un'ottimizzazione.

Tab.1.31

% Ripple	Parametro coppia
69.392820	4.096444

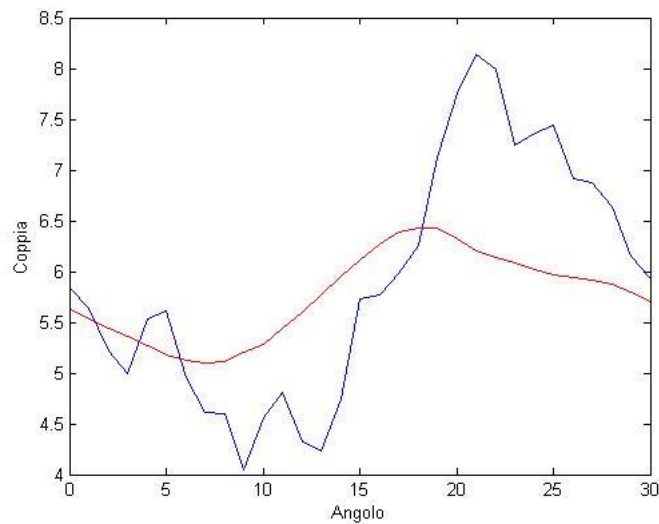
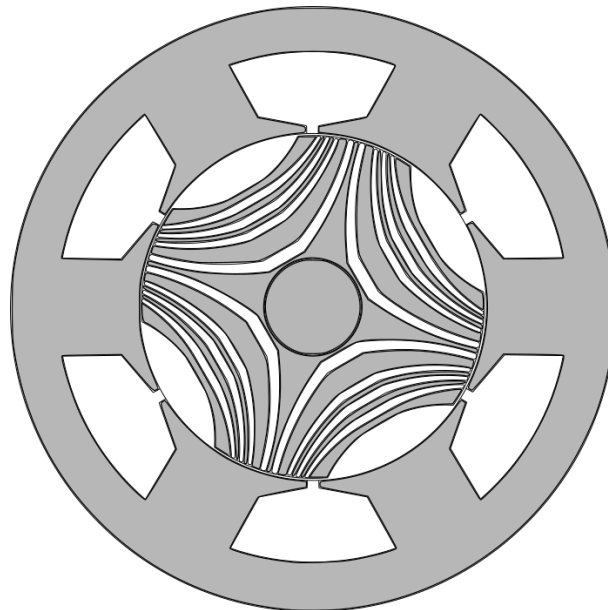


Fig.6.3 Motore analizzato e relativo andamento della coppia

Settimo ciclo di prove

In questo ultimo ciclo di prove il parametro che verrà modificato maggiormente è la forma delle punte delle barriere. In tutte le prove svolte fin ora questo aspetto non è mai stato cambiato in modo marcato, per via della sua influenza ridotta sui parametri in uscita. Poichè i risultati ottenuti fin ora necessitano di ottimizzazioni che riguardano anche piccole variazioni, è necessario verificare l'andamento che ha questo parametro per poter avere un maggior capo d'azione sui risultati delle ottimizzazioni che seguiranno queste prove parametriche.

Prova 7.1

In questa prova viene cambiata la forma delle barriere per poterla meglio integrare con la forma delle punte. In particolare viene utilizzata una forma di parabola per disegnare la parte interna delle barriere, mentre per le punte vengono definiti più punti in modo da controllarne meglio la forma. L'inserimento di quattro punti per disegnare le punte consente di riprodurre meglio la forma a macaone utilizzata in precedenza e permette di definire meglio la parte che s'interfaccia con il diametro esterno del rotore. La forma delle punte influisce sulla forma d'onda e modifica il concatenamento delle linee di flusso durante la rotazione. L'aspetto fondamentale sta nel creare una forma congeniale all'andamento delle linee durante la rotazione, questo viene implementato agendo sia sullo spazio tra la parte più alta della punta che sulla forma che questa assume. I parametri utilizzati per questa prova creano un'andamento unico tra la barriera interna e la punta, allargando leggermente la parte più estrema, appiattendolo la parte superiore e stondando quella inferiore. Lo stesso andamento appena descritto appartiene anche al resto della barriera. La quarta barriera presenta un angolo di curvatura molto marcato e definito dall'interpolazione dei vari punti, questo va a ridurre il canale presente tra i vari gruppi di barriere, ma aumenta quello presente tra la quarta e la terza barriera. Di seguito vengono riportati i dati e i modelli utilizzati per la prova.

Tab.1.32

<i>Spessori</i>	
$t_1 = t_2 = t_4$	2 mm
t_3	3 mm
<i>Parametri punte</i>	
l_{p1}	0.5
l_{p2}	0.5
l_{p3}	0.5
l_{p4}	0.7
<i>Spazi tra le barriere</i>	
w_{sb}	2 mm
w_{43}	5 mm
w_{32}	2 mm
w_{21}	2 mm
w_{bt}	0.5 mm
<i>Angoli</i>	
β_1	18°
β_2	24°
β_3	30°
β_4	41°
β_{bt}	16°

I risultati di questa prova evidenziano una riduzione della coppia media e un aumento del ripple accompagnato da un aumento delle oscillazioni. Il livello di distorsione interessa soprattutto le armoniche di ordine basso, ci sono delle armoniche di ordine più alto ma distorcono poco la forma d'onda. In generale i risultati possono ritenersi in linea con la configurazione di angoli utilizzata salvo per la percentuale di ripple. Questa è troppo elevata rispetto alle configurazioni simili usate in precedenza, questo è dovuto alla forma troppo curva della quarta barriera. Se da un lato aumenta lo spazio dove vengono concatenate la maggior parte delle linee e se ne migliora la forma, dall'altro la curvatura eccessiva della parte inferiore della barriera è un ostacolo eccessivo per la buona concatenazione delle linee di flusso nella parte più interna del rotore. La configurazione delle punte consente una miglior concatenazione delle linee di flusso durante la rotazione e riduce la distorsione delle armoniche di ordine più elevato. Le caratteristiche utilizzate in questa prova e i risultati che ne sono derivati, sono molto utili come riferimento per le prove successive, e possono essere utilizzati soprattutto come integrazione in altre configurazioni.

Tab.1.33

% Ripple	Parametro coppia
74.362008	4.517862

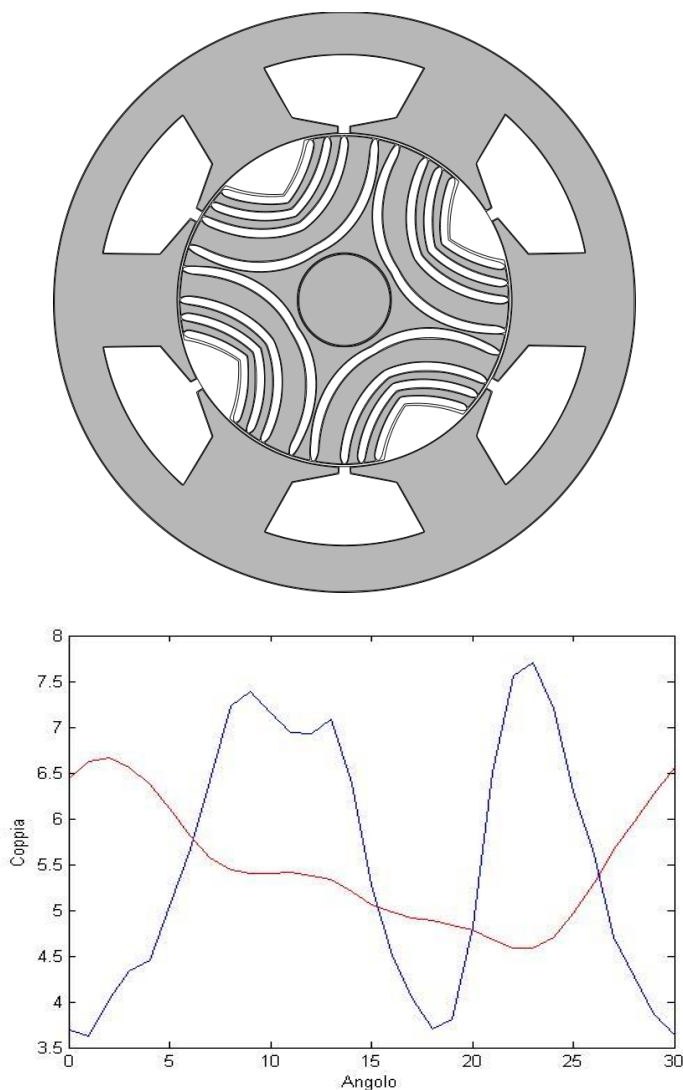


Fig.7.1 Motore analizzato e relativo andamento della coppia

Prove 7.2

Per questa prova si rielabora la già collaudata configurazione a barriere curve, modificando leggermente la forma della prima barriera e diminuendo la distanza tra questa e il taglio superiore. Questi due accorgimenti servono per testare l'entità del miglioramento portato da una geometria del rotore più compatta. Il fatto di avvicinare molto la prima barriera al taglio superiore serve per ridurre le zone che, durante la rotazione, rimangono prive di linee di flusso. Questa conformazione dovrebbe ridurre in modo sostanziale l'entità delle distorsioni nella forma d'onda, riducendo le armoniche sia a di ordine basso che quelle di ordine più alto. Con l'accorgimento preso in questa prova non cambia la forma delle punte ma ne viene omogenizzata la distanza rispetto alla parte più esterna del rotore. La forma delle punte, per questa configurazione, verrà cambiata in una delle prove successive. Di seguito vengono riportati i dati e il modello utilizzati per la prova.

Tab.1.34

<i>Spessori</i>	
$t_1 = t_2 = t_3 = t_4$	2 mm
<i>Spazi tra le barriere</i>	
w_{sb}	1 mm
w_{43}	6 mm
w_{32}	1 mm
w_{21}	2 mm
w_{bt}	0.5 mm
<i>Angoli</i>	
β_1	18°
β_2	25°
β_3	30°
β_4	43°
β_{bt}	16°

I risultati sono molto buoni, soprattutto per quanto riguarda la forma d'onda. La distorsione che era presente nei risultati precedenti qui è molto ridotta, soprattutto per quanto riguarda le armoniche di ordine più basso, infatti ci sono meno oscillazioni. Per quanto riguarda le armoniche di ordine più alto, queste non sono sparite del tutto e risentono ancora di una configurazione non del tutto ottimizzata. La coppia media, a causa del poco spazio tra la prima barriera e il taglio superiore, si è ridotta di circa 1 Nm. La percentuale di ripple non è troppo elevata ma può essere migliorata ottimizzando gli spazi tra le barriere e la configurazione degli angoli. Nel complesso il risultato è molto buono e costituisce una base per le ottimizzazioni.

Tab.1.35

% Ripple	Parametro coppia
61.247078	4.458225

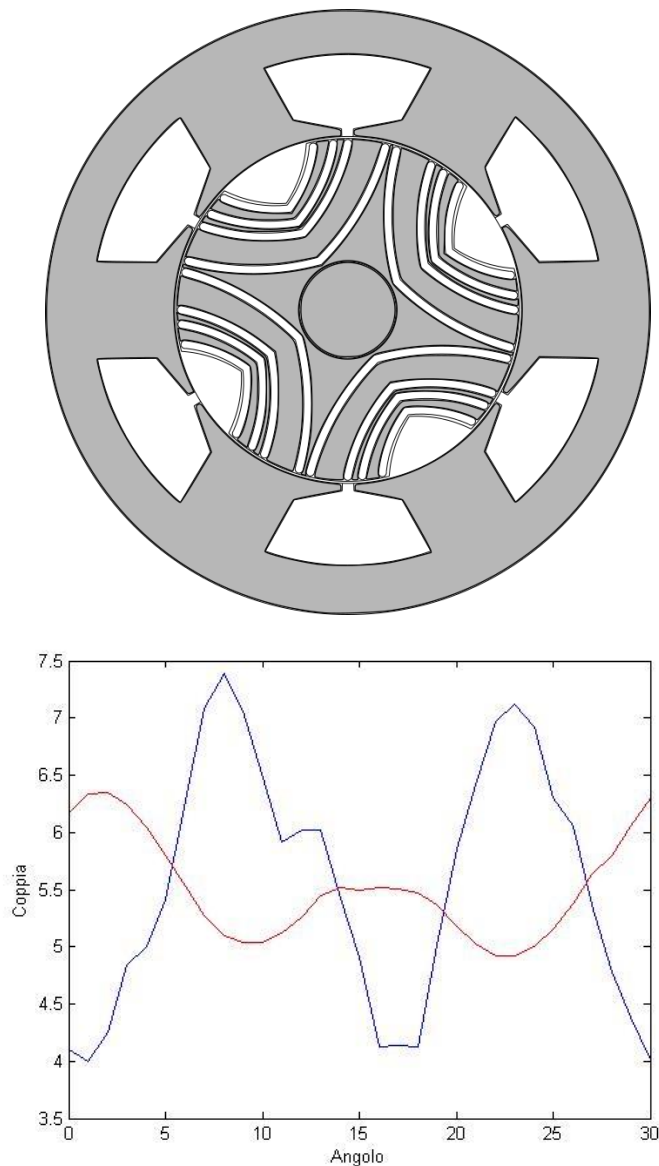


Fig.7.2 Motore analizzato e relativo andamento della coppia

Prova 7.3

Per questa prova viene ripresa la geometria del prototipo e viene variata la configurazione delle punte aumentandone leggermente la curvatura. Gli spazi tra le barriere e la configurazione degli angoli viene mantenuta simile a quella utilizzata nelle prove precedenti. In questo caso vengono abbassati leggermente gli angoli delle prime due barriere e viene aumentata la profondità del taglio superiore. Questo cambiamento consente di migliorare i canali formati dalle barriere e di rendere la geometria del rotore più compatta. Per quanto riguarda agli spazi tra le barriere e gli spessori di queste, non vengono fatte variazioni significative rispetto alle configurazioni utilizzate in precedenza. La larghezza delle barre orizzontali viene ridotta a 2 mm per tutte le barriere in modo da ridurre la curvatura delle linee di flusso. La geometria utilizzata dovrebbe portare ad una riduzione della distorsione nella forma d'onda della coppia. La percentuale di ripple e il valore della coppia media non dovrebbero subire variazioni sostanziali, infatti la configurazione utilizzata si avvicina molto a quella del prototipo di base salvo per la forma delle punte. Di seguito vengono riportati i dati e il modello utilizzati per la prova.

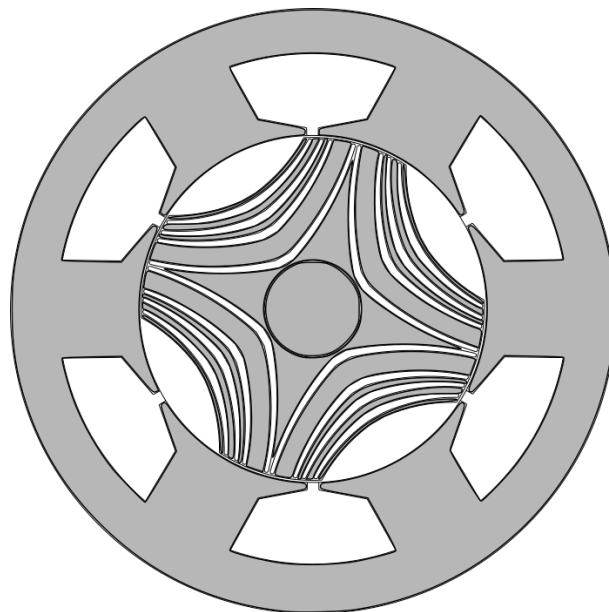
Tab.1.36

<i>Spessori</i>	
$t_1 = t_2 = t_3 = t_4$	2 mm
<i>Larghezza barre</i>	
$l_1 = l_2 = l_3 = l_4 = l_{bt}$	2 mm
<i>Spazi tra le barriere</i>	
w_{sb}	1 mm
w_{43}	6 mm
w_{32}	2 mm
w_{21}	2 mm
w_{bt}	1 mm
<i>Angoli</i>	
β_1	29°
β_2	33°
β_3	36°
β_4	44°
β_{bt}	27°

I risultati riportano una riduzione della distorsione che interessava l'andamento tra i 5° e i 25°. Questo miglioramento è dovuto alla nuova geometria utilizzata per le punte, in particolare la forma più tondeggiante ostacola meno le linee di flusso durante la rotazione. I miglioramenti registrati sono in parte da attribuire anche al leggero spostamento delle prime due barriere, infatti l'andamento delle linee di flusso durante la prova ha mostrato un miglior concatenamento durante tutta la prova. Per quanto riguarda la percentuale di ripple e il valore della coppia media non ci sono variazioni rispetto alle prove precedenti. La geometria delle punte utilizzata in questa prova verrà ripresa anche nel disegno dei motori che verranno analizzati nel programma di ottimizzazione.

Tab.1.37

% Ripple	Parametro coppia
114.851236	4.193342



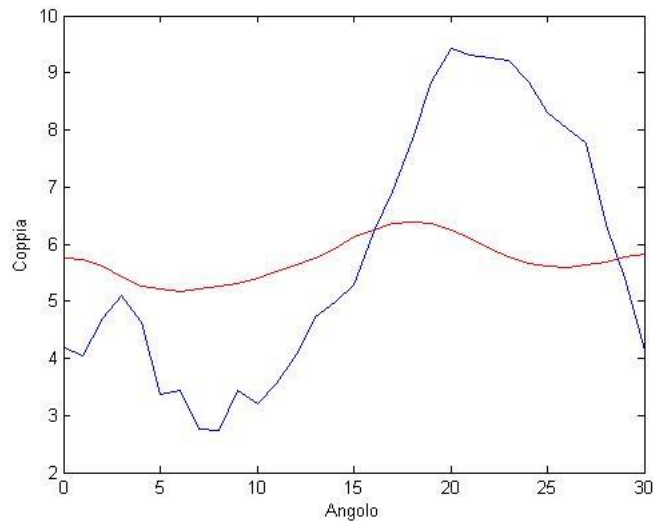


Fig.7.3 Motore analizzato e relativo andamento della coppia

Prova 7.4

Per questa prova viene usata la forma ad ellisse per disegnare le varie barriere. Le punte in questo caso sono integrate meglio con il resto della barriera e vengono disegnate con un arco di grado inferiore. Gli altri parametri vengono modificati in modo da alzare leggermente la posizione delle barriere, questo genera una geometria che rende più omogenea la distribuzione delle linee di flusso. La larghezza e lo spessore delle barre viene tenuta uguale a quella della prova 7.3. La configurazione generale si avvicina a quella del prototipo ma differisce per la forma delle barriere e per la loro collocazione più alta. Di seguito vengono riportati i dati e i modelli utilizzati per la prova.

Tab.1.38

<i>Spessori</i>	
$t_1 = t_2 = t_3 = t_4$	2 mm
<i>Larghezza barre</i>	
$l_1 = l_2 = l_3 = l_4 = l_{bt}$	2 mm
<i>Spazi tra le barriere</i>	
w_{sb}	1 mm
w_{43}	6 mm
w_{32}	2 mm
w_{21}	2 mm
w_{bt}	1 mm
<i>Angoli</i>	
β_1	24°
β_2	38°
β_3	36°
β_4	44°
β_{bt}	22°

I risultati sono buoni per quanto riguarda la percentuale di ripple e la coppia media, ma lasciano un pò a desiderare per quanto riguarda la distorsione della forma d'onda. La percentuale di ripple rispetto agli altri modelli analizzati in precedenza si è ridotta molto e non ha penalizzato il valore della coppia

media, che rimane molto vicino agli standard di tutte le prove migliori. La forma d'onda soprattutto tra i 5° e i 20° risulta più distorta rispetto ai casi precedenti. In particolare si può notare come la forma d'onda nel complesso tenda ad aumentare la frequenza delle oscillazioni ed ad allontanarsi dalla forma sinusoidale che caratterizzava i motori con questa geometria. Questo mutamento della forma d'onda è dovuto al cambiamento di collocazione delle barriere. Nel complesso i risultati possono comunque essere ritenuti buoni, vista la diminuzione della percentuale di ripple e il discreto valore di coppia media.

Tab.1.39

% Ripple	Parametro coppia
73.255621	4.291204

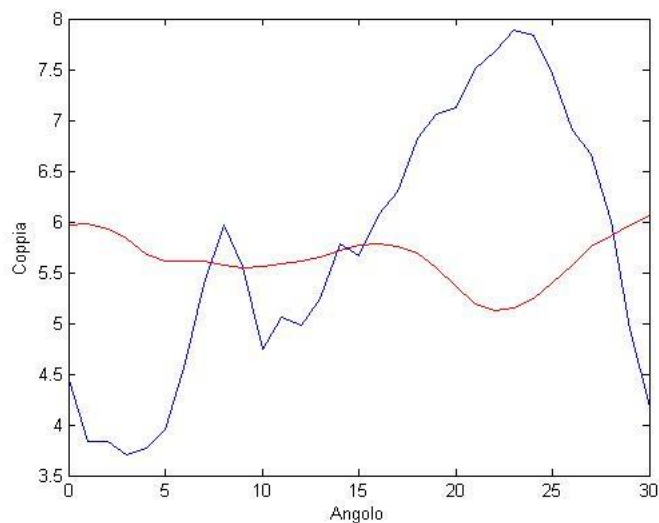
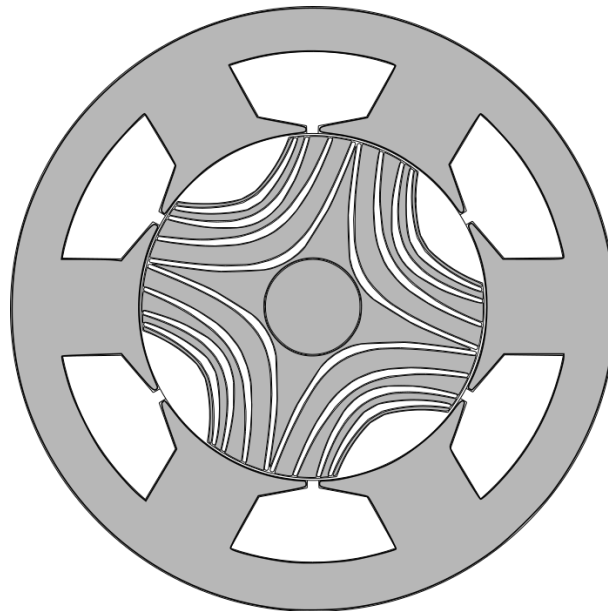


Fig.7.4 Motore analizzato e relativo andamento della coppia

Prova 7.5

In questa prova viene modificata la forma delle punte, rendendola più simile a quella del macaone. Le punte tendono ad essere più strette e a curvare di meno nella parte alta, mentre nella parte bassa tendono ad essere più tonde. Il beneficio ricavato da questa geometria sta nel poter definire meglio la distanza che c'è tra la punta della barriera e il traferro, questo aspetto consente di migliorare la distorsione causata dalle armoniche di ordine più elevato. Il resto della geometria del rotore è uguale a quello delle barre curve e definisce una configurazione alta delle barriere. Per questa prova viene ridotto lo spazio tra il taglio superiore e la prima barriera, quindi la distorsione armonica dovrebbe ridursi ulteriormente. Gli spazi tra le barriere, gli spessori e gli angoli delle barriere sono simili a quelli già definiti per le prove precedenti. Di seguito vengono riportati i dati e il modello utilizzati per la prova.

Tab.1.40

<i>Spessori</i>	
$t_1 = t_2 = t_3 = t_4$	2 mm
<i>Parametri punte</i>	
l_{p1}	0.5
l_{p2}	0.5
l_{p3}	0.5
l_{p4}	0.7
<i>Spazi tra le barriere</i>	
w_{sb}	1 mm
w_{43}	6 mm
w_{32}	1 mm
w_{21}	2 mm
w_{bt}	0.5 mm
<i>Angoli</i>	
β_1	18°
β_2	25°
β_3	30°
β_4	43°
β_{bt}	16°

I risultati rispettano le ipotesi fatte riguardo la forma d'onda, infatti la distorsione delle armoniche più elevate è ridotta rispetto alle prove precedenti e migliora la forma d'onda che caratterizza i rotori con tale geometria. La percentuale di ripple è inferiore ai risultati migliori che sono stati ottenuti in altre prove, ma viene compensata dall'ipotesi ottenute per la distorsione della forma d'onda. In particolare la coppia tende ad avere più picchi in aumento e meno picchi in diminuzione, quest'ultimi però sono leggermente più arcuati dei casi precedenti e incidono negativamente sulla percentuale di ripple.

Tab.1.41

% Ripple	Parametro coppia
64.014442	4.468050

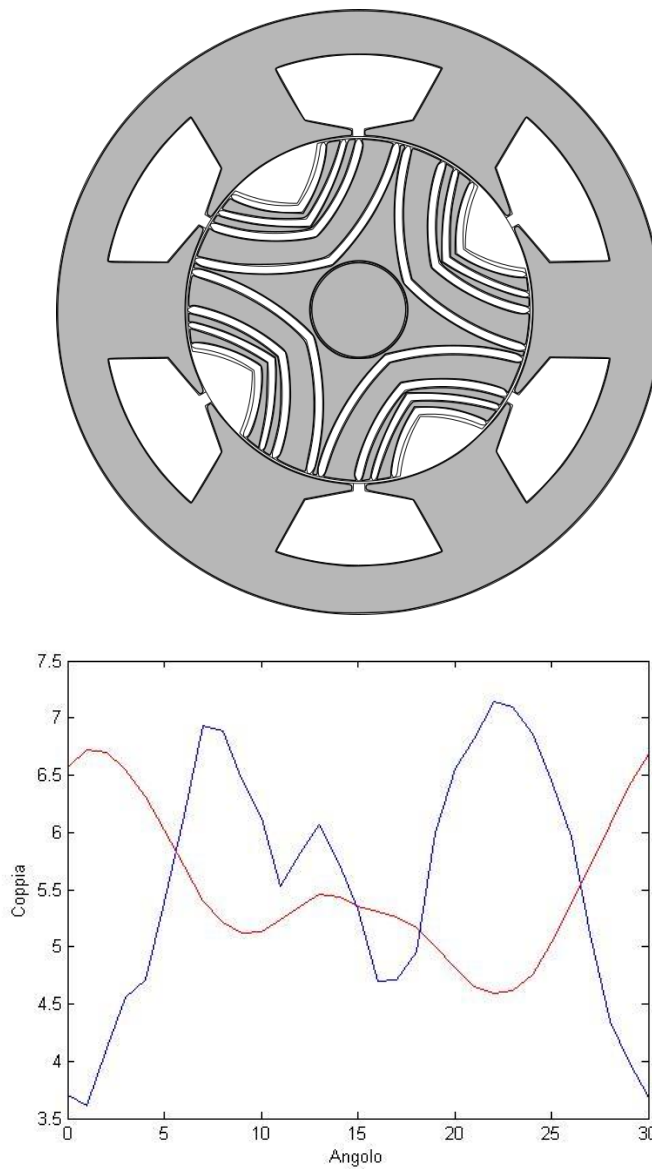


Fig.7.5 Motore analizzato e relativo andamento della coppia

Prova 7.6

In questa prova si utilizza la stessa geometria utilizzata nella prova 7.5 ma con delle punte che sono direttamente collegate alla parte più esterna del rotore tramite dei ponticelli. Questa configurazione così particolare viene analizzata per verificare l'influenza che ha sulle prestazioni una forzatura delle linee di flusso. In generale, per ottenere un beneficio per le prestazioni, la distanza tra le punte e la parte esterna del rotore dev'essere ridotta il più possibile. In questo caso queste due parti vengono collegate direttamente, creando un canale diretto tra statore e rotore. I risultati ipotizzati per questa configurazione dovrebbero evidenziare un peggioramento delle prestazioni e della forma d'onda dato da una forzatura delle linee di flusso.

Tab.1.42

% Ripple	Parametro coppia
95.224895	4.337159

I risultati sono in linea con le ipotesi fatte e riportano i peggioramenti che erano attesi. I risultati di questa prova permettono di capire l'influenza delle punte delle barriere ed evidenziano come queste debbano indirizzare le linee di flusso accompagnandone il più possibile l'andamento naturale e quindi senza creare ostacoli o forzature.

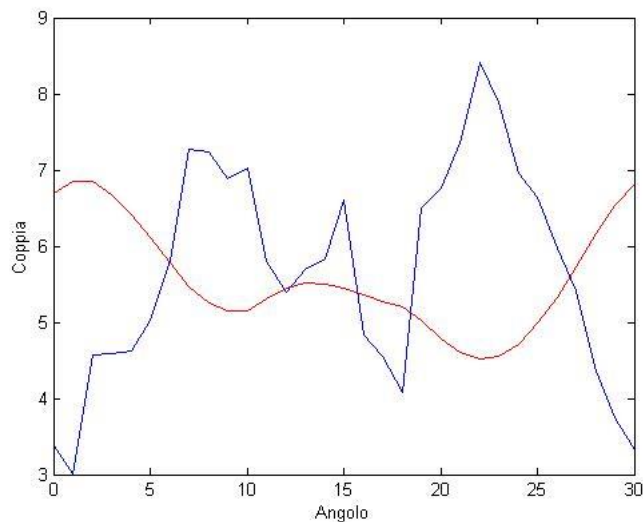
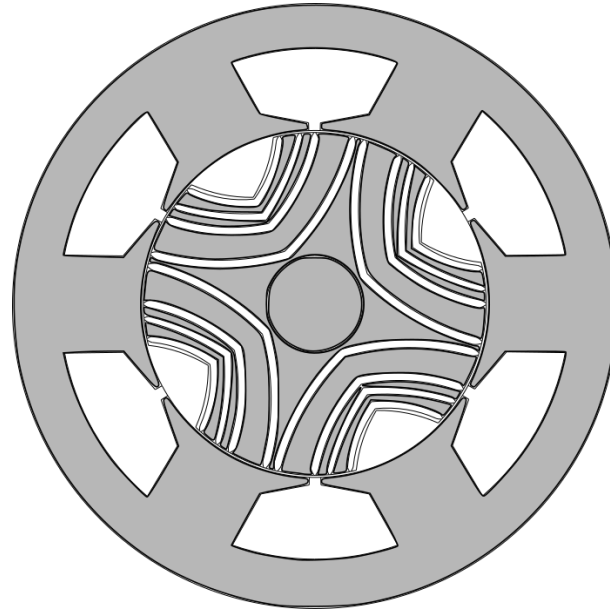


Fig.7.6 Motore analizzato e relativo andamento della coppia

Conclusioni

Tutte le prove svolte sono risultati fondamentali per definire un collegamento tra la geometria del rotore e le prestazioni del motore. Le prove hanno evidenziato che un innalzamento delle barriere porta ad avere una riduzione di ripple, un aumento delle oscillazioni e una riduzione del valore di coppia media. Viceversa, una configurazione più bassa e protesa verso l'albero interno evidenzia un

aumento di ripple, un aumento della coppia media e una riduzione del numero di oscillazioni. Unendo le varie caratteristiche è stato possibile ottenere andamenti intermedi che saranno di spunto per la definizione dei range per le ottimizzazioni. Nei vari cicli di prove sono stati definiti i diversi livelli d'influenza che caratterizzano ogni parametro ma soprattutto è emersa l'esigenza di dover ottimizzare ogni aspetto per poter ottenere le prestazioni migliori. I risultati delle ottimizzazioni che seguiranno queste prove, al fine di ottenere una configurazione ottimale, dovranno essere combinati tenendo conto degli andamenti di tutte le prove svolte.

1.2 Prove sullo statore

Verranno ora svolte delle prove sulla geometria dello statore, in particolare si cercherà di analizzare gli andamenti medi dell'induzione in tre zone specifiche: Lo spingolo basso di cava, il dente e la corona. Agire sulla geometria dello statore va ad incidere in modo abbastanza significativo sulle prestazioni, in particolare sulla forma d'onda della coppia e sul valore della coppia media. Per ogni prova verrà modificata la geometria della cava con dei parametri che spostano le coordinate dei punti di base. Ogni modifica varia l'area dello slot quindi nel programma verrà ricalcolata l'area di cava. Queste variazioni devono essere considerate perché vanno ad influire molto sul valore della coppia media. In queste prove verranno analizzati solamente i valori d'induzione, quindi non verranno svolte delle prove per la coppia.

Prova sullo statore di base

Al fine di avere dei valori di riferimento viene svolta una prova sullo statore di base.

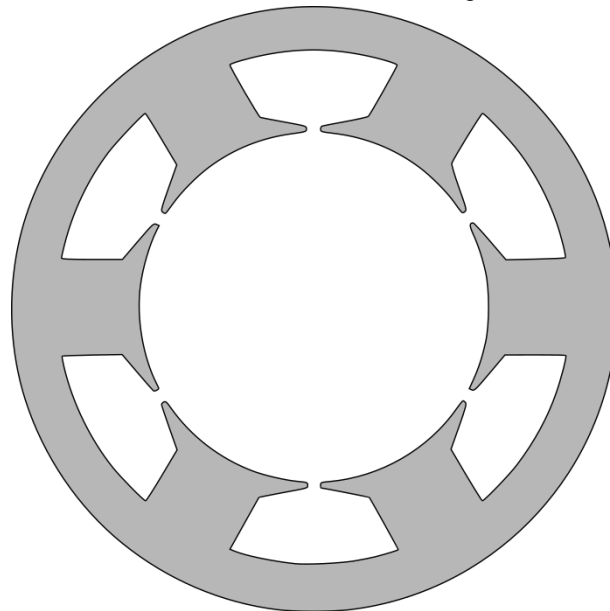


Fig. 1.2.1 Statore analizzato nella prova

In tabella vengono riportati i valori d'induzione:

Tab.1.43

<i>Zona dello statore</i>	<i>Valore d'induzione</i>
<i>Corona</i>	1.203011 T
<i>Dente</i>	1.202731 T
<i>Spigolo basso</i>	1.757010 T

I valori d'induzione sono abbastanza buoni, ma sbilanciati verso lo spigolo basso, dove si registra una leggera saturazione.

Prova 1

Per questa prima prova si allarga lo spigolo alto della cava e lo si abbassa leggermente, lo spigolo basso, l'apertura e l'altezza della cava rimangono praticamente invariate. Questa configurazione dovrebbe migliorare l'induzione media presente sul dente e ridurre il carico magnetico presente nella corona di statore. Lo spigolo basso potrebbe risentire di una maggior densità di flusso derivante dal maggior carico direzionato sul dente. Questa configurazione non varia in modo significativo l'area di cava. Di seguito vengono riportati i dati usati nella prova.

Tab.1.44

<i>Geometria cava</i>	
<i>Parameto</i>	<i>Valore</i>
X_{wedav}	4
Y_{wedav}	2
X_{wedbv}	0
Y_{wedbv}	1
Y_{wsav1}	1
X_{wsav}	2
Y_{pv}	0
S_{slot}	
560.255 mm ²	

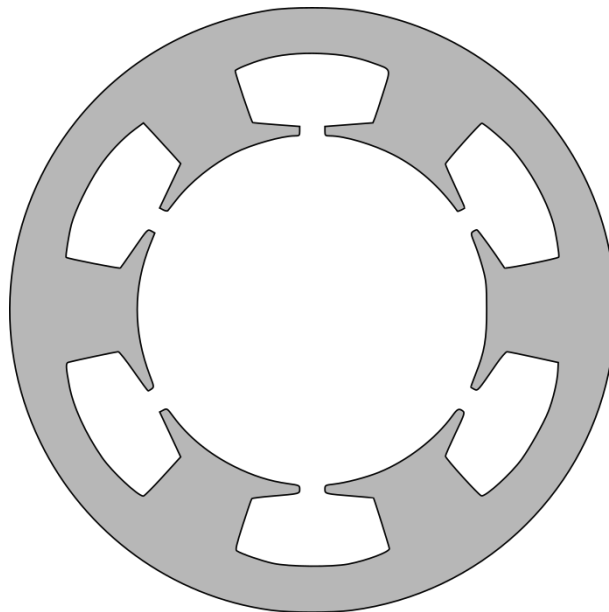


Fig.1.2.2 Statore analizzato nella prova

Di seguito vengono riportati i valori d'induzione:

Tab.1.45

<i>Zona dello statore</i>	<i>Valore d'induzione</i>
<i>Corona</i>	1.133309 T
<i>Dente</i>	1.160745 T
<i>Spigolo basso</i>	1.458983 T

In generale si registra un abbassamento dei valori d'induzione in tutte le zone esaminate. Com'era stato ipotizzato, il fatto di aver allagato e abbassato lo spigolo alto ha portato ad avere più induzione nella zona dello spigolo basso. I risultati non sono molto buoni, infatti le induzioni sono ancora molto sbilanciate verso lo spigolo basso della cava.

Prova 2

In questa prova lo spigolo alto viene mantenuto come nella prova precedente, in questo caso però viene stretto lo spigolo basso e viene alzata l'altezza di cava. Questa configurazione tende a rendere la cava più longilinea, stringendola nella parte bassa. Questa geometria serve per cercare di ridurre l'induzione nello spigolo basso, concentrandola nella parte più alta della cava, in particolare tra il dente e la corona. L'area dello slot si riduce abbastanza, quindi si avrà un aumento del coefficiente di riempimento della cava. Di seguito vengono riportati i dati utilizzati per la prova:

Tab.1.46

<i>Geometria cava</i>	
<i>Parameto</i>	<i>Valore</i>
X_{wedav}	4
Y_{wedav}	2
X_{wedbv}	2
Y_{wedbv}	2
Y_{wsor1}	1
X_{wsor}	1
Y_{pv}	1
S_{slot}	
532.425 mm ²	

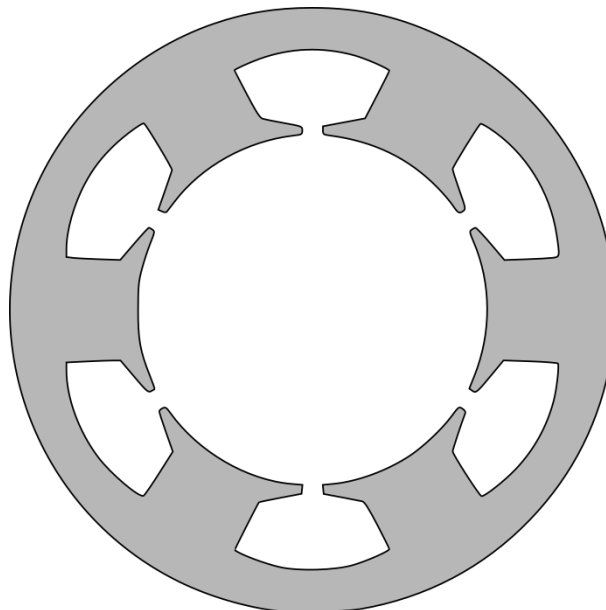


Fig.1.2.3 Statore analizzato nella prova

Di seguito vengono riportati i valori d'induzione:

Tab.1.47

Zona dello statore	Valore d'induzione
Corona	1.027068 T
Dente	1.011412 T
Spigolo basso	1.648909 T

In questo caso i risultati registrano un ulteriore abbassamento delle induzione con uno sbilanciamento verso la parte bassa della cava. Rispetto alla prova precedente le induzioni sono meno bilanciate e portano ad una leggera saturazione nella zona dello spigolo basso. La forma utilizzata in questa prova può essere comunque utilizzata come base per le prove successive, infatti lavorando su un aumento dell'altezza della cava è possibile influenzare molto la distribuzione delle induzioni.

Prova 3

In questa prova lo spigolo alto viene allargato e abbassato, lo spigolo basso viene stretto, l'apertura di cava viene leggermente alzata e l'altezza di cava viene mantenuta invariata. Nel complesso la cava tende ad allargarsi nella parte alta e ad essere più bassa. La configurazione utilizzata per questa prova è simile a quella della della prova precedente ma con una geometria più abbassata. In questo caso le induzioni dovrebbero ridistribuirsi verso la parte più alta della cava e ridurre quindi il carico nella parte bassa. L'area dello slot è molto piccola rispetto a quella dello statore di partenza, questo potrebbe incidere molto sulle prestazioni del motore e verrà verificato nella fase di ottimizzazione. I dati utilizzati nella prova sono riportati in tabella.

Tab.1.48

Geometria cava	
Parameto	Valore
X_{wedav}	4
Y_{wedav}	3
X_{wedbv}	2
Y_{wedbv}	2
Y_{wsov1}	1
X_{wsov}	2
Y_{pv}	0
S_{slot}	
505.094 mm ²	

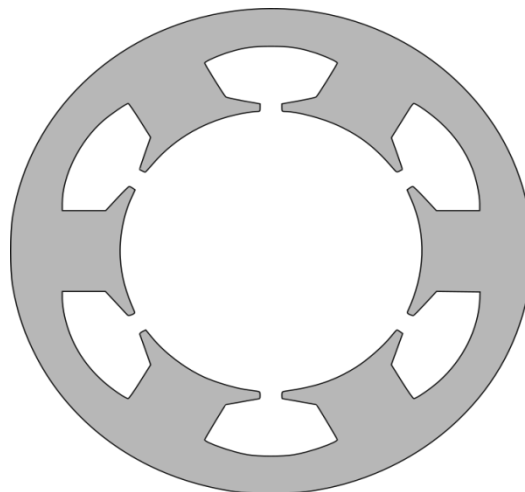


Fig.1.2.4 Statore analizzato nella prova

Di seguito vengono riportati i valori d'induzione:

Tab.1.49

<i>Zona dello statore</i>	<i>Valore d'induzione</i>
<i>Corona</i>	1.052199 T
<i>Dente</i>	1.032015 T
<i>Spigolo basso</i>	1.517962 T

I risultati sono in linea con le ipotesi fatte e mettono in luce una redistribuzione delle induzioni verso la parte più alta della cava. Lo sbilanciamento tra le varie zone è ancora alto ma in questo caso nessuna zona presenta un livello particolare di saturazione.

Prova 4

In questa prova sia lo spigolo alto che quello basso vengono allargati ed abbassati. Il resto dei punti rimane invariato salvo per l'apertura di cava che viene leggermente alzata. In generale la forma della cava tende ad appiattire il dente e a renderlo più dritto. La parte laterale del dente è molto schiacciata ed ha i due spigoli praticamente allineati, questo toglie la leggera inclinazione che prima caratterizzava le cave. Questa configurazione alza la parte bassa del dente, questo consente alle linee di flusso di subire una curvatura minore e di ridurre così la saturazione nella parte bassa della cava. L'allargamento dei due spigoli ha stretto molto il dente, allargando così lo slot che ora ha un'area molto più grande rispetto ai casi precedenti. La redistribuzione geometrica utilizzata nello statore di questa prova dovrebbe ribilanciare le induzioni presenti in ogni zona analizzata. Un'altro aspetto molto importante è l'aumento dell'area di cava, in questo caso lo slot è molto più grande rispetto ai casi precedenti, questo influisce sulla redistribuzione degli spazi e sulla distribuzione delle correnti. Qui di seguito vengono riportati i dati utilizzati per la prova.

Tab.1.50

<i>Geometria cava</i>	
<i>Parametro</i>	<i>Valore</i>
X_{wedav}	5
Y_{wedav}	2
X_{wedbv}	0
Y_{wedbv}	0
Y_{wsav1}	1
X_{wsav}	2
Y_{pv}	1
S_{slot}	
617.917 mm ²	

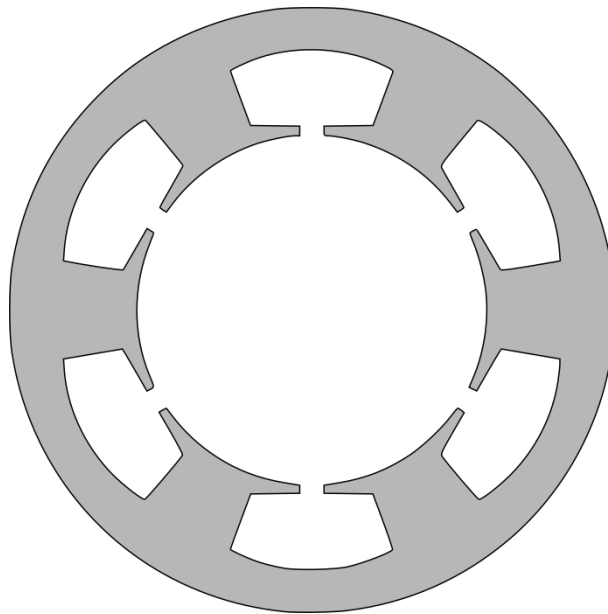


Fig.1.2.5 Statore analizzato nella prova

I risultati sono:

Tab.1.51

<i>Zona dello statore</i>	<i>Valore d'induzione</i>
<i>Corona</i>	1.127996 T
<i>Dente</i>	1.157993 T
<i>Spigolo basso</i>	1.527348 T

I risultati sono in linea con le ipotesi fatte e mostrano un ribilanciamento delle induzioni delle varie zone. In generale le singole induzioni sono aumentate e si sono riequilibrate, riducendo il gap che prima era presente. La geometria dello statore tende a ridistribuire meglio la magnetizzazione ma allo stesso tempo forza le linee di flusso creando delle zone che tendono a saturare. Nei singoli casi specifici non si registrano delle zone con particolare saturazione, ma in generale si può notare un'andamento dei flussi abbastanza forzato. L'aumento dell'area della cava non causa particolari problemi per quanto riguarda la tipologia di alimentazione e i coefficienti di riempimento della cava. Questa geometria, nonostante le forzature delle linee di flusso, è da tenere in considerazione per le ottimizzazioni successive.

Prova 5

In questa prova lo spigolo alto viene allargato molto mentre lo spigolo basso viene stretto. Per quanto riguarda l'apertura di cava questa viene alzata in modo da ingrandire la parte bassa del dente. L'altezza della cava non viene variata ma nel complesso lo slot è più stretto e longilineo, questo comporta un allargamento della parte bassa del dente. La configurazione in generale stringe la parte superiore e si allarga nella parte bassa, diminuendo così le zone dove le linee di flusso si concentravano e tendevano a causare saturazione. Questo particolare non è detto che possa giovare alla ridistribuzione delle induzioni, infatti il restringimento della cava e la configurazione più longilinea non hanno portato a dei buoni risultati. Lo scopo principale di questa prova è vedere quali possono essere i vantaggi di un allargamento della parte bassa del dente. Di seguito vengono riportati i dati usati nella prova.

Tab.1.52

<i>Geometria cava</i>	
<i>Parameto</i>	<i>Valore</i>
X_{wedav}	5
Y_{wedav}	2
X_{wedbv}	2
Y_{wedbv}	2
Y_{wsor1}	1
X_{wsor}	1
Y_{pv}	0
S_{slot}	
531.645 mm ²	

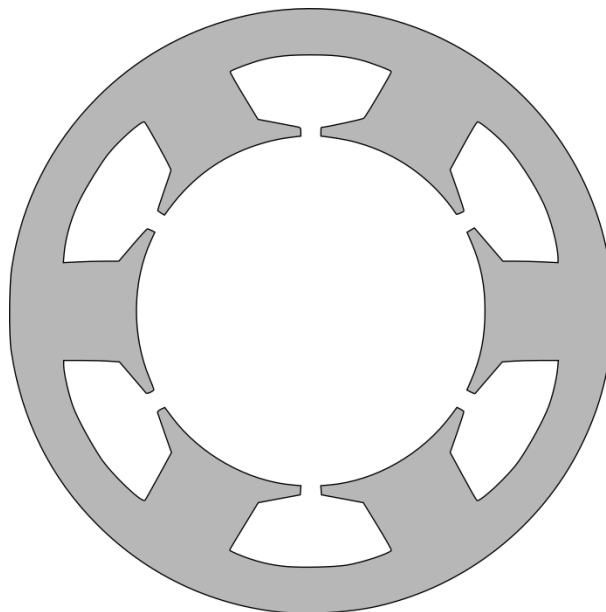


Fig.1.2.6 Statore analizzato nella prova

I risultati sono:

Tab.1.53

<i>Zona dello statore</i>	<i>Valore d'induzione</i>
<i>Corona</i>	1.053268 T
<i>Dente</i>	1.033824 T
<i>Spigolo basso</i>	1.535245 T

Lo statore presenta una maggiore induzione nella zona dello spigolo basso, le altre due zone registrano una diminuzione delle induzione rispetto alle prove precedenti. La configurazione designata in questa prova tende ad aumentare troppo il gap tra le varie zone e a ridurre le induzioni medie nella zona superiore del dente.

Prova 6

In questa prova la geometria della cava vede un allargamento degli spigoli alto e basso e un innalzamento della parte bassa del dente. In generale la cava è stata ristretta cercando di allineare il più possibile lo spigolo alto con quello basso e senza modificare l'altezza di cava. La geometria di questo statore dovrebbe omogenizzare le l'induzione nel dente, riducendo il gap tra la parte centrale e

quella bassa del dente. Per quanto riguarda la corona, questa non dovrebbe subire variazioni particolari, infatti l'altezza di cava non è stata modificata e la parte superiore del dente non presenta dei restringimenti particolari. Di seguito vengono riportati i dati utilizzati nella prova.

Tab.1.54

<i>Geometria cava</i>	
<i>Parametro</i>	<i>Valore</i>
X_{wedav}	5
Y_{wedav}	3
X_{wedbv}	2
Y_{wedbv}	1
Y_{wsov1}	1
X_{wsov}	2
Y_{pv}	0
S_{slot}	
541.115 mm ²	

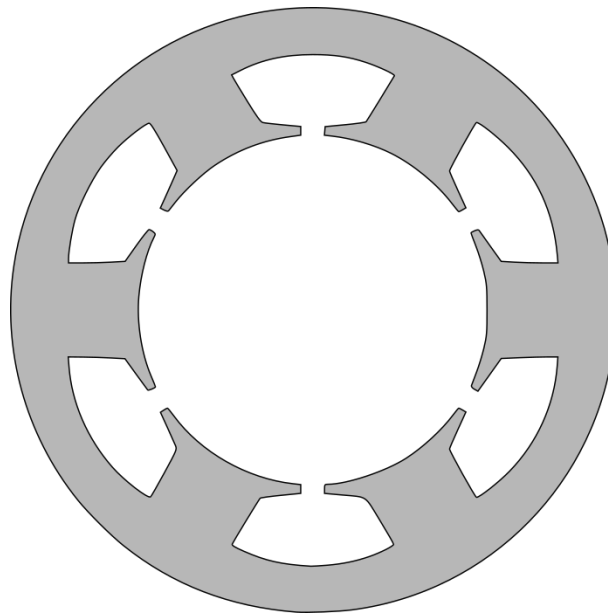


Fig.1.2.7 Statore analizzato nella prova

I risultati sono:

Tab.1.55

<i>Zona dello statore</i>	<i>Valore d'induzione</i>
<i>Corona</i>	1.074327 T
<i>Dente</i>	1.037970 T
<i>Spigolo basso</i>	1.483850 T

I risultati sono in linea con le aspettative e vedono un leggero aumento dell'induzione nella parte superiore del dente ed una diminuzione nella zona dello spigolo basso. La geometria utilizzata nella prova ha omogenizzato abbastanza la magnetizzazione attorno alla cava grazie ad una localizzazione abbastanza allineata degli spigoli. Nel complesso i risultati di questa prova possono ritenersi soddisfacenti e da tenere da conto per le ottimizzazioni successive.

Prova 7

La geometria utilizzata questa prova cambia la parte bassa della cava, in particolare lo spigolo basso viene allargato e l'apertura di cava viene alzata. Questi cambiamenti portano ad una forma più spigolosa del dente ma tendono ad assecondare di più l'andamento delle linee di flusso. Un'altro cambiamento molto importante riguarda l'innalzamento dell'altezza di cava. Nel complesso la cava risulta leggermente più larga e alta. Questo ha portato ad un notevole aumento dell'area dello slot. Solitamente gli statori con le caratteristiche simili a quello di questa prova hanno portato a buoni risultati. Di seguito vengono riportati i dati usati nella prova.

Tab.1.56

<i>Geometria cava</i>	
<i>Parametro</i>	<i>Valore</i>
X_{wedav}	6
Y_{wedav}	2
X_{wedbv}	0
Y_{wedbv}	0
Y_{wsov1}	1
X_{wsov}	2
Y_{pv}	2
S_{slot}	
661.801 mm ²	

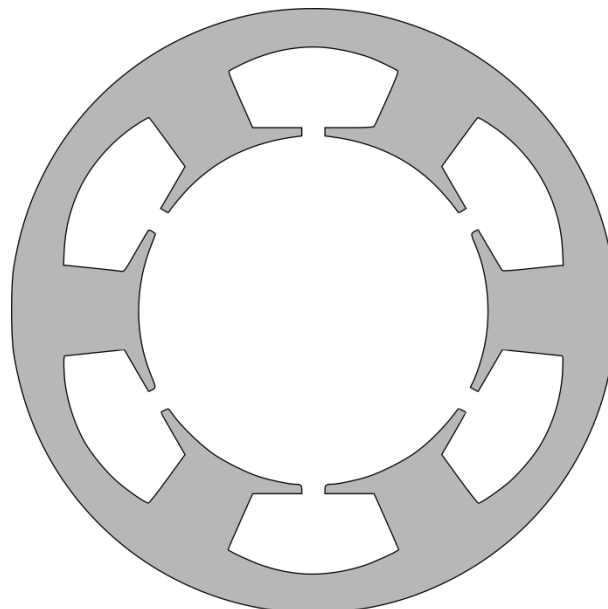


Fig.1.2.8 Statore analizzato nella prova

I risultati sono:

Tab.1.57

<i>Zona dello statore</i>	<i>Valore d'induzione</i>
<i>Corona</i>	1.127716 T
<i>Dente</i>	1.140993 T
<i>Spigolo basso</i>	1.642780 T

I risultati sono molto soddisfacenti e rispettano le ipotesi fatte. In particolare l'aumento dell'area dello slot ha comportato un aumento generale delle induzioni. L'aumento delle induzioni, grazie ad una

buona configurazione geometrica, non ha portato ad una disomogenizzazione delle induzioni che in generale non presentano un gap molto grande, almeno rispetto alle prove precedenti. I risultati di questa prova essendo molto buoni verranno presi in considerazione per le ottimizzazioni successive.

Prova 8

In questa prova lo spigolo basso non viene modificato mentre la parte bassa del dente e lo spigolo alto vengono abbassati. Questo restringe la cava e crea un disallineamento tra lo spigolo alto e quello basso, rendendo leggermente più obliqua la parte laterale del dente. Questa configurazione dovrebbe riequilibrare le induzioni nelle varie zone analizzate omogenizzando la geometria della cava e l'andamento delle linee di flusso. In particolare in questo caso, a differenza della prova precedente, viene modificata la parte più alta della cava rendendola più larga. L'area dello slot è molto più grande rispetto a quella di partenza.

Tab.1.58

<i>Geometria cava</i>	
<i>Parameto</i>	<i>Valore</i>
X_{wedav}	6
Y_{wedav}	3
X_{wedbv}	0
Y_{wedbv}	0
Y_{wsov1}	1
X_{wsov}	1
Y_{pv}	0
S_{slot}	
600.799 mm ²	

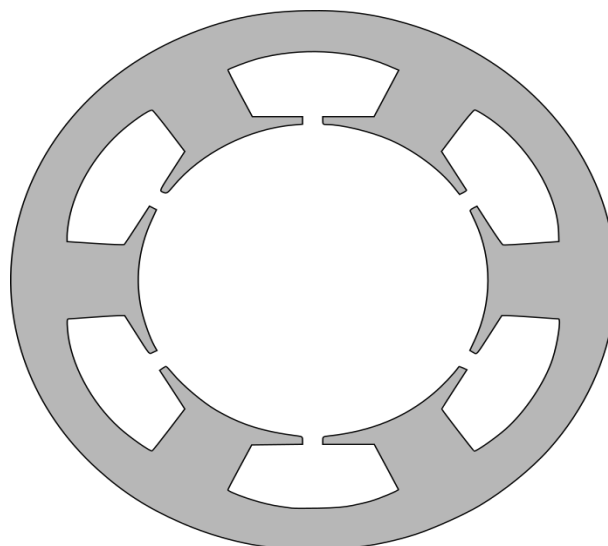


Fig. 1.2.9 Statore analizzato nella prova

I risultati sono:

Tab.1.59

<i>Zona dello statore</i>	<i>Valore d'induzione</i>
<i>Corona</i>	1.178566 T
<i>Dente</i>	1.176820 T
<i>Spigolo basso</i>	1.411597 T

I risultati sono molto buoni, le induzioni sono abbastanza alte ma soprattutto sono molto più omogenee rispetto ai casi precedenti. I risultati di questa prova evidenziano come l'aumento dell'area dello slot e una migliore integrazione tra la geometria e l'andamento delle linee di flusso vada a fornire buoni risultati per quanto riguarda i livelli d'induzione presenti nello statore. Questa geometria sarà molto utile per la definizione dei range dell'ottimizzazione.

Prova 9

In questa prova lo spigolo alto viene allargato ed abbassato molto, fornendo alla cava una forma più schiacciata. Gli altri parametri rimangono invariati salvo per l'apertura di cava che viene leggermente alzata. La geometria di questo statore serve per aumentare l'induzione in corona, infatti una forma più schiacciata e larga dello slot stringe il dente e aumenta così la quantità di linee di flusso che interessano la corona di statore. Questo aumento della magnetizzazione della corona dovrebbe avvenire in modo bilanciato con la magnetizzazione delle altre zone analizzate. Il fatto di avere un dente più stretto nella parte più alta potrebbe causare un aumento dell'induzione nella parte bassa, visto la leggera forzatura che si crea con l'allargamento e l'abbassamento dello spigolo alto dello slot. L'area della cava è più grande rispetto a quella del prototipo di base, questo fin ora ha portato ad un miglioramento delle induzioni.

I dati utilizzati per la prova sono riportati di seguito:

Tab.1.60

<i>Geometria cava</i>	
<i>Parametro</i>	<i>Valore</i>
X_{wedav}	6
Y_{wedav}	4
X_{wedbv}	0
Y_{wedbv}	1
Y_{wsov1}	1
X_{wsov}	1
Y_{pv}	1
S_{slot}	
590.281 mm ²	

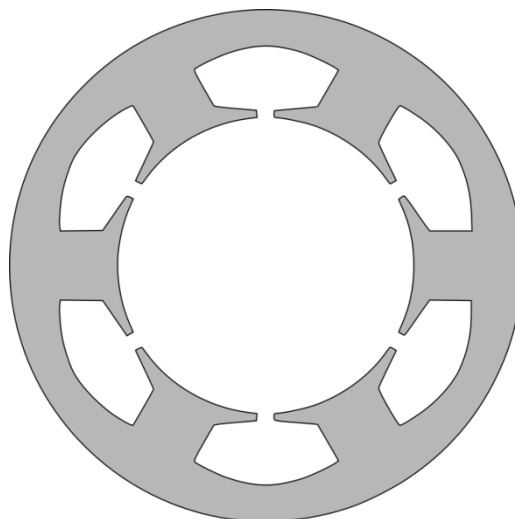


Fig. 1.2.10 Statore analizzato nella prova

I risultati sono:

Tab.1.61

<i>Zona dello statore</i>	<i>Valore d'induzione</i>
<i>Corona</i>	1.186826 T
<i>Dente</i>	1.171716 T
<i>Spigolo basso</i>	1.564927 T

I risultati sono molto buoni e rispecchiano le ipotesi fatte, le induzioni nelle varie zone hanno dei buoni valori e sono abbastanza equilibrate. La geometria utilizzata in questa prova conferma l'importanza del posizionamento dello spigolo alto della cava e il miglioamento delle induzioni portato da un aumento dell'area dello slot di statore. La redistribuzione delle induzioni, per quanto sia equilibrata è ancora sbilanciata verso la parte bassa del dente, questo non causa saturazione e non crea forzature nell'andamento delle linee di flusso.

Prova 10

In questa prova viene rovolta una configurazione particolare. Lo spigolo alto viene definito come nella prova precedente, ma in questo caso viene stretto lo spigolo basso e vengono alzati tutti gli altri parametri. La cava è più alta, larga e presenta un notevole dissallineamento tra lo spigolo alto e quello basso. Questa geometria definisce un dente più stretto nella parte alta e più largo e alto nella parte più bassa. La particolarità di questa configurazione serve per testare quale effetto possa avere un estremizzazione dei parametri correttivi della cava. In particolare in questo caso le tre zone che verranno analizzate vedono una riduzione dei canali dove si distribuiscono le linee di flusso, questo aspetto crea un leggera forzatura negli andamenti della magnetizzazione dello statore. L'area dello slot non ha subito notevoli aumenti, infatti lo spigolo basso è stato stretto molto. Di seguito vengono riportati i dati utilizzati nella prova.

Tab.1.62

<i>Geometria cava</i>	
<i>Parameto</i>	<i>Valore</i>
X_{wedav}	6
Y_{wedav}	4
X_{wedbv}	2
Y_{wedbv}	2
Y_{wsor1}	1
X_{wsor}	2
Y_{pv}	2
S_{slot}	
575.332 mm ²	

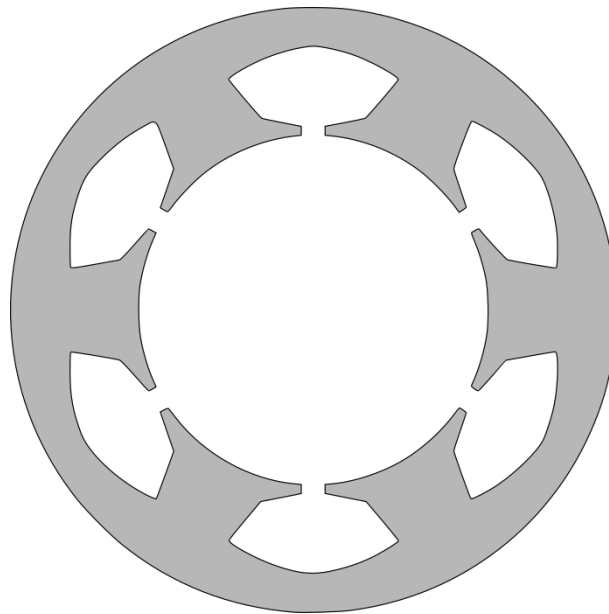


Fig.1.2.11 Statore analizzato nella prova

I risultati sono:

Tab.1.63

<i>Zona dello statore</i>	<i>Valore d'induzione</i>
<i>Corona</i>	1.077973 T
<i>Dente</i>	1.017570 T
<i>Spigolo basso</i>	1.739429 T

I risultati non sono molto buoni, infatti il livello delle induzioni nella corona e nel dente si sono ridotti aumentando così il gap con la magnetizzazione nello spigolo basso. La forma estremizzata della cava, creando delle forzature in tutte le zone analizzate ha portato ad una redistribuzione squilibrata della magnetizzazione.

Conclusioni

In queste prove si è potuto evincere l'importanza della geometria di statore per la magnetizzazione. In generale le prove hanno evidenziato come la modifica di una zona specifica abbia un'influenza su più zone dello statore. Questo aspetto è molto importante per la redistribuzione delle induzioni in modo equilibrato. Quest'ultima non dev'essere del tutto simmetrica ma deve impedire che si creino delle zone di saturazione, queste infatti generano un aumento del contenuto armonico di ordine più alto e influiscono negativamente sulla percentuale di ripple aumentando l'entità delle oscillazioni. Gli aspetti appena citati verranno trattati nel capitolo specifico. Le prove svolte sono un'ottima base di partenza per lo svolgimento dell'ottimizzazione dello statore. In seguito a questa ottimizzazione verrà analizzato anche l'aspetto prestazionale dei motori.

Capitolo 2: Ottimizzazione

In seguito alle prove di tipo parametrico è stato possibile individuare dei range da utilizzare per l'ottimizzazione di angoli e spazi tra le barriere.

Dalle analisi fatte in precedenza si è potuto notare un miglioramento del ripple e della coppia media aumentando l'entità del taglio superiore, diminuendo gli angoli delle prime due barriere e aumentando quelli delle ultime due. Tutto questo è collegato anche con gli spazi tra le barriere, infatti aumentando o diminuendo gli angoli si modifica la parte iniziale dei canali dove passano le linee di flusso mentre, aumentando il taglio superiore, si elimina una zona dove in sostanza non vengono concatenate linee di flusso. Per quanto riguarda gli spazi tra le barriere è meglio aumentare gli spazi tra 2° e 3° e tra 3° e 4° barriera e diminuire quelli tra 3° e 2° e 2° e 1°. Tutti questi risultati sono legati alla concentrazione delle linee di flusso. Tenere angoli più grandi per le ultime due barriere, e viceversa abbassarli per le prime due, poiziona le barriere in modo tale da agevolare le linee di flusso proprio nella zona dove queste hanno maggior densità. La stessa cosa vale per gli spazi tra le barriere, le zone tra la 2° e 3° e tra 3° e 4° sono quelle dove confluiscono più linee di flusso, un maggior spazio consente di avere canali grandi che riducono il rischio di saturazione e migliorano la concatenazione. Oltre ai parametri elencati fin ora bisogna tener conto anche dello spazio tra albero interno e la 4° barriera e dello spazio tra la 1° barriera e il taglio superiore.

Per quanto riguarda il primo parametro citato nelle prove svolte fin ora è stata verificata l'influenza positiva che ha la diminuzione di questo spazio sul ripple. Per motivi di fattibilità costruttiva e in accordo con i risultati delle prove precedenti tale spazio è stato mantenuto ad 1mm in tutte le prove successive. Per quanto riguarda lo spazio tra la 1° barriera e il taglio superiore si è potuto notare che la sua influenza varia anche in base all'angolo della prima barriera, in particolare questo spazio va alzato quando l'angolo della prima barriera è basso viceversa quando è più alto, questo è dovuto a come vengono direzionate e concentrate le linee di flusso dalla disposizione delle barriere. Alcune linee di flusso con certe disposizioni vengono concatenate più in alto o più in basso, cambiandone così la concentrazione. L'influenza del parametro appena descritto non è molto alta ma comunque verrà considerata tra le variabili da utilizzare per l'ottimizzazione e quindi anche per questo parametro è stato definito un range di variazione.

2.1 Ottimizzazione rotore a 4 barriere: Angoli

Considerati tutti i risultati ottenuti fin ora e tenuto conto del numero di variabili da considerare, per non avere un numero eccessivo di motori su cui fare le simulazioni, verrà svolta una prima ottimizzazione degli angoli, in modo da poter ridurre ulteriormente i range ottenuti dalle prove parametriche. Tale suddivisione delle ottimizzazioni è resa possibile dal fatto che gli angoli hanno una buona influenza sia sul ripple che sull'effetto positivo che le altre variabili hanno su questo. Utilizzare delle combinazioni ottimali di angoli nelle ottimizzazioni successive consentirà quindi di ottenere migliori risultati.

Per questa prima ottimizzazione sono stati definiti i seguenti range:

Tab.2.1

Angolo	Range
β_1	18 ÷ 22
β_2	23 ÷ 27
β_3	30 ÷ 35
β_{bt}	15 ÷ 18

I parametri fissi sono i seguenti:

Tab.2.2

Parametro	Valore
β_4	43°
w_{bt}	1 mm
w_{sb}	1 mm
w_{43}	4 mm

W_{32}	2 mm
W_{21}	2 mm
t^*	2 mm

*lo spessore di tutte le barriere è uguale

In seguito all'ottimizzazione è stato ottenuto il seguente grafico:

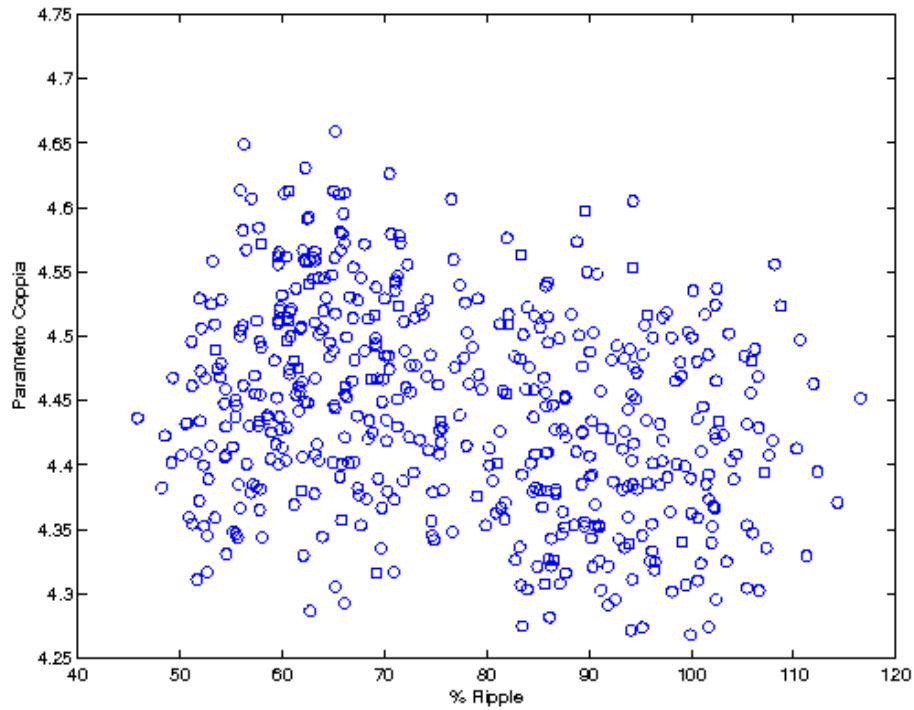


Fig.2.1 Grafico dei parametri ottenuti con ogni motore.

Da questi punti è stato ricavato un fronte di pareto:

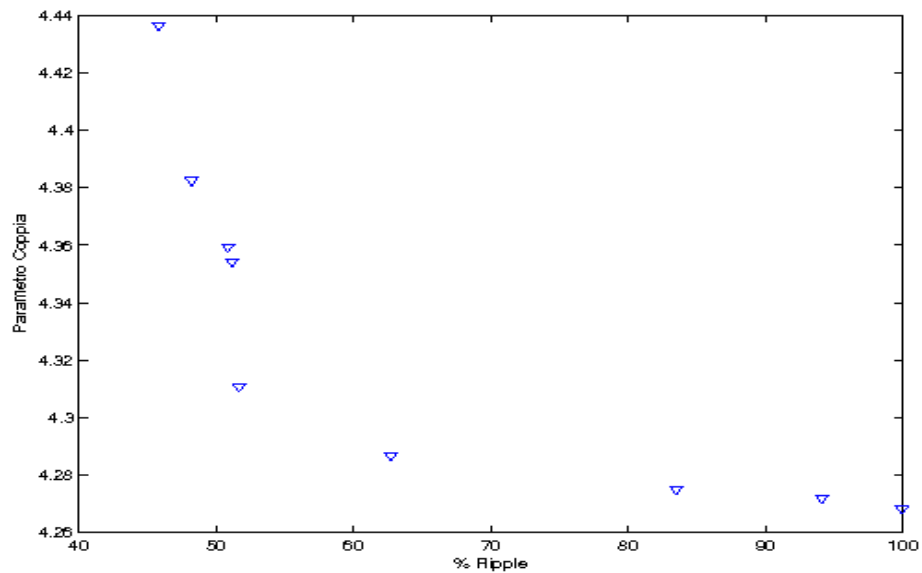


Fig.2.2 Fronte di pareto ottenuto dal grafico precedente

Il fronte di pareto ottenuto è formato da 9 punti ognuno dei quali rappresenta un motore. Esaminando i valori ottenuti solo tre di questi hanno una bassa percentuale di ripple e una buona coppia media, in particolare si può notare come le tre combinazioni migliori siano molto simili. Alla luce di questo per l'ottimizzazione successiva verranno utilizzate queste tre combinazioni per gli angoli e verranno definiti dei range per le altre variabili.

Le tre combinazioni ottime sono:

Tab.2.3

β_1	β_2	β_3	β_{nt}	%Ripple	Parametro coppia
18	26	33	15	50.833355	4.359463
18	27	35	15	48.192951	4.382527
18	27	35	17	45.803446	4.436539

Osservando l'andamento delle coppie di questi tre motori si può notare come le forme d'onda siano molto distorte e presentino oscillazioni improvvise. In particolare la tendenza registrata è quella di avere un picco, sia in aumento che in diminuzione, ogni 5° gradi, questo aspetto è ottimale per lo skewing del rotore. Con un angolo così basso tra i picchi, l'entità dello skewing è ridotta ma dovrebbe comunque fornire una riduzione della percentuale di ripple. L'analisi di questo aspetto verrà trattata in seguito.

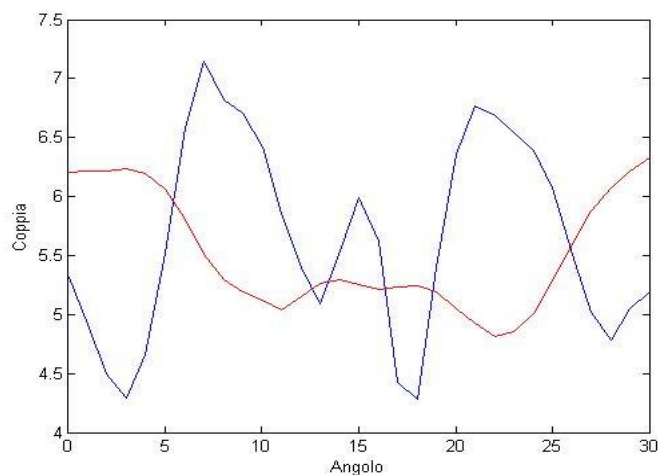
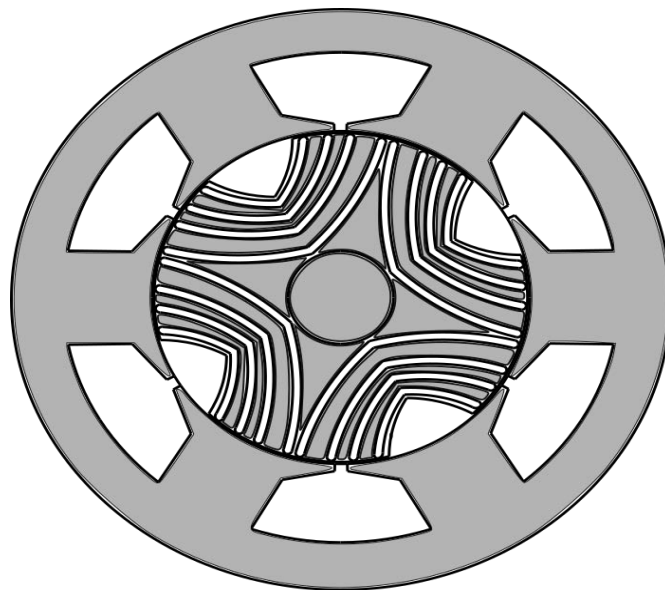


Fig.2.3 Motore con il 50% di ripple e relativo andamento della coppia

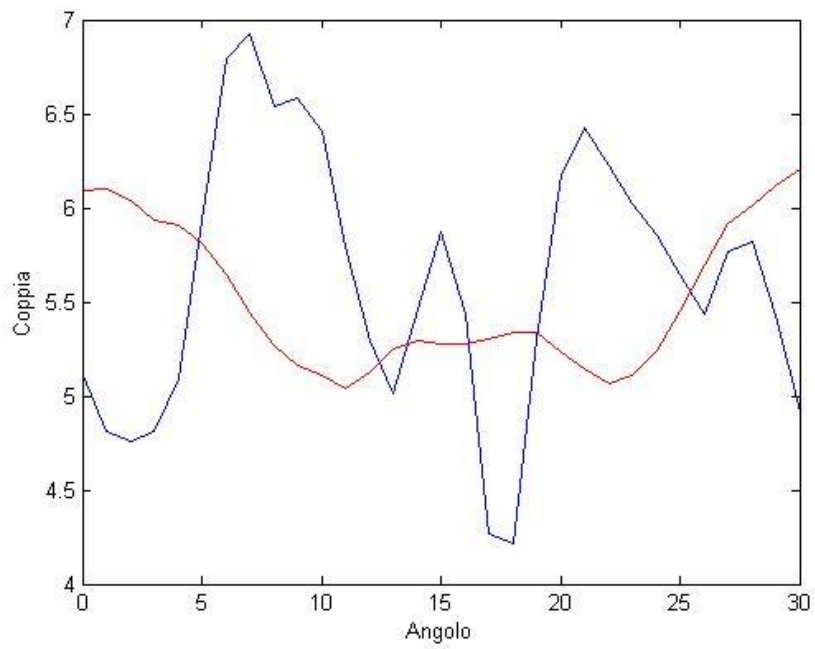
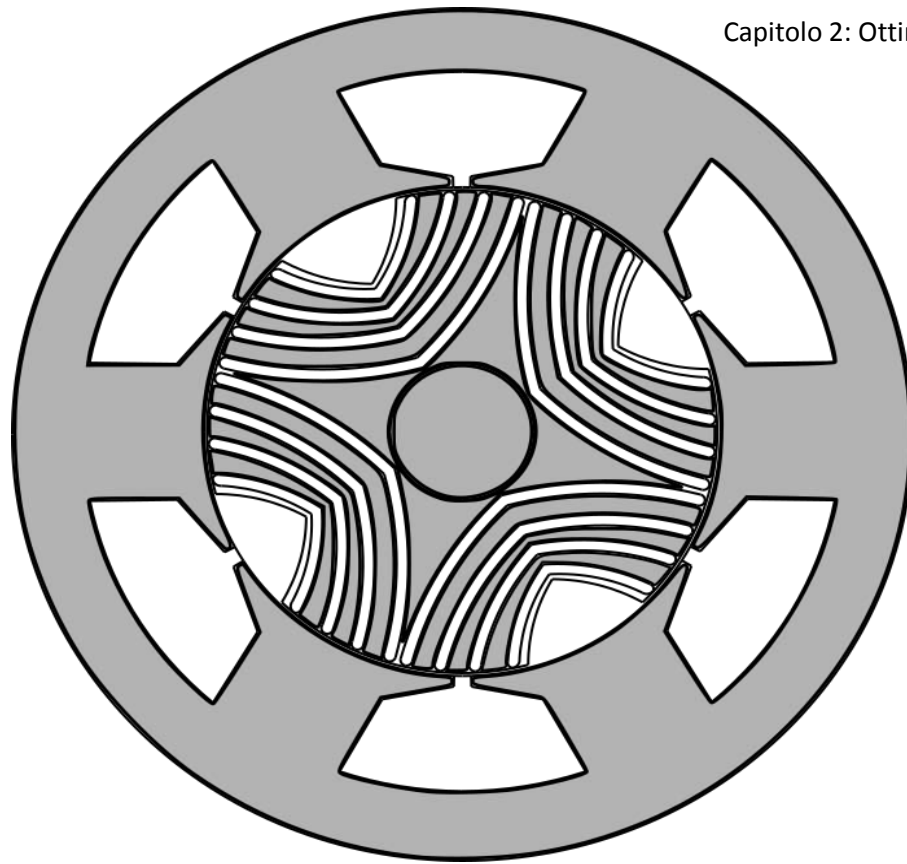


Fig.2.4 Motore con il 48% di ripple e relativo andamento della coppia

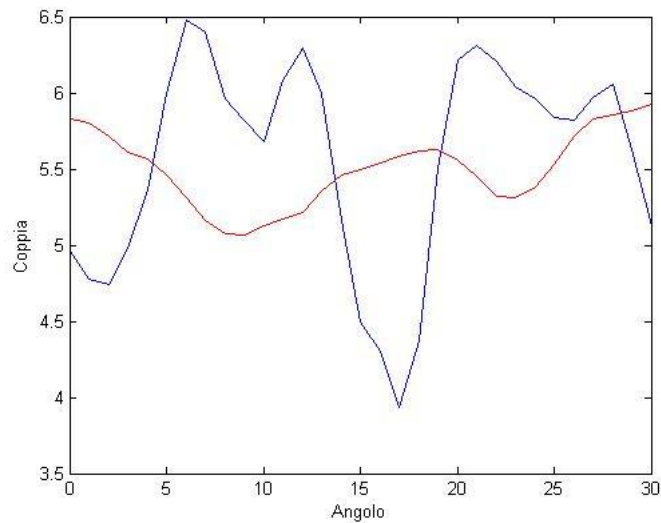
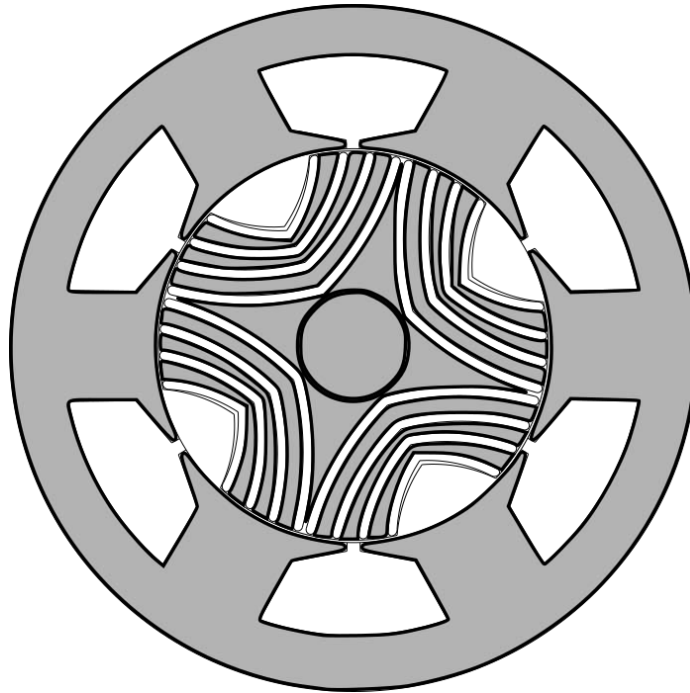


Fig.2.4 Motore con il 45% di ripple e relativo andamento della coppia

2.2 Ottimizzazione Rotore a 4 barriere: Spazi tra barriere e angoli

Dopo aver definito un range più ristretto di angoli è possibile svolgere un'ottimizzazione su più parametri, in questo caso vengono considerati anche gli spazi tra le varie barriere del rotore. Considerati i risultati delle prove parametriche e in base ai range stabiliti fin ora, lavorare sugli spazi tra le barriere dovrebbe incidere molto sul ripple e sulla coppia media. Tale influenza potrebbe fornire risultati dove un buon miglioramento del ripple comporta un peggioramento della coppia media. Poiché le combinazioni utilizzate nell'ottimizzazione forniscono già buoni andamenti, eventuali peggioramenti saranno limitati e comunque compensati dall'entità dei miglioramenti. I range utilizzati nell'ottimizzazione sono i seguenti (Tab):

Tab.2.4

Parametro	Range
w_{bt}	0.5 ÷ 2 mm
w_{43}	4 ÷ 6 mm
w_{32}	1 ÷ 2 mm
w_{21}	1 ÷ 2 mm

Le combinazioni utilizzate per gli angoli sono:

Tab.2.5

β_1	β_2	β_3	β_{bt}
18	26	33	15
18	27	35	15
18	27	35	17

I parametri mantenuti fissi sono:

Tab.2.6

Parametro	Valore
β_4	43°
t^*	2 mm

*lo spessore di tutte le barriere è uguale

I risultati ottenuti sono i seguenti

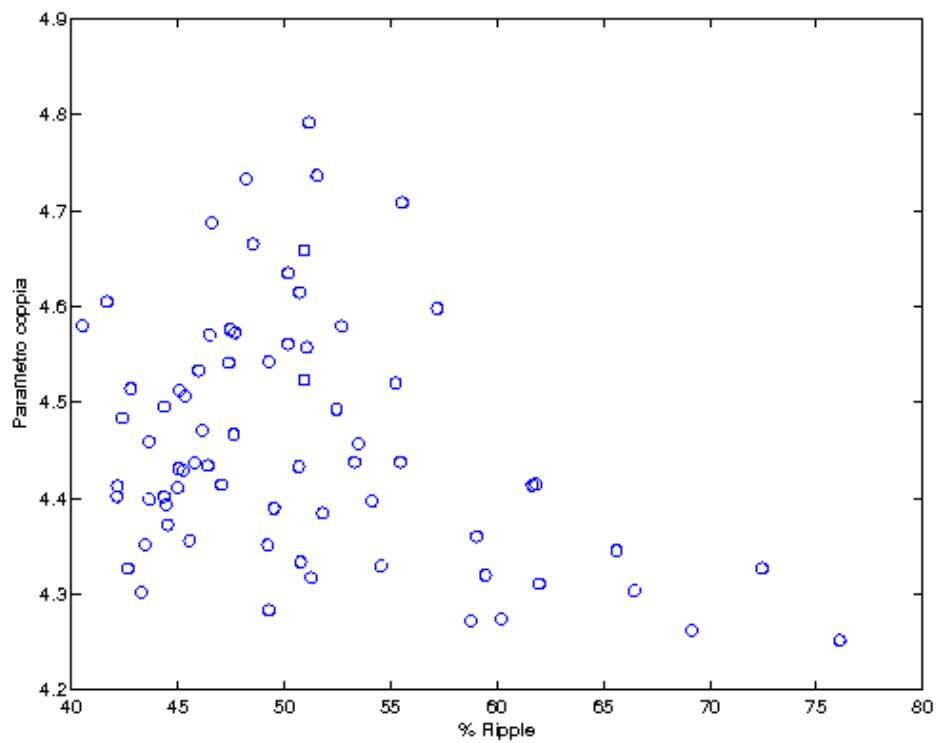


Fig.2.5 Grafico dei parametri ottenuti con ogni motore

Da questo grafico è stato ottenuto il seguente fronte di pareto:

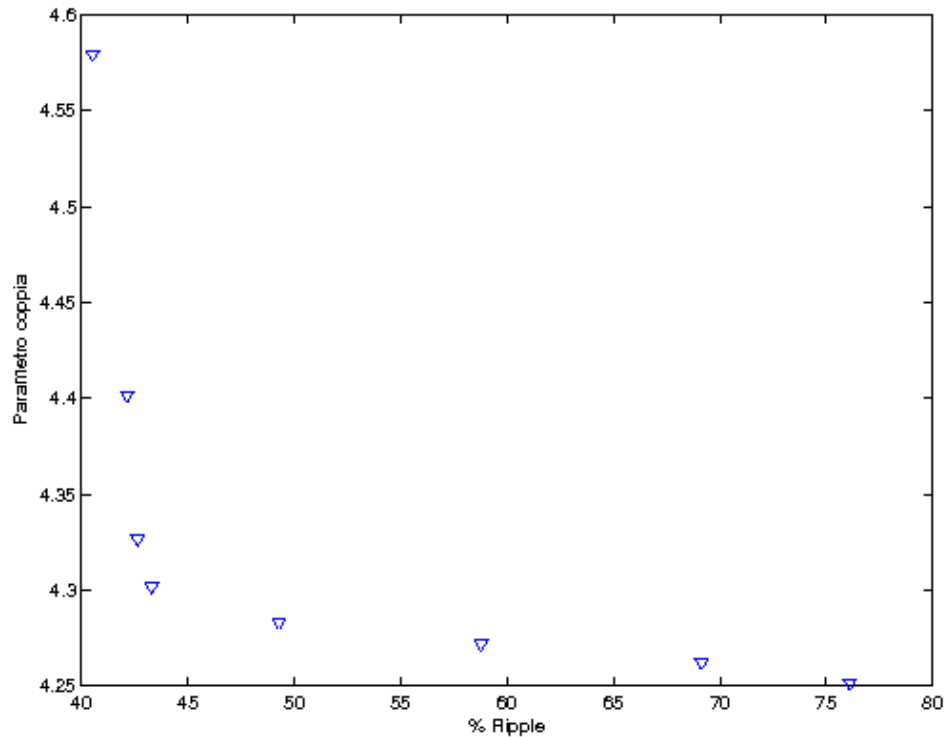


Fig.2.6 Fronte di pareto ottenuto dal grafico precedente

Dei motori che appartengono al fronte di pareto vengono considerati buoni solo 7 su 13. Questi 7 motori dall’ottimizzazione degli spazi tra le barriere hanno ricevuto un notevole improvement per quanto riguarda il ripple. La percentuale di oscillazione di coppia si aggira intorno al 40%, in particolare ci sono due motori che hanno il 40.5% di ripple. Come ci si aspettava nei casi in cui il ripple è migliorato in modo più marcato, la coppia media è diminuita di circa 0.1 Nm, tale diminuzione è comunque accettabile visto l’entità della diminuzione del ripple.

I dati precisi sono riportati in tabella Tab:

Tab.2.7

w_{bt}	w_{43}	w_{32}	w_{21}	β_1	β_2	β_3	β_{bt}	%Ripple	Parametro coppia
1 mm	6 mm	2 mm	2 mm	18°	27°	35°	15°	43.2912	4.30165
1.5 mm	5 mm	2 mm	2 mm	18°	27°	35°	15°	42.6398	4.32648
1.5 mm	6 mm	1 mm	2 mm	18°	27°	35°	15°	42.1443	4.40156
2 mm	4 mm	1 mm	2 mm	18°	27°	35°	15°	40.5094	4.57926
1.5 mm	5 mm	2 mm	2 mm	18°	27°	35°	17°	42.6398	4.32648
1.5 mm	6 mm	1 mm	2 mm	18°	27°	35°	17°	42.1443	4.40156
2 mm	4 mm	1 mm	2 mm	18°	27°	35°	17°	40.5094	4.57926

Esaminando le forme d’onda si può notare come nei due casi con meno ripple la forma d’onda sia meno distorta e con un numero inferiore di picchi. Rispetto ai risultati migliori della precedente ottimizzazione, nei motori migliori, si ha una forma d’onda più pulita e tendente ad un andamento sinusoidale. Nel primo motore elencato in tabella 2.7 la forma d’onda è abbastanza simile ad una forma sinusoidale e presenta dei picchi che, a differenza dei due risultati migliori, sono più tondeggianti. Questo aspetto comporta che la coppia varia in modo più lento e meno repentino tendendo ad avere meno picchi, anche se più ampi.

Per migliorare i risultati ottenuti è necessario fare alcune osservazioni su come vengono concatenate le linee di flusso nel rotore e cominciare a modificare anche la geometria dello statore. Tutte le considerazioni verranno fatte sui due motori che hanno la percentuale minore di ripple. Qualora i risultati delle due strade intraprese non fornissero buoni risultati, verranno prese in considerazione soluzioni diverse che utilizzino anche i risultati scartati ora.

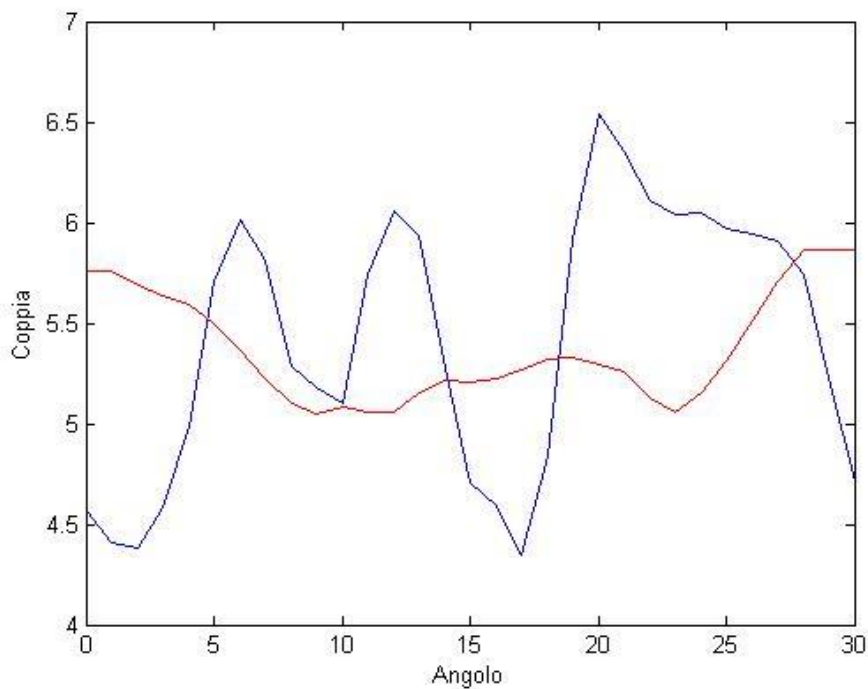
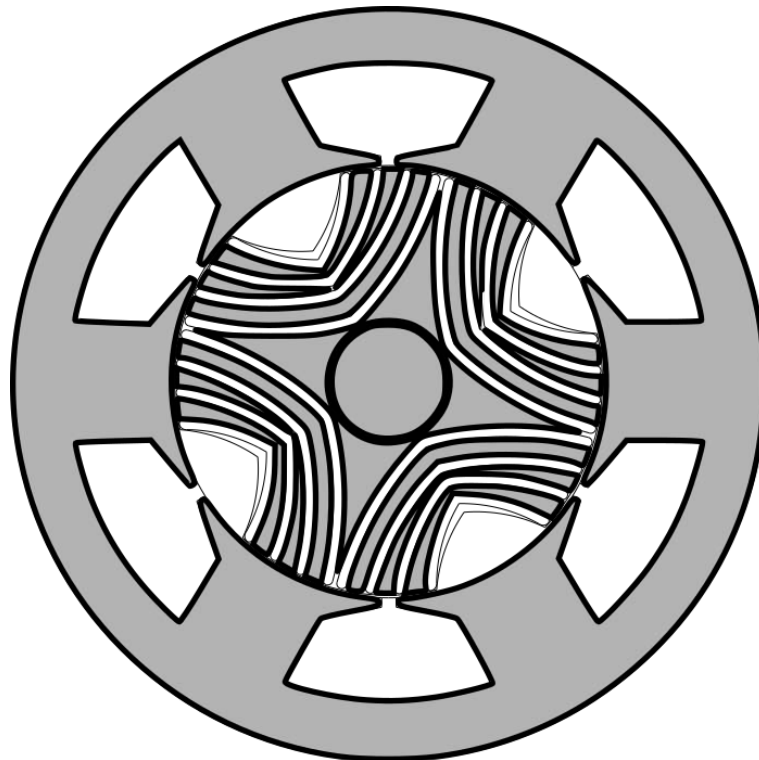


Fig.2.7 Motore con il 40% di ripple e $\beta_{bt} = 17^\circ$ con relativo andamento della coppia

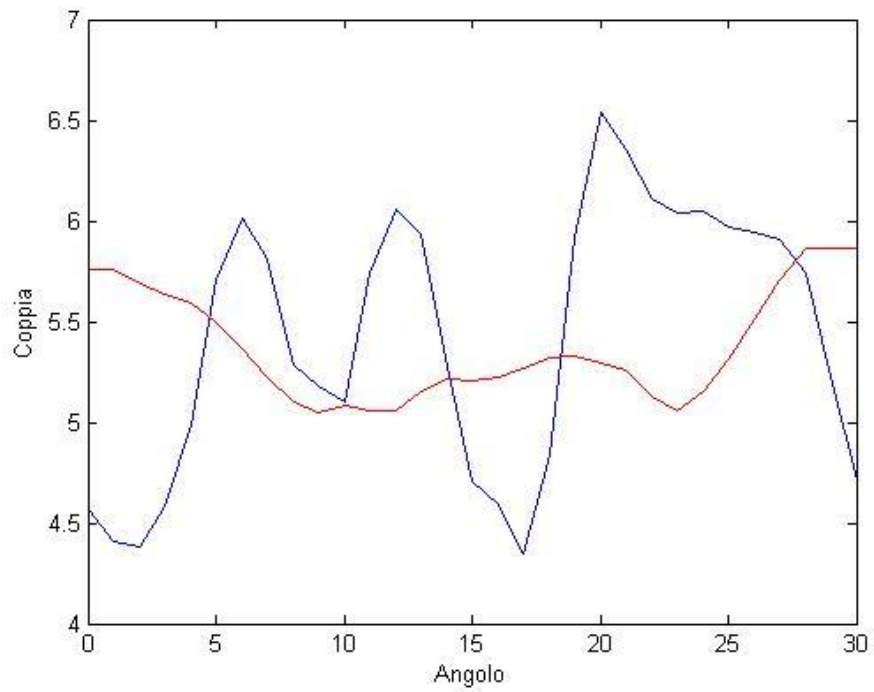
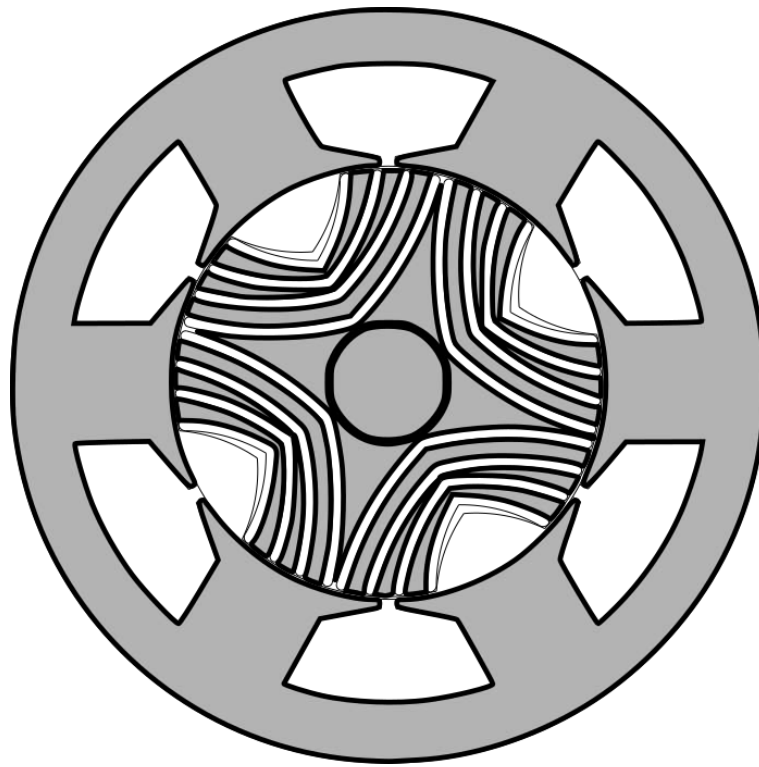


Fig.2.8 Motore con il 40% di ripple e $\beta_{bt} = 17^\circ$ con relativo andamento della coppia

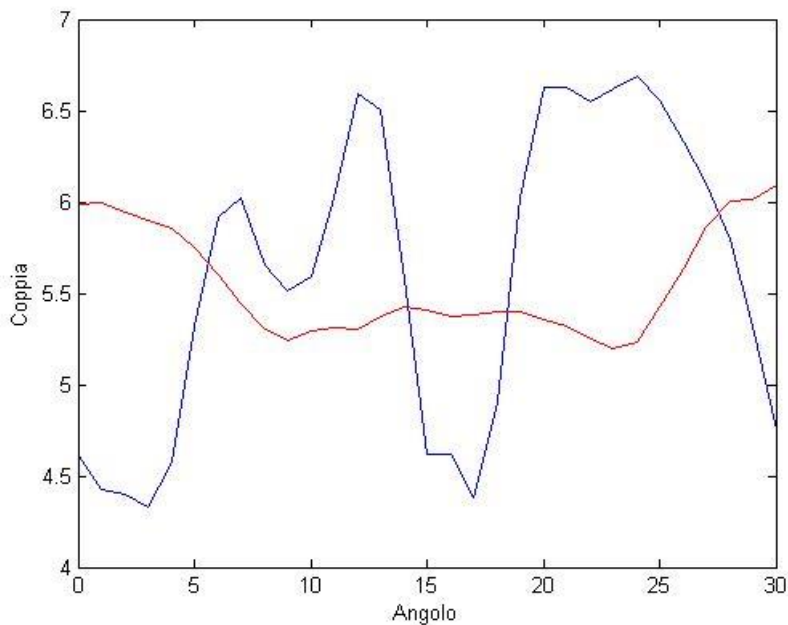
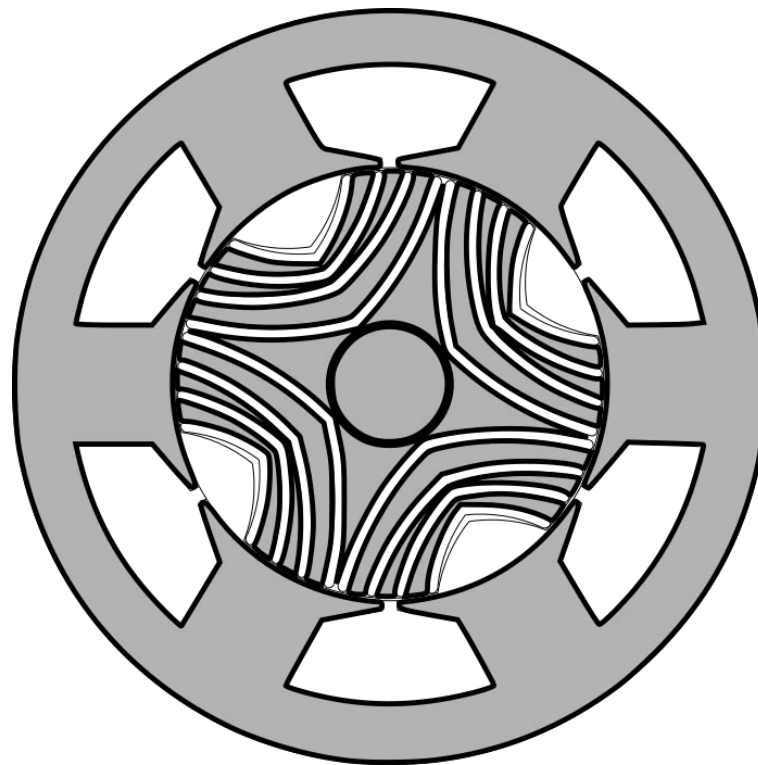


Fig.2.9 Motore con il 42.14% di ripple e relativo andamento della coppia

2.2.1 Osservazioni sui risultati

Osservando le linee di flusso si può notare come queste tendano a saturare in due zone specifiche: l'angolo basso della cava e la prima barriera. Per poter ridurre la saturazione in questi due punti si può lavorare sullo statore e sul rotore, in particolare si può provare a rimuovere la prima barriera e cercare di modificare gli spigoli delle cave dello statore. Queste due tipologie di modifiche verranno trattate separatamente in modo da vedere quale dei due fattori ha più influenza e soprattutto per non avere simulazioni troppo onerose.

2.3 Ottimizzazione sul Rotore a 3 barriere

Come già descritto in precedenza, eliminare la prima barriera dovrebbe migliorare la saturazione presente nel rotore e giovare quindi al ripple. In questo caso la perdita di una barriera potrebbe comportare la diminuzione della coppia media, tuttavia la riduzione di saturazione e il miglior concatenamento delle linee di flusso dovrebbero compensare se non migliorare il valore di tale parametro.

Per poter realizzare una buona ottimizzazione è necessario ridefinire i range di variazione delle variabili, a tal proposito sono state effettuate delle prove parametriche che non verranno riportate, infatti saranno parte dell'ottimizzazione che si andrà a fare e riportarne i risultati sarebbe un doppione. Il fatto di avere una barriera in meno consente di ampliare alcuni spazi tra le barriere, in particolare il w_{32} e il w_{bt} , e di allargare il rage del taglio superiore. Queste piccole variazioni sono utili per il concatenamento delle linee di flusso, infatti l'assenza della prima barriera modifica gli spazi a disposizione nel rotore.

Un altro parametro che viene modificato rispetto alle ottimizzazioni precedenti è il β_4 , questo verrà tenuto fisso a 42° , infatti la nuova configurazione delle linee di flusso che si viene a creare richiede che ci sia più spazio tra le varie terne di barriere. In questa ottimizzazione oltre a β_4 anche β_3 verrà tenuto fisso, infatti sia dalle prove parametriche che dalle ottimizzazioni precedenti si è potuto notare che tra le combinazioni di variabili che forniscono i risultati migliori quest'angolo sia sempre pari a 35° .

I range che verranno utilizzati sono riportati nella tabella seguente:

Tab.2.8

<i>Angoli</i>	
β_2	25 ÷ 27
β_{bt}	15 ÷ 17
<i>Spazi tra le barriere</i>	
w_{bt}	2 ÷ 4
w_{43}	4 ÷ 6
w_{32}	2 ÷ 4

I valori fissi saranno (tab):

Tab.2.9

Variabile	Valore
β_4	42°
β_3	35°

I risultati ottenuti sono i seguenti:

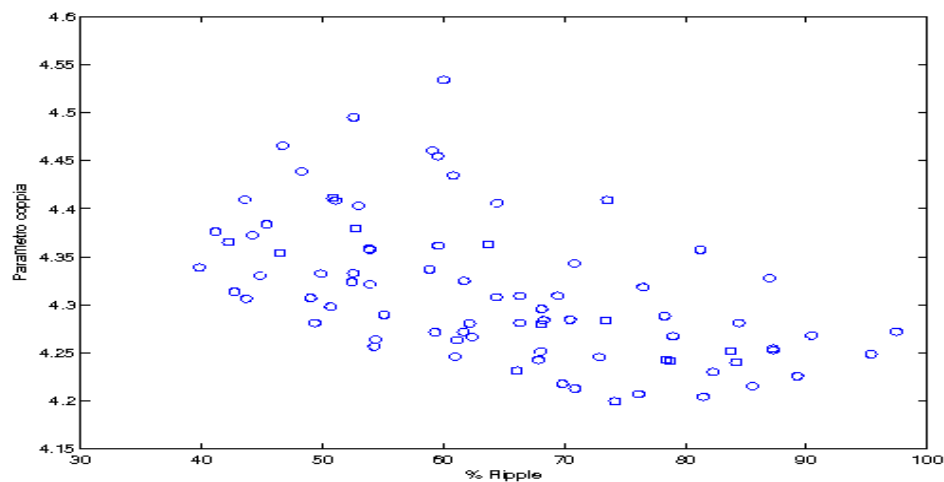


Fig.2.10 Grafico dei parametri ottenuti con ogni motore

Da qui è stato ricavato il fronte di pareto:

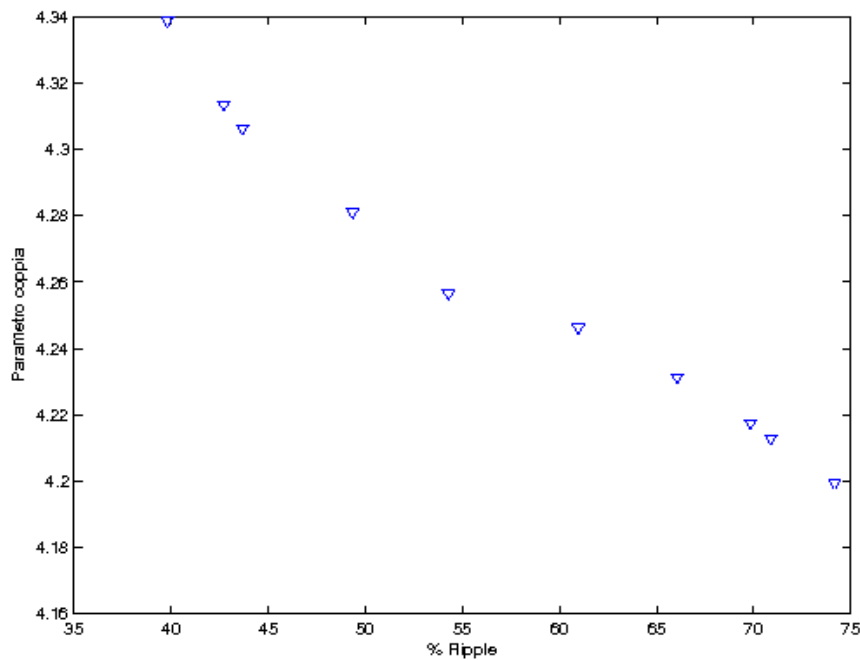


Fig.2.11 Fronte di pareto ricavato dal grafico precedente

I motori che fanno parte di questo fronte di pareto sono 30, solo 9 di questi hanno un buona percentuale di ripple ma soprattutto una buona coppia media. Il miglioramento più marcato che è stato ottenuto da quest'ottimizzazione è il valore della coppia media, questo è aumentato anche rispetto alla prima ottimizzazione fatta sugli angoli. Per quanto riguarda il ripple il miglioramento si limita ad un punto percentuale. Tali risultati sono in linea con le aspettative, infatti il miglior concatenamento delle linee di flusso e la minor saturazione, pur non giovando in modo particolare sul ripple, hanno migliorato notevolmente la coppia media. Un altro aspetto da considerare è l'andamento della coppia, infatti le forme d'onda in questo caso sono migliorate rispetto ai casi precedenti. La tendenza di avere un'oscillazione ogni 5 gradi, in questi risultati è molto più marcata. Nella fase centrale, tra i 10 e i 20 gradi, ci sono delle piccole oscillazioni che si ripetono anche tra i 25 e i 30 gradi. I risultati in dettaglio sono riportati nella seguente tabella Tab:

Tab.2.10

β_2	β_{bt}	w_{bt}	w_{43}	w_{32}	%Ripple	Parametro coppia
27°	15°	2 mm	4 mm	3 mm	42.7103	4.31353
27°	15°	2 mm	5 mm	2 mm	39.8046	4.33885
27°	15°	2 mm	6 mm	2 mm	43.6708	4.3064
27°	16°	2 mm	4 mm	3 mm	42.7103	4.31353
27°	16°	2 mm	5 mm	2 mm	39.8046	4.33885
27°	16°	2 mm	6 mm	2 mm	43.6708	4.3064
27°	17°	2 mm	4 mm	3 mm	42.7103	4.31353
27°	17°	2 mm	5 mm	2 mm	39.8046	4.33885
27°	17°	2 mm	6 mm	2 mm	43.6708	4.3064

Osservando i risultati in tabella si può notare una certa ripetitività delle variabili e dei risultati che ne conseguono. Questo fatto mette in luce la buona riuscita delle prove parametriche nell'individuare un range ottimale e la buona riuscita dell'ottimizzazione nel definire la combinazione migliore. Oltre alla buona riuscita delle prove, dalla tabella si può capire la bassa influenza che ha il taglio superiore oltre un certo angolo e si può vedere molto bene come gli spazi tra le barriere esercitino un'influenza maggiore sui risultati rispetto al valore di β_{bt} . Questo aspetto era già stato accennato in precedenza,

infatti era già stato fatto notare come gli spazi tra le barriere esercitino la loro influenza positiva solo con combinazioni d'angolo ottimali. Per le ottimizzazioni successive verranno presi in considerazione solo i tre motori che hanno il 39% di ripple. Questi tre motori rispetto agli altri risultati hanno una coppia media che è leggermente inferiore ma che è ampiamente compensata dalla minor quantità di ripple, infatti la differenza di coppia si può ritenere praticamente nulla.

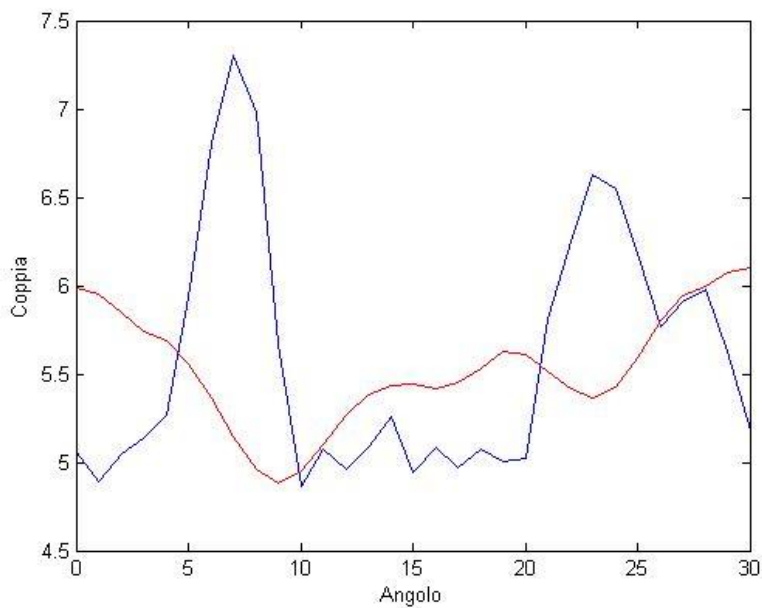
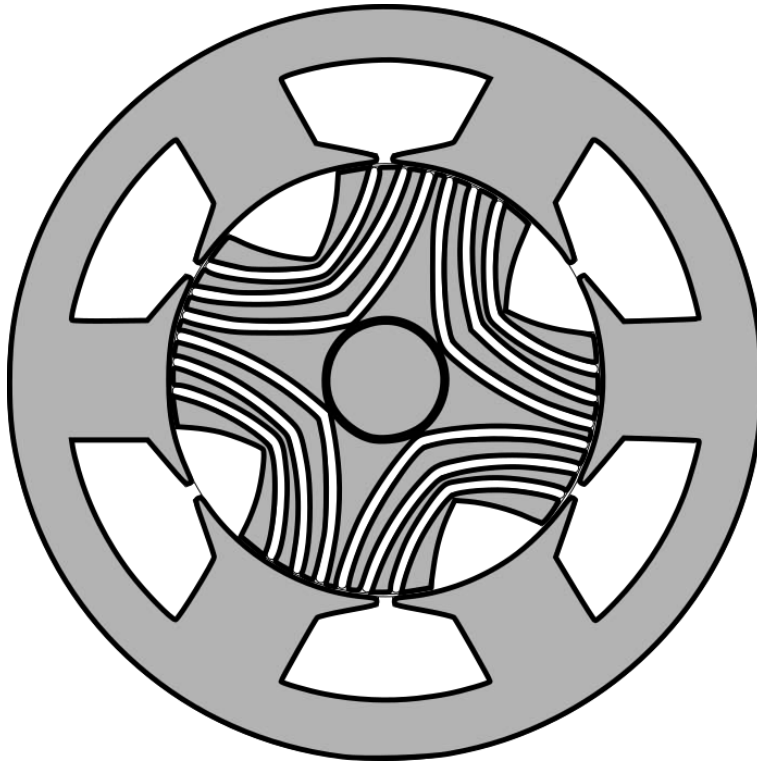


Fig.2.12 Motore con il 39% di ripple e $\beta_{bt} = 15^\circ$ con relativo andamento della coppia

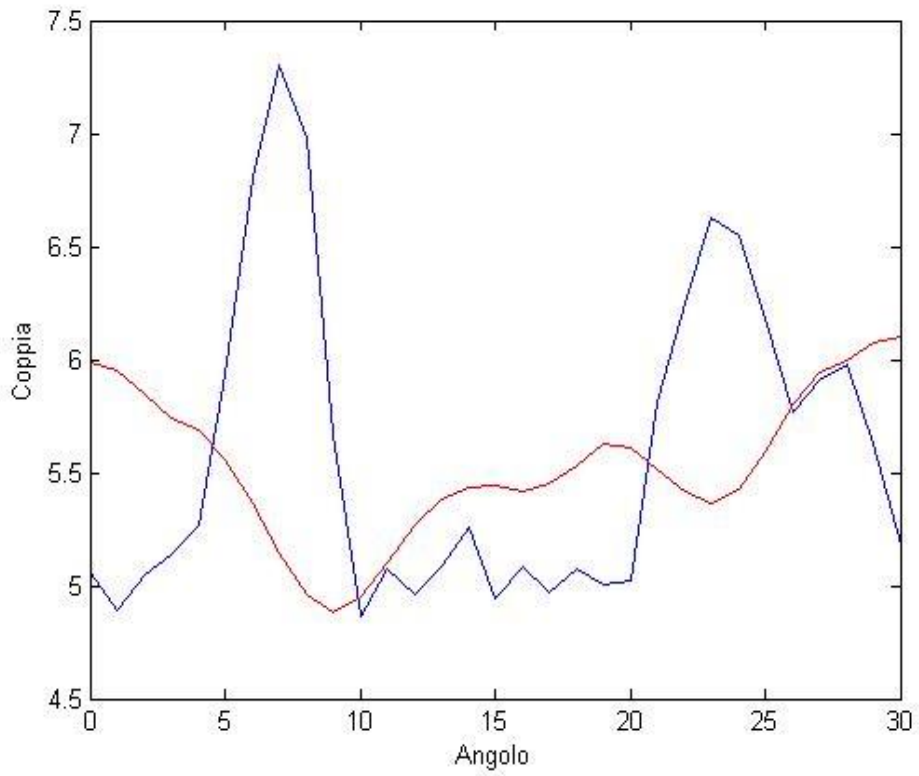
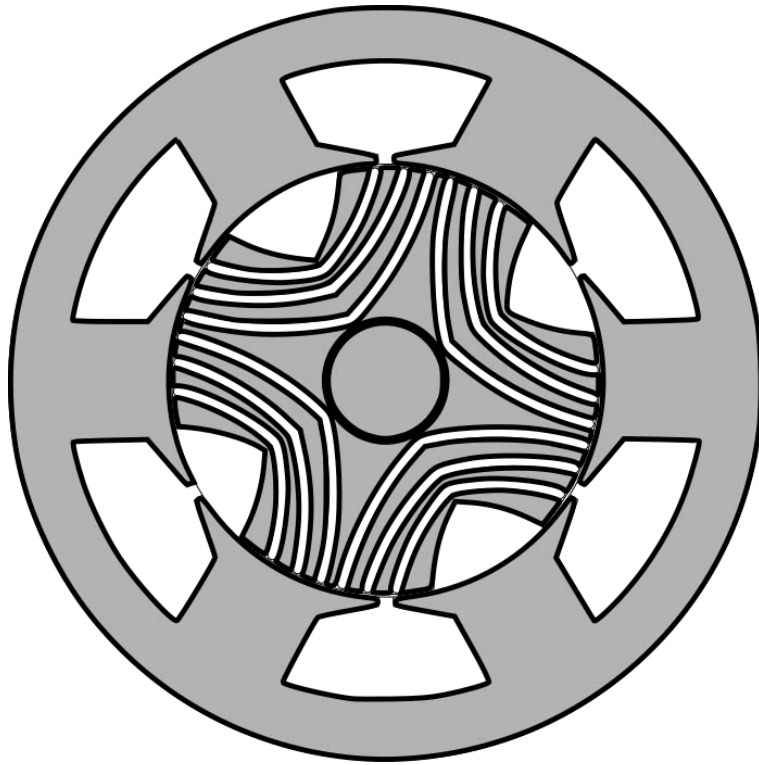


Fig.2.13 Motore con il 39% e $\beta_{bt} = 16^\circ$ con relativo andamento della coppia

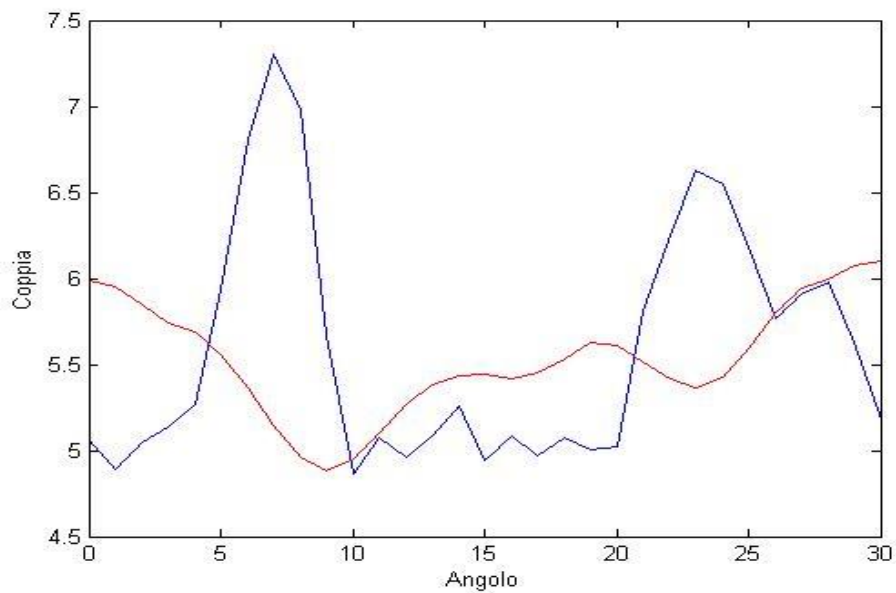
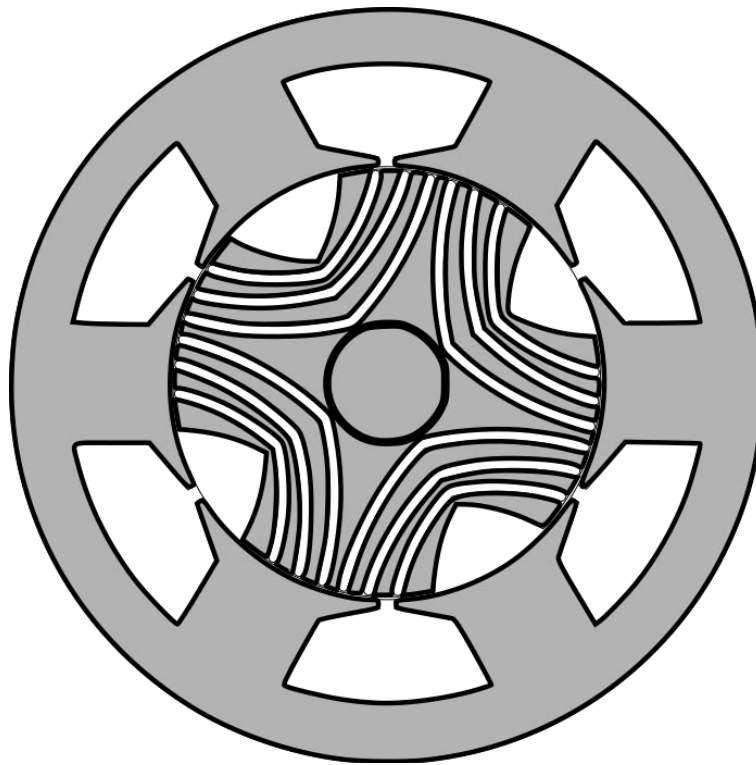


Fig.2.14 Motore con il 39% di ripple e $\beta_{bt} = 17$ con relativo andamento della coppia

2. 4 Ottimizzazione delle punte

In questa ottimizzazione verranno ottimizzate le punte per il rotore a 4 barriere, questo è stato fatto con lo stesso programma utilizzato nelle prove parametriche. I rotori di queste prove hanno un maggior numero di punti che disegnano le barriere e quindi presentano una forma leggermente diversa rispetto ai precedenti.

2.4.1 Prima ottimizzazione

Per questa prima ottimizzazione non verranno cambiati solamente i parametri delle punte, ma si agir  anche sugli angoli delle barriere e sugli spazi tra queste. In particolare verranno prese le tre migliori configurazioni ottenute con la prima ottimizzazione del rotore e verranno cambiati gli spazi tra la quarta e la terza barriera e tra la prima barriera e il taglio superiore. Questi cambiamenti vengono fatti per ottimizzare al meglio il rotore, infatti la variazione della forma delle barriere, anche se interessa solamente le punte, comunque incide sulle prestazioni,   quindi necessario rifinire bene le geometrie del rotore. Gli spessori delle barriere verranno mantenuti tutti pari a 2 mm, infatti fin ora questa configurazione ha fornito i risultati migliori. In questa prima ottimizzazione verranno apportate delle modifiche solamente alle punte della quarta e della terza barriera, infatti sono le barriere interessate da pi  cambiamenti geometrici. I range definiti per le punte allargano leggermente la parte finale della barriera e ne modificano la forma in modo da accompagnare al meglio le linee di flusso, per ora i cambiamenti riguardano principalmente la geometria del rotore in generale, quindi da quest'ottimizzazione ci si aspetta di individuare un motore utile come base per la seconda ottimizzazione che riguarder  solamente le punte. I parametri modificati sono:

Le combinazioni di angoli utilizzate sono:

Tab. 2.11

β_{ht}	β_1	β_2	β_3	β_4
15	18	26	33	43
15	18	27	35	43
17	18	27	35	43

I range utilizzati per gli spazi sono:

Tab.2.12

Spazio	Range
w_{ht}^*	1.5 ÷ 2
w_{43}	4 ÷ 6
w_{32}	1
w_{21}	2

*questo spazio viene variato con uno step di 0.5 mm.

I range utilizzati per le punte sono:

Tab.2.13

Parametro Punta	Range
l_{p4}	0.7 ÷ 0.9
l_{p3}	0.7 ÷ 0.9
l_{p2}	0.7
l_{p1}	0.7

I risultati ottenuti sono i seguenti:

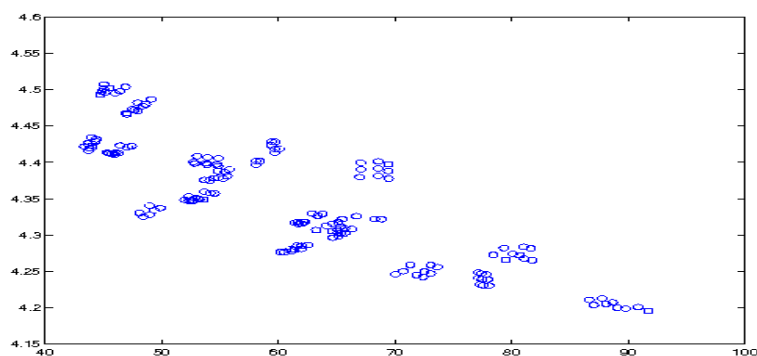


Fig.2.15 Parametri dei motori analizzati

da questi è stato ricavato il seguente fronte di pareto:

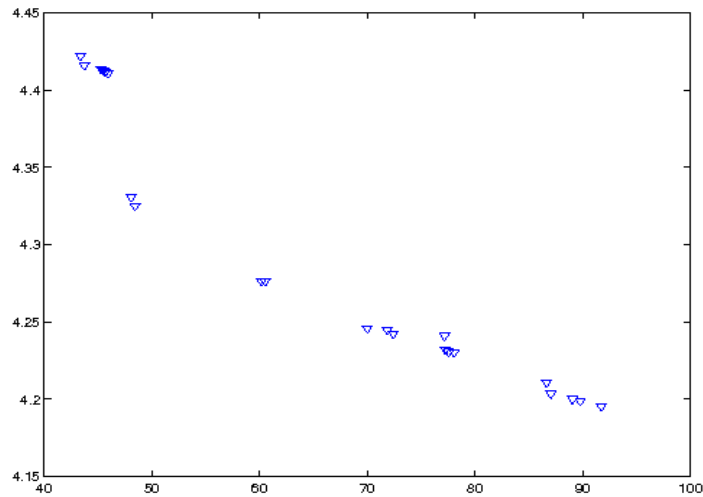


Fig.2.16 Fronte di pareto ottenuto dal grafico precedente

Il fronte di pareto in questo caso è formato da molti motori molti dei quali presentano delle percentuali molto elevate di ripple. Considerando questo aspetto verranno tenuti come buoni solamente i motori con una percentuale di ripple il più possibile vicina al 40%. Riducendo il fronte di pareto ottenuto sono stati ottenuti dei motori con delle buone prestazioni a soprattutto con delle buone forme d'onda. Analizzando l'andamento della coppia vengono registrate ancora molte distorsioni causate da armoniche di ordine più alto e si può notare una sparizione quasi completa dell'influenza di armoniche di ordine più basso. I risultati vengono riportati qui di seguito.

I due motori migliori hanno la stessa configurazione per quanto riguarda angoli e spazi:

Tab.2.14

w_{bt}	w_{43}	w_{32}	w_{21}	β_{bt}	β_1	β_2	β_3	β_4
1.5 mm	4 mm	1 mm	2 mm	15	18	27	35	43

Per quanto riguarda i parametri delle punte ci sono due configurazioni abbastanza simili:

Tab.2.15

l_{p4}	l_{p3}	l_{p2}	l_{p1}	%Ripple	Parametro coppia
0.8	0.9	0.7	0.7	43.733414	4.415808
0.9	0.9	0.7	0.7	43.346478	4.421840

I risultati ottenuti hanno fornito i risultati aspettati, è stata definita una configurazione di partenza per poter ottimizzare in modo più mirato le punte.



Fig.2.17 Dettaglio della nuova forma delle barriere

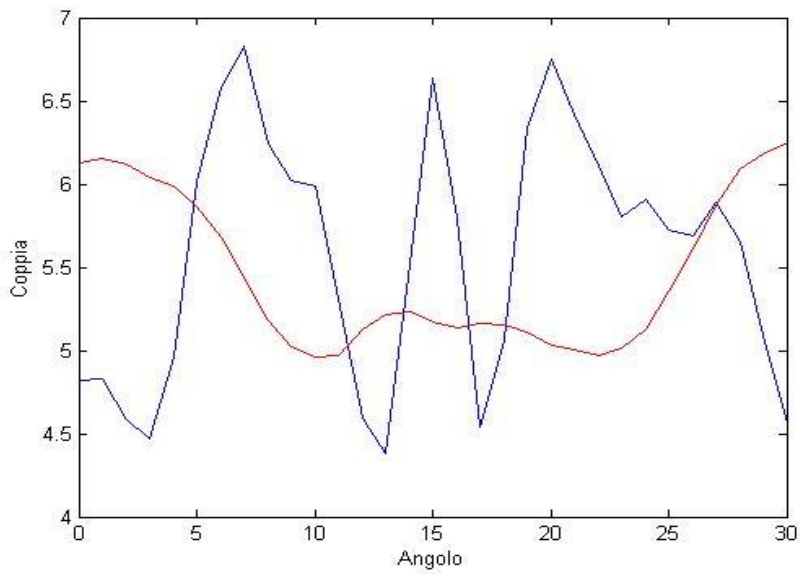
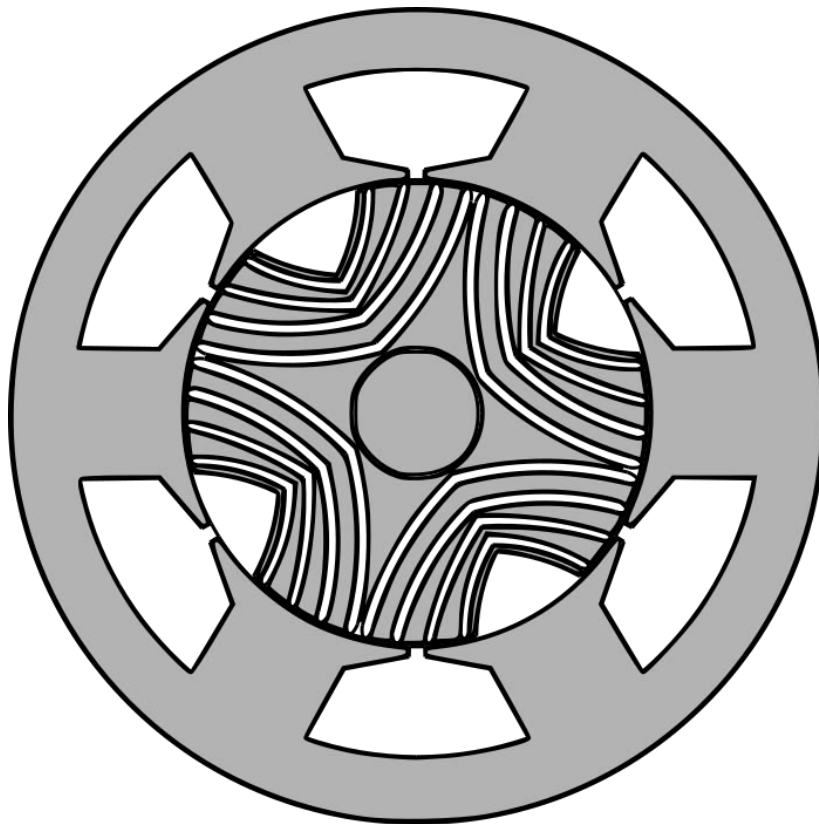


Fig.2.18 Motore con il 43.73% di ripple e relativo andamento della coppia



Fig.2.19 Dettaglio della nuova forma delle punte

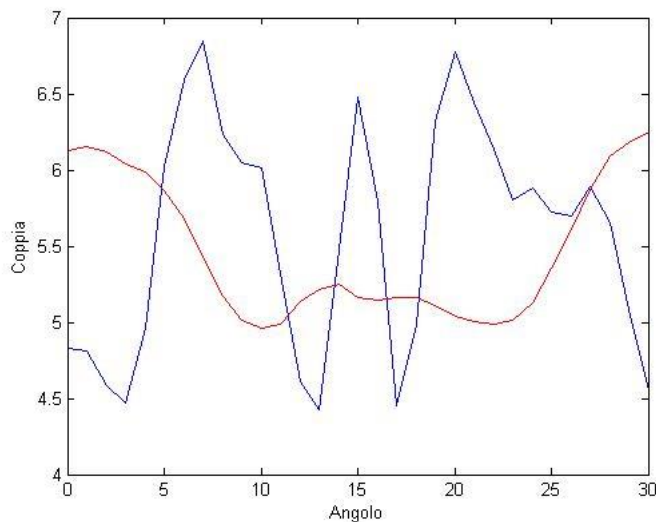
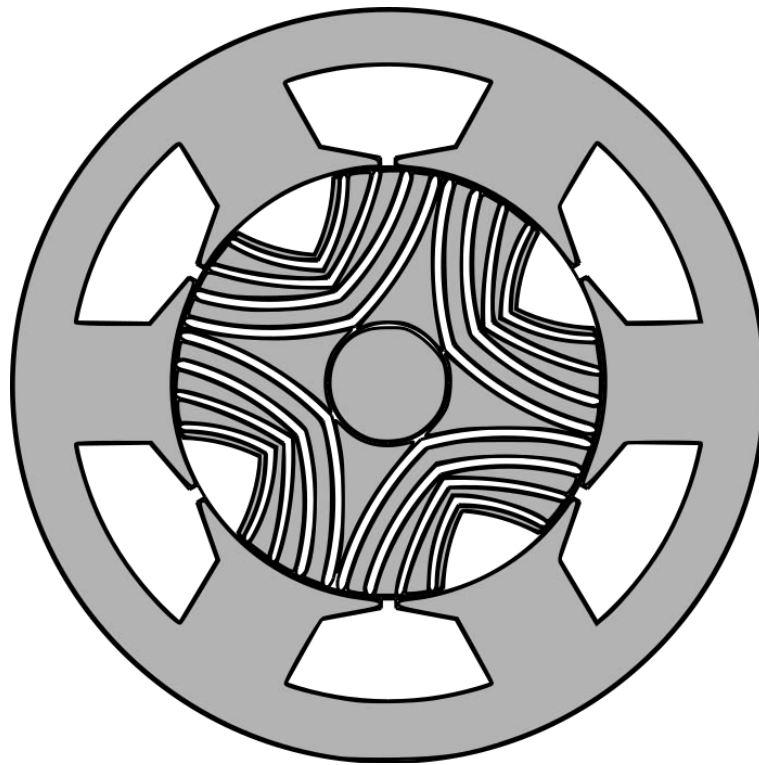


Fig. 2.20 Motore con il 43.34% di ripple e relativo andamento della coppia

2.4.2 Seconda Ottimizzazione

In questa seconda ottimizzazione, visto che è già stata definita una configurazione ottimale per gli angoli e gli spazi tra le barriere, verranno modificati solamente i parametri delle punte. Per definire i range da utilizzare vengono ripresi i risultati delle prove parametriche e dell'ottimizzazione precedente. Per le prime due barriere vengono definiti dei range che tendono a stringere le punte in modo da migliorare l'interfaccia tra lo statore e il rotore. Per quanto riguarda la terza e la quarta barriera, queste vengono modificate con range che tendono ad allargarle, questo permette un miglior direzionamento delle linee di flusso. Nel complesso si cerca di ottenere una geometria delle punte che migliori la concatenazione delle linee di flusso per le prime due barriere, generando meno ostacoli possibile, e che permetta un miglior direzionamento delle linee di flusso con le ultime due, in particolare si cerca di aumentare la densità di magnetizzazione nella parte più interna del rotore. Le configurazioni utilizzate vengono riportate di seguito.

Per quanto riguarda angoli e spazi:

Tab. 2.16

w_{bt}	w_{43}	w_{32}	w_{21}	β_{bt}	β_1	β_2	β_3	β_4
1.5	4	1	2	15	18	27	35	43

I rage per i parametri delle punte sono:

Tab.2.17

Parametro	Range
l_{p1}	0.5 ÷ 0.7
l_{p2}	0.5 ÷ 0.7
l_{p3}	0.8 ÷ 1
l_{p4}	0.8 ÷ 1

I risultati ottenuti sono i seguenti:

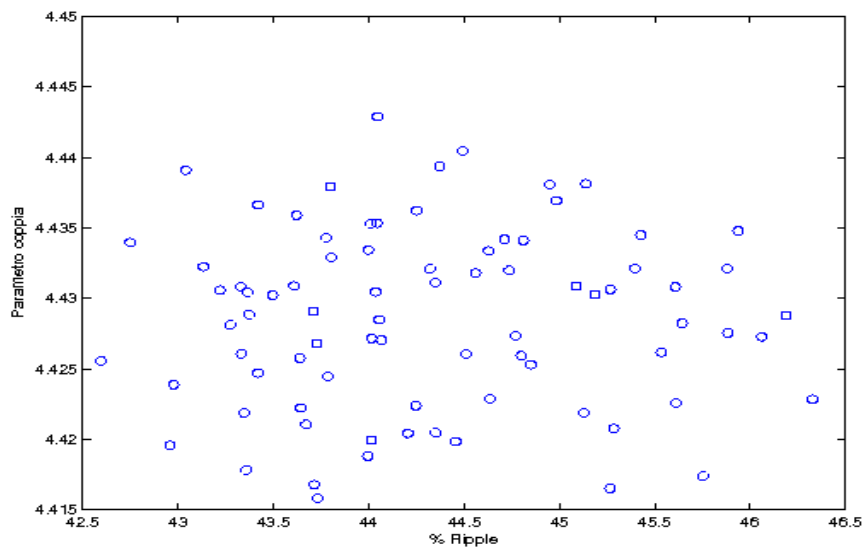


Fig.2.21 Grafico dei parametri corrispondenti ad ogni motore

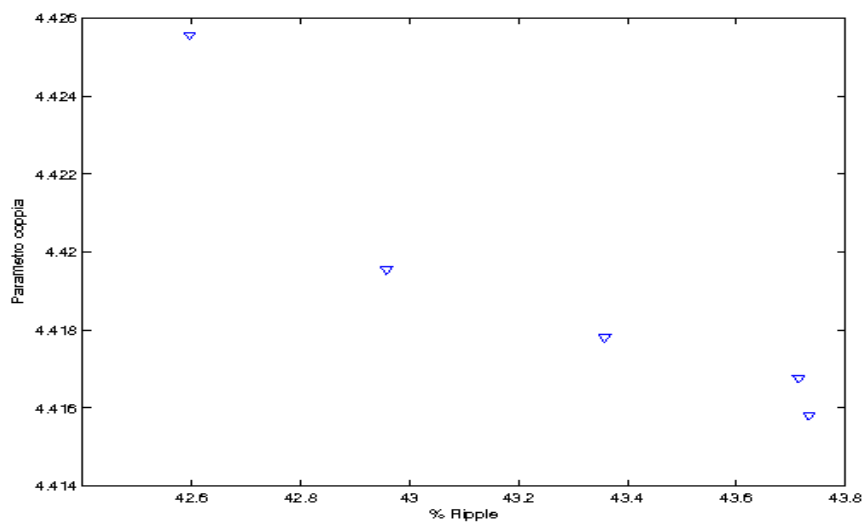


Fig.2.22 Fronte di pareto ottenuto dal grafico precedente

I risultati sono in linea con le aspettative, la percentuale di ripple non è migliorata di molto ma è migliorata la forma d'onda. Analizzando la forma d'onda della coppia si può vedere una riduzione delle armoniche di ordine più basso e un aumento di quelle di ordine più alto, in particolare la tendenza ad avere un picco ogni 5 gradi in questo caso è molto più marcata. Questo aspetto sarà molto utile per applicare lo skewing, infatti in questo caso avere un picco ogni 5 gradi riduce di molto l'entità di skewing da applicare. I risultati ottenuti sono abbastanza soddisfacenti, eventuali miglioramenti potranno essere ottenuti combinando questi risultati ai risultati delle altre ottimizzazioni, in particolare si potrà provare la configurazione a 3 barriere e l'ottimizzazione dello statore. I risultati migliori vengono riportati qui di seguito:

Tab.2.18

l_{p4}	l_{p3}	l_{p2}	l_{p1}	%Ripple	Parametro coppia
0.9	0.9	0.5	0.7	42.596167	4.425571
0.8	0.9	0.5	0.7	42.957656	4.419549

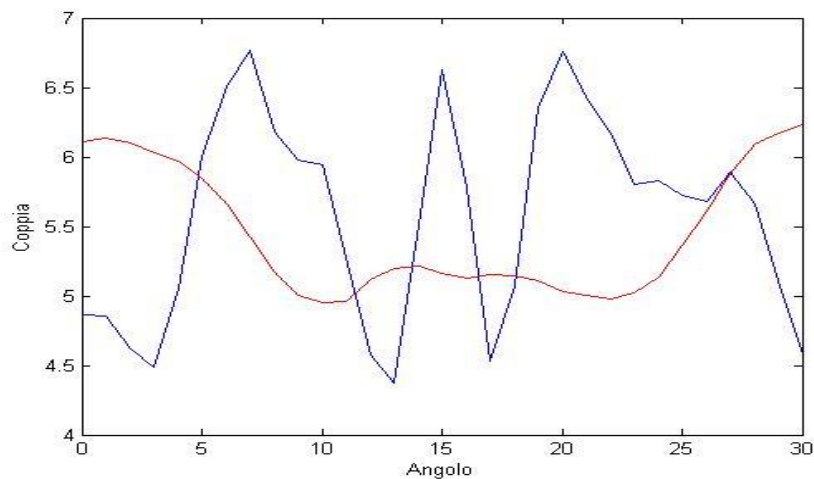
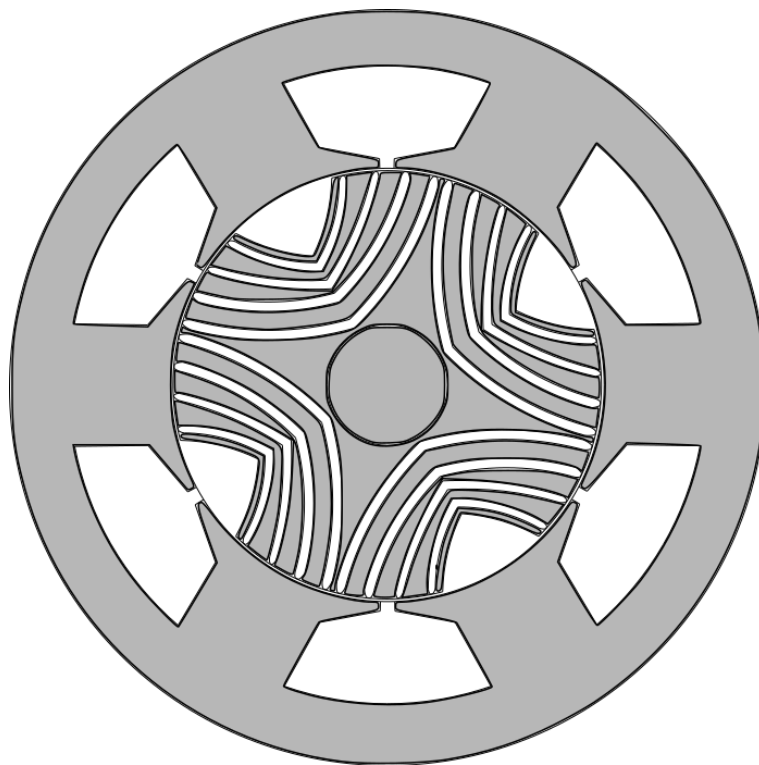


Fig.2.23 Motore con il 42.95% di ripple e relativo andamento della coppia

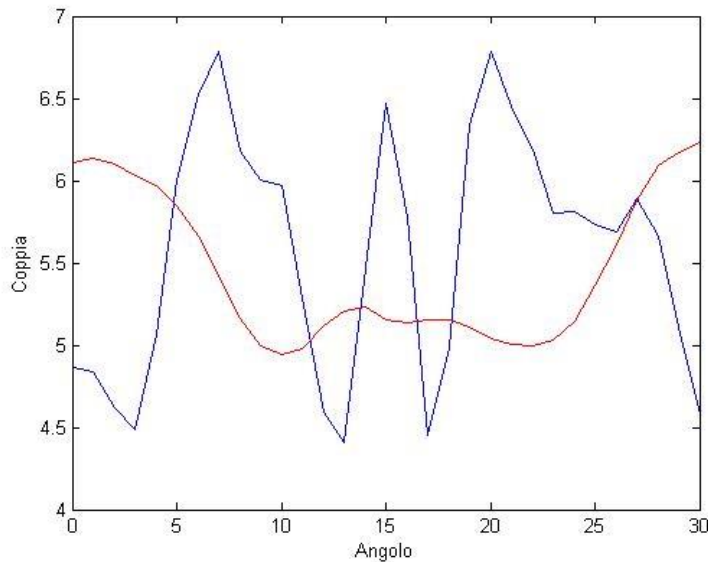
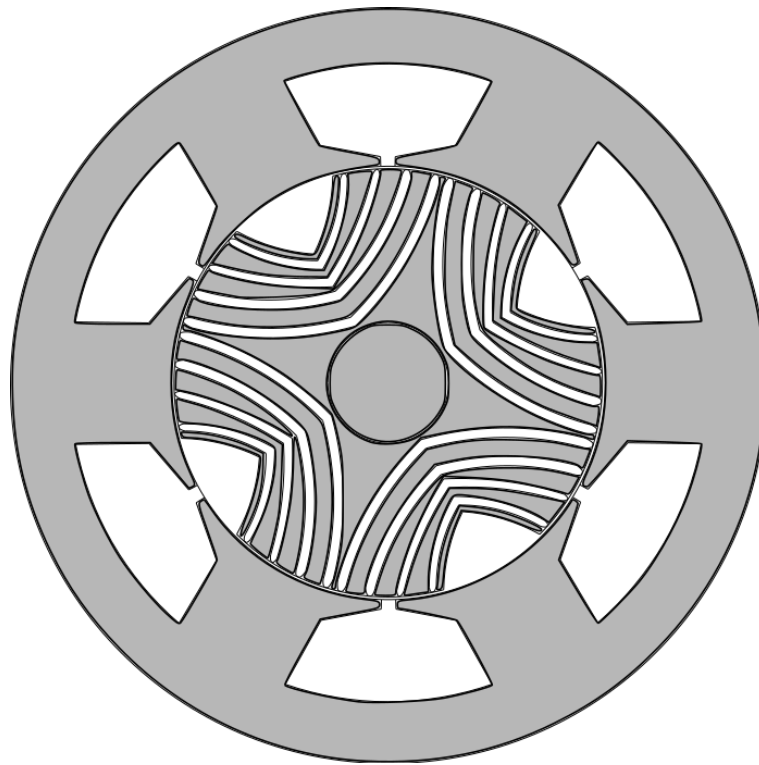


Fig.2.24 Motore con il 42.59% di ripple e relativo andamento della coppia

2.5 Ottimizzazione Statore

Cambiare la geometria dello statore influisce principalmente sulla forma d'onda della coppia e sulla percentuale di ripple. Tale influenza è dovuta alla modifica dei parametri della cava e quindi al cambiamento dei flussi che vengono generati. Per modificare la geometria dello statore è stato scritto un programma che agisce sui punti fondamentali della geometria delle cave: la larghezza e l'altezza dell'apertura di cava, lo spigolo basso, lo spigolo alto e l'altezza del punto centrale della cava. Tutti questi punti sono stati modificati utilizzando dei coefficienti correttivi che verranno variati nel programma di ottimizzazione. Come nei casi precedenti è stato necessario svolgere delle prove di tipo parametrico in modo da definire quelli che sono i range ottimali da utilizzare, i resoconti di tali prove sono presenti nel capitolo specifico. Lo scopo di questa ottimizzazione è quello di ottimizzare il livello

di saturazione che interessa alcune zone specifiche dello statore. Il fatto di avere una migliore configurazione per lo statore migliora la forma d'onda della coppia ma potrebbe influire in modo negativo sulla percentuale di ripple tendendo ad aumentarne la percentuale. In tutte le prove precedenti una riduzione di ripple è sempre stata accompagnata da un peggioramento della forma d'onda e da una riduzione della coppia media. In questa ottimizzazione verranno analizzati i livelli d'induzione presenti attorno ad ogni cava e verranno presi in considerazione gli statori che presentano i valori più alti e più bassi d'induzione. In seguito a quest'ottimizzazione ci saranno 6 motori che verranno analizzati dal punto di vista della coppia con le prove già utilizzate in precedenza. I range utilizzati per questa ottimizzazione sono riportati in tabella.

Tab.2.19

<i>Valore</i>	<i>Range</i>
X_{wedav}	4 ÷ 6
Y_{wedav}	2 ÷ 4
X_{wedbv}	0 ÷ 2
Y_{wedbv}	0 ÷ 2
Y_{wsor1}	0 ÷ 1
Y_{wsor}	1 ÷ 2
Y_{pv}	0 ÷ 2

Le variazioni che vengono fatte in ogni prova vanno a modificare la conformazione della cava, aumentandone o diminuendone l'area. Questo cambiamento della superficie dello slot è stato considerato, calcolando la variazione della superficie prima di ogni prova. L'area dello slot va ad incidere sul calcolo del potenziale e quindi anche sul valore del flusso prodotto.

Tab.2.20

<i>Motori con i valori minimi d'induzione</i>	
<i>Corona</i>	
<i>Geometria cava</i>	
<i>Parameto</i>	<i>Valore</i>
X_{wedav}	4
Y_{wedav}	2
X_{wedbv}	2
Y_{wedbv}	0
Y_{wsor1}	0
X_{wsor}	2
Y_{pv}	2
<i>Valore d'induzione</i>	
0.986576	
S_{slot}	
615.132 mm ²	
<i>Dente</i>	
<i>Geometria cava</i>	
<i>Parameto</i>	<i>Valore</i>
X_{wedav}	5
Y_{wedav}	2
X_{wedbv}	2
Y_{wedbv}	1
Y_{wsor1}	0
X_{wsor}	2
Y_{pv}	2
<i>Valore d'induzione</i>	
0.980836	
S_{slot}	

621.893 mm ²	
<i>Spigolo basso</i>	
<i>Geometria motore</i>	
<i>Parameto</i>	<i>Valore</i>
X_{wedav}	6
Y_{wedav}	4
X_{wedbv}	0
Y_{wedbv}	0
Y_{wsor1}	0
X_{wsor}	2
Y_{pv}	0
<i>Valore d' induzione</i>	
1.308597	
S_{slot}	
620.0661 mm ²	

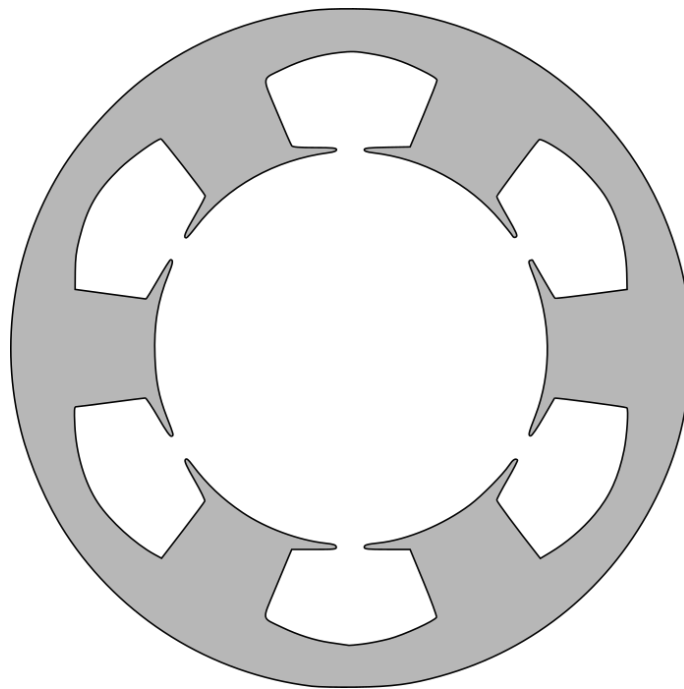


Fig.2.25 Statore con la minima induzione in corona

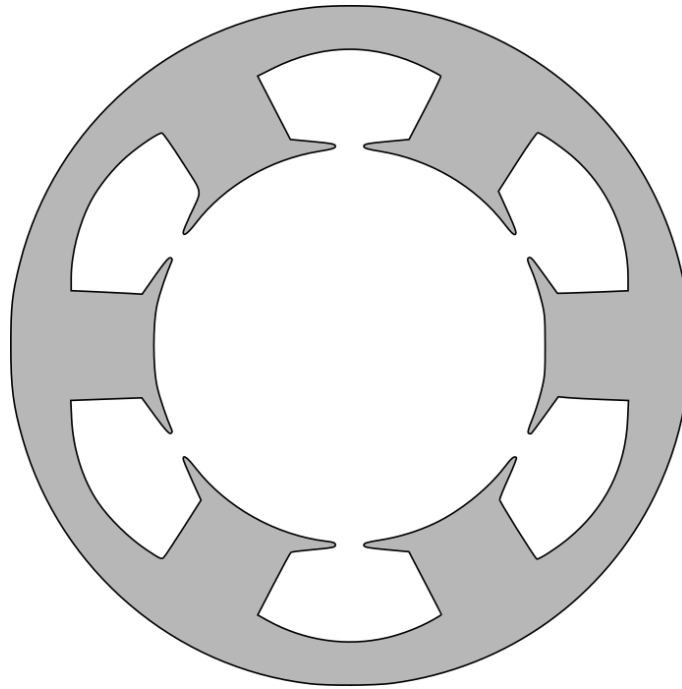


Fig.2.26 Statore con la minima induzione nel dente

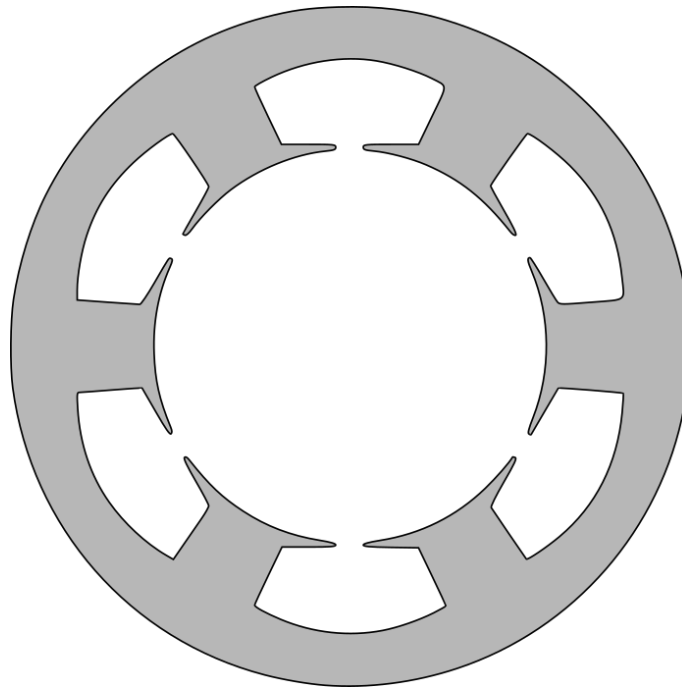


Fig.2.27 Statore con la minima induzione nello spigolo basso

Analizzando i tre statori, che hanno i valori minimi d'induzione, è possibile trovare delle similitudini tra le geometrie. L'aspetto più ricorrente è l'innalzamento della posizione dello spigolo alto, questo influisce sulla forma del dente e caratterizza di più l'andamento generale delle linee di flusso. In tutti i tre casi l'altezza dell'apertura di cava non è modificata rispetto la configurazione originale, e il dente è più stretto. Il fatto di avere denti allungati, e più stretti nella parte più bassa, porta ad una riduzione della densità di flusso, distribuendola su zone più ampie. Tutti e tre gli statori presentano un livello generale d'induzione ridotto rispetto a quello dello statore di base, questo consente di avere minor saturazione e di migliorare la forma d'onda della coppia in uscita, ma va ad influenzare negativamente

anche la percentuale di ripple. Il peggioramento delle prestazioni è dovuto al cambiamento della geometria della cava e alla variazione del potenziale che ne consegue. Considerando questo aspetto, che verrà analizzato in seguito, tra i risultati validi vengono presi in considerazione anche le geometrie che hanno registrato un aumento dell'induzione. Qui di seguito vengono riportati i risultati.

Tab.2.21

<i>Motori con i valori massimi d'induzione</i>	
<i>Corona</i>	
<i>Geometria cava</i>	
<i>Parameto</i>	<i>Valore</i>
X_{wedav}	6
Y_{wedav}	4
X_{wedbv}	0
Y_{wedbv}	0
Y_{wsor1}	1
X_{wsor}	1
Y_{pv}	0
<i>Valore d'induzione</i>	
1.193173	
S_{slot}	
586.917 mm ²	
<i>Dente</i>	
<i>Geometria cava</i>	
<i>Parameto</i>	<i>Valore</i>
X_{wedav}	5
Y_{wedav}	4
X_{wedbv}	0
Y_{wedbv}	0
Y_{wsor1}	1
X_{wsor}	1
Y_{pv}	0
<i>Valore d'induzione</i>	
1.186645	
S_{slot}	
565.879 mm ²	
<i>Spigolo basso</i>	
<i>Geometria cava</i>	
<i>Parameto</i>	<i>Valore</i>
X_{wedav}	4
Y_{wedav}	4
X_{wedbv}	2
Y_{wedbv}	2
Y_{wsor1}	1
X_{wsor}	1
Y_{pv}	2
<i>Valore d'induzione</i>	
1.779737	
S_{slot}	
529.006 mm ²	

Come nel caso precedente, anche in questi tre statori ci sono delle somiglianze nella geometria. In questa terna gli le cave lo spigolo alto è allargato orizzontalmente e abbassato, l'apertura di cava è leggermente alzata e lo spigolo basso è rimasto invariato, salvo per il terzo statore dove questo spigolo

è leggermente spostato. Questa vicinanza tra i parametri geometrici è dovuta ai range non troppo ampi utilizzati per l'ottimizzazione e alla struttura di base che già era ottimizzata. Le geometrie di questa terna consentono di avere delle induzioni più alte senza presentare zone con particolare saturazione. Anche in questo caso i vantaggi e gli svantaggi sono gli stessi delle tre configurazioni precedenti. Gli statori che sono stati individuati in questa ottimizzazione verranno uniti ai rotori ottimizzati e verranno analizzati dal punto di vista della coppia.

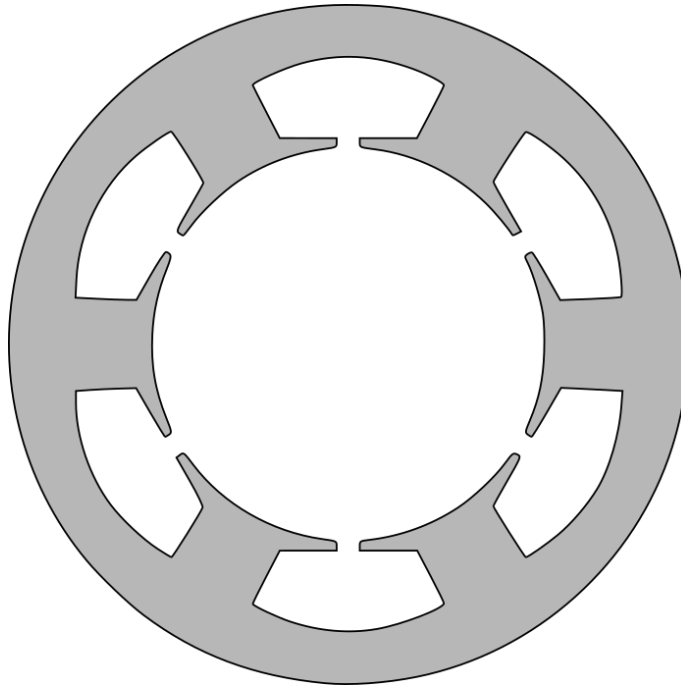


Fig.2.28 Statore con la massima induzione in corona

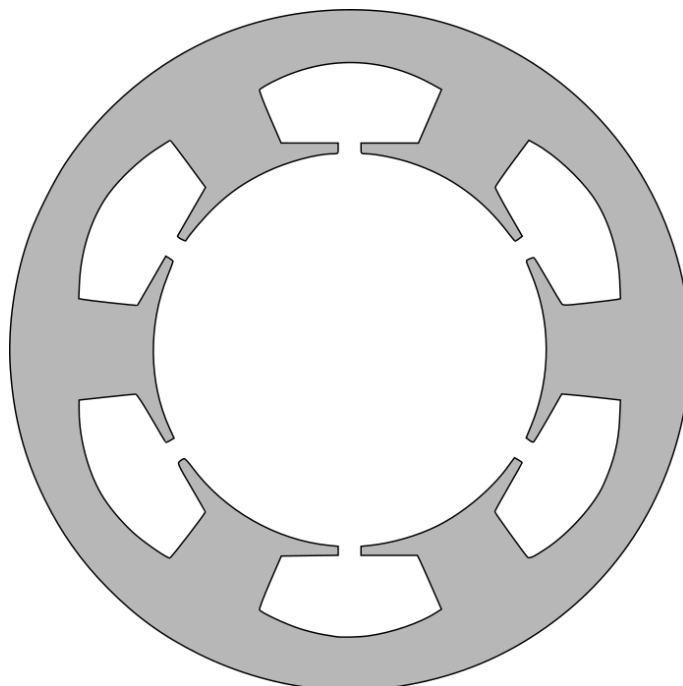


Fig.2.29 Statore con la massima induzione nel dente

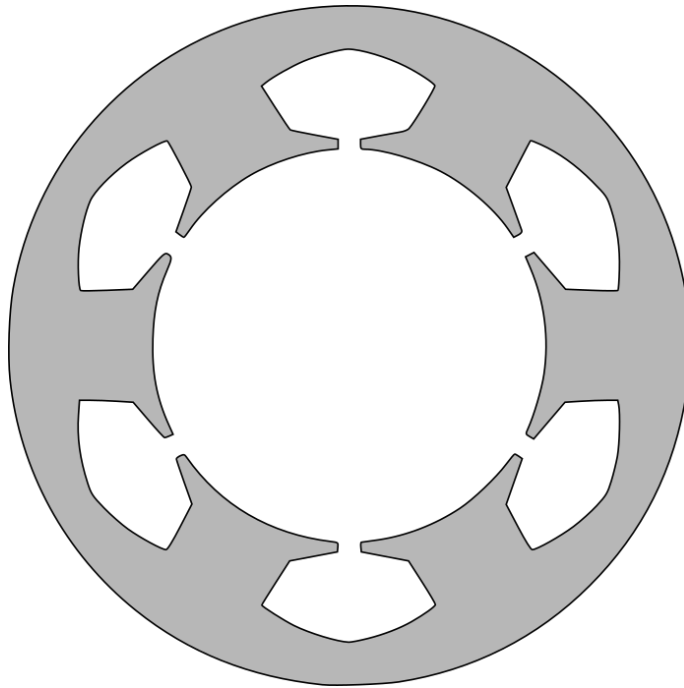


Fig.2.30 Statore con la massima induzione nello spigolo basso

2. 6 Unione tra statore e rotore ottimizzati

L'ottimizzazione dello statore è stata fatta tenendo conto del cambiamento del valore d'induzione legato alla variazione geometrica della cava. L'ottimizzazione delle induzioni nelle varie zone dello statore consente di agire sulle armoniche di ordine più elevato e di eliminarle. La modifica della geometria di cava va però a modificare l'area di quest'ultima, variando così il potenziale calcolato durante le prove. Questo fatto causa un variazione del flusso prodotto e quindi va a modificare direttamente le prestazioni del motore. Considerando che i rotori che vengono uniti con questi statori sono già ottimizzati, la percentuale di ripple non dovrebbe subire degli stravolgimenti ma potrebbe aumentare in modo considerevole. La stessa cosa vale per il valore della coppia media, quest'ultimo è direttamente legato ai flussi prodotti dallo statore, quindi la variazione dell'area di cava ha un influenza maggiore su questo parametro.

2.6.1 Unione con il rotore a 4 barriere

La prima serie di prove verrà svolta con il miglior rotore a 4 barriere ottenuto con l'ottimizzazione. In particolare viene preso il rotore con la minor percentuale di ripple in modo da non un peggioramento della percentuale di ripple troppo marcato. Qui di seguito vengono riportati i dati del rotore che verrà utilizzato con gli statori.

Tab.2.22

w_{bt}	w_{43}	w_{32}	w_{21}	β_1	β_2	β_3	β_{bt}	%Ripple	Parametro coppia
2 mm	4 mm	1 mm	2 mm	18°	27°	35°	15°	40.5094	4.57926

Terna con le induzioni minori

Corona

Il primo motore analizzato è l'unione tra lo statore con minore induzione in corona e il rotore ottimo. La configurazione dello statore riduce l'altezza dell'apertura di cava, stringe la parte bassa del dente e alza leggermente la punta della cava. Questa geometria tende a schiacciare le linee di flusso verso la parte bassa del dente e modifica l'interfaccia tra lo statore e le barre del rotore. L'andamento delle linee di flusso nel rotore, viene influenzato dallo statore e, vede una buona distribuzione delle linee di flusso nella parte alta dello statore con una tendenza a non concatenate la parte più interna del rotore.

L'andamento della coppia risente molto meno delle armoniche di ordine elevato e tende ad avere un'oscillazione ogni 5° gradi, ma risente di un grosso aumento del ripple e di una diminuzione della coppia media. Questo peggioramento delle prestazioni può identificarsi nel cambiamento della distribuzione delle linee di flusso e nel cambiamento dell'area della cava. In questo caso le linee di flusso tendono a concatenare meno la zona dell'albero interno, con i relativi svantaggi che ne possono conseguire e che sono già stati verificati con le prove parametriche, ma nel complesso hanno una distribuzione che elimina del tutto le distorsioni che caratterizzavano le configurazioni precedenti. L'altro aspetto da tenere in considerazione è il cambiamento dell'area dello slot di cava, questo è passato da 560 mm^2 a 615.132 mm^2 , portando ad una diminuzione del potenziale prodotto e di conseguenza anche del flusso prodotto dalla cava, oltre ad un aumento delle perdite.

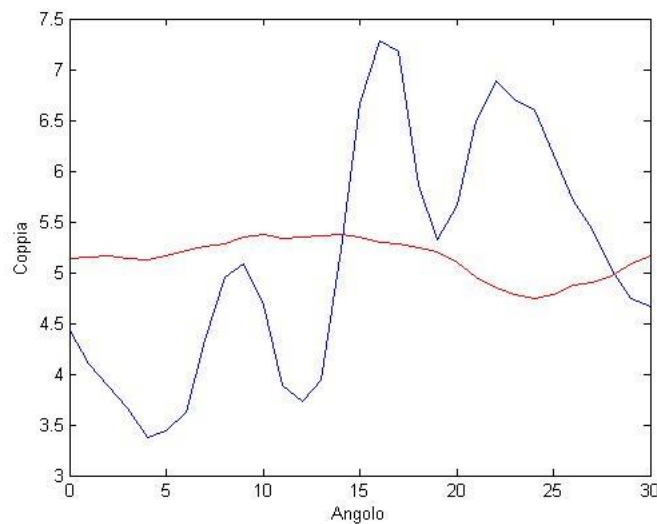
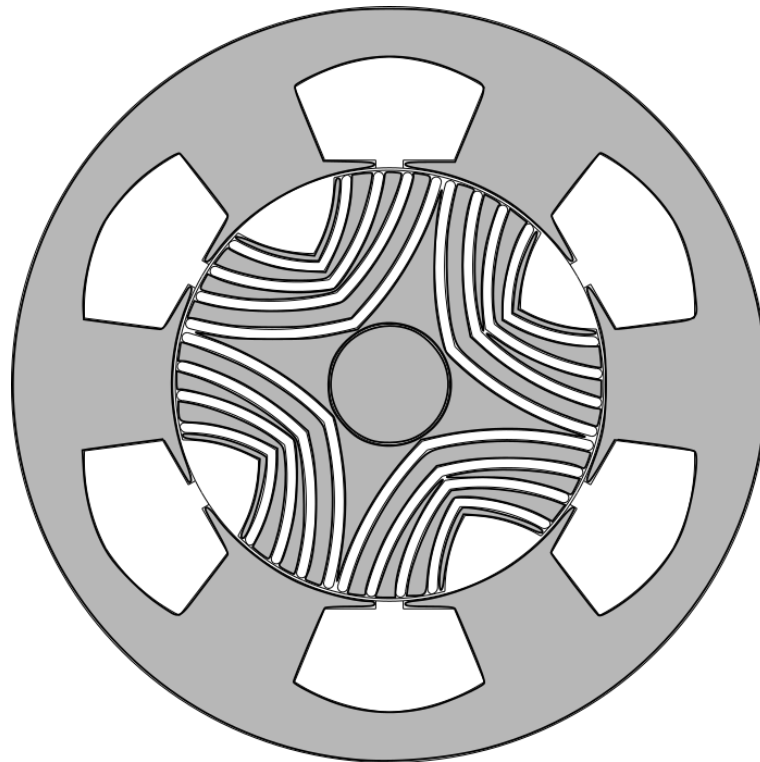


Fig.2.31 Motore analizzato nella prova e relativo andamento della coppia

Tab.2.23

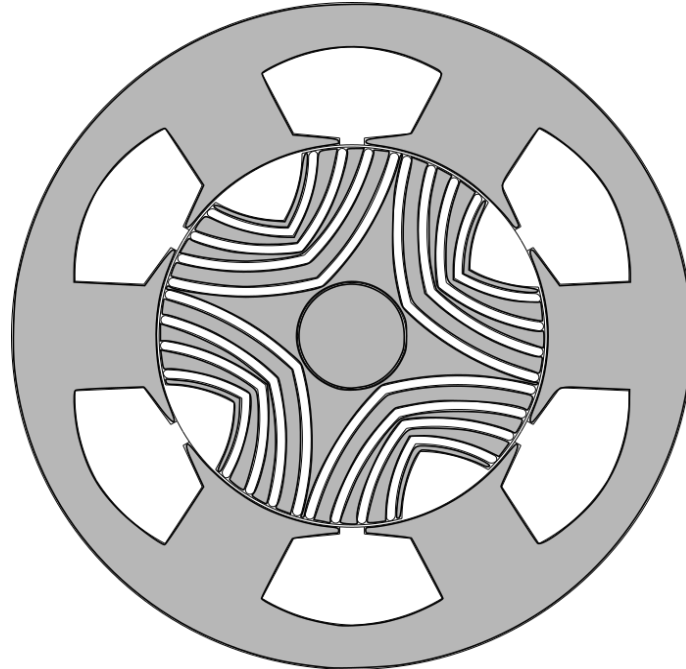
<i>% Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
76.499519	4.879671

Dente

In questa prova la geometria dello statore riduce l'induzione presente nel dente. Questa configurazione abbassa la posizione dello spigolo alto allargandolo in orizzontale, stringe lo spingolo basso e la parte bassa del dente, non cambia l'apertura di cava e aumenta l'altezza di cava. In generale la forma dello slot, nonostante il marcato aumento della sua area, è abbastanza simile a quella del prototipo di base conservandone le caratteristiche tipiche: spigolo superiore molto largo, spigolo basso più stretto e parte inferiore del dente più piccola. La distribuzione delle linee di flusso è molto omogenea e non presenta zone di saturazione. La forma d'onda della coppia è ottima, non presenta distorsioni e rispetta l'andamento di un picco ogni 5°, anche in questo caso le prestazioni sono peggiorate ma in modo meno marcato rispetto alla configurazione precedente. Il ripple è il 70%, peggiorato del 30 %, la coppia media è circa 5.5 Nm ed è in linea con le ottimizzazioni precedenti. In questo caso l'aumento dell'area di cava, è inferiore rispetto a quello registrato nella prova precedente e, ed è stato compensato dalla forma delle cave di statore, queste infatti hanno permesso una buona distribuzione delle linee di flusso sia nello statore che nel rotore, causando un aumento minore della percentuale di ripple. Il peggioramento delle prestazioni non è ancora accettabile e non può essere compensato dal miglioramento della forma d'onda.

Tab.2.24

<i>% Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
70.530111	4.813699



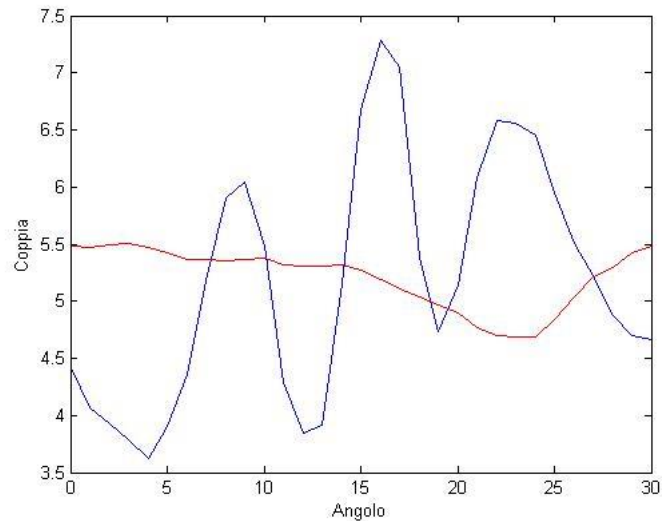


Fig.2.32. Motore analizzato nella prova e relativo andamento della coppia

Spigolo basso

In questo statore la cava viene allargata molto aumentando la larghezza dello spigolo alto e senza modificare gli altri parametri, solo la parte bassa viene leggermente stretta. La forma delle cave è molto larga e bassa, questo non aumenta di troppo l'area dello slot ma stringe molto i denti, causando una leggera saturazione lungo tutto il dente. Mediamente la concentrazione delle linee di flusso è distribuita solo su alcuni denti, questo crea un maggior divario tra le zone a maggiore e minore densità di flusso e forza molto l'andamento del flusso. Questo stesso andamento influenza anche il flusso che concatena il rotore e va a peggiorare le prestazioni, infatti causa il divario di densità tra le varie zone del rotore e determina una peggiore distribuzione delle linee di flusso. La forma d'onda è priva di distorsioni come nei due casi precedenti, ma in questo caso presenta una percentuale di ripple più elevata e una coppia media molto bassa. Il peggioramento delle prestazioni è in parte legato alle stesse cause rilevate nei due casi precedenti, ma è anche causato dalla geometria dello statore che forza molto le linee di flusso e che influisce direttamente anche sul concatenamento di queste nel rotore.

Tab.2.25

<i>% Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
77.817333	4.925791

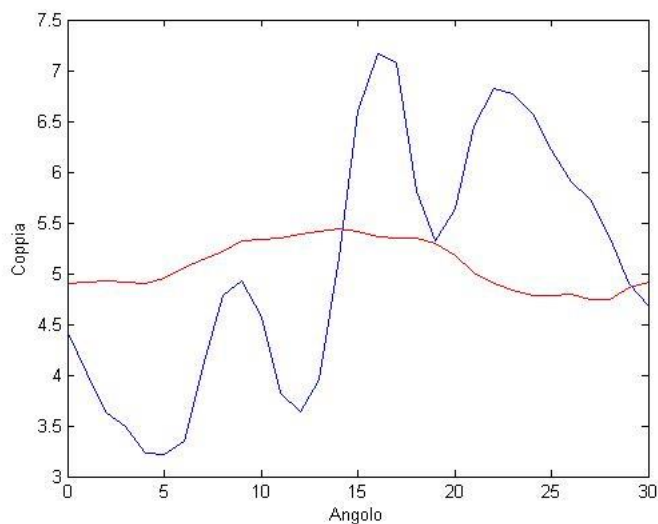
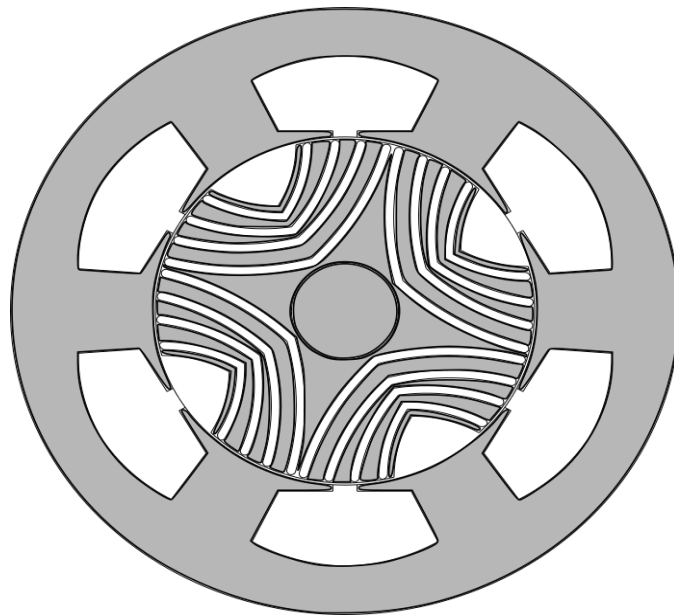


Fig.2.33 Motore analizzato nella prova e relativo andamento della coppia

Osservazioni sui risultati

Le analisi fatte su questa prima terna presentano un miglioramento della forma d'onda ed un peggioramento della percentuale di ripple e della coppia media. Questo peggioramento è dovuto al cambiamento del potenziale legato alla variazione dell'area delle cave e alla peggior distribuzione delle linee di flusso che interessa sia lo statore che il rotore. In tutti e tre i motori sono diminuiti i valori più bassi della coppia, questo ha aumentato l'entità dei picchi e influito in modo negativo sia sulla coppia media che sul ripple. Il fatto di aver migliorato la forma d'onda non compensa il peggioramento delle prestazioni ma può essere un punto di partenza per una nuova ottimizzazione del rotore. Dato che lo statore e il rotore sono stati progettati con una procedura che ottimizza le prestazioni, cambiare le dimensioni di base non sarebbe una buona scelta quindi il miglioramento dei motori ottenuti dalle varie ottimizzazioni sarà fatto cambiando la geometria dei componenti interni allo statore e al rotore.

Terna con le induzioni maggiori

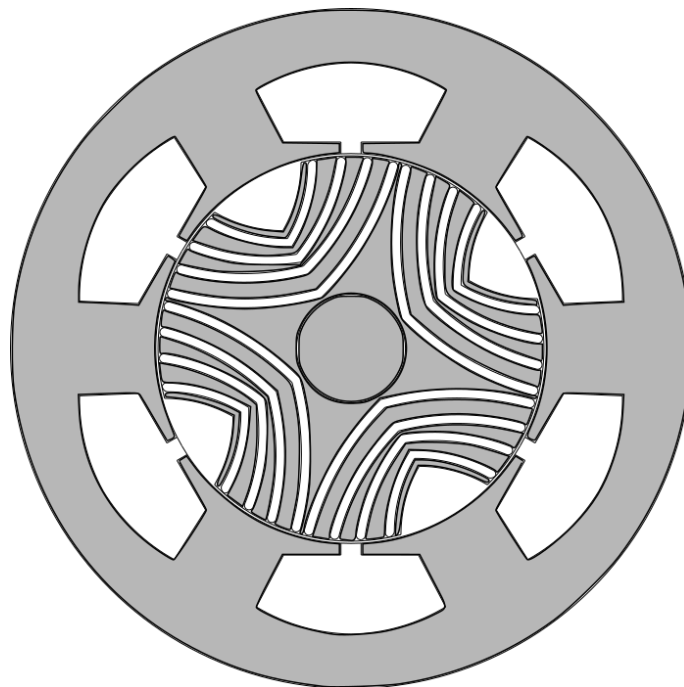
Qui di seguito vengono analizzati i tre statori con le induzioni maggiori accoppiati con il rotore ottimo a quattro barriere.

Corona

La geometria dello statore modifica principalmente lo spigolo alto della cava, allargandolo e abbasandolo. Il resto della geometria di cava rimane invariato, salvo per un restringimento della parte bassa del dente. In generale la forma della cava risulta leggermente più appuntita e tende a stringere le linee di flusso presenti nella corona. Sia nello statore che nel rotore non vengono registrate zone con particolare saturazione e la distribuzione delle linee di flusso è abbastanza omogenea. Le prestazioni risentono ancora dei peggioramenti registrati in precedenza nella stessa misura. Per quanto riguarda la forma d'onda, in questo caso si è ottenuto un improvement ulteriore rispetto ai casi precedenti.

Tab.2.26

<i>% Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
75.780344	4.807640



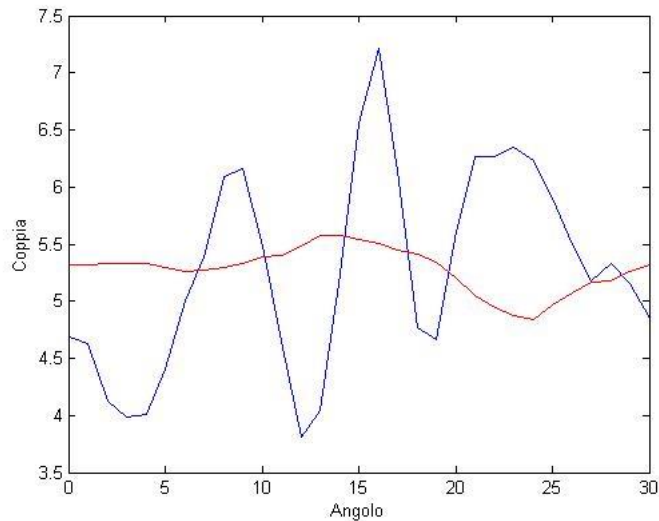


Fig.2.34 Motore analizzato nella prova e relativo andamento della coppia

Dente

La geometria delle cave in questo motore è abbastanza affine a quella del motore precedente, in questo caso però la forma degli slot è più arrotondata e meno appuntita. L'andamento delle linee di flusso è ottimale sia nello statore che nel rotore, infatti la sagoma del dente è più appiattita e indirizza meglio le linee di flusso verso il rotore. Per quanto riguarda il rotore, rispetto alle altre prove di questa ottimizzazione, la disposizione delle linee di flusso è più omogenea ma risente ancora di una riduzione di densità nella zona centrale del motore. La forma d'onda della coppia in uscita è molto buona e risulta leggermente distorta tra i 20° e i 30°, tuttavia la percentuale di ripple e il valore della coppia media compensano questo peggioramento della forma d'onda. Questi due parametri appena citati sono migliorati molto e si distaccano meno rispetto a quelli ottenuti con le ottimizzazioni precedenti. In questo caso l'area dello slot è aumentata di poco rispetto a quella del prototipo di base, questo ha permesso di avere una riduzione minore delle prestazioni e conferma l'influenza di questo parametro sulla percentuale di ripple e sul valore della coppia media. Va notato inoltre come la geometria dei denti sia di particolare importanza per la riduzione delle armoniche di ordine più elevato. Questo motore ha la maggior induzione media sui denti ed ha una geometria ideale per l'indirizzamento delle linee di flusso verso il rotore.

Tab.2.27

<i>% Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
62.002092	4.602626

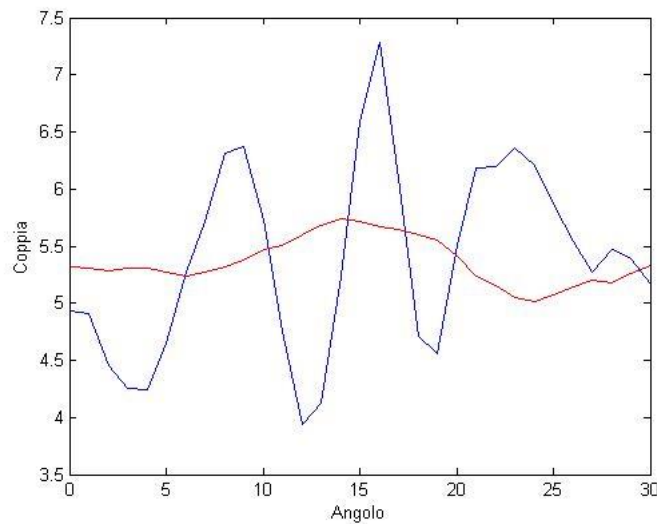
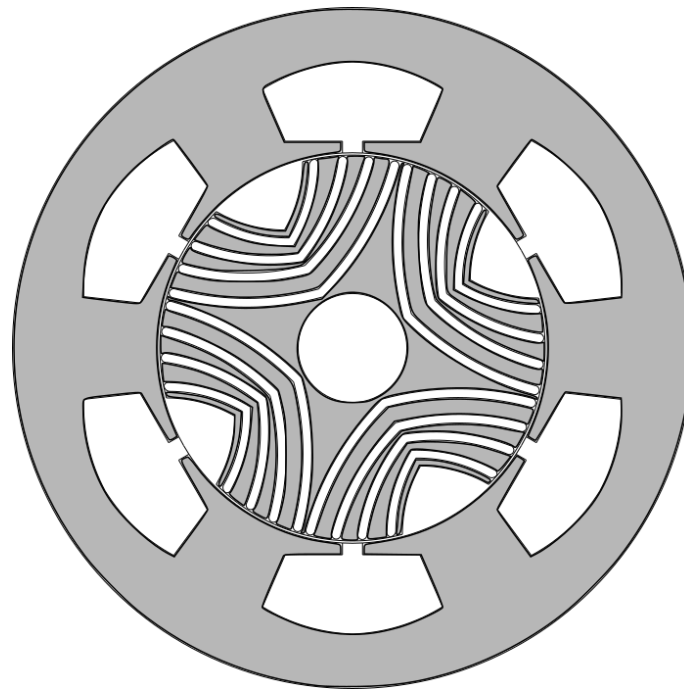


Fig.2.35 Motore analizzato nella prova e relativo andamento della coppia

Spigolo basso

In questo caso la geometria è simile a quelle precedenti ma vede un leggero innalzamento dell'altezza di cava e un restringimento della parte bassa del dente. La configurazione di questo motore ha una buona distribuzione delle linee di flusso sia nello statore che nel rotore, ma risulta peggiore, rispetto al motore precedente, nella parte bassa del dente. In questa zona tendono ad essere forzate, questo è legato anche alla maggior altezza della cava e del dente. Le linee di flusso vengono forzate di più a seguire la forma del dente, peggiorando così l'interfaccia tra statore e rotore. Le prestazioni risentono dell'aspetto appena descritto e riportano un leggero peggioramento delle prestazioni. La forma d'onda è affine a quello riscontrato nella prova precedente e non presenta una particolare distorsione. In generale si può notare come l'abbassamento della concentrazione delle linee di flusso verso la parte bassa del rotore, porti ad un peggior interfaccia tra statore e rotore. In questo motore l'area dello slot è aumentata abbastanza ma non nella misura da causare un peggioramento marcato delle prestazioni.

Tab.2.28

<i>% Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
64.524510	4.720146

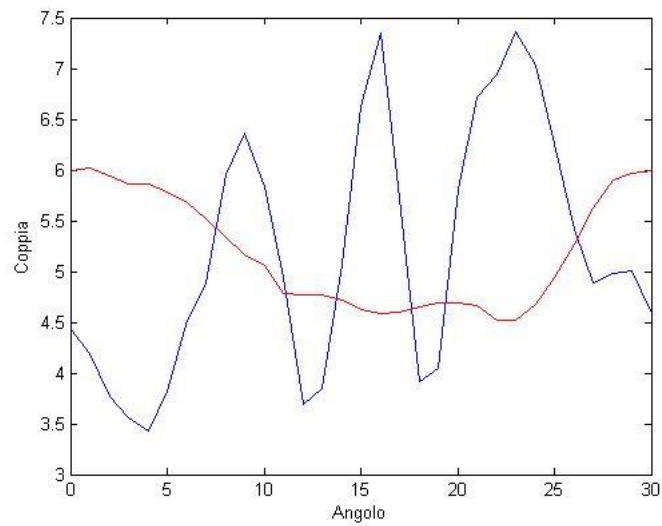
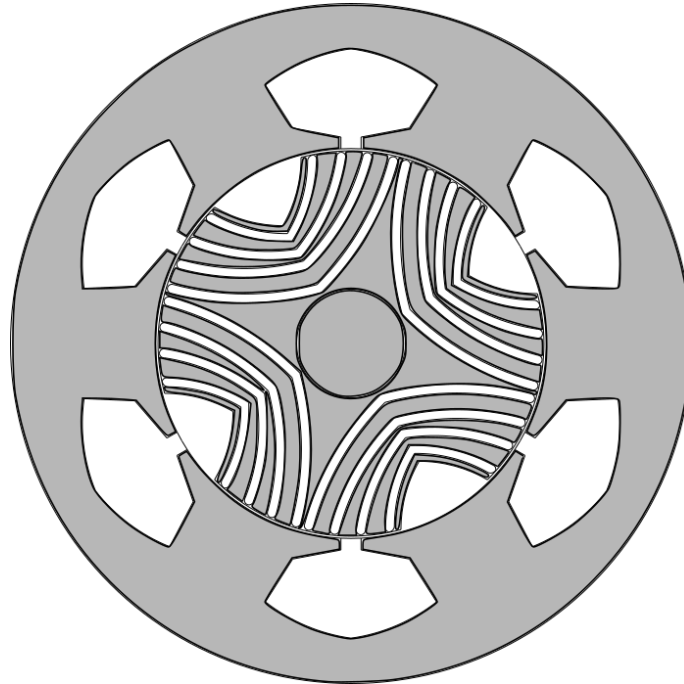


Fig.2.36 Motore analizzato nella prova e relativo andamento della coppia

Osservazioni sui risultati

Rispetto alla terna precedente, in queste prove l'area delle cave non ha subito particolari aumenti o diminuzioni, questo fatto ha migliorato le prestazioni ottenute riavvicinandole a quelle che erano state ottenute con lo statore del prototipo. Da queste prove è emerso come lo statore influenzi molto la

concatenazione delle linee di flusso nello statore. In particolare si può notare l'importanza di una distribuzione dei livelli d'induzione più bilanciata verso la parte centrale dei denti di statore. Il motore con le prestazioni migliori sarà oggetto di un'ulteriore ottimizzazione che servirà per correggere la posizione delle barriere e degli spazi del rotore. Questa ottimizzazione dovrebbe migliorare l'interfaccia tra lo statore e il rotore e portare un improvement delle prestazioni.

2.6.2 Unione con il rotore a 3 barriere

Il secondo ciclo di prove viene svolto su motore nati dall'unione tra gli statori ottimizzati e il rotore a tre barriere ottimizzato nell'ottimizzazione precedente. Di seguito vengono riportati i dati del rotore utilizzato nelle prove.

Tab.2.29

β_2	β_{bt}	w_{bt}	w_{43}	w_{32}	%Ripple	Parametro coppia
27°	16°	2 mm	5 mm	2 mm	39.8046	4.33885

In modo del tutto analogo alle prove precedenti, vengono suddivise le due terne di statori ottimizzati. La geometria dei motori, rispetto alle 6 prove precedenti, differisce solo per il rotore.

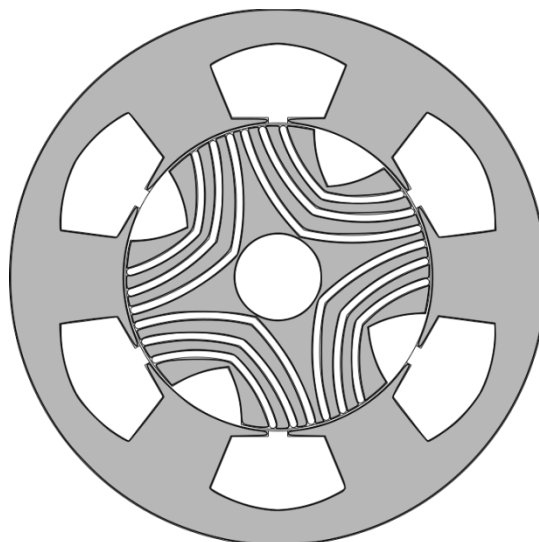
Terna con le induzioni minori

Corona

In questo motore la configurazione delle linee risulta migliore rispetto a quella del corrispettivo a 4 barriere. L'andamento nello statore è lo stesso, quello che cambia è l'interfacciamento tra statore e rotore, in questo caso infatti l'assenza della prima barriera aumenta la densità di flusso nella parte superiore dello statore e omogenizza la distribuzione delle linee di flusso nel rotore. Come i motori precedenti, anche in questo caso le prestazioni peggiorano, ma in modo meno marcato. Le problematiche sono le stesse descritte nei casi precedenti, ma in questo caso esercitano un'influenza negativa minore sulle prestazioni. La forma d'onda è analoga a quella ottenuta con il rotore a 4 barriere, l'unica differenza sta nella percentuale di ripple e nell'aumento della coppia media.

Tab.2.30

% Ripple	Parametro coppia
59.168095	4.784737



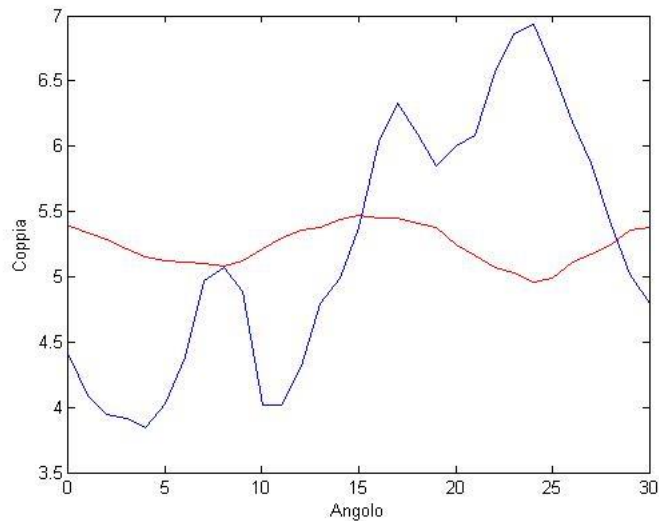


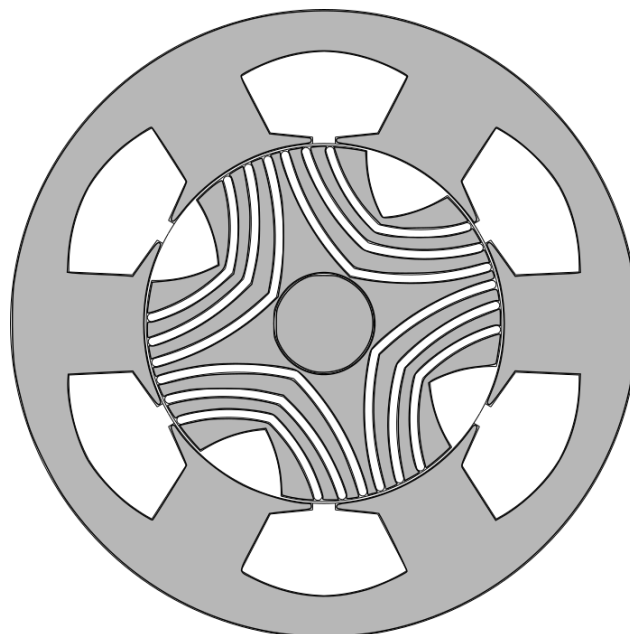
Fig.2.37 Motore analizzato nella prova e relativo andamento della coppia

Dente

La geometria di questo motore tende ad avere una leggera saturazione nella parte bassa del dente, questo va a forzare le linee di flusso modificandone l'entrata nello statore. La percentuale di ripple e il valore della coppia media sono molto buoni e si avvicinano ai risultati ottimizzati ottenuti con le prime ottimizzazioni. L'aspetto che è leggermente peggiorato è la forma d'onda; in generale l'andamento è molto buono, ma tra i 10° e i 20° ci sono delle leggere distorsioni dovute ad armoniche di ordine molto elevato che sono dovute alla forzature delle linee di flusso nella parte bassa del dente. Tuttavia gli improvement ottenuti compensano ampiamente il peggioramento della forma d'onda, che comunque risulta migliore di quelle ottenute con le ottimizzazioni precedenti.

Tab.2.31

<i>% Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
55.784118	4.695401



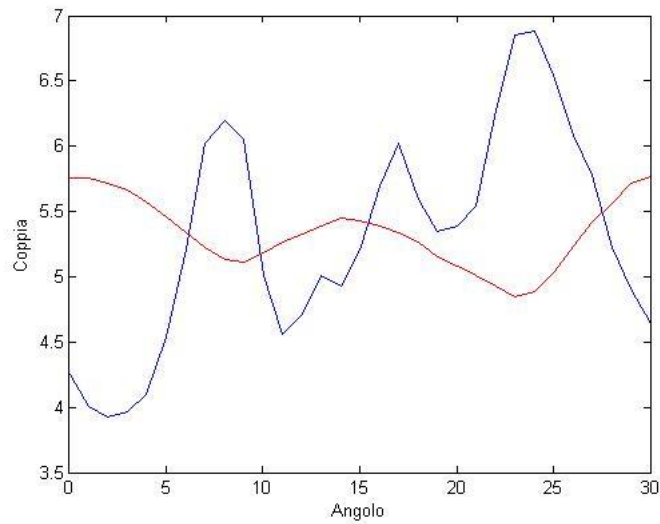


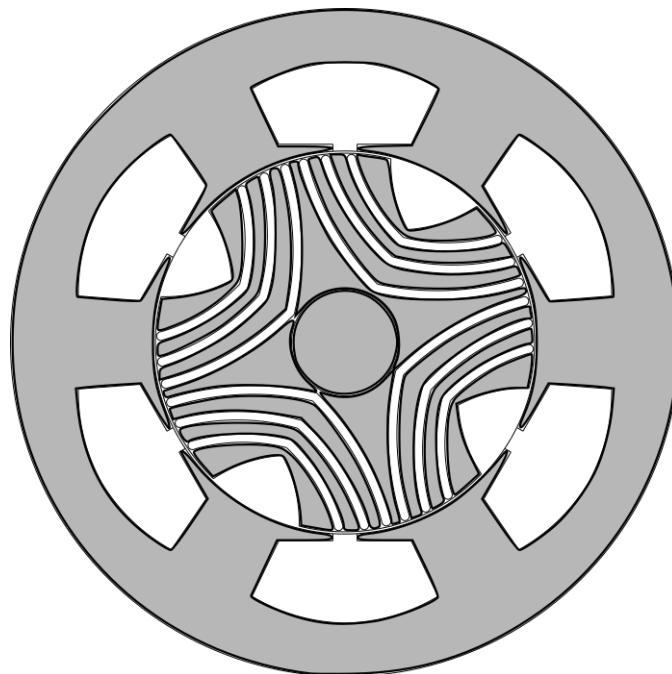
Fig.2.38 Motore analizzato nella prova e relativo andamento della coppia

Spigolo basso

In questo motore la distribuzione delle linee di flusso è più bilanciata verso lo statore, dove la dimensione delle cave e la ridotta altezza dell'apertura di cava, tendono a forzarne l'andamento. Il fatto di avere una la base del dente molto schiacciata forza l'entrata delle linee di flusso nel rotore e ne aumenta la curvatura durante la rotazione di questo. Tutti questi aspetti si riflettono in parte nelle prestazioni, ma soprattutto sulla forma d'onda della coppia in uscita. La percentuale di ripple e il valore della coppia media sono in linea con quelli di questa serie di ottimizzazioni. La forma d'onda è molto distorta e vede l'influenza di molte armoniche sia di ordine alto che di ordine più basso.

Tab.2.32

<i>% Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
59.156033	4.847345



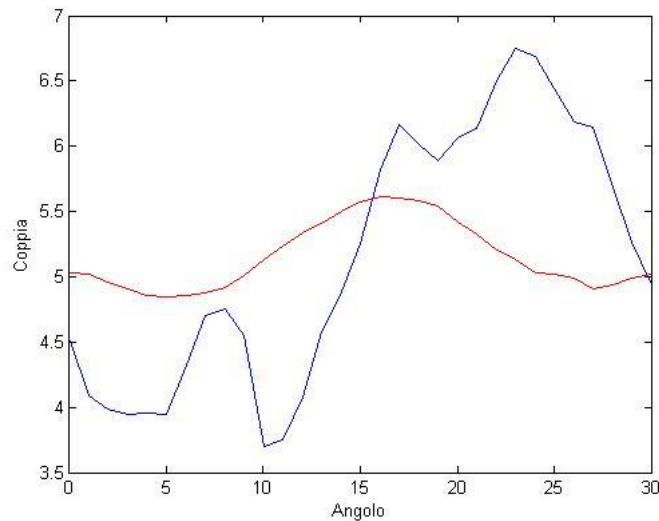


Fig.2.39 Motore analizzato nella prova e relativo andamento della coppia

Osservazioni sui risultati

In questo caso la geometria a tre barriere ottiene risultati nettamente migliori rispetto alle geometrie usate per le prove precedenti. Questo miglioramento delle prestazioni si può identificare nel miglior interfacciamento tra la nuova geometria dello statore e quella del rotore. Il miglioramento delle prestazioni ottenuto con questa prima terna di prove, conferma l'esigenza, una volta stabilita la miglior configurazione per lo statore, di ottimizzare il rotore.

Terna con le induzioni maggiori

Corona

La distribuzione delle linee di flusso risulta ottimale sia allo statore che al rotore. Non ci sono zone con saturazione, e l'interfaccia tra statore e rotore fa in modo che al rotore la densità delle linee di flusso sia ottimale e simile a quella del motore costruito con l'ottimizzazione. Le prestazioni sono abbastanza buone sia per quanto riguarda la percentuale di ripple che per la coppia media, questi due parametri infatti non sono molto lontani da quelli ottenuti con la prima ottimizzazione. La forma d'onda è notevolmente migliorata anche rispetto agli altri motori di questa ottimizzazione. L'entità della distorsione causata dal contenuto armonico è molto ridotta. Analizzando la forma d'onda è possibile notare due oscillazioni elevate tra i 5° e i 10°, queste due oscillazioni sono notevolmente più marcate rispetto alle altre e vanno a determinare l'elevata percentuale di ripple. A tal proposito, ottimizzando il rotore si può cercare di ridurre l'entità di queste due oscillazioni e ottenere così un grande improvement per quanto riguarda il ripple.

Tab.2.33

<i>% Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
53.664185	4.606429

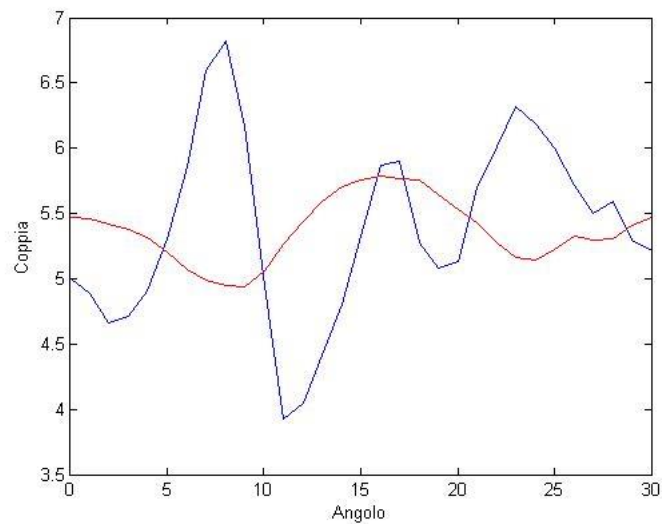
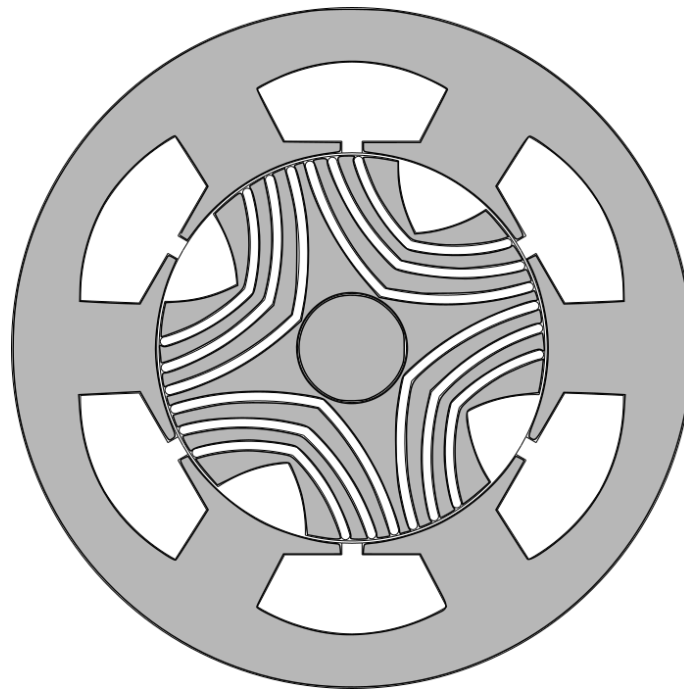


Fig.2.40 Motore analizzato nella prova e relativo andamento della coppia

Dente

Anche in questo caso l'interfaccia tra statore e rotore è ottimale, le due geometrie s'incastrano bene e consentono di avere una distribuzione omogenea e abbastanza affine a quella ottenuta con la prima ottimizzazione. La forma d'onda e le prestazioni sono migliorate, la percentuale di ripple è vicina a quella ottenuta con la prova precedente e la coppia media è più alta. La forma d'onda è identica a quella ottenuta in precedenza ed è molto buona, come nel caso precedente la percentuale di ripple è influenzata dalle due oscillazioni tra i 5° e i 15° . In questo caso l'aumento della coppia media è legato alla differente area dello slot di statore, infatti in questo motore questa è più piccola e molto simile a quella dello statore di base.

Tab.2.34

<i>% Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
56.354542	4.492348

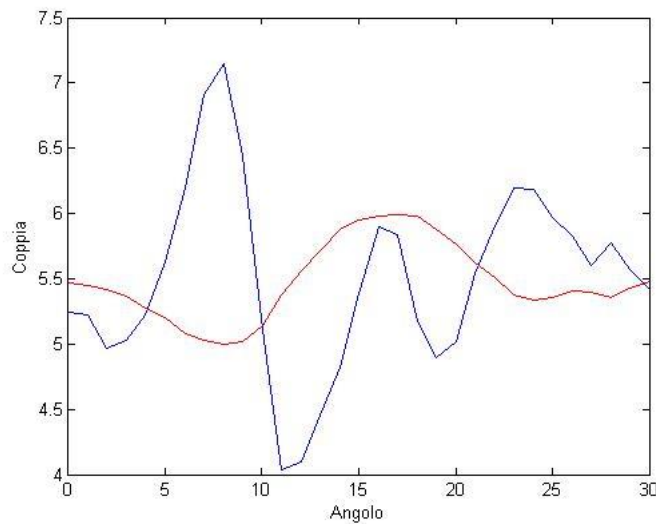
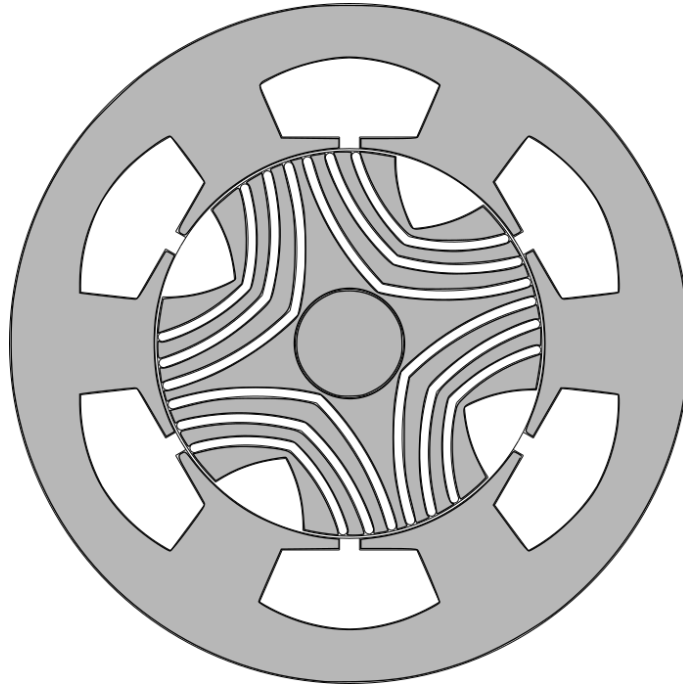


Fig.2.41 Motore analizzato nella prova e relativo andamento della coppia

Spigolo basso

In questo motore la forma delle cave presenta molti spigoli sia nella parte superiore che nella parte laterale, questo forza la curvatura delle linee di flusso e ne forza l'andamento. L'aspetto che risente di più della forma dei denti è l'interfaccia tra statore e rotore, infatti le linee di flusso tendono ad entrare nel rotore con una maggior curvatura. Quest'ultimo aspetto descritto, com'è stato osservato in precedenza, va ad influire negativamente sulla forma d'onda ma soprattutto sulla percentuale di ripple, aumentando l'entità delle oscillazioni di coppia. Le prestazioni del motore in questo caso sono peggiorate rispetto alle altre prove di questa terna. La percentuale di ripple è aumentata molto e le

oscillazioni sono mediamente più elevate di quelle ottenute con gli altri motori. La forma d'onda e la coppia media sono in linea con gli standard ottenuti fin ora, ma non compensano l'aumento di ripple.

Tab.2.35

<i>% Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
66.956309	4.642148

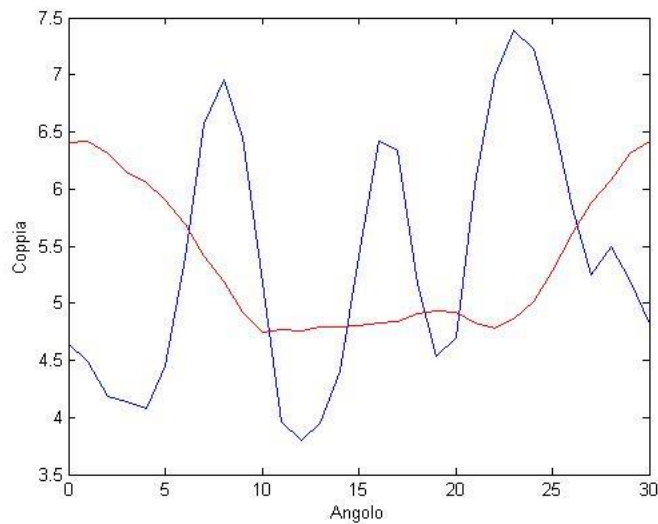
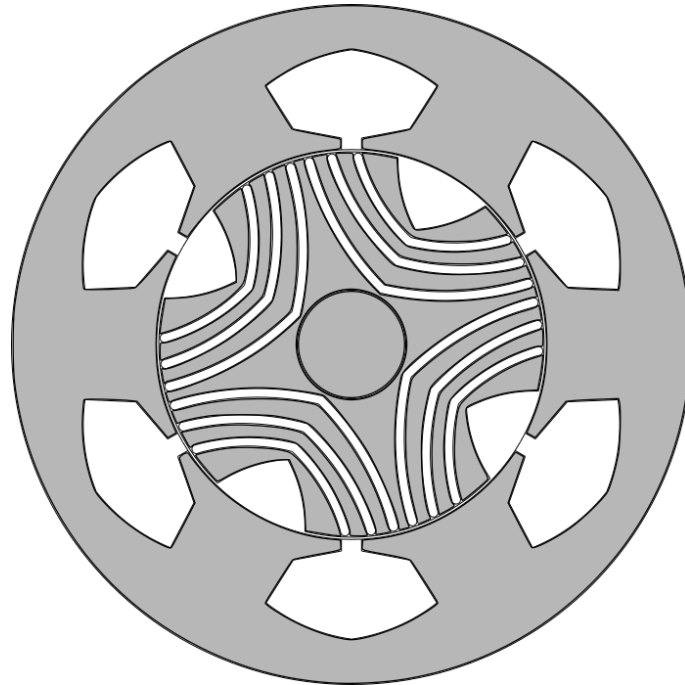


Fig.2.42 Motore analizzato nella prova e relativo andamento della coppia

Osservazioni sui risultati

In queste dodici prove i risultati hanno messo in luce la grande influenza che esercita la geometria di statore sulle prestazioni del motore. In generale il peggioramento delle prestazioni è stato accompagnato da un miglioramento della forma d'onda, in particolare del suo contenuto armonico. Analizzando l'andamento delle linee di flusso e la geometria generata dall'unione tra gli statori e i

rotori ottimizzati, l'interfaccia tra statore e rotore è risultata determinante per garantire una distribuzione del flusso, il possibile omogenea. I risultati migliori sono stati ottenuti nei motori con l'induzione media più alta, nella parte centrale dei denti di statore, e con le linee di flusso interfacciate meglio con il rotore. I motori con le prestazioni più alte sono quelli con le tre barriere, questo conferma un andamento già osservato in precedenza e conferma l'importanza del legame tra la geometria del rotore e la distribuzione delle linee di flusso. I motori ottenuti necessitano di un'ottimizzazione del rotore, infatti la variazione della configurazione dello statore ha influito troppo sulle prestazioni, rendendo necessario un adattamento della geometria. Questo non annulla i risultati precedenti ma mette in luce l'importanza del legame tra le geometrie dei vari componenti del motore. Come base per le ottimizzazioni verranno riprese le due geometrie migliori, una a quattro barriere e una a tre barriere, e ne verrà modificata la configurazione del rotore.

2.7 Seconda Ottimizzazione del rotore

Come si è potuto evincere dalle prove precedenti, al fine di migliorare le prestazioni dei motori si qui esaminati, è necessario proseguire con una seconda ottimizzazione della geometria del rotore. In particolare verranno ottimizzati due rotori, uno con quattro barriere e uno con tre barriere. Per il rotore a quattro barriere verrà utilizzato lo statore con la massima induzione nel dente, mentre per quello a tre barriere si utilizzerà quello con la massima induzione nella corona. Considerando le percentuali di ripple e le forme d'onda ottenute con i motori esaminati in precedenza, i due statori scelti per questa ottimizzazione risultano essere i più adatti a fornire risultati migliori. Per quanto riguarda lo svolgimento, questa ottimizzazione verrà sviluppata in due fasi, una prima fase in cui verranno ottimizzati solamente gli angoli e una seconda fase dove verranno presi in considerazione solo gli spazi. Questo serve sia a velocizzare le prove che a confermare le ipotesi fatte.

2.7.1 Ottimizzazione 4 barriere

Prima fase: Ottimizzazione degli angoli

Per questa ottimizzazione sono stati definiti dei range molto ristretti e derivanti dalle osservazioni fatte su tutte le prove precedenti. Rispetto alle precedenti ottimizzazioni fatte sui rotori a quattro barriere sono stati apportati due cambiamenti. In questo caso viene modificato anche l'angolo della quarta barriera con un range molto ridotto, questo serve per aumentare il canale tra i vari gruppi di barriere e aumentare così le linee di flusso che vengono concatenate nella parte più interna del rotore. L'altro cambiamento riguarda lo spazio tra il taglio superiore e la prima barriera, questo è stato leggermente ridotto in continuità con i risultati ottenuti nell'ottimizzazione delle punte. Per questa prima fase sono stati presi i seguenti range:

Tab.2.36

Angolo	Range
β_1	22 ÷ 24
β_2	28 ÷ 30
β_3	33 ÷ 35
β_4	42 ÷ 43
β_{bt}	16 ÷ 17

Questi range aumentano il ferro di rotore riducendo i gradi del taglio superiore, e ricompattano le barriere verso la parte più interna del rotore. Questo andamento appena descritto serve per adattare meglio le barriere all'andamento delle linee di flusso, aumentando la quantità di flusso concatenato col rotore. L'obiettivo principale di questa ottimizzazione è la riduzione della percentuale di ripple, l'ottimizzazione del contenuto armonico della forma d'onda è solamente un obiettivo secondario, infatti questo aspetto è già migliorato molto ottimizzando lo statore.

I parametri fissi sono riportati qui in tabella:

Tab.2.37

Parametro	Valore
W_{bt}	1.5 mm
W_{sb}	1 mm
W_{43}	3 mm
W_{32}	2 mm
W_{21}	2 mm
t^*	2 mm

*lo spessore di tutte le barriere è uguale

I risultati dell'ottmizzazione sono i seguenti:

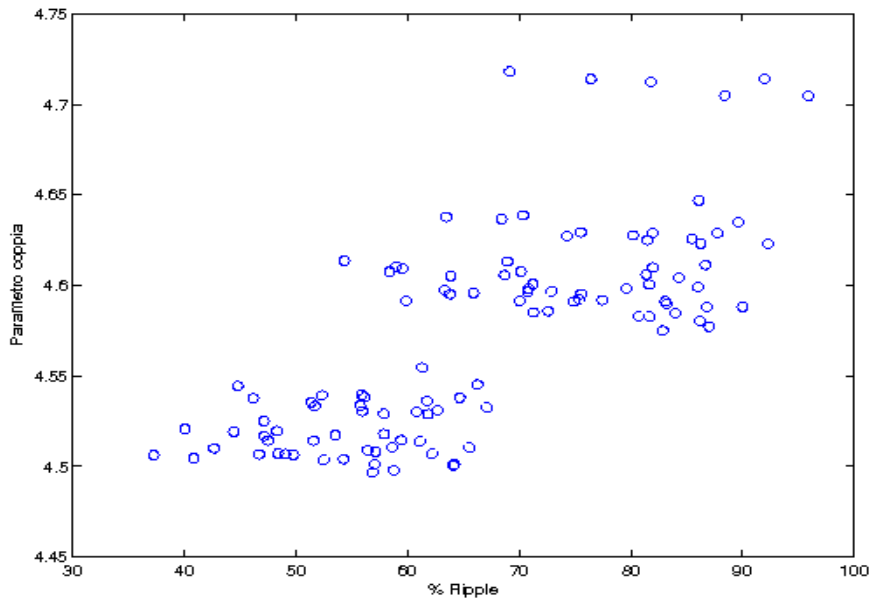


Fig.2.43 Parametri corrispondenti ai motori analizzati

Da questo grafico è stato ottenuto un fronte di pareto:

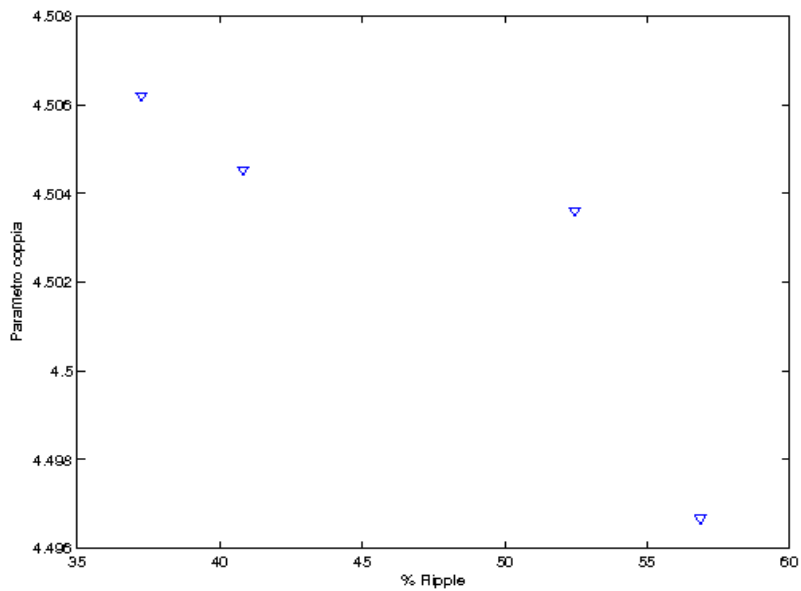


Fig.2.44 Fronte di pareto ottenuto dal grafico precedente

Il fronte di parete ottenuto è formato da quattro punti, i quattro motori che corrispondono presentano delle percentuali di ripple notevolmente migliori rispetto alle ultime prove svolte. In particolare ci sono due motori che hanno percentuali di ripple ottime. Qui di seguito vengono riportati i dati dei due motori migliori.

Tab.2.38

β_1	β_2	β_3	β_4	β_{bt}	%Ripple	Parametro coppia
22	28	34	42	16	37.2503	4.5062
22	29	34	42	16	40.8229	4.50453

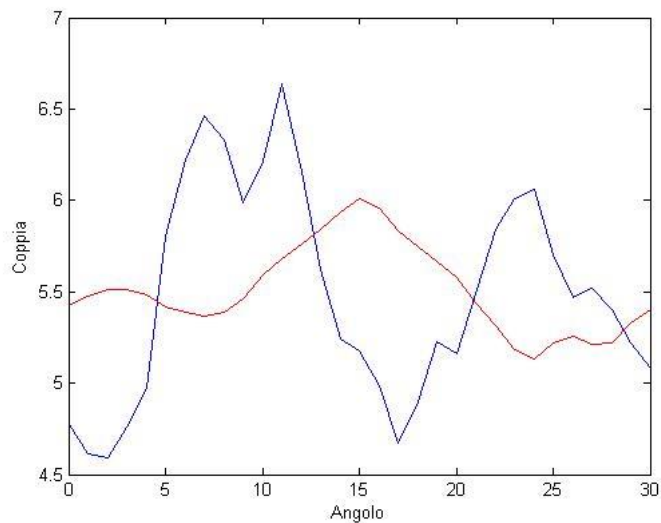
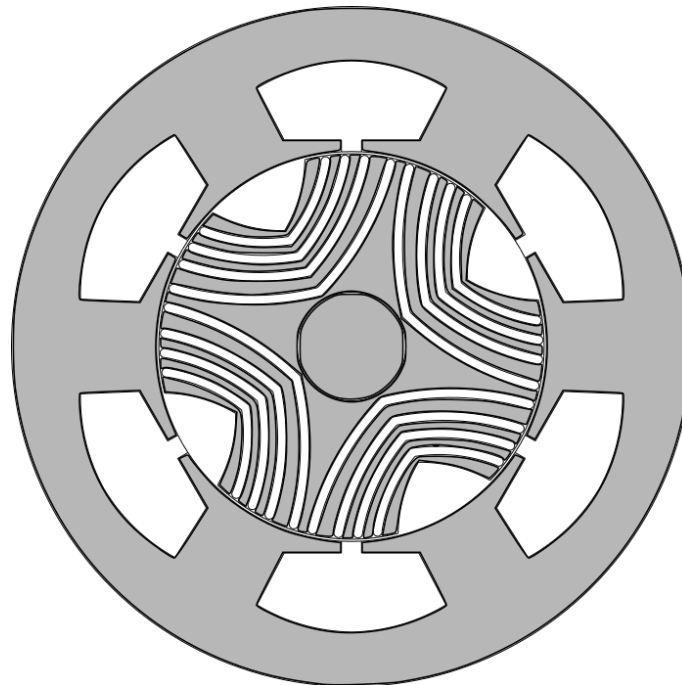


Fig.2.45 Motore con il 37% di ripple e relativo andamento della coppia

I due motori hanno delle geometrie molto simili, infatti il ripple e i valori della coppia media sono molto vicini tra loro. Le percentuali di ripple sono molto buone in entrambi i casi e, sebbene siano vicine a quelle trovate con le ottimizzazioni precedenti, presentano una forma d'onda migliore. L'influenza delle armoniche di basso ordine, la seconda in particolare, è molto forte ma viene

compensato dalla minor entità delle oscillazioni. Le armoniche di ordine più alto si sono ridotte molto, questo ha portato ad avere ogni dieci gradi. Questo aspetto andrà ad influenzare lo skewing che verrà applicato nelle prove successive, ma non comporta comunque un grosso problema.

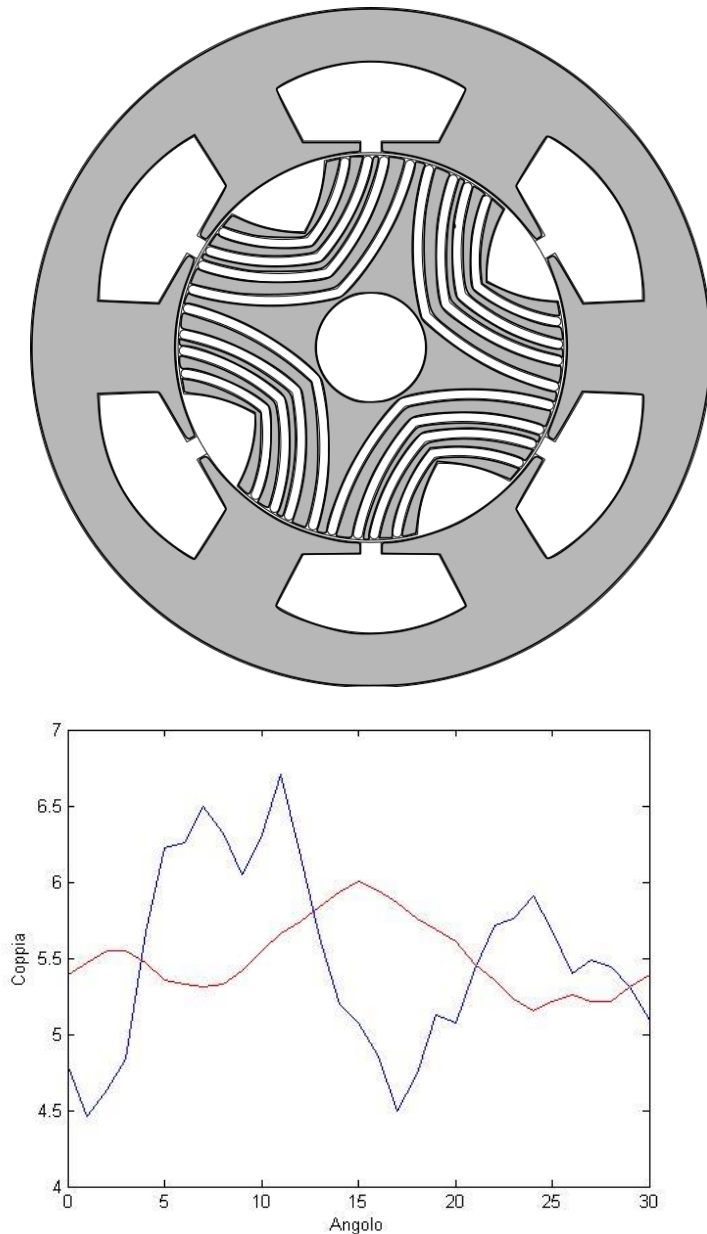


Fig.2.46 Motore con il 40% di ripple e relativo andamento della coppia

Seconda fase:Ottimizzazione spazi

In questa seconda fase, vengono ottimizzati gli spazi tra le barriere. I range utilizzati sono definiti nei dintorni dei valori utilizzati nella prima fase, infatti i buoni risultati ottenuti confermano la validità della configurazione utilizzata. I valori scelti per le varie combinazioni tendono ad allargare i canali tra le varie barriere interne, questo aspetto è utile per l'aumento della densità di flusso concatenata nel rotore. Tutti i range avranno una variazione di 0.5 mm per ogni step. Per quanto riguarda gli angoli delle barriere, questi sono fissati ai valori della combinazione migliore ottenuta nella prima fase. L'improvement portato dall'ottimizzazione dovrebbe interessare principalmente la percentuale di ripple e la riduzione di alcune armoniche, il valore della coppia media dovrebbe rispettare

l'andamento visto fin ora, ossia una leggera diminuzione di coppia man mano che la percentuale di ripple diminuisce. I range utilizzati delle prova sono i seguenti:

Tab.2.39

Spazio	Range
w_{43}	3 ÷ 4
w_{32}	2 ÷ 3
w_{21}	2 ÷ 3
w_{bt}	0.5 ÷ 2

I parametri fissi sono riportati nella tabella qui di seguito, tra questi ci sono anche gli spessori delle barriere, questi non sono stati variati, in continuità con quanto ottenuto con le prove precedenti.

Tab.2.40

Parametro	Valore
β_{bt}	16
β_1	22
β_2	28
β_3	34
β_4	42
t^*	2 mm

*lo spessore di tutte le barriere è uguale

Dalle prove sono stati ottenuti i seguenti risultati:

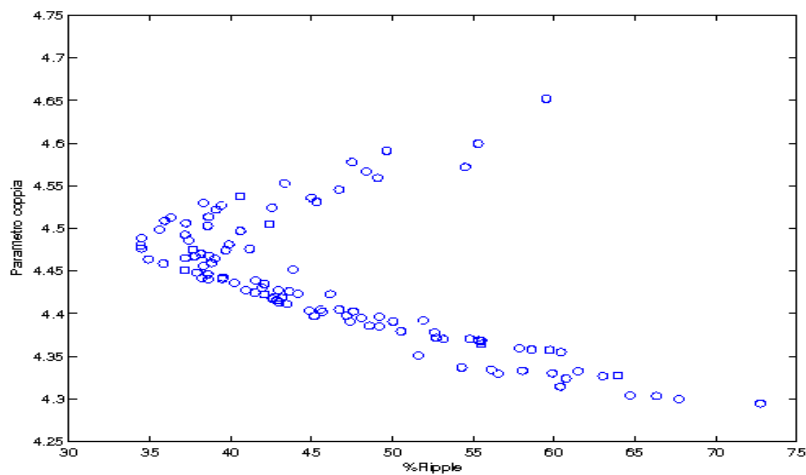


Fig.2.47 Grafico dei parametri dei motori analizzati

Da cui è stato ricavato un fronte di pareto:

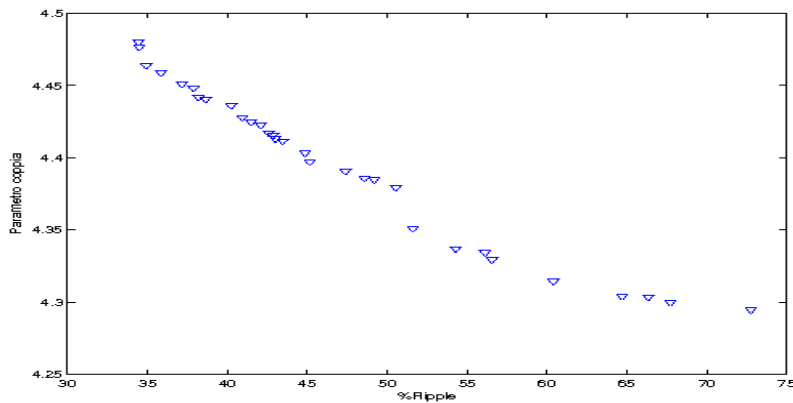
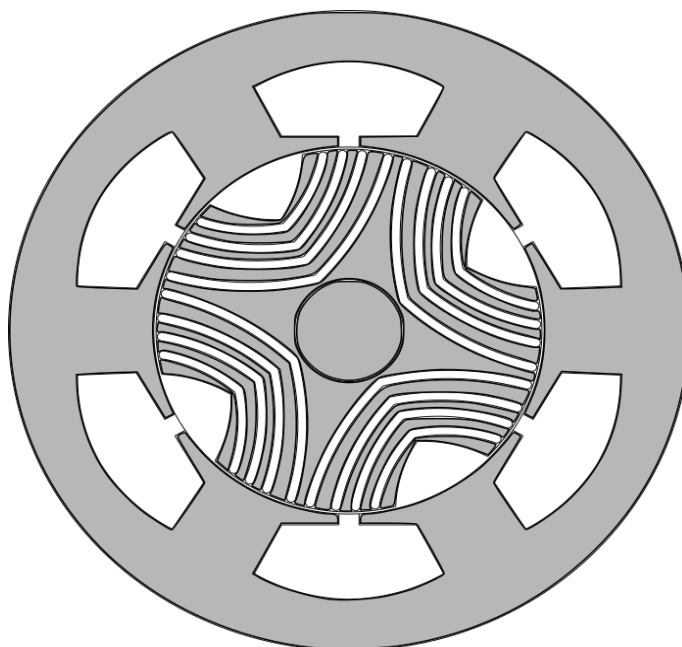


Fig.2.48 Fronte di pareto ricavato dal grafico precedente

Il fronte di pareto è formato da molti punti, alcuni dei motori appartenenti al fronte presentano una coppia media molto alta ma a questo aumento è legato anche un aumento della percentuale di ripple. Questi motori, nonostante l'incremento della coppia media, non verranno considerati, infatti l'aumento della percentuale di ripple è troppo elevato. I restanti 8 motori registrano una diminuzione della percentuale di ripple che si spinge fino al 34%. Le forme d'onda di questi motori sono tutte molto simili e vedono un andamento simile a quello ottenuto nella prima fase, con una grossa influenza della seconda armonica e delle distorsioni causate da armoniche più alte. I dati dei motori migliori sono riportati qui di seguito:

Tab.2.41

w_{bt}	w_{43}	w_{32}	w_{21}	%Ripple	Parametro coppia
0.5	3	3	3	34.9277	4.46374
0.5	3.5	3	3	38.6414	4.44053
0.5	4	2.5	3	38.1959	4.44177
1	3	2	3	34.485	4.47645
1	3	2.5	2.5	34.4455	4.48018
1	3	3	2.5	37.8969	4.44808
1	3.5	2.5	2.5	37.1696	4.45088
1	3.5	3	2	35.8429	4.45875



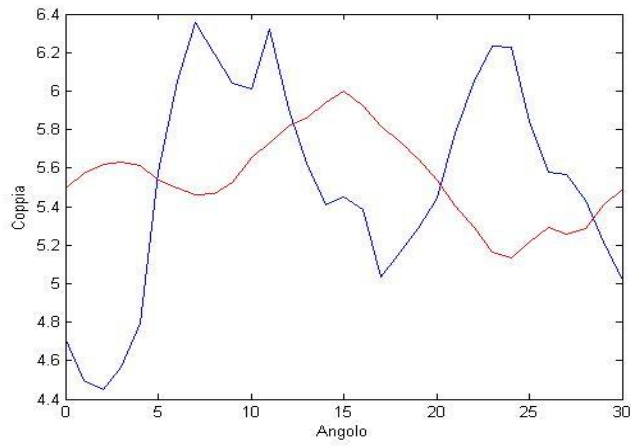


Fig.2.49 Motore con il 34.48% di ripple con relativo andamento della coppia

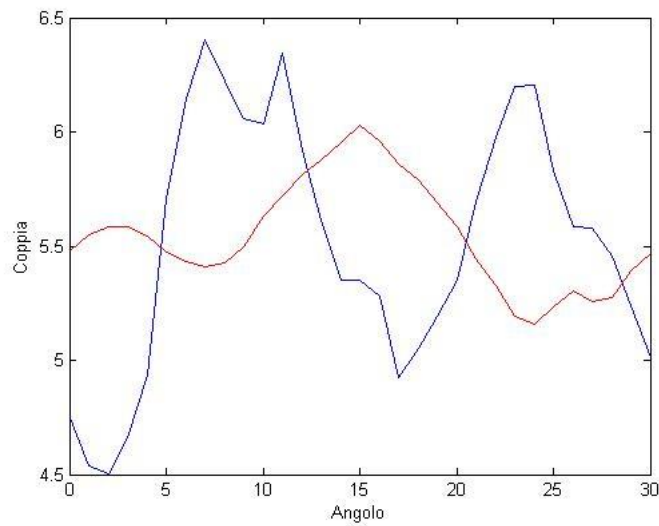
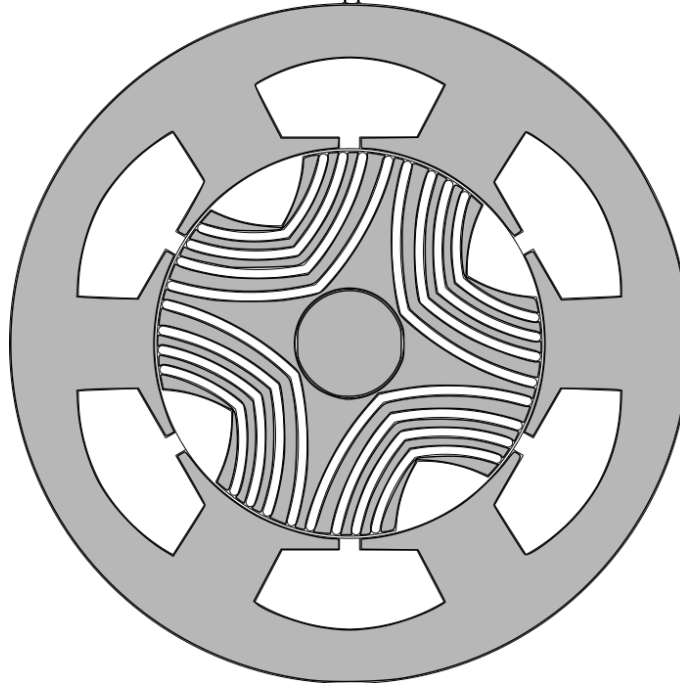


Fig.2.50 Motore con il 34.44% di ripple e relativo andamento della coppia

Osservazioni

I risultati ottenuti nell'ottimizzazione del rotore a quattro barriere sono soddisfacenti e rispettano le varie ipotesi fatte man mano che si procedeva con le ottimizzazioni. A questo punto è possibile ricercare un ulteriore improvement delle prestazioni utilizzando lo skewing per i risultati migliori. Data la tipologia delle forme d'onda ottenute, i risultati migliori verranno ottenuti con valori di skewing più alti. Oltre ad utilizzare lo skewing, sarà molto importante completare l'analisi dei motori migliori con le prove che non sono state svolte fin ora.

2.7.2 Ottimizzazione 3 barriere

Prima fase: Ottimizzazione angoli

Utilizzando lo stesso modo operandi utilizzato per le quattro barriere, vengono definiti i range da utilizzare per ottimizzare il rotore a tre barriere. In questo caso le barriere hanno angoli più bassi, in particolare la quarta barriera è più alta e aumenta la quantità di flusso che viene concatenato nella parte più interna del rotore. L'abbassamento degli angoli delle barriere è legato alla maggior quantità di spazio comportata dall'assenza di una barriera. Per quanto riguarda gli spazi tra le barriere, questi sono ripresi dai motori ottimizzati ottenuti in precedenza, in particolare vengono aumentati certi spazi, in modo da avere dei canali più ampi e maggiore simmetria nella disposizione delle barriere. I range utilizzati per questa ottimizzazione sono i seguenti:

Tab.2.42

Angolo	Range
β_2	25 ÷ 27
β_3	33 ÷ 35
β_4	42 ÷ 42
β_{bt}	14 ÷ 16

I parametri fissi sono:

Tab.2.43

Parametro	Valore
w_{bt}	2 mm
w_{sb}	1 mm
w_{43}	5 mm
w_{32}	3 mm
t^*	2 mm

*lo spessore di tutte le barriere è uguale

I risultati ottenuti sono i seguenti:

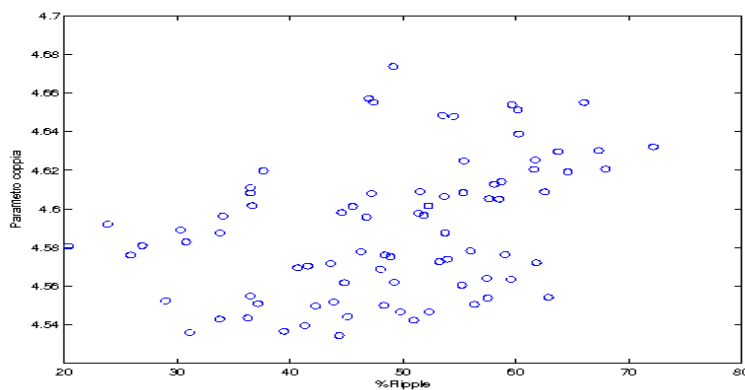


Fig.2.51 Grafico dei parametri dei motori analizzati

Da questi risultati è stato ottenuto il seguente fronte di pareto:

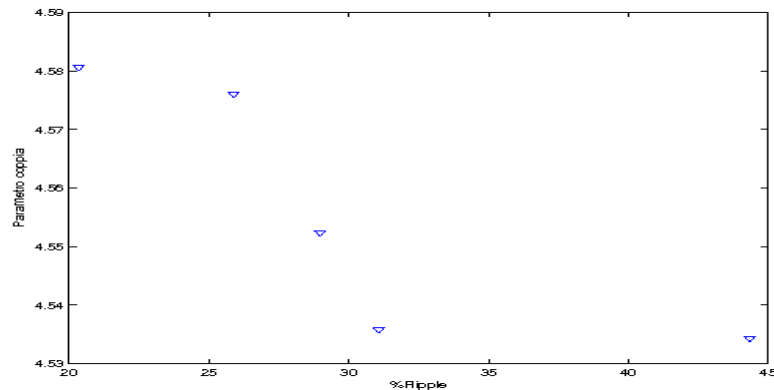


Fig.2.52 Fronte di pareto ottenuto dal grafico precedente

Con il fronte di pareto sono stati ottenuti cinque motori ottimi, questi hanno delle ottime percentuali di ripple che vanno dal 44% al 20%. Anche i valori della coppia media sono molto buoni e in linea con i risultati fin ora ottenuti, il valore di coppia si attesta più o meno sui 5.5 Nm. L' miglioramento maggiore è stato ottenuto per la percentuale di ripple, questa si è praticamente dimezzata rispetto alle prove precedenti. Questo miglioramento è dovuto al miglioramento dell' interfaccia tra statore e rotore, in particolare questo lo si può notare nell' entità ridotta delle oscillazioni. L' andamento della forma d' onda della coppia vede una grossa influenza delle armoniche di ordine più alto e una ridotta presenza di armoniche di ordine più bass, questo lo si può registrare nella presenza di un' oscillazione all' incirca ogni 5 gradi. Questo andamento è presente solo nei motori con le percentuali di ripple al di sotto del 40%, infatti il motore con il 44% di ripple presenta un andamento molto simile a quello ottenuto per i rotori a 4 barriere. I risultati ottenuti sono molto buoni e sono una sorta di punto di arrivo per le ottimizzazioni, un ulteriore miglioramento sarebbe difficile da ottenere. Nonostante la bontà dei risultati, è comunque necessario procedere con la seconda fase e ottimizzare anche gli spazi, infatti è possibile ottenere dei miglioramenti per quanto riguarda la forma d' onda la coppia media. Va inoltre considerato lo skewing che verrà applicato in seguito, questo dovrebbe migliorare ulteriormente la percentuale di ripple, riducendola. Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti.

Tab.2.44

β_1	β_2	β_3	β_4	β_{bt}	%Ripple	Parametro coppia
18	25	33	40	16	44.345	4.53434
18	26	34	40	16	31.0687	4.53582
18	26	35	40	16	20.3477	4.58061
18	26	35	41	16	25.8866	4.57606
16	27	34	40	16	28.9746	4.55235

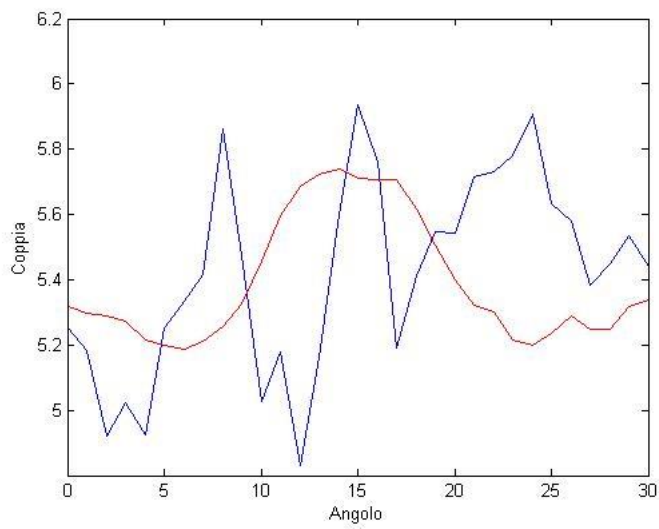
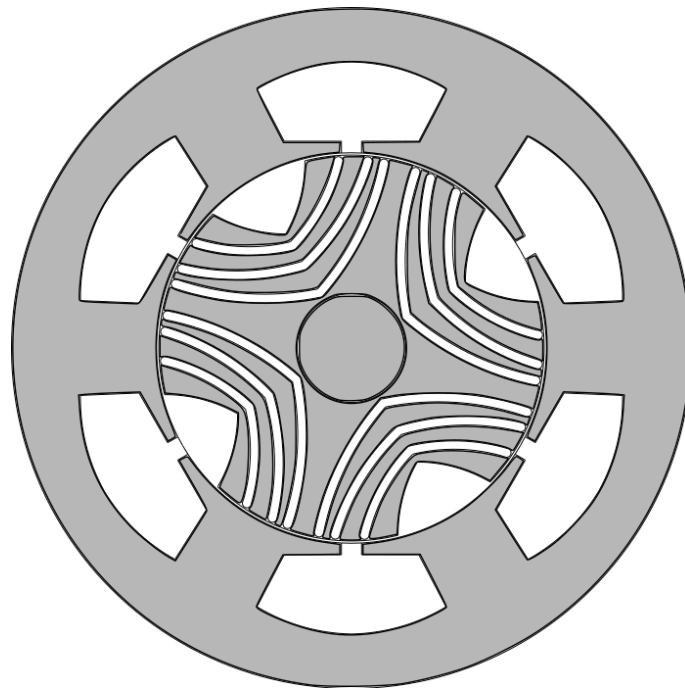


Fig.2.53 Motore con il 20% di ripple e relativo andamento della coppia

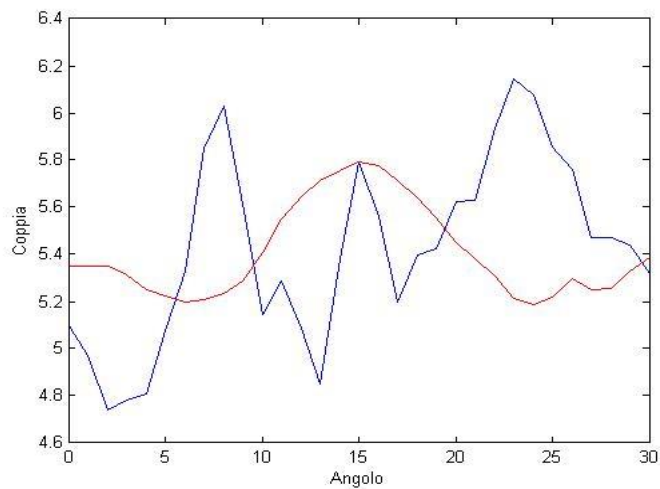
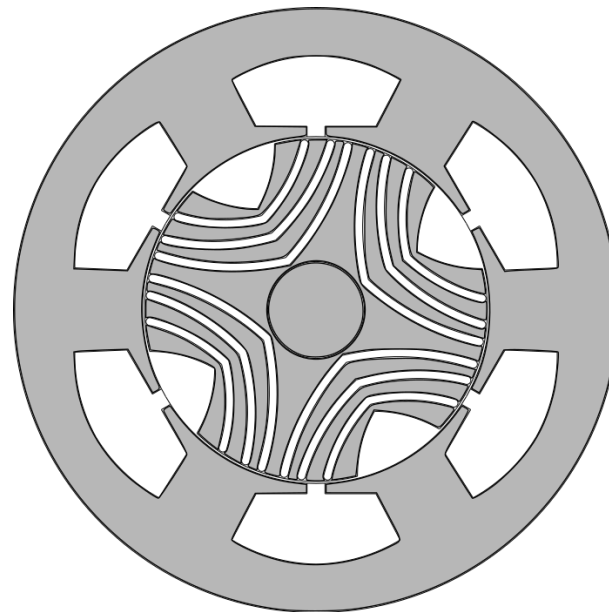


Fig.2.54 Motore con il 26% di ripple e relativo andamento della coppia

Fase due: Ottimizzazione degli spazi tra barriere

Come fatto in precedenza, come primo passo vengono definiti dei range da utilizzare per l'ottimizzazione degli spazi. I range da utilizzare vengono presi nei dintorni degli spazi già utilizzati nella prima fase, in particolare, visti i buoni risultati ottenuti, i vari spazi verranno variati di mezzo millimetro, in modo da rendere l'ottimizzazione più accurata. Come già detto, i range sono stati presi nei dintorni dei valori fissati nella fase 1, questo è dovuto al fatto che i valori degli spazi tra le barriere utilizzati in precedenza consentono di avere dei buoni canali tra le barriere e permettono una buona concatenazione delle linee di flusso. Per quanto riguarda gli angoli delle barriere, questi vengono tenuti fissi ai valori del miglior rotore ottenuto con la prima fase. Nella tabella vengono riportati i dati utilizzati.

Tab.2.45

Spazio	Range
w_{43}	4 ÷ 6
w_{32}	1 ÷ 3
w_{pt}	0.5 ÷ 2

I parametri fissi sono:

Tab.2.46

Parametro	Valore
β_{bt}	16
β_2	26
β_3	35
β_4	40
t^*	2 mm

I risultati ottenuti sono i seguenti:

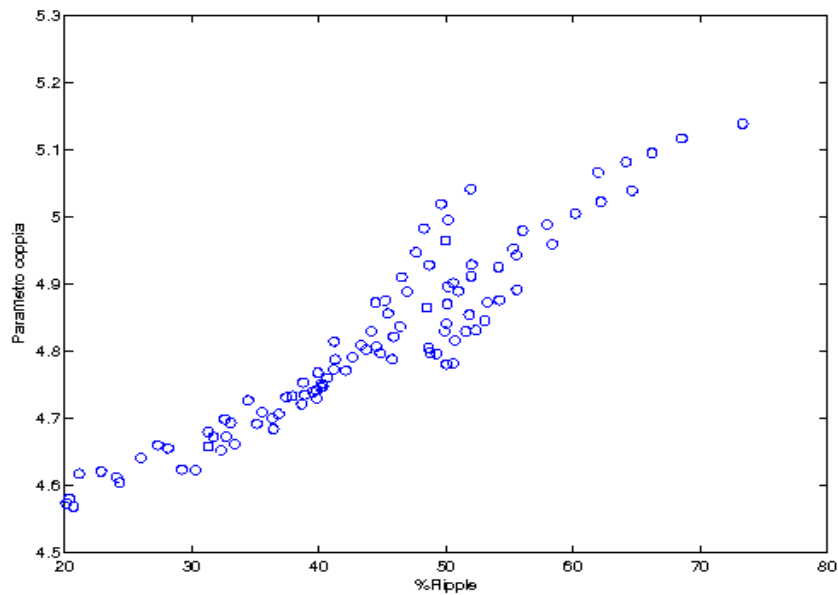


Fig. 2.55 Punti dei parametri dei vari motori

Da questi risultati è stato ottenuto il seguente fronte di pareto:

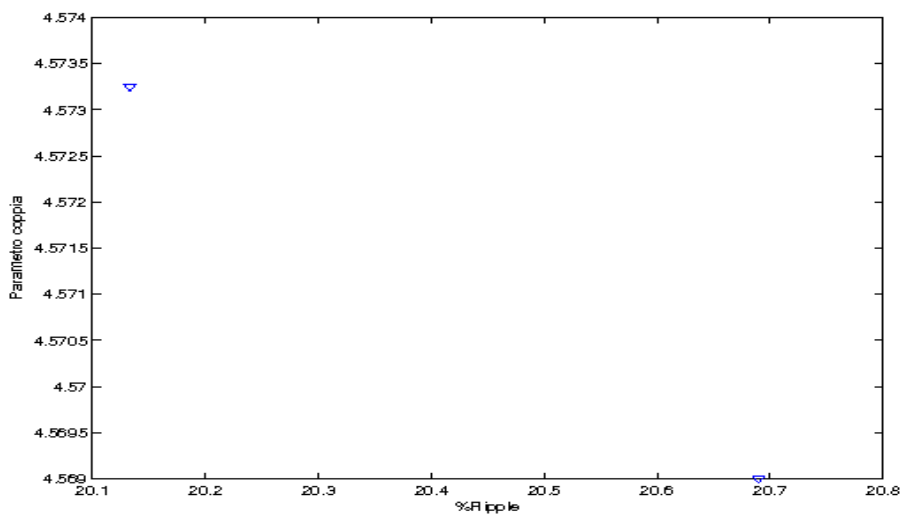


Fig.2.56 Fronte di pareto ottenuto dal grafico precedente

I motori migliori sono solamente due, entrambi hanno il 20% di ripple ed entrambi hanno più o meno la coppia con lo stesso valor medio. Per quanto riguarda la forma d'onda, questa in entrambi i casi è

affine a quella ottenuta in precedenza, in questo caso però le oscillazioni mediamente sono leggermente più piccole. Osservando l'andamento della coppia si può rilevare un contenuto armonico del tutto affine a quello ottenuto nella prima fase. L'improvement ottenuto in questa seconda fase risiede principalmente nella leggera riduzione delle oscillazioni che mediamente interessano la coppia, sebbene i picchi maggiori siano più grandi e quindi il ripple sia leggermente maggiore, la riduzione dei picchi migliori denota una riduzione delle armoniche di ordine più alto. Qui di seguito vengono riportati i risultati ottenuti.

Tab.2.47

w_{bt}	w_{43}	w_{32}	%Ripple	Parametro coppia
2	5.5	3	20.1331	4.57325
2	6	3	20.6898	4.56901

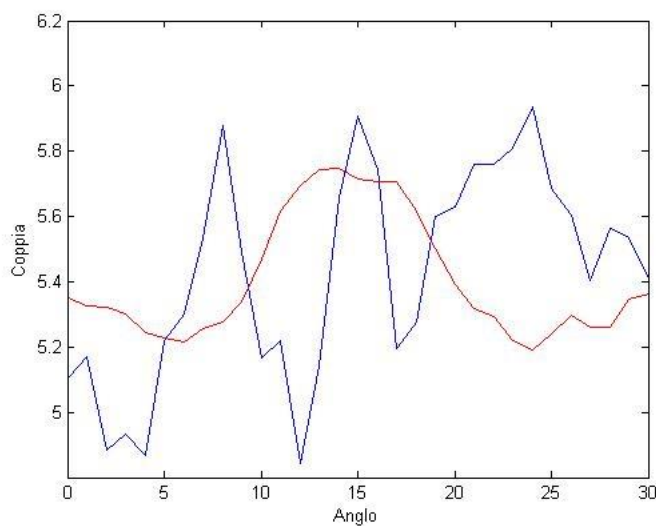
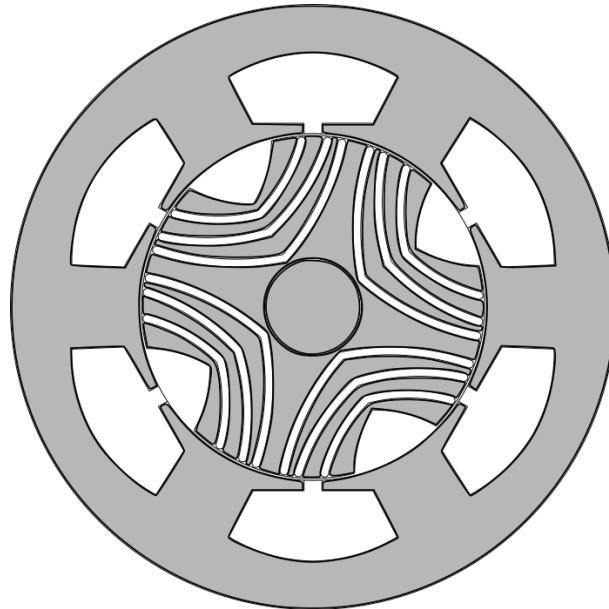


Fig.2.57 Motore con il 20.1% di ripple e relativo andamento della coppia

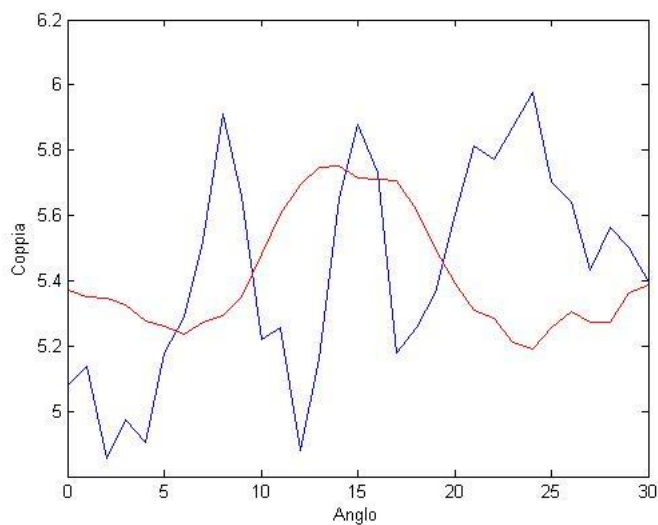
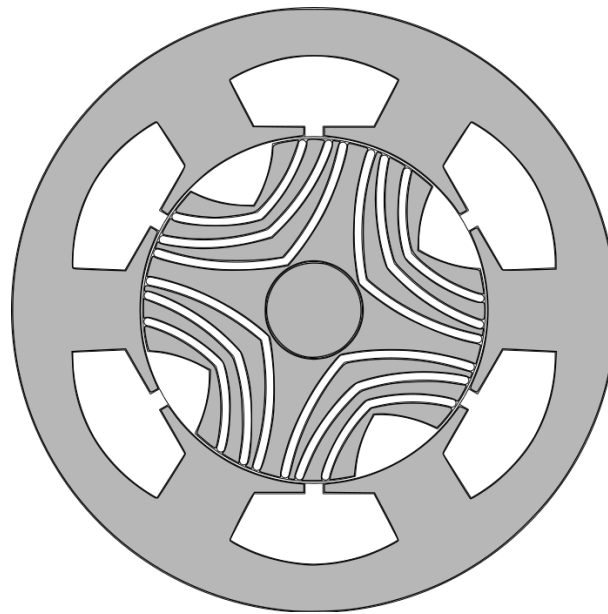


Fig.2.58 Motore con il 20.68% di ripple e relativo andamento della coppia

Osservazioni

I risultati ottenuti nell'ottimizzazione del rotore a 3 barriere, sono migliori rispetto a quelli ottenuti con le 4 barriere, e sono molto buoni. A questo punto è possibile provare ad ottenere un ulteriore improvement con lo skewing e attraverso un'analisi più completa dei motori migliori. Il fatto di applicare lo skewing dovrebbe fornire un leggero improvement della percentuale di ripple e una diminuzione della coppia media. Analizzare i motori migliori utilizzando anche le altre tipologie di prove consente di capire meglio i vari andamenti del motore nelle varie condizioni di funzionamento e permette di applicare delle correzioni diverse da quelle fatte fin ora.

2.8 Unione con il rotore con le punte ottime

Riprendendo i risultati delle ottimizzazioni precedenti viene fatta una prova su un motore che unisce gli statori e i rotori ottimi con la configurazione ottima delle punte. In questo caso verranno analizzati un motore a 4 e un motore a 3 barriere. Dato che le configurazioni sono già ottimizzate è possibile che una variazione nella forma delle barriere, dovuta alla combinazione delle geometrie, possa portare ad un peggioramento delle prestazioni. In particolare il peggioramento potrebbe riguardare la percentuale di ripple, infatti il cambiamento della forma delle barriere potrebbe variare gli equilibri generati

dall'ottimizzazione della geometria dei rotori. In generale le aspettative per queste prove riguardano principalmente il miglioramento della forma d'onda della coppia, infatti dalle prove precedenti è emersa l'influenza che le punte hanno sul contenuto armonico.

2.8.1 Rotore a 4 barriere

Rotore con gli angoli ottimi

Questo motore unisce la geometria ottenuta con la seconda ottimizzazione degli angoli di rotore con quella ottimizzata per le punte. La configurazione degli spazi è uguale a quella trovata con l'ottimizzazione delle punte. Qui di seguito vengono riportati solamente i dati del rotore, infatti per quanto riguarda lo statore non ci sono cambiamenti rispetto alla configurazione precedente.

Tab.2.48

<i>Parametro</i>	<i>Valore</i>
β_{pt}	16
β_1	22
β_2	28
β_3	34
β_4	42
w_{sb}	1 mm
w_{pt}	1.5 mm
w_{43}	3 mm
w_{32}	2 mm
w_{21}	2 mm
l_{p4}	0.9
l_{p3}	0.9
l_{p2}	0.5
l_{p1}	0.7

I risultati registrano un peggioramento della percentuale di ripple ed un migliramento della coppia media. L'andamento della forma d'onda della coppia, è affine a quella ottenuta in precedenza, e registra una riduzione delle oscillazioni che mediamente interessano la coppia. La percentuale di ripple è molto alta perchè sono presenti due oscillazioni molto grandi presenti tra i 20° e i 30° gradi e nei primi 5° gradi, mediamente invece le oscillazioni sono molto ridotte rispetto a quelle ottenute con i motori analizzati in precedenza. Nel complesso i risultati possono comunque ritenersi validi, infatti la geometria migliora il valore della coppia media e riduce il contenuto armonico di ordine più basso. Nel capitolo specifico verrà analizzato questo legame tra la geometria e il contenuto armonico. Qui di seguito vengono riportati i risultati ottenuti.

Tab.2.49

<i>%Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
45.134892	4.243440

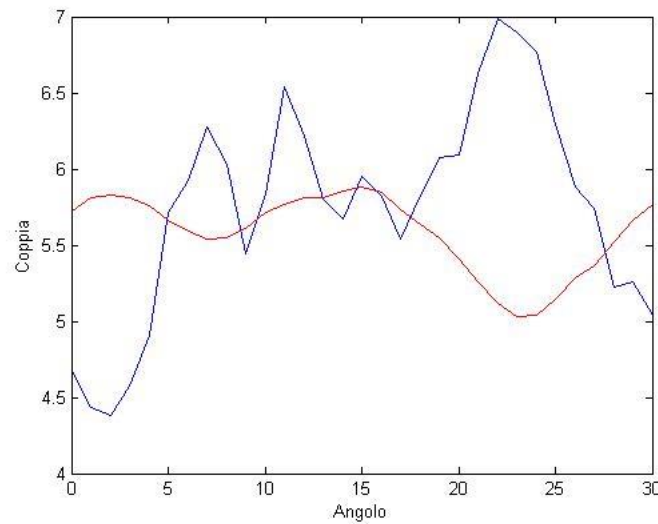
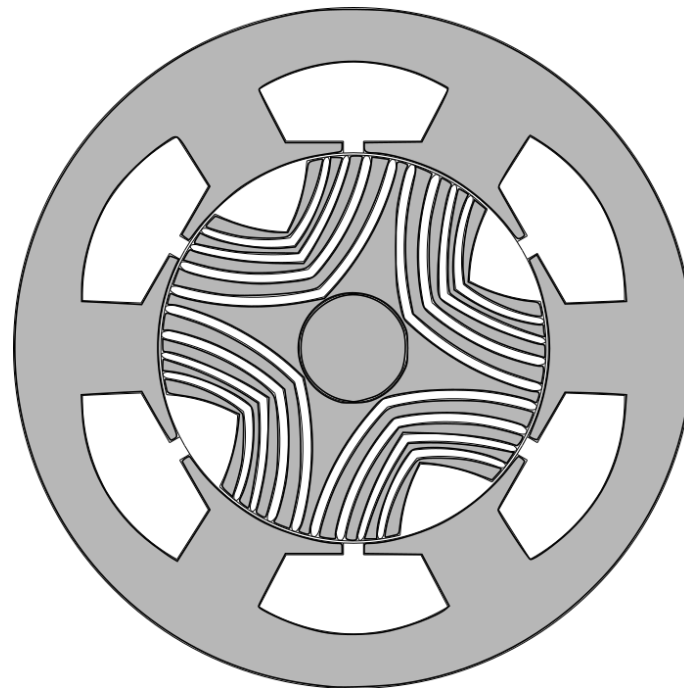


Fig.2.59 Motore e relativo andamento della coppia

Rotore con gli angoli e gli spazi ottimi

Il motore analizzato in questa prova è uguale a quello precedente salvo per la configurazione degli spazi che coincide con quella della seconda ottimizzazione del rotore. Questo cambiamento dovrebbe incidere in modo sostanziale sulla percentuale di ripple e sul valore della coppia media. La forma d'onda della coppia non dovrebbe subire cambiamenti troppo marcati. Di seguito vengono riportati i dati utilizzati per la prova, in particolare viene riportata solo la configurazione degli spazi.

Tab.2.50

<i>Parametro</i>	<i>Valore</i>
w_{sb}	1 mm
w_{bt}	1 mm
w_{43}	3 mm
w_{32}	2.5 mm
w_{21}	2.5 mm

I risultati regitrao un peggioramento della percentuale di ripple ed un leggero miglioramento della coppia media, questo è in linea con quanto è stato ottenuto fin ora. Gli spazi non sono stati cambiati di molto, quindi anche le restazioni non sono peggiorate di molto. Per quanto riguarda la forma d'onda, questa non ha subito variazioni sostanziali, in accordo con quanto era stato ipotizzato. Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti.

Tab.2.51

<i>%Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
49.672037	4.193459

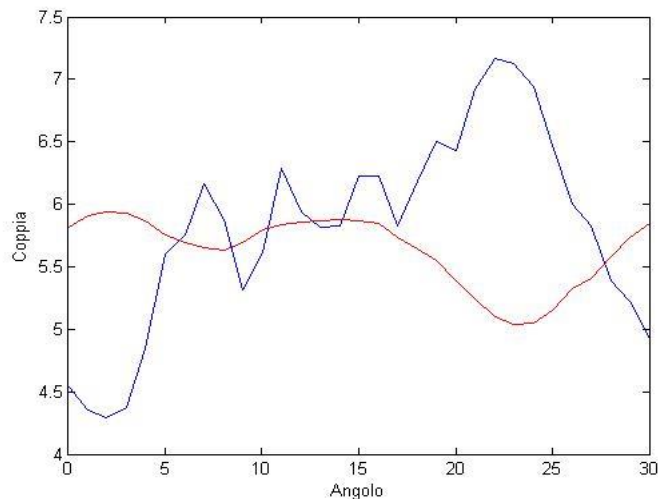
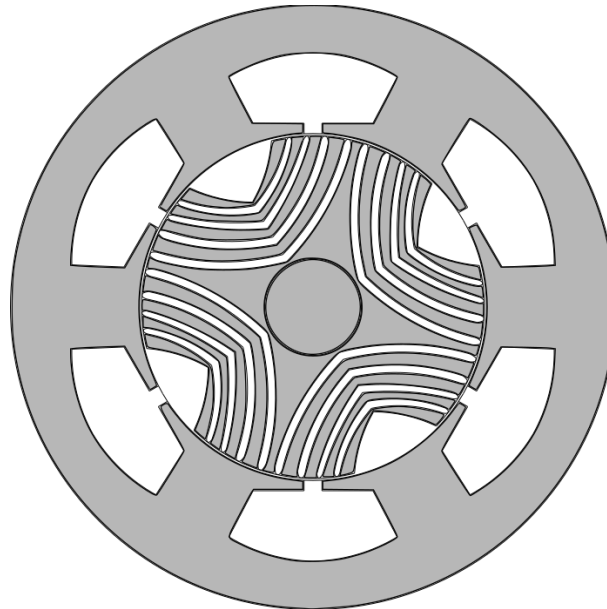


Fig.2.60 Motore e relativo andamento della coppia

2.8.2 Rotore a 3 barriere

Rotore con gli angoli ottimi

Com'è stato fatto per il caso precedente, viene unita la configurazione ottima a 3 barriere, uscita dalla seconda ottimizzazione del rotore, con quella ottima delle punte. Anche in questo caso la

configurazione degli spazi è uguale a quella dell'ottimo delle punte. Qui di seguito vengono riportati i dati del rotore.

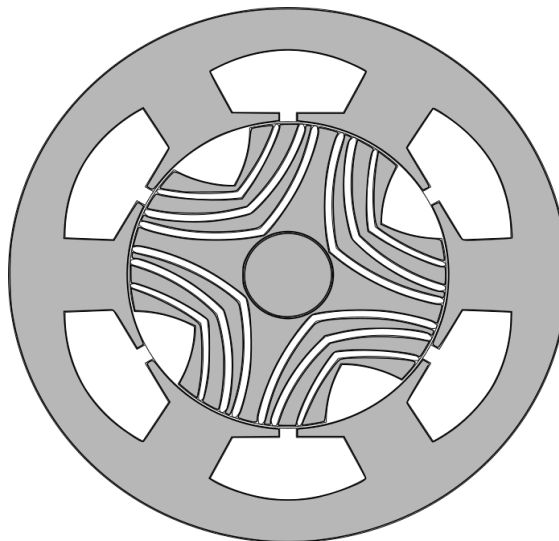
Tab.2.52

<i>Parametro</i>	<i>Valore</i>
β_{bt}	16
β_2	26
β_3	35
β_4	40
w_{sb}	1 mm
w_{bt}	2 mm
w_{43}	5 mm
w_{32}	3 mm
l_{p4}	0.9
l_{p3}	0.9
l_{p2}	0.5

I risultati sono molto buoni, la percentuale di ripple è all'incirca del 24 % mentre il valore della coppia media si attesta sullo standard ottenuto fin ora con le prove. Questo miglioramento delle prestazioni è legato all'assenza della prima barriera, questa infatti peggiorava la concatenazione nella parte alta del rotore e tendeva a ridurre la densità di flusso. Un'altro aspetto che va sottolineato è la buona integrazione tra le due geometrie, il leggero cambiamento della forma delle barriere non ha interferito troppo con la geometria a tre barriere. Per quanto riguarda la forma d'onda, questa è molto buona e vede una riduzione dell'influenza delle armoniche di ordine minore, questo porta ad avere delle oscillazioni di entità minore. Rispetto all'ottimo ottenuto dalla seconda ottimizzazione del rotore, c'è stato un peggioramento della percentuale di ripple, questi risultati sono comunque accettabili visto il miglioramento della forma d'onda della coppia. Qui di seguito vengono riportati i risultati ottenuti.

Tab.2.53

<i>%Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
23.978540	4.537124



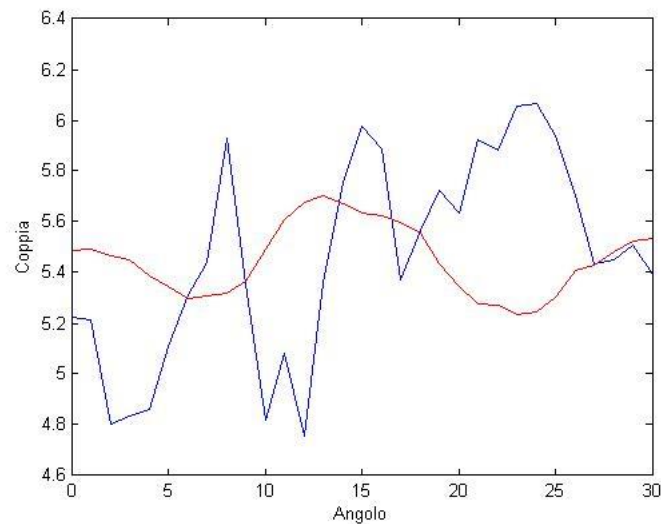


Fig.2.61 Motore e relativo andamento della coppia

Rotore con angoli e spazi ottimizzati

In questa prova si utilizza lo stesso motore della prova precedente ma viene cambiata la configurazione degli spazi. In questo caso si utilizza la configurazione ottenuta con l'ottimizzazione degli spazi nella fase due della rispettiva ottimizzazione. Qui di seguito viene riportata la configurazione degli spazi tra le barriere di rotore.

Tab.2.54

<i>Parametro</i>	<i>Valore</i>
w_{sb}	1 mm
w_{bt}	2 mm
w_{43}	5.5 mm
w_{32}	3 mm

I risultati sono simili a quanto ottenuto con le quattro barriere. Sebbene la percentuale di ripple sia del 25% e il valore della coppia media sia comunque nella norma, anche in questo caso il cambiamento della configurazione degli spazi ha portato ad un peggioramento, seppur lieve, delle prestazioni. Per quanto riguarda la forma d'onda della coppia non ci sono cambiamenti sostanziali, se non per quanto riguarda il leggero aumento dei picchi più grandi.

Tab.2.55

<i>%Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
25.537230	4.544855

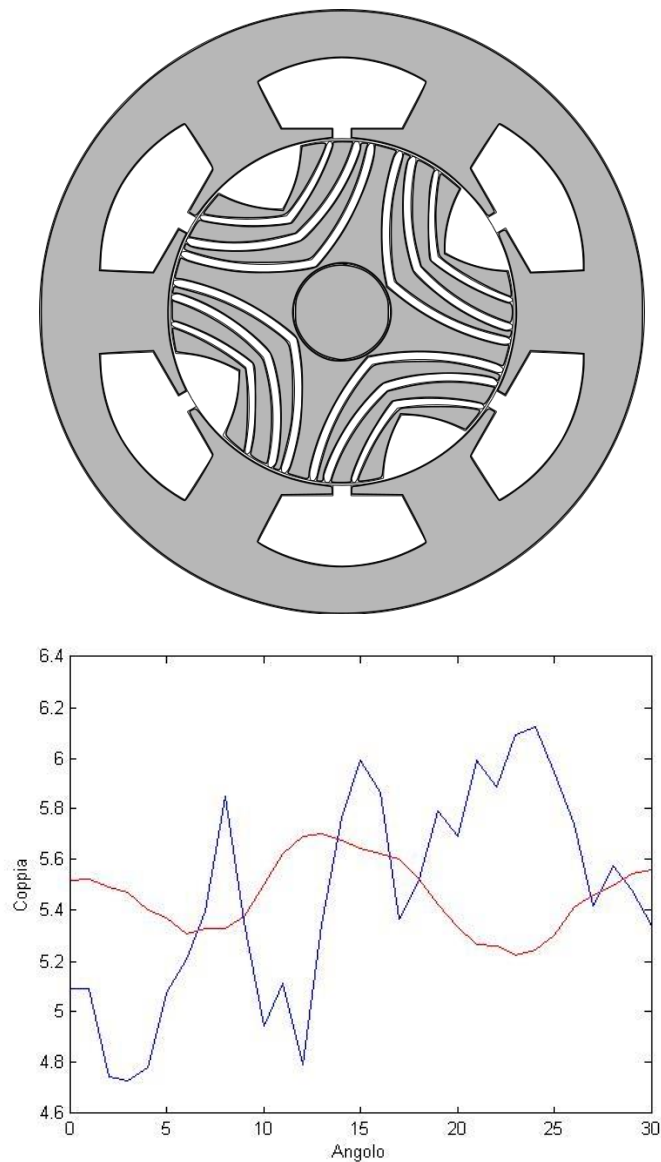


Fig.2.62 Motore e relativo andamento della coppia

Osservazioni

In queste ultime quattro prove svolte è emersa la difficoltà di unire al meglio gli aspetti positivi derivanti dalle varie geometrie. In questo caso anche ottimizzare i motori che derivano dalla fusione delle varie configurazioni non porterebbe ad un sostanziale miglioramento, infatti le prestazioni sembrano delinearci su un motore con il 20% di ripple ed un valore della coppia media pari a 5.5 Nm.

2.9 Riepilogo risultati e conclusioni

Il processo di ottimizzazione ha portato ad un notevole miglioramento delle prestazioni del motore da cui si è partiti per le analisi. Le modifiche che sono state apportate man mano hanno messo in evidenza il forte legame che esiste tra la geometria del motore e le sue prestazioni. Un'altro aspetto che è emerso è la forte influenza che le varie configurazioni geometriche hanno sul contenuto armonico e sulle oscillazioni della coppia. Questi due aspetti verranno analizzati in un capitolo specifico. Nelle ottimizzazioni svolte fin ora i parametri con maggior influenza sulle prestazioni sono stati gli angoli delle barriere e gli spazi tra queste. In particolare è emerso che le configurazioni con gli

angoli più bassi, il taglio superiore più stretto e una quantità maggiore di ferro tendono ad avere una riduzione della percentuale di ripple e una diminuzione delle armoniche di ordine più basso. Per quanto riguarda gli spazi tra le barriere, una simmetrizzazione degli spazi e una redistribuzione delle linee di flusso verso la parte interna del rotore fornisce buoni risultati sia per la percentuale di ripple che per il contenuto armonico della forma d'onda della coppia. Oltre al rotore, anche lo statore ha giocato un ruolo molto importante, infatti la sua ottimizzazione ha consentito di ottenere le prestazioni migliori. In questo senso, l'interfaccia tra la geometria dello statore e del rotore ha mostrato la sua importanza, infatti, per ottenere i motori migliori, è stato necessario svolgere una seconda ottimizzazione del rotore. I motori con le prestazioni migliori sono stati quelli con le tre barriere, in questa configurazione il rotore ha una quantità maggiore di ferro da magnetizzare e ha una geometria più congeniale all'andamento naturale delle linee di flusso.

Qui di seguito vengono riepilogati i migliori motori ottenuti con le varie ottimizzazioni:

Tab.2.56

<i>ID motore</i>	<i>%Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
<i>Ottimizzazione Rotore a 4 barriere: angoli</i>		
<i>Motore 1</i>	50.833355	4.359463
<i>Motore 2</i>	48.192951	4.382527
<i>Motore 3</i>	45.803446	4.436539
<i>Ottimizzazione Rotore a 4 barriere: spazi</i>		
<i>Motore 4</i>	40.5094	4.57926
<i>Motore 5</i>	40.5094	4.57926
<i>Ottimizzazione Rotore a 3 barriere</i>		
<i>Motore 6</i>	39.8046	4.33885
<i>Prima ottimizzazione delle punte</i>		
<i>Motore 7</i>	43.733414	4.415808
<i>Motore 8</i>	43.346478	4.421840
<i>Seconda ottimizzazione delle punte</i>		
<i>Motore 9</i>	42.596167	4.425571
<i>Motore 10</i>	42.957656	4.419549
<i>Seconda ottimizzazione rotore</i>		
<i>Rotore a 4 barriere: Fase 1</i>		
<i>Motore 11</i>	37.2503	4.5062
<i>Motore 12</i>	40.8229	4.50453
<i>Rotore a 4 barriere: Fase 2</i>		
<i>Motore 13</i>	34.485	4.47645
<i>Motore 14</i>	34.4455	4.48018
<i>Rotore a 3 barriere: Fase 1</i>		
<i>Motore 15</i>	20.3477	4.58061
<i>Motore 16</i>	25.8866	4.57606
<i>Rotore a 3 barriere: Fase 2</i>		
<i>Motore 17</i>	20.1331	4.57325
<i>Motore 18</i>	20.6898	4.56901
<i>Unione Rotori ottimi e punte ottimizzate</i>		
<i>Rotore a 4 barriere con gli angoli ottimizzati</i>		
<i>Motore 19</i>	45.134892	4.243440
<i>Rotore a 3 barriere con gli angoli ottimizzati</i>		
<i>Motore 20</i>	23.978540	4.537124

Capitolo 3: Skewing

In questo capitolo verranno ripresi i migliori motori ottenuti fin ora e gli verrà applicato lo skewing. Questa tecnica, utilizzando una deformazione del rotore, va a ridurre la percentuale di ripple e ad abbassare il valore della coppia media. Per applicare lo skewing è necessario osservare l'andamento della forma d'onda della coppia e valutare l'intervallo di gradi che intercorre tra un'oscillazione e l'altra. Nei casi che verranno analizzati, in prima approssimazione, si può ritenere che l'intervallo tra un picco e l'altro sia di circa 5° gradi. Nel motore ottimizzato con le 4 barriere tale intervallo sarebbe più grande ma comunque può essere ritenuto intorno ai 5° gradi. Oltre a questo aspetto, va considerato inoltre il grado di sensibilità nei confronti della variazione dell'angolo elettrico. Durante la fasatura dei motori presi in analisi tale sensibilità è risultata abbastanza elevata, quindi si è deciso di applicare uno skewing molto contenuto. La deformazione verrà applicata in due step: un primo step con lo skewing pari a 0.2 e un secondo step con lo skewing pari a 0.5.

3.1 Motore ottimo a 4 barriere

Come prima prova viene analizzato il motore con le 4 barriere ottenuto nel paragrafo 2.7.1 del capitolo precedente. Questo motore presenta le seguenti prestazioni di base:

Tab.3.1.1

<i>% Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
34.4455	4.48018

Come primo step viene applicato uno skewing pari a 0.2:

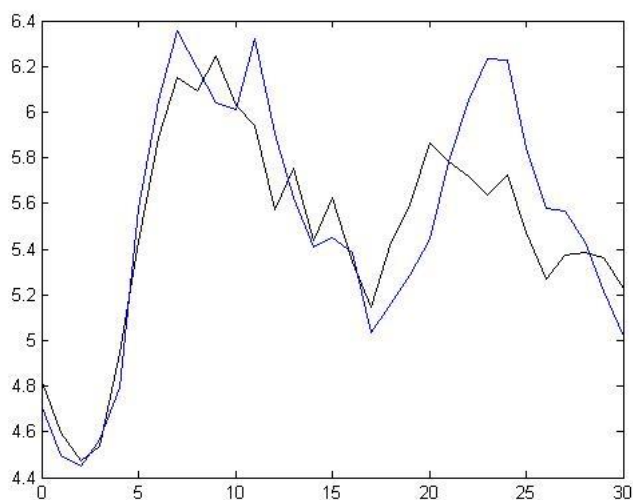


Fig. 3.1.1 Confronto della coppia tra il motore di base(blu) e con lo skewing(nero) pari a 0.2

Le prestazioni sono le seguenti :

Tab.3.1.2

<i>% Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
32.35777	4.519526

I risultati riportano un piccolo miglioramento della percentuale di ripple ed un abbassamento contenuto della coppia media. Le oscillazioni di coppia si sono ridotte molto sia nell'ampiezza che nella frequenza, questo ha portato un aumento delle distorsioni e ad un cambiamento nell'andamento della coppia. Nel complesso gli improvement possono ritenersi proporzionali al grado di deformazione applicato. Considerato quest'ultimo aspetto, l'aumento di skewing dovrebbe portare a risultati migliori.

Secondo step, applicazione dello skewing pari a 0.5:

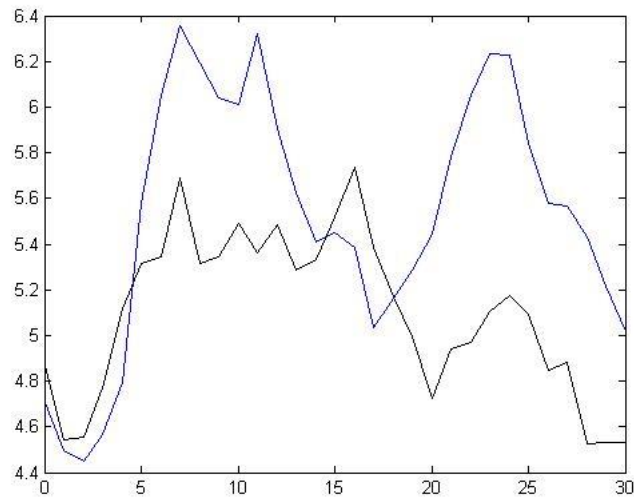


Fig. 3.1.2 Confronto della coppia tra il motore di base(blu) e con lo skewing(nero) pari a 0.5

Le prestazioni sono le seguenti :

Tab.3.1.2

<i>% Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
23.835635	4.90442

Come ipotizzato nel caso precedente un aumento di skewing ha portato ad un miglioramento notevole nella percentuale di ripple. Il valore della coppia media si è abbassato molto ma viene compensato dalla riduzione delle oscillazioni di coppia. La forma d'onda, come nel caso precedente presenta delle oscillazioni più ridotte ed un aumento della distorsione. Si può notare inoltre un leggero spostamento della periodicità di un paio di gradi, questo è dovuto alla deformazione e non comporta cambiamenti nelle prestazioni, infatti le oscillazioni presenti in questo intervallo non superano i picchi più grandi. Un ulteriore aumento dello skewing non è consigliato vista la notevole sensibilità del motore ai cambiamenti di angolo.

3.2 Motore ottimo a 3 barriere

Viene ora analizzato il motore ottimizzato a 3 barriere ottenuto nel paragrafo 2.7.2 del capitolo precedente. Questo motore presenta le migliori prestazioni ottenute fin ora. L'improvement atteso non dovrebbe essere marcato come nel caso precedente, infatti le prestazioni sono già abbastanza buone.

Tab.3.2.1

<i>% Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
20.1331	4.57325

Primo step, applicazione di uno skewing pari a 0.2:

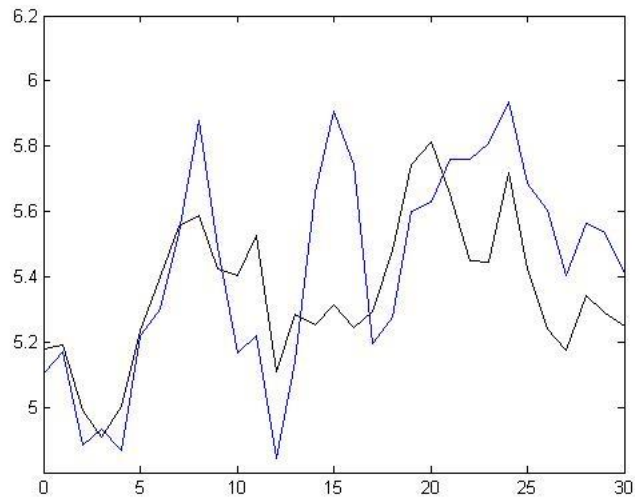


Fig. 3.2.1 Confronto della coppia tra il motore di base(blu) e con lo skewing(nero) pari a 0.2

Le prestazioni sono le seguenti:

Tab.3.2.2

<i>% Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
16.89511	4.647487

In questo caso le prestazioni sono migliorate molto, la percentuale di ripple si è ridotta di quasi il 5% e la coppia media non ha subito una riduzione eccessiva. Per quanto riguarda la forma d'onda della coppia, c'è stata una riduzione delle oscillazioni ed un aumento delle distorsioni, non ci sono sfasamenti nella periodicità.

Secondo step, applicazione di uno skewing pari a 0.5:

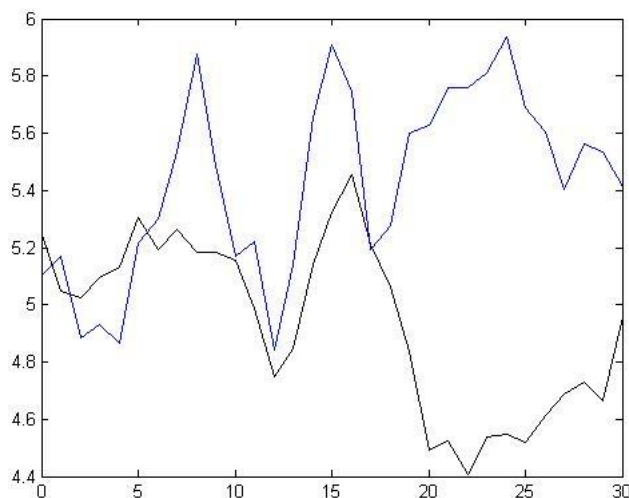


Fig.3.2.2 Confronto della coppia tra il motore di base(blu) e con lo skewing(nero) pari a 0.2

Tab.3.2.3

<i>% Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
21.275474	5.060502

In questo caso le prestazioni sono peggiorate di un punto percentuale per il ripple e di 0.5 Nm per la coppia. La forma d'onda della coppia risente di molte più distorsioni ed ha una periodicità leggermente spostata. Nel complesso il fatto che le migliori prestazioni vengano ottenute con uno skewing più ridotto, è riconducibile all'elevata sensibilità del motore nei confronti della fasatura. L'improvement ottenuto con lo skewing pari a 0.2 è molto buono e definisce un nuovo punto di arrivo per l'ottimizzazione delle prestazioni.

3.3 Motore ottimo a 3 barriere con le punte ottimizzate

Come ultimo motore, viene analizzato il motore a tre barriere con le punte ottimizzate costruito nel paragrafo 2.8 del capitolo precedente. In questo caso la geometria differisce da quella utilizzata nella prova 3.2 per la forma delle punte. Questa variazione influisce principalmente sulla forma d'onda della coppia e non riporta notevoli improvement per quanto riguarda le prestazioni. Qui di seguito vengono riportate le prestazioni di base:

Tab.3.3.1

<i>% Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
23.97854	4.537124

Primo step, applicazione dello skewing pari a 0.2:

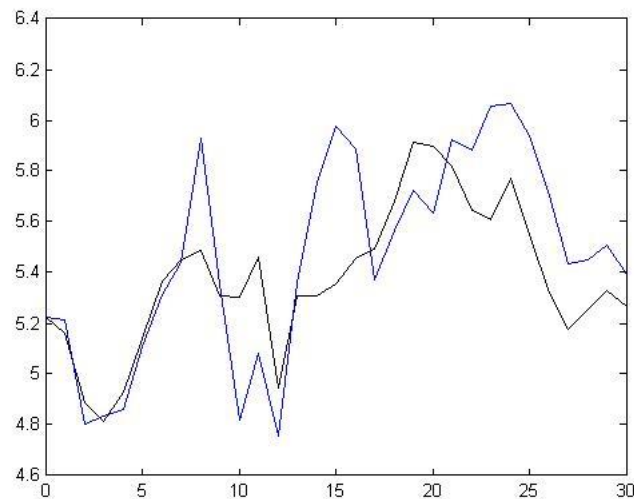


Fig. 3.3.1 Confronto della coppia tra il motore di base(blu) e con lo skewing(nero) pari a 0.2

Tab.3.3.1

<i>% Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
20.485744	4.625048

Come nel caso precedente l'applicazione di uno skewing pari a 0.2 migliora la percentuale di ripple e non abbassa di troppo il valore della coppia media. Anche la forma d'onda conserva un buon andamento e nel complesso non risente di molte distorsioni, questo è dovuto alla forma delle punte che va a migliorare il contenuto armonico. Viene inoltre conservata anche la periodicità.

Secondo step, applicazione dello skewing pari a 0.5:

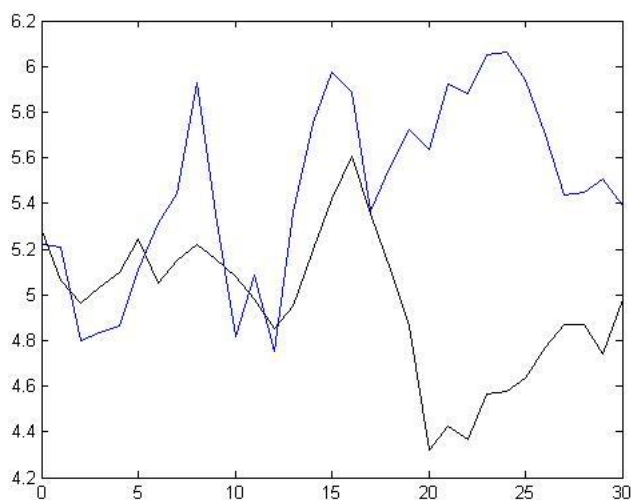


Fig. 3.3.2 Confronto della coppia tra il motore di base(blu) e con lo skewing(nero) pari a 0.5

Tab.3.3.2

<i>% Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
25.923452	5.038859

Anche in questo caso un aumento di skewing comporta un peggioramento delle prestazioni sotto tutti gli aspetti. La forma d'onda della coppia riscontra un peggioramento nell'entità delle oscillazioni, mentre le distorsioni sono rimaste più o meno uguali grazie alla compensazione portata dalla geometria delle punte. L'andamento delle prestazioni è affine a quello del motore precedente e conferma le ipotesi fatte fin ora sull'influenza esercitata dalle punte sulla coppia.

3.4 Riepilogo risultati ed osservazioni

Tab.3.4.1

<i>Skewing</i>	<i>%Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
<i>Motore a 4 barriere</i>		
0	34.4455	4.48018
0.2	32.35777	4.519526
0.5	23.834635	4.519526
<i>Motore a 3 barriere</i>		
0	20.1331	4.57325
0.2	16.89511	4.647487
0.5	21.275474	5.060502
<i>Motore a 3 barriere con le punte ottimizzate</i>		
0	23.97854	4.537124
0.2	20.485744	4.625048
0.5	25.923452	5.038859

Le prove svolte fin ora hanno messo in luce il miglioramento delle prestazioni portato dallo skewing. In alcuni casi c'è stato un peggioramento delle prestazioni legato all'elevata sensibilità che i motori hanno nei confronti della fasatura. Nel complesso si può notare come il motore a 4 barriere abbia giovato in misura maggiore dello skewing e in particolare come questo sia risultato meno sensibile a livelli di deformazione più alta. I motori a 3 barriere sono risultati migliori per quanto riguarda la percentuale di ripple e non hanno riscontrato un abbassamento eccessivo della coppia media. Per quanto riguarda le forme d'onda, in tutti i casi c'è stato un aumento delle distorsioni e in alcuni casi c'è stato un leggero sfasamento della periodicità. Il livello di distorsione è stato limitato nei rotori con le punte ottimizzate, questo va in continuità con gli andamenti che si sono evidenziati nelle prove

precedenti. Per quanto riguarda il cambiamento nella periodicità, questo è il risultato dell'unione tra la deformazione e l'elevata sensibilità al cambiamento di fasatura, infatti lo sfasamento allarga di qualche grado il periodo e non comporta una grossa variazione delle prestazioni. Nel complesso il basso livello di skewing è un vantaggio dal punto di vista costruttivo e non va ad abbassare troppo il valore della coppia media che rimane intorno ai 5.5 Nm. La percentuale di ripple nei casi migliori, sebbene sia intorno al 20%, si può ritenere comunque ottimale.

Capitolo 4: Analisi Armonica

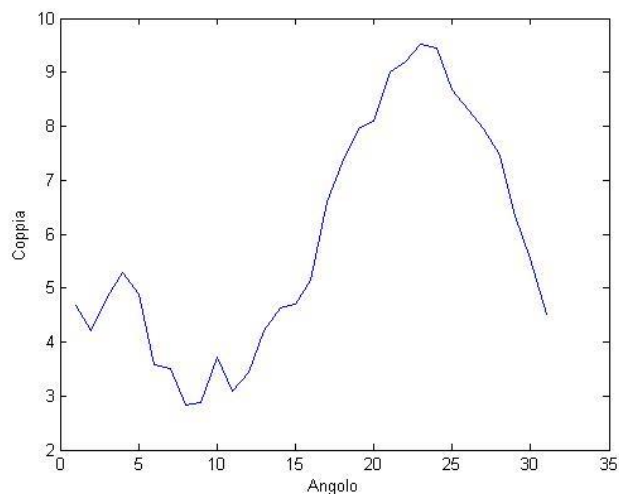
In questo capitolo verranno rianalizzati gli andamenti delle coppie dal punto di vista delle armoniche, in particolare si cercherà di ricavare una correlazione tra la geometria e il contenuto armonico. Nelle prove svolte fin ora si è già potuto vedere come la geometria vada a influenzare molto la coppia e la sua forma d'onda, in particolare si è visto che, un miglioramento della percentuale di ripple è accompagnato da una riduzione del valore di coppia media e da un aumento delle armoniche di ordine superiore. L'andamento appena descritto non è casuale, infatti una riduzione delle armoniche porta ad avere oscillazioni più ridotte. Questa riduzione avvicina i picchi maggiori al valor medio e quindi abbassa la percentuale di ripple, ma contestualmente porta ad una riduzione del valore della coppia media, che è strettamente legata al livello del contenuto armonico. Fin ora la variazione geometrica ha interessato principalmente le cave di statore e gli elementi del rotore, quindi l'analisi si concentrerà sul legame che c'è tra contenuto armonico e la variazione di questi elementi. Per ogni analisi verranno riportati: Il grafico del contenuto armonico (riportato sui 6 poli), la configurazione geometrica del motore analizzato, il valore della coppia media e il valore in Nm dell'oscillazione di coppia.

4.1 Analisi sui motori delle prove parametriche

Come punto di partenza vengono svolte delle prove sui primi motori analizzati, in seguito verranno analizzati i motori ottenuti con le ottimizzazioni, questo consentirà di avere un buon paragone tra le varie geometrie. Per non essere troppo prolissi nelle prove verranno ri-analizzati solamente i motori ritenuti più significativi per l'obiettivo di questo capitolo.

4.1.1 Analisi sul prototipo di base

In questa prima prova viene analizzato il primo motore analizzato, ossia il prototipo di base simile a quello analizzato nell'articolo di Christopher Spargo¹, le differenze tra i due modelli sono nei diametri, nella geometria e nella caratterizzazione elettrica dello statore. La prova ha portato i seguenti risultati:



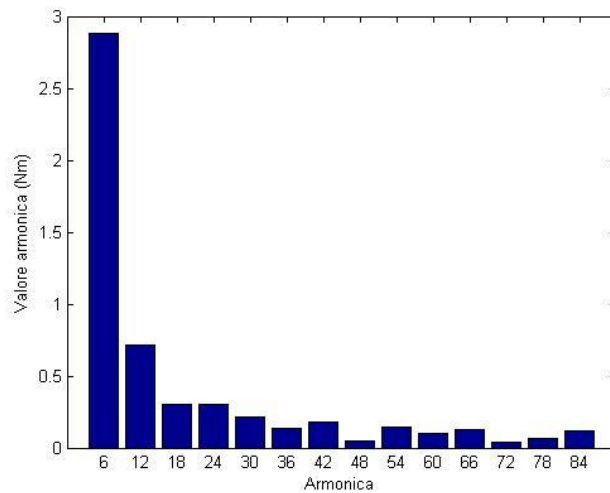


Fig. 4.1 Andamento della coppia e relativo contenuto armonico

Tab. 4.1.1

<i>Coppia media</i>	<i>Oscillazione di coppia</i>
5.856380 Nm	6.687024 Nm

Tab 4.1.2

<i>Spessori</i>	
t_1	1.44 mm
t_2	1.62 mm
t_3	1.91 mm
t_4	2.69 mm
<i>Larghezza barre</i>	
l_1	7.2 mm
l_2	7.2 mm
l_3	7.8 mm
l_4	3.6 mm
<i>Spazi tra le barriere</i>	
w_{sb}	2.4 mm
w_{43}	6 mm
w_{32}	2.1 mm
w_{21}	1.8 mm
w_{bt}	1.5 mm
<i>Angoli</i>	
β_1	30°
β_2	34°
β_3	36°
β_4	43°
β_{bt}	27°

In questo motore le armoniche prevaletti sono la prima e la seconda. Questo è confermato anche dall'andamento della coppia, infatti si può notare come questo sia definito da due oscillazioni principali e sia interessato solo in minima parte da leggere distorsioni di ordine più basso. Per quanto riguarda le geometria, gli angoli delle barriere e del taglio superiore sono molto alti e la parte orizzontale delle barriere è molto ampia. Considerata l'influenza che ciascuno di questi parametri esercita sulle prestazioni si può ipotizzare che questi siano direttamente collegati con l'andamento armonico. Questa ipotesi verrà analizzata e al limite confermata nelle prove successive, ma in parte è già stata delineata con le prove svolte fin ora sulla coppia. I restanti parametri geometrici del rotore, considerate le configurazioni analizzate fin ora, in questo caso non sono considerati determinanti,

infatti non escono molto dalle combinazioni ottime che in seguito verranno analizzate. Per quanto riguarda la geometria dello statore questa è già ottimizzata per il rotore utilizzato e verrà cambiata solamente nella relativa ottimizzazione. Considerato questo, tutte le osservazioni a riguardo vengono rimandate. In generale in questa prima analisi si delinea lo stesso andamento emerso nei capitoli precedenti. Angoli più alti tendono ad aumentare le oscillazioni, questo viene amplificato se unito alla forma delle barriere che presenta la parte orizzontale.

4.1.2 Analisi della prova 4.1

In questa prova viene analizzato il motore della prova parametrica 4.1. Questo motore sarà poi la base che verrà utilizzata per tutte le ottimizzazioni. La particolarità di questa configurazione sta nella forma delle barriere, che non presenta più la parte orizzontale, e negli angoli delle barriere che sono più bassi.

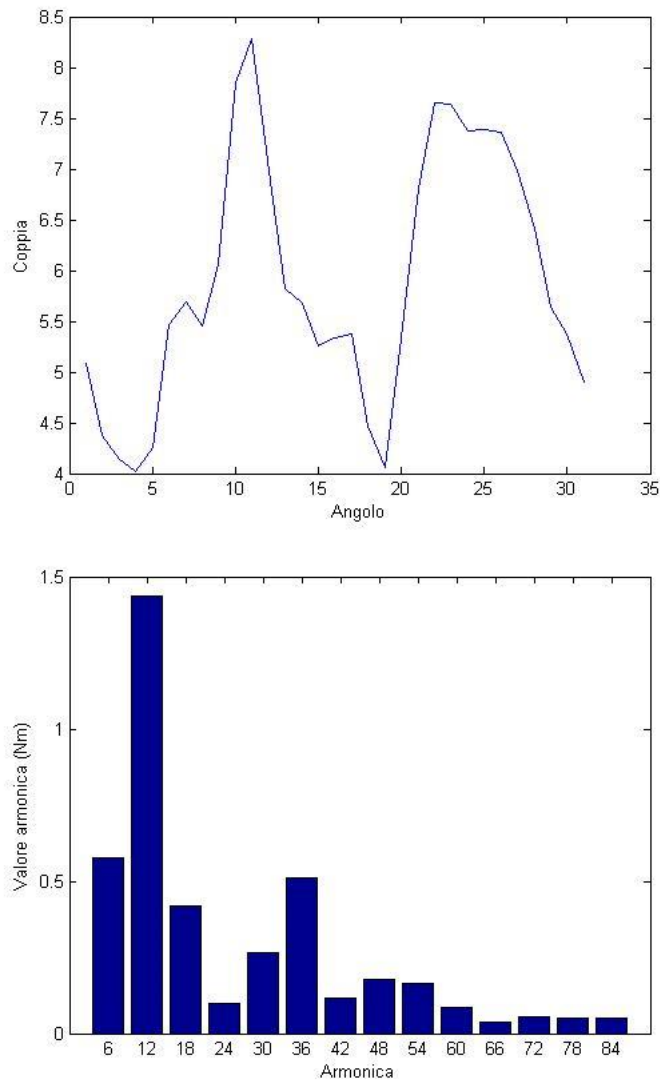


Fig.4.2 Andamento della coppia e relativo contenuto armonico

Tab. 4.1.3

<i>Coppia media</i>	<i>Oscillazione di coppia</i>
5.888147 Nm	4.272133 Nm

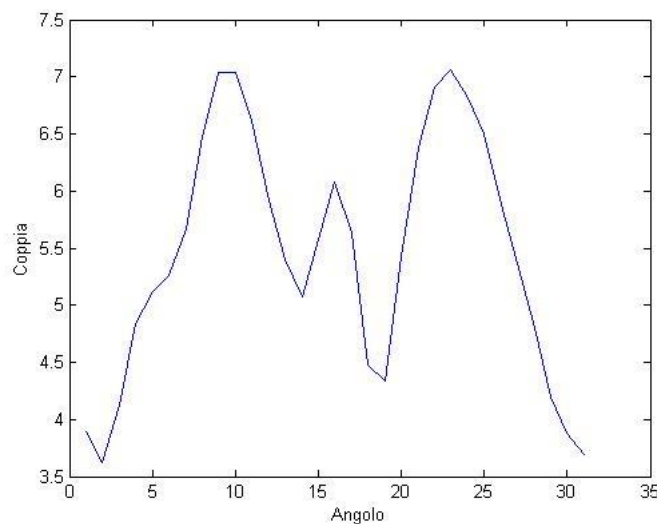
Tab. 4.1.4

<i>Spessori</i>	
$t_1 = t_2 = t_3 = t_4$	2 mm
<i>Spazi tra le barriere</i>	
w_{sb}	1 mm
w_{43}	6 mm
w_{32}	2 mm
w_{21}	2 mm
w_{ht}	2 mm
<i>Angoli</i>	
β_1	22°
β_2	27°
β_3	33°
β_4	43°
β_{ht}	20°

In questo motore le armoniche di ordine più alto sono diventate più grandi. In particolare alla diminuzione della prima armonica è subentrato un grosso aumento della seconda armonica e un innalzamento dei valori della terza e della sesta armonica. Questo cambiamento nell'andamento armonico lo si nota anche nella forma d'onda della coppia, questa infatti ha il doppio delle oscillazioni rispetto alla prova precedente e presenta una forte riduzione del ripple che rimane comunque molto elevato. Il valore della coppia media è leggermente aumentato, questo lo si può collegare ai cambiamenti della forma delle barriere, degli spazi tra queste e del loro spessore. Va inoltre notato il forte cambiamento portato da una configurazione più bassa degli angoli delle barriere, questo ha ridistribuito le armoniche ed ha abbassato le oscillazioni dei picchi. Quanto ottenuto in questa analisi conferma l'ipotesi fatta in precedenza e delinea sempre di più l'andamento che è stato osservato finora.

4.1.3 Analisi della prova 5.2

In continuità con l'analisi precedente, viene analizzato un motore con la stessa geometria di quello precedente, ma con una configurazione diversa per quanto riguarda gli angoli e gli spazi tra le barriere.



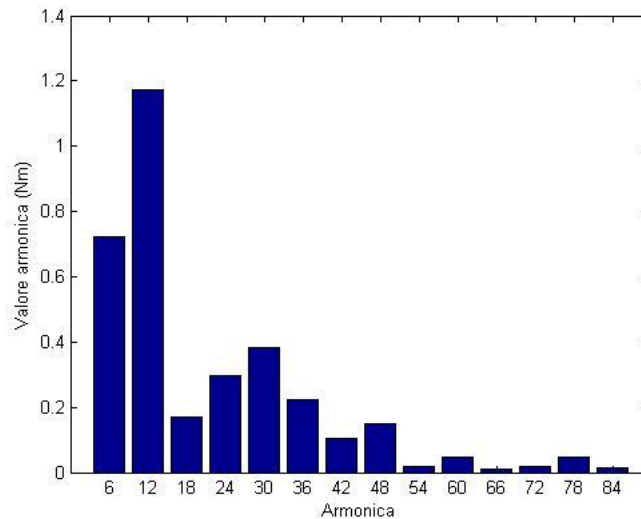


Fig.4.3 Andamento della coppia e relativo contenuto armonico

Tab. 4.1.5

<i>Coppia media</i>	<i>Oscillazione di coppia</i>
5.455378 Nm	3.439073 Nm

Tab.4.1.6

<i>Spessori</i>	
$t_1 = t_2 = t_3 = t_4$	2 mm
<i>Spazi tra le barriere</i>	
w_{sb}	1 mm
w_{43}	4 mm
w_{32}	2 mm
w_{21}	2 mm
w_{bt}	2 mm
<i>Angoli</i>	
β_1	18°
β_2	25°
β_3	30°
β_4	43°
β_{bt}	15°

L'andamento armonico di questo motore vede una redistribuzione del contenuto armonico, in particolare la seconda, la terza e la sesta armonica si abbassano, mentre la prima, la quarta e la quinta si alzano leggermente. Questa redistribuzione è legata all'ulteriore abbassamento degli angoli delle barriere. La forma d'onda risulta essere poco distorta e con molte oscillazioni. La percentuale di ripple, grazie al cambiamento degli angoli delle barriere e allo spostamento della terza barriera, è diminuita molto. La simmetrizzazione degli spazi tra le barriere ha inciso molto sulla riduzione delle armoniche di ordine più basso, mentre la disposizione delle punte delle barriere non ha ancora ridotto in modo marcato la seconda armonica. La riduzione di quest'ultima è fondamentale ai fini della riduzione della percentuale di ripple, e può essere ottenuta modificando più parametri e ricercando una combinazione ottimale.

4.1.4 Analisi della prova 5.3

Nel motore che viene analizzato viene utilizzata l'ellisse per disegnare le barriere, che in questo caso riprendono la forma simile a quella del prototipo. Gli angoli hanno una configurazione intermedia tra quella del prototipo di base e quella della prova 5.2.

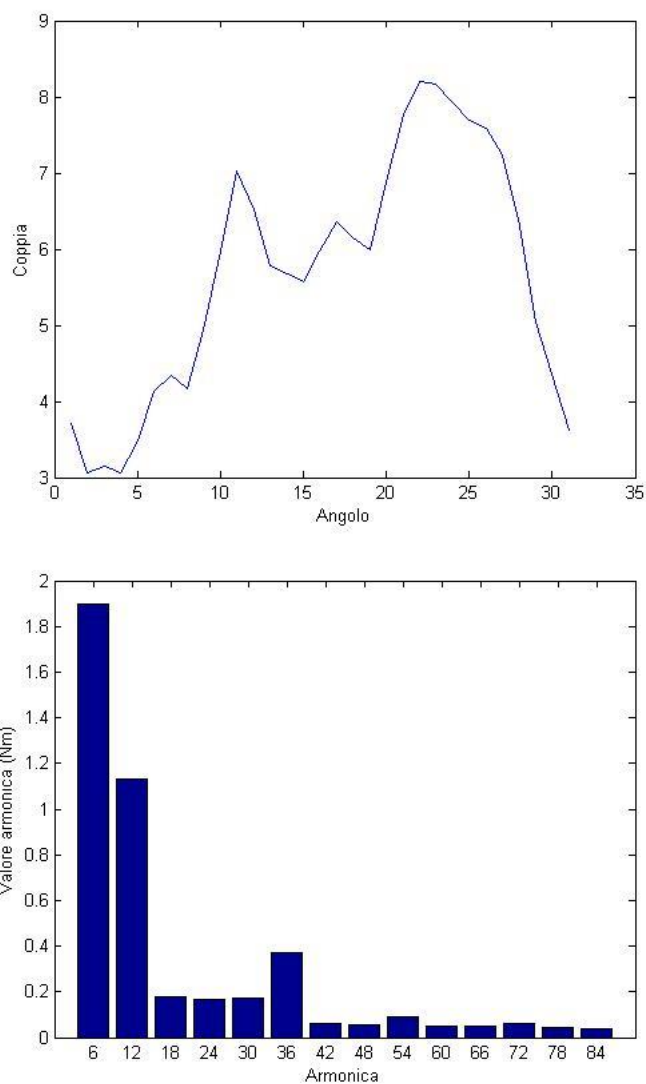


Fig. 4.4 Andamento della coppie e relativo contenuto armonico

Tab. 4.1.7

<i>Coppia media</i>	<i>Oscillazione di coppia</i>
5.673473 Nm	5.137661 Nm

Tab.4.1.8

<i>Spessori</i>	
$t_1 = t_2 = t_3 = t_4$	2 mm
<i>Larghezza barre</i>	
$l_1 = l_2 = l_3 = l_4 = l_{bt}$	5 mm
<i>Spazi tra le barriere</i>	
w_{sb}	1 mm
w_{43}	6 mm
w_{32}	2 mm
w_{21}	2 mm
w_{bt}	2 mm
<i>Angoli</i>	
β_1	22°
β_2	27°

β_3	33°
β_4	43°
β_{bt}	20°

In questo motore, dato che la configurazione geometrica è l'unione di più geometrie, il contenuto armonico risulta essere un ibrido di quello dei motori visti in precedenza. In questo caso l'andamento della coppia è definito principalmente dalla prima e dalla seconda armonica e presenta qualche distorsione causata dalla sesta armonica. Questo tipo di andamento è causato dall'unione di una configurazione degli angoli simile a quella del prototipo di base e un taglio superiore molto basso. La forma delle barriere, disegnata con l'ellisse, ha portato ad una riduzione delle armoniche di ordine più alto, infatti la barra orizzontale è stata maggiormente integrata nelle barriere. I risultati di questa prova vanno a rafforzare le ipotesi fatte fin ora.

4.1.5 Analisi della prova 6.3

In questa prova viene ripresa una geometria simile a quella del prototipo di base e ne vengono cambiati alcuni parametri. In particolare vengono abbassati gli angoli, aumentato lo spessore della quarta barriera e ridotti gli spazi tra le barriere. Questi cambiamenti sono utili per capire a che livello ciascun parametro influenza il contenuto armonico.

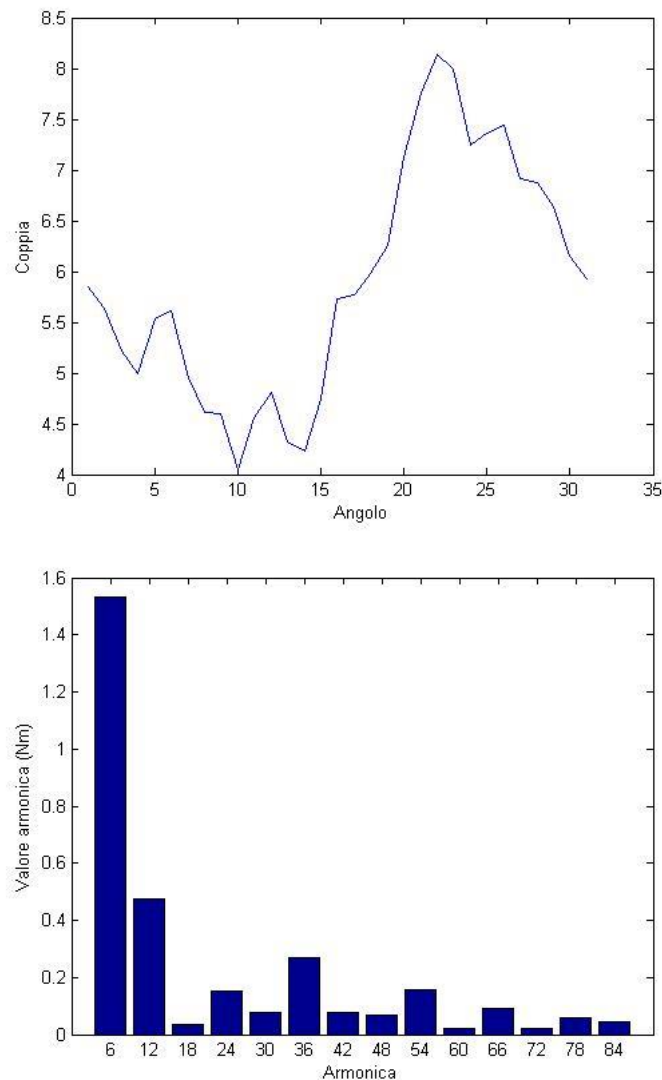


Fig.4.5 Andamento della coppia e relativo contenuto armonico

Tab. 4.1.9

<i>Coppia media</i>	<i>Oscillazione di coppia</i>
5.903556 Nm	4.096644 Nm

Tab.4.1.10

<i>Spessori</i>	
$t_1 = t_2 = t_3$	2 mm
t_4	3 mm
<i>Larghezza barre</i>	
$l_1 = l_2 = l_3 = l_4 = l_{bt}$	5 mm
<i>Spazi tra le barriere</i>	
w_{sb}	1 mm
w_{43}	6 mm
w_{32}	1.5 mm
w_{21}	2 mm
w_{bt}	2 mm
<i>Angoli</i>	
β_1	32°
β_2	35°
β_3	38°
β_4	43°
β_{bt}	25°

L'andamento armonico è abbastanza affine a quello del prototipo di base, ma risente di molte più distorsioni causate dai cambiamenti apportati ai parametri che fin ora non erano stati cambiati. Come ipotizzato fin ora, la percentuale di ripple è migliorata grazie al riposizionamento delle barriere dovuto alla configurazione degli angoli delle barriere e degli spazi tra queste.

Osservazioni

Analizzando le prove parametriche è stato possibile delineare un collegamento tra la geometria e il contenuto armonico. In queste prime prove è emerso che le armoniche di ordine più basso, in particolare la prima e la seconda, sono le armoniche che influenzano maggiormente la percentuale di ripple e l'andamento della forma d'onda della coppia. I parametri che hanno maggiore influenza sul contenuto armonico sono quelli che vanno a definire la forma, gli angoli e il posizionamento delle barriere. Nelle prove svolte fin ora la riduzione degli angoli delle barriere e una simmetrizzazione degli spazi tra le barriere ha portato ad una riduzione del ripple e ad una contestuale diminuzione delle armoniche di ordine più basso. Questa diminuzione è stata accompagnata da un aumento delle armoniche di ordine più alto e da un cambiamento nell'andamento della forma d'onda della coppia.

4.2 Analisi dei motori ottenuti con le ottimizzazioni

4.2.1 Ottimizzazione degli angoli del rotore a 4 barriere

Vengono inizialmente analizzati i motori ottimizzati per quanto riguarda gli angoli delle barriere. I tre risultati migliori ottenuti da questa ottimizzazione vedono una buona riduzione della percentuale di ripple. Non avendo cambiato altri parametri, il miglioramento della percentuale e del contenuto armonico è limitato ma comunque molto buono rispetto ai valori ottenuti nelle prove parametriche. Di seguito vengono riportati i dati geometrici dei tre motori migliori:

Tab.4.2.1

β_1	β_2	β_3	β_{bt}	%Ripple	Parametro coppia
18	26	33	15	50.833355	4.359463
18	27	35	15	48.192951	4.382527
18	27	35	17	45.803446	4.436539

Per ciascuno dei tre motori viene riportato l'andamento della coppia e il contenuto armonico:

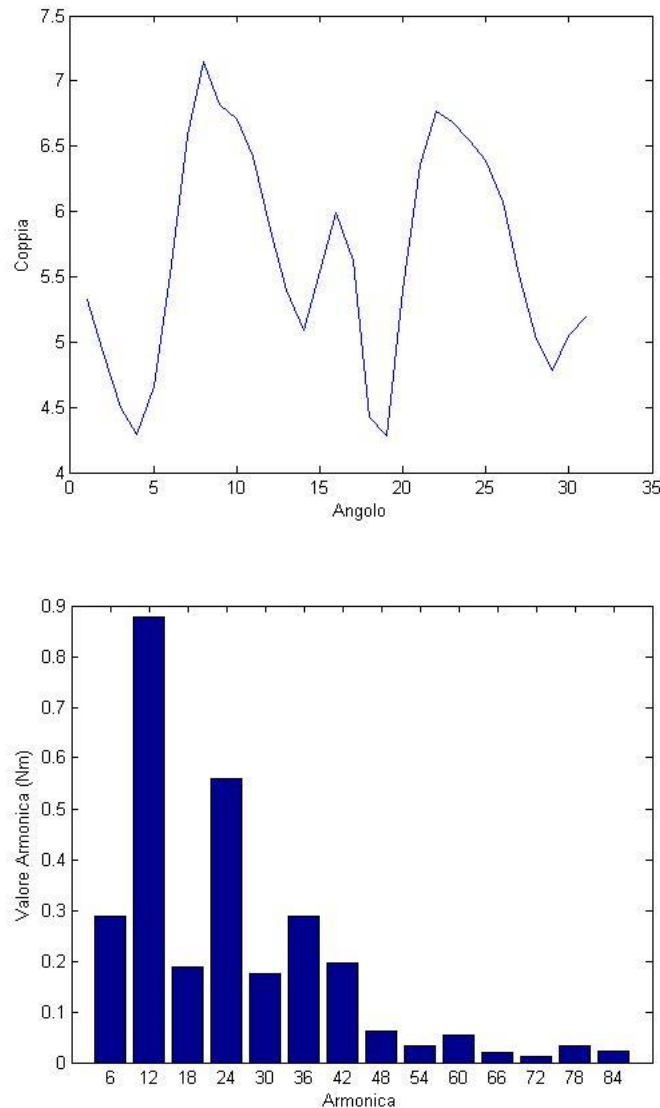


Fig. 4.2.1 Andamento della coppia e relativo contenuto armonico del motore con il 50% di ripple

Tab. 4.2.2

<i>Coppia media</i>	<i>Oscillazione di coppia</i>
5.640537 Nm	2.867274 Nm

In questo motore la seconda armonica è ancora l'armonica più grande, ma rispetto ai motori visti finora c'è stata una redistribuzione dei valori verso le armoniche di ordine più alto. La prima armonica si è abbassata moltissimo ed è quasi del tutto nulla mentre la seconda armonica si è ridotta di circa un terzo. Questa riduzione delle armoniche di ordine più basso ha portato ad un aumento delle armoniche più alte, in particolare la quarta e la sesta. La redistribuzione del contenuto armonico è stata accompagnata da una riduzione della percentuale di ripple, che si attesta intorno al 50%, e ad una riduzione del valore medio della coppia. Le geometrie del rotore vede un abbassamento degli angoli delle prime due barriere e un allargamento dei canali presenti tra queste. Questo aspetto risulta essere

molto importante per il miglioramento delle prestazioni, infatti osservando le configurazioni geometriche degli altri due motori si può notare come queste non differiscano di molto.

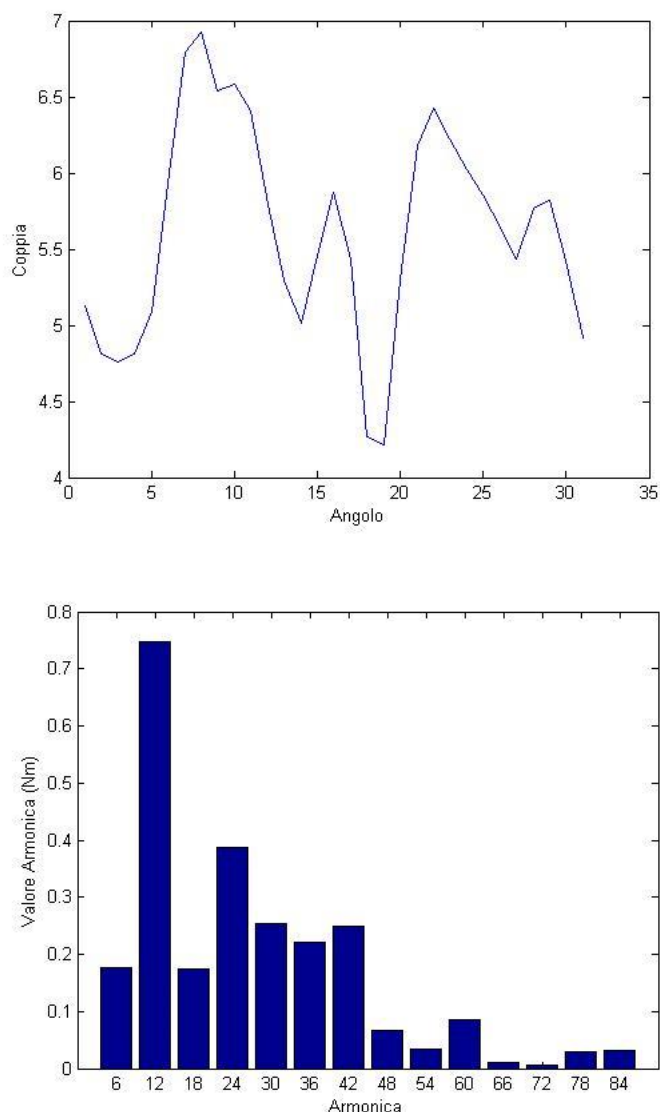


Fig. 4.2.2 Andamento della coppia e relativo contenuto armonico del motore con il 48% di ripple

Tab. 4.2.3

<i>Coppia media</i>	<i>Oscillazione di coppia</i>
5.617473 Nm	2.707226 Nm

In questo caso si registra lo stesso fenomeno visto in precedenza anche se in questo caso, vista la maggiore riduzione del ripple, la ridistribuzione delle armoniche è maggiore e arriva fino alla settima armonica. Questo aumento delle armoniche di ordine più elevato interessa anche l'andamento della coppia che risulta molto più distorto rispetto al caso precedente. La geometria del rotore differisce da quella precedente solamente per gli angoli della seconda e della terza barriera, questi due sono tali da allargare il canale presente tra queste due barriere. Questo allargamento fa in modo che ci sia una maggior magnetizzazione nella parte più interna del rotore, con i conseguenti benefici che sono già stati descritti in precedenza.

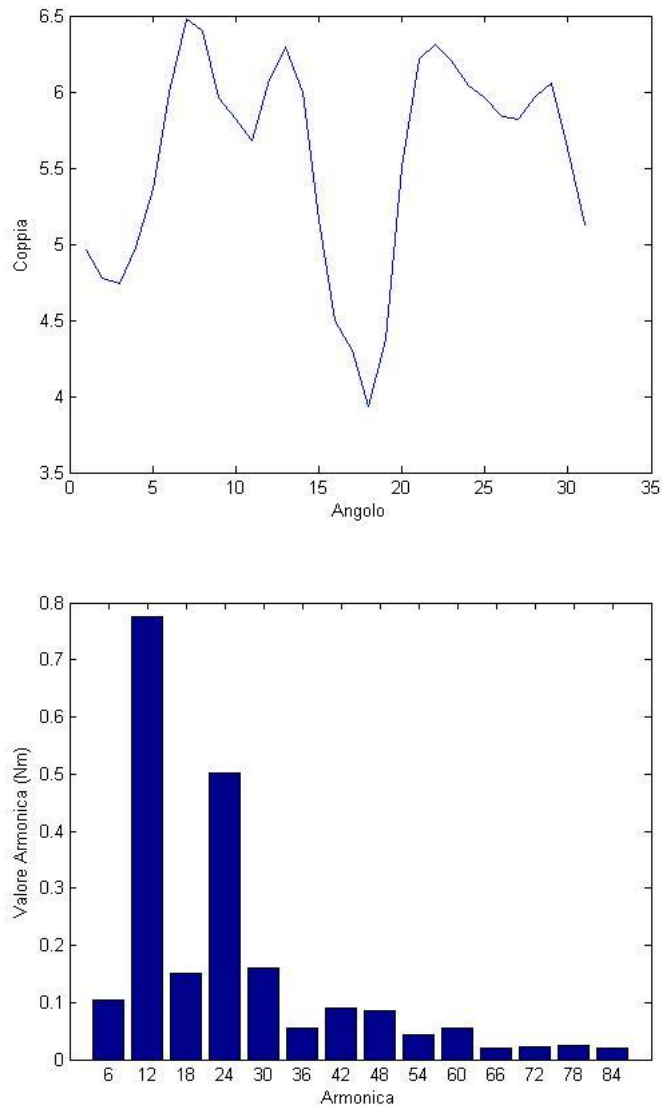


Fig.4.2.3 Andamento della coppia e relativo contenuto armonico della motore con il 45% di ripple

Tab. 4.2.4

<i>Coppia media</i>	<i>Oscillazione di coppia</i>
5.56346 Nm	2.548257 Nm

In questo motore si ripete la stessa riduzione della seconda armonica registrata nei casi precedenti ma con una redistribuzione diversa delle armoniche. In questo caso infatti prevalgono la seconda e la quarta armonica, mentre tutte le altre risultano essere quasi nulle. La geometria del rotore è praticamente identica a quella del motore precedente salvo per l'angolo del taglio superiore. In questo rotore questo angolo è più alto e riduce maggiormente la quantità di ferro. Questo aspetto mette in luce la forte influenza del taglio superiore sul contenuto armonico. Tale aspetto verrà tenuto in considerazione ai fini della definizione del legame tra la geometria e l'andamento delle armoniche. In generale in queste prove è emerso che, per migliorare il contenuto armonico e la percentuale di ripple è necessario ottenere una buona combinazione tra i vari parametri, in particolare una simmetrizzazione della geometria e una buona localizzazione delle barriere. Questi due aspetti vanno a modificare direttamente gli spazi del rotore dove avviene la magnetizzazione e ridistribuiscono le linee di flusso definendone l'andamento all'interno del rotore.

4.2.2 Analisi dei motori con gli angoli e gli spazi ottimizzati

In questa serie di prove verranno analizzati i motori ottimizzati sia per quanto riguarda gli angoli che per gli spazi. Queste prove saranno in grado di fornire un'idea dell'influenza che possono avere gli spazi tra le barriere sul contenuto armonico. Di seguito vengono riportati i dati geometrici dei motori che saranno analizzati:

Tab.4.2.5

w_{bt}	w_{43}	w_{32}	w_{21}	β_1	β_2	β_3	β_{bt}	%Ripple	Parametro coppia
2 mm	4 mm	1 mm	2 mm	18°	27°	35°	15°	40.5094	4.57926
1.5 mm	6 mm	1 mm	2 mm	18°	27°	35°	17°	42.1443	4.40156
2 mm	4 mm	1 mm	2 mm	18°	27°	35°	17°	40.5094	4.57926

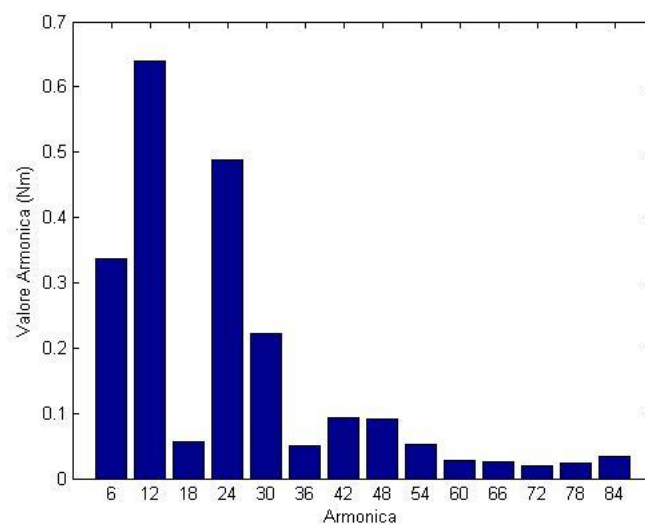
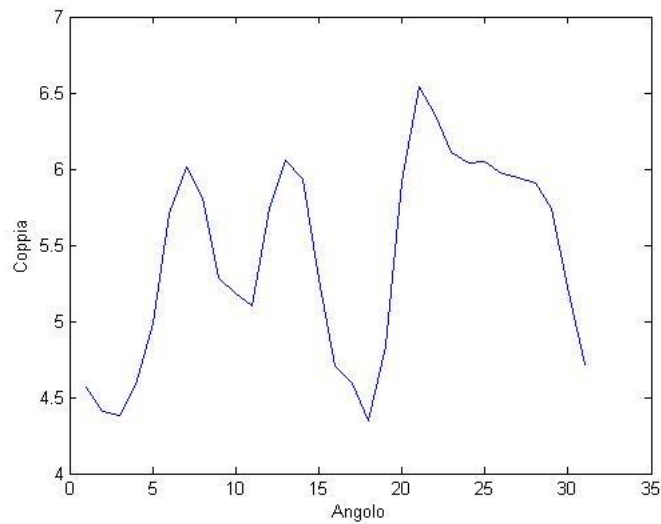


Fig.4.2.4 Coppia e contenuto armonico del motore con il 40% di ripple e $\beta_{bt} = 15^\circ$

Tab. 4.2.5

<i>Coppia media</i>	<i>Oscillazione di coppia</i>
5.420743 Nm	2.195912 Nm

Il contenuto armonico di questo motore è del tutto affine a quelli precedenti. L'ottimizzazione degli spazi ha portato ad una riduzione della seconda armonica, che si è ulteriormente ridotta e he è quasi confrontabile con le altre armoniche. Assieme alla riduzione della seconda armonica c'è stata una riduzione del ripple e del valore della coppia media. Per quanto riguarda la forma d'onda si comincia a delineare un andamento con un picco ogni 5 gradi, questo è molto positivo per poter applicare lo skewing del rotore.

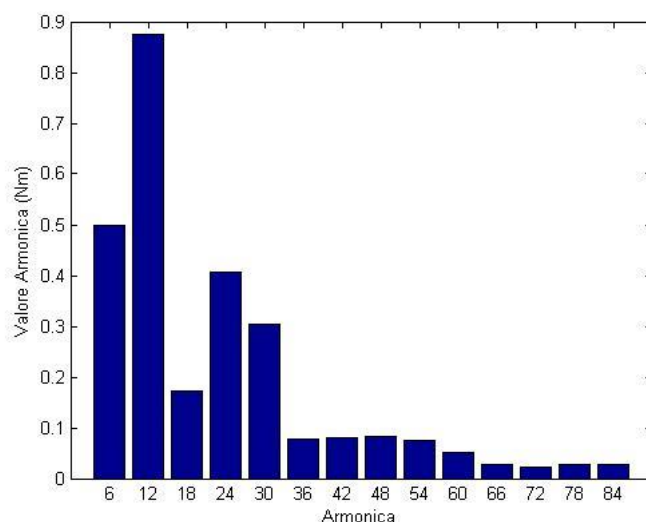
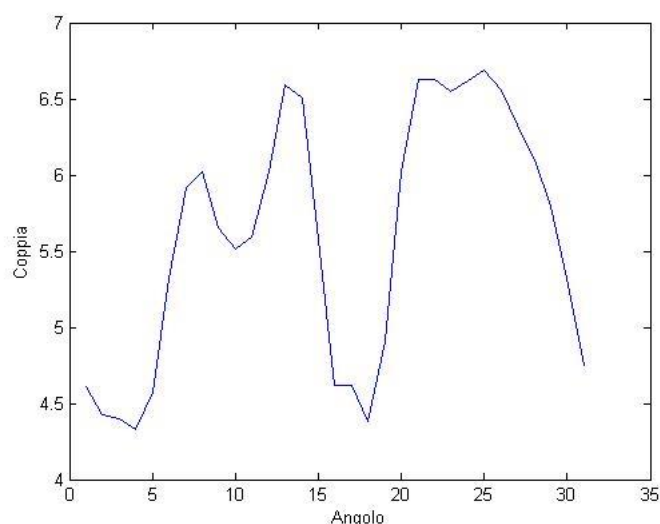


Fig.4.2.5 Andamento della coppie e relativo contenuto armonico del motore con 42% di ripple

Tab. 4.2.6

<i>Coppia media</i>	<i>Oscillazione di coppia</i>
5.598438 Nm	2.359424 Nm

Anche in questo caso c'è lo stesso andamento armonico dei casi precedenti, con la differenza che in questo caso la percentuale di ripple è leggermente più alta di quella vista nel caso precedente. Questo lo si può riscontrare in un aumento della prima armonica e in un diverso andamento della forma d'onda della coppia. Quest'ultima presenta meno distorsioni ma in compenso ha delle oscillazioni più marcate e i picchi più distanti tra loro.

4.2.3 Analisi dei rotori con le punte ottimizzate(seconda ottimizzazione)

Vengono ora analizzati i motori con le punte ottimizzate, queste prove servono per confermare l'influenza della configurazione delle punte sul contenuto armonico. La geometria delle punte va ad interessare principalmente la parte esterna del rotore e quindi modifica l'interazione tra lo statore e il rotore agendo sul canale d'entrata delle linee di flusso. Tale influenza dovrebbe ripercuotersi principalmente sulle armoniche di ordine superiore.

Tab.4.2.7

l_{p4}	l_{p3}	l_{p2}	l_{p1}	%Ripple	Parametro coppia
0.9	0.9	0.5	0.7	42.596167	4.425571
0.8	0.9	0.5	0.7	42.957656	4.419549

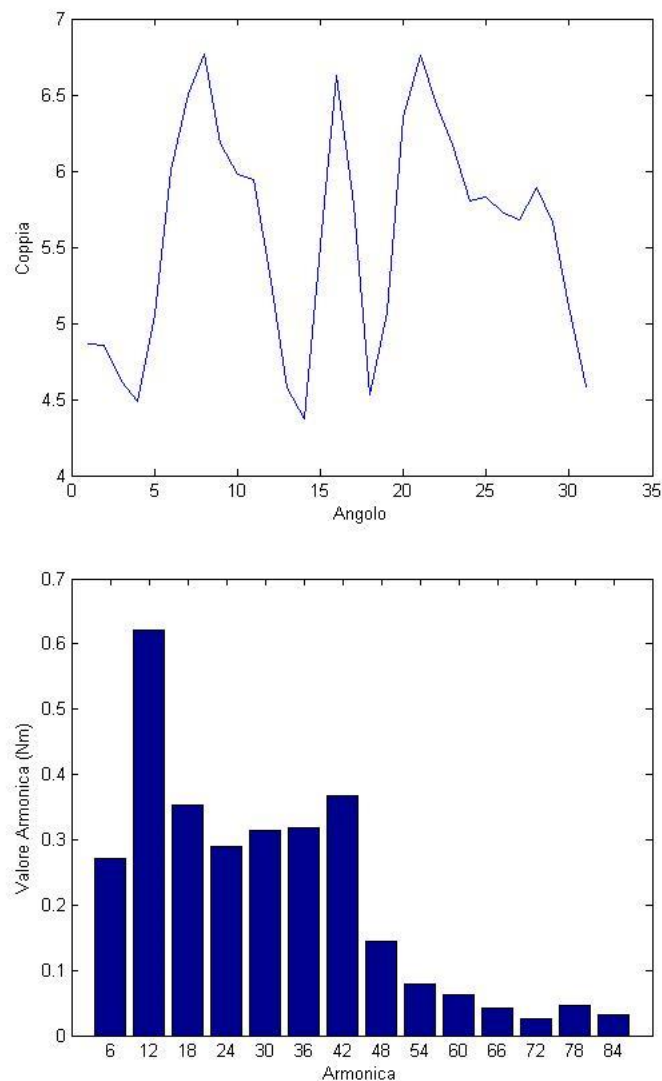


Fig.4.2.6 Coppia e relativo contenuto armonico del motore con il 42.6% di ripple

Tab. 4.2.8

<i>Coppia media</i>	<i>Oscillazione di coppia</i>
5.580451 Nm	2.397231 Nm

I risultati dell'analisi di questo motore confermano le ipotesi fatte. La forma delle punte va ad incidere principalmente sul contenuto armonico di ordine più alto e a ridurre di poco quello più basso. Questo è direttamente collegato con la percentuale di ripple, infatti agendo sulle armoniche più alte quest'ultima non viene modificata di molto.

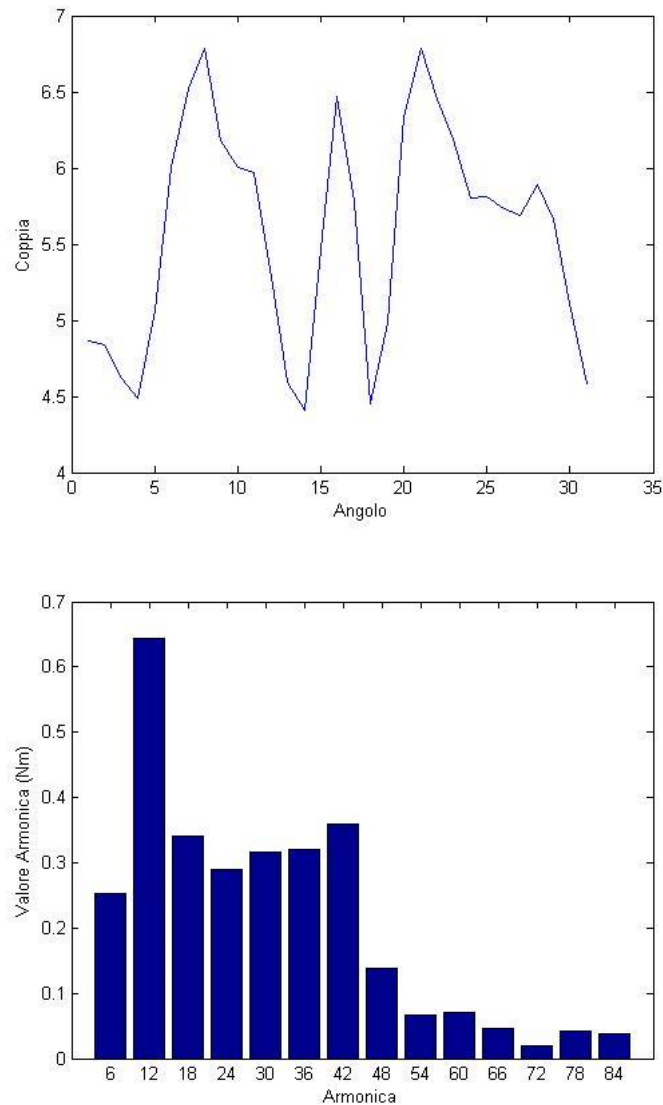


Fig.4.2.7 Andamento della coppia e relativo contenuto armonico del motore con il 43% di ripple

Tab. 4.2.9

<i>Coppia media</i>	<i>Oscillazione di coppia</i>
5.574429 Nm	2.374493 Nm

In questo motore viene esplicitato lo stesso andamento visto nel caso precedente, questo va a confermare ulteriormente l'ipotesi fatta. Nelle due prove svolte l'aspetto più interessante riguarda proprio il contenuto armonico, questo infatti subisce una grossa modifica grazie al cambiamento di un

parametro quasi secondario. Anche l'andamento della coppia viene ridefinito portandosi maggiormente verso una forma d'onda che presenta un'oscillazione ogni 5 gradi. La geometria ottimizzata delle punte non fa altro che assecondare l'andamento delle linee di flusso, addolcendo la curvatura che queste subiscono nel tratto di entrata del rotore.

4.2.4 Analisi dei motori ottimizzati a tre barriere

Vengono ora analizzati i contenuti armonici dei motori con il rotore a tre barriere. La scelta di togliere una barriera è stata fatta per eliminare l'ostacolo causato dalla prima barriera, questa infatti non s'incastava al meglio con l'andamento delle linee di flusso.

Tab.4.2.10

β_2	β_{bt}	w_{bt}	w_{43}	w_{32}	%Ripple	Parametro coppia
27°	15°	2 mm	5 mm	2 mm	39.8046	4.33885
27°	16°	2 mm	5 mm	2 mm	39.8046	4.33885
27°	17°	2 mm	5 mm	2 mm	39.8046	4.33885

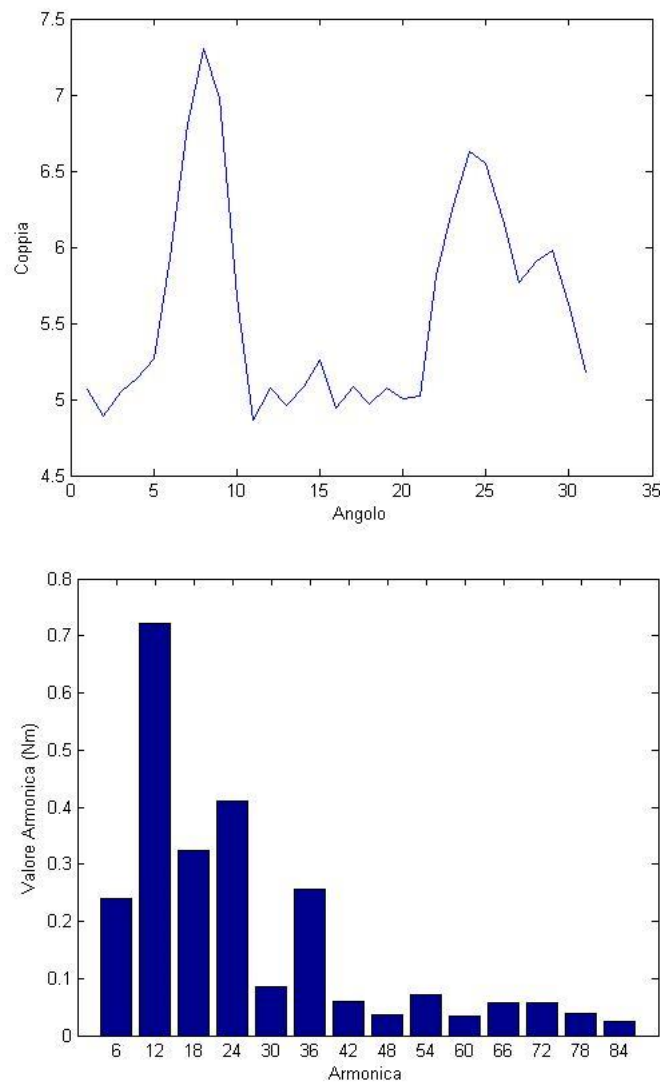


Fig. 4.2.8 Andamento della coppia e relativo contenuto armonico dei motori analizzati

Tab. 4.2.11

<i>Coppia media</i>	<i>Oscillazione di coppia</i>
5.590249 Nm	2.434524 Nm

In questo caso i tre motori, nonostante il differente angolo del taglio superiore, non hanno delle differenze nelle prestazioni e nel contenuto armonico. Dato che i tre rotor sono praticamente identici, il differente posizionamento del taglio superiore non sopisce alcun effetto. Questo fatto avvalorava ancora di più l'importanza del combinare al meglio i vari parametri. Il contenuto armonico è ancora sbilanciato a favore della seconda armonica, ma in questo caso si può notare un notevole aumento della terza, la quarta e la sesta armonica. L'assenza della prima barriera ha portato ad un leggero miglioramento della percentuale di ripple e ad una redistribuzione delle armoniche. Essendoci una barriera in meno nel rotore è presente una maggiore simmettrizzazione dei parametri e viene magnetizzata una quantità maggiore di ferro.

4.2.5 Analisi delle combinazioni di statore e rotore ottimi

In questo paragrafo verranno analizzate le combinazioni tra gli statori e i rotor ottimizzati. Verranno presi in considerazione gli statori delle combinazioni maggiori, questi infatti hanno dato i risultati migliori. Questo paragrafo sarà suddiviso in due parti, una parte dedicata ai rotor a 4 barriere e una dedicata a quelli a 3 barriere. In entrambi i casi la combinazione con gli statori ottimizzati non ha portato grandi miglioramenti sulla percentuale di ripple, tuttavia questi motori verranno analizzati comunque per poter osservare gli effetti della variazione della geometria dello statore.

Tab.4.2.12

<i>Statori con i valori massimi d'induzione</i>	
<i>Corona</i>	
<i>Geometria cava</i>	
<i>Parameto</i>	<i>Valore</i>
X_{wedav}	6
Y_{wedav}	4
X_{wedbv}	0
Y_{wedbv}	0
Y_{wsor1}	1
X_{wsor}	1
Y_{pv}	0
<i>Valore d'induzione</i>	
1.193173	
S_{slot}	
586.917 mm ²	
<i>Dente</i>	
<i>Geometria cava</i>	
<i>Parameto</i>	<i>Valore</i>
X_{wedav}	5
Y_{wedav}	4
X_{wedbv}	0
Y_{wedbv}	0
Y_{wsor1}	1
X_{wsor}	1
Y_{pv}	0
<i>Valore d'induzione</i>	
1.186645	
S_{slot}	
565.879 mm ²	
<i>Spigolo basso</i>	
<i>Geometria cava</i>	

<i>Parameto</i>	<i>Valore</i>
X_{wedav}	4
Y_{wedav}	4
X_{wedbv}	2
Y_{wedbv}	2
Y_{wsov1}	1
X_{wsov}	1
Y_{pv}	2
<i>Valore d'induzione</i>	
1.779737	
S_{slot}	
529.006 mm ²	

4.2.6.1 Rotori a 4 barriere

Corona

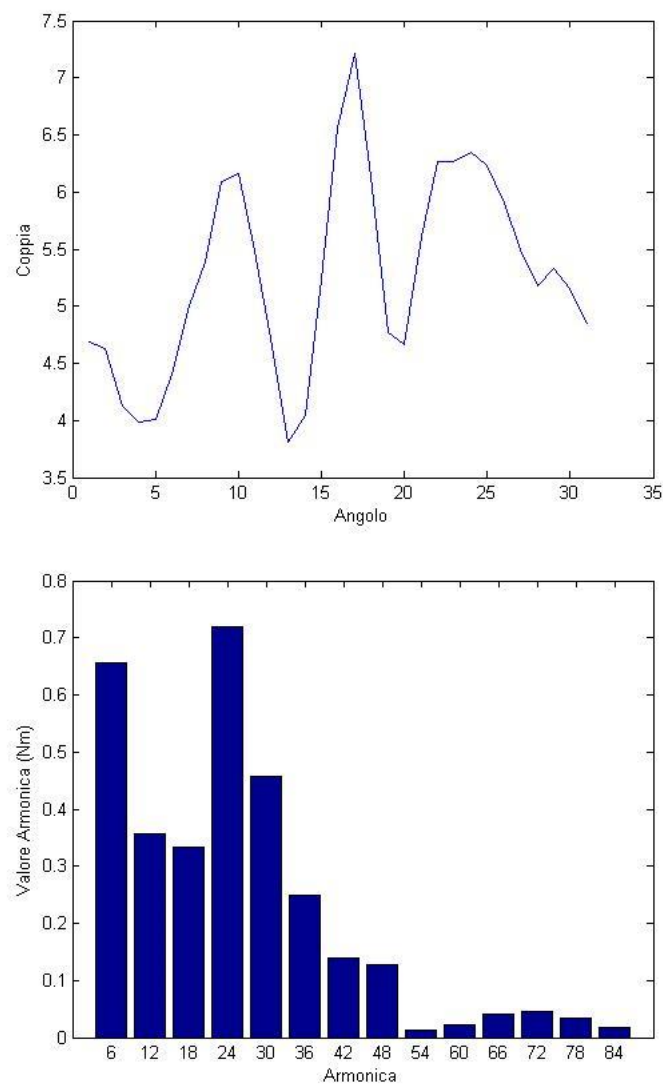


Fig.4.2.9 Coppia e contenuto armonico del motore con l'induzione maggiore in corona

Tab. 4.2.13

<i>Coppia media</i>	<i>Oscillazione di coppia</i>
5.279854 Nm	3.406800 Nm

In questo motore si può notare un abbassamento radicale della seconda armonica e un aumento della quarta e della quinta. La prima armonica è ancora molto elevata ed influenza la percentuale di ripple. Quest'ultimo aspetto è legato principalmente alla configurazione del rotore non del tutto ottimizzata con la geometria dello statore, infatti il valore della prima armonica è molto legato alla geometria del rotore. In questo caso la forma più schiacciata ed allargata della parte alta della cava, unita ad una parte bassa del dente più larga, ha portato ad un innalzamento delle armoniche di ordine più alto. Nonostante l'aumento delle oscillazioni, l'andamento della coppia si può ritenere molto buono, infatti viene definito in modo più marcato l'andamento che vede un'oscillazione ogni 5 gradi.

Dente

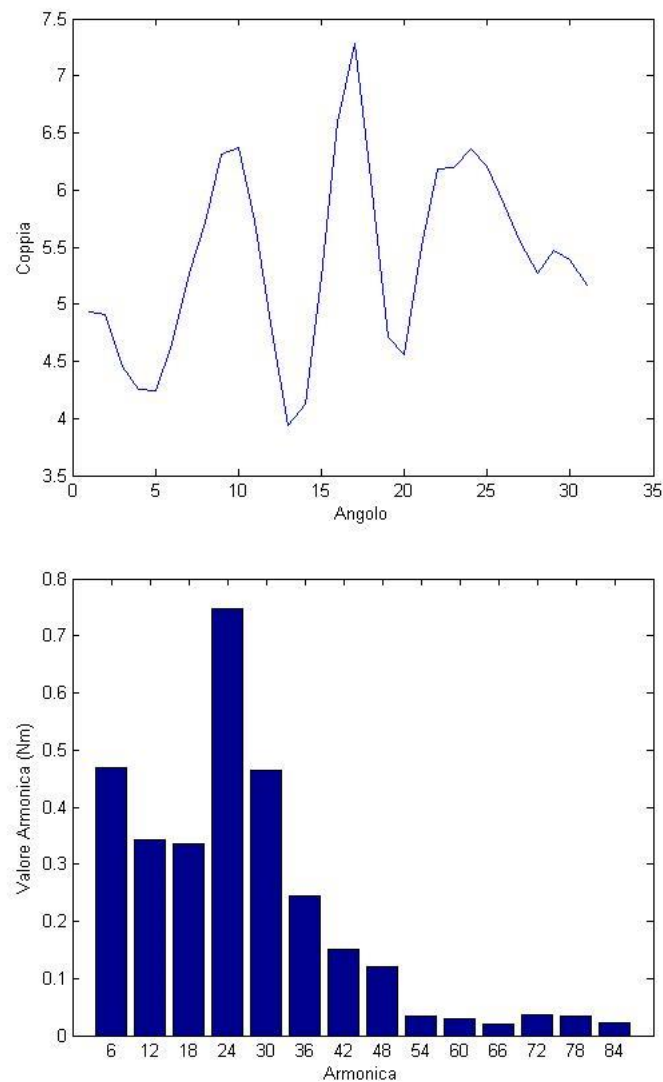


Fig.4.2.10 Coppia e contenuto armonico del motore con l'induzione maggiore nel dente

Tab. 4.2.13

<i>Coppia media</i>	<i>Oscillazione di coppia</i>
5.397374 Nm	3.346485 Nm

Il contenuto armonico di questo motore è distribuito principalmente nelle armoniche di ordine più elevato, la seconda armonica ha un valore comparabile o inferiore rispetto alle armoniche principali. Dalla terza alla sesta armonica c'è stato un aumento dei valori che ha riguardato principalmente la quarta e la quinta armonica. Per quanto riguarda la prima armonica, questa ha ancora un valore abbastanza elevato ed esercita quindi una forte influenza sulla percentuale di ripple che risulta ancora molto elevata. In questo caso la cava è molto simile a quella della prova precedente salvo per una parte superiore più ristretta che rende più piccola l'area dello slot e che allarga la parte superiore del dente. In questo statore la magnetizzazione è concentrata principalmente nei denti, questo ha avuto una forte influenza sui valori di prima e seconda armonica. Tale andamento rispecchia l'importanza di una buona interfaccia tra statore e rotore.

Spigolo basso

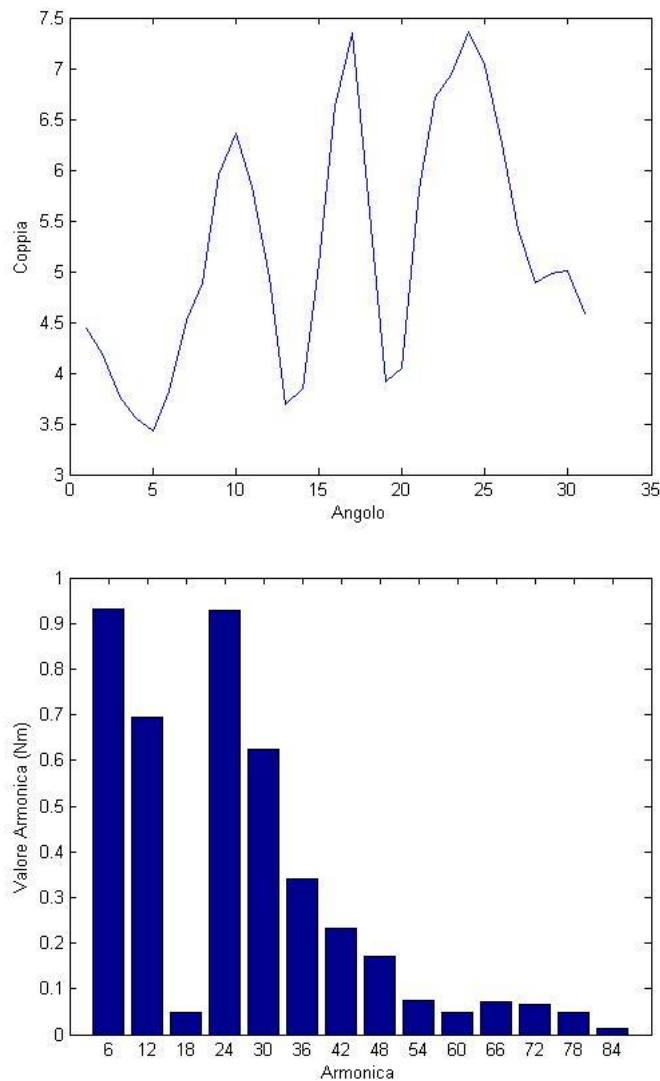


Fig.4.2.11 Coppia e contenuto armonico del motore con l'induzione maggiore nello spigolo basso

Tab. 4.2.14

<i>Coppia media</i>	<i>Oscillazione di coppia</i>
5.192360 Nm	3.934788 Nm

In questo motore si può subito notare un cambiamento radicale del contenuto armonico, in particolare si nota un notevole aumento della quarta, quinta e della sesta armonica. La prima e la seconda armonica sono ancora molto alte quindi la percentuale di ripple è molto alta. La forma della cava è molto diversa rispetto ai due statori precedenti, infatti in questo caso la cava è stata alzata in punta e stretta nello spigolo basso. Questa geometria ha portato ad un allargamento della parte bassa del dente e ad una riduzione dell'area dello slot.

Osservazioni

Fin ora nei tre motori analizzati si è potuto vedere la forte influenza esercitata dallo statore sul contenuto armonico. In particolare è risultato interessante notare come sia fondamentale una buona interazione tra lo statore e il rotore. Lo statore con la maggior induzione nel dente è il migliore dei tre casi, infatti il bilanciamento della magnetizzazione fa in modo che le linee di flusso abbiano un andamento congeniale alla disposizione delle barriere nel rotore. In tutti e tre i casi è ancora molto forte la presenza della prima armonica, questo ha influenzato negativamente le percentuali di ripple. Questo aspetto può essere corretto con una seconda ottimizzazione del rotore, infatti nelle prove svolte fin ora si è potuto notare come l'andamento della prima armonica sia strettamente legato alla geometria del rotore.

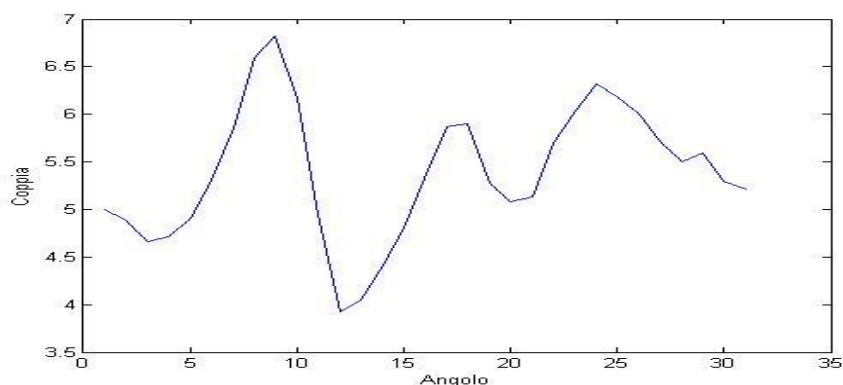
4.2.6.2 Rotori a 3 barriere

Vengono ora analizzati i tre migliori motori a tre barriere, questi sono lo statore con la massima induzione in corona e gli statori con la massima e la minima induzione nel dente. Dato che le geometrie degli altri due statori sono già state riportate, qui di seguito viene riportata solamente la geometria dello statore con la minima induzione nel dente.

Tab.4.2.15

<i>Statore con la minima induzione nel dente</i>	
<i>Geometria cava</i>	
<i>Parameto</i>	<i>Valore</i>
X_{wedav}	5
Y_{wedav}	2
X_{wedbv}	2
Y_{wedbv}	1
Y_{wsav1}	0
X_{wsav}	2
Y_{pv}	2
<i>Valore d' induzione</i>	
0.980836	
<i>S_{slot}</i>	
621.893 mm ²	

Corona



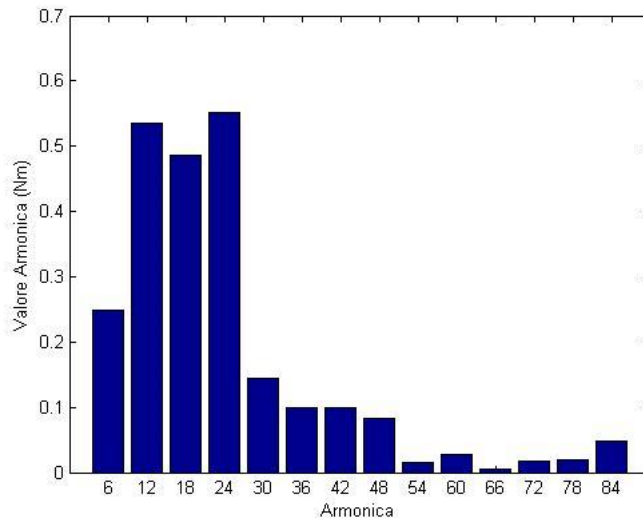


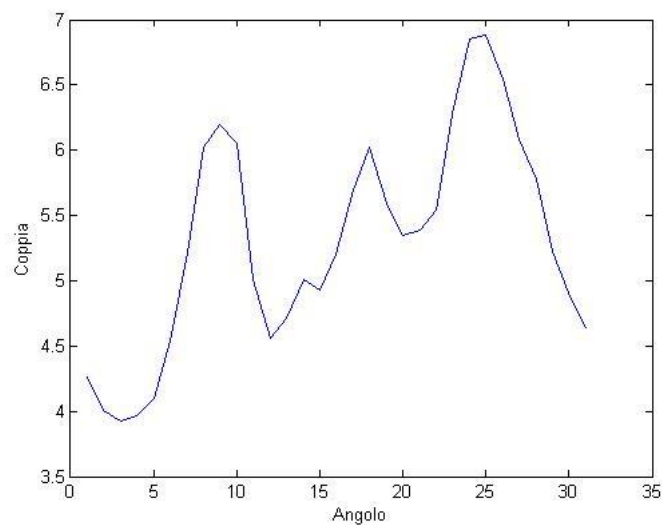
Fig.4.2.12 Coppia e contenuto armonico del motore con l'induzione maggiore nella corona

Tab. 4.2.16

<i>Coppia media</i>	<i>Oscillazione di coppia</i>
5.393571 Nm	2.894416 Nm

In questo caso si può notare un abbassamento della prima armonica ed un aumento della seconda, la terza e la quarta armonica. Questa redistribuzione ha portato ad un miglioramento delle oscillazioni di coppia, che tuttavia sono ancora molto marcate. La geometria della cava è del tutto affine a quella del caso a quattro barriere, quindi in questo caso l'assenza della prima barriera migliora l'interfaccia tra statore e rotore, in particolare allarga i canali tra le barriere e agevola l'andamento delle linee di flusso.

Dente con l'induzione minore



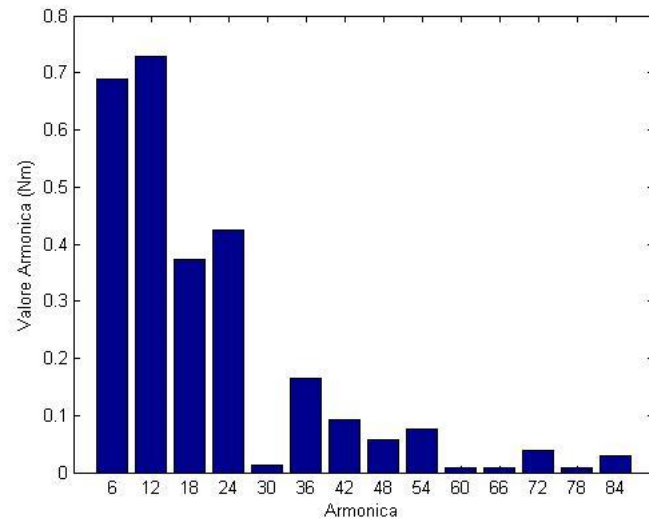


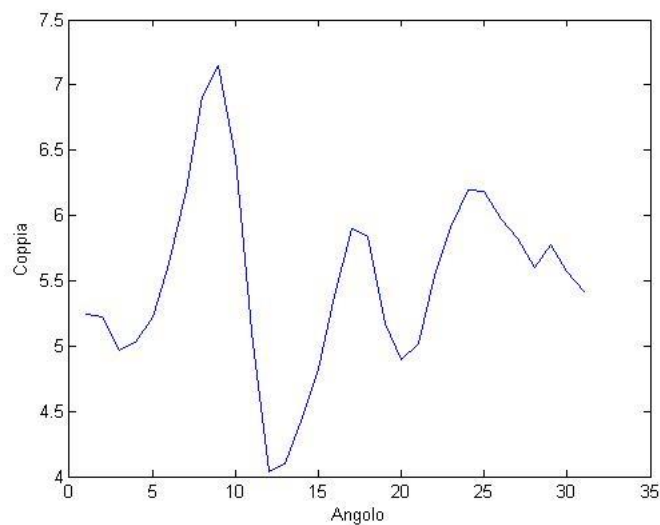
Fig.4.2.13 Coppia e contenuto armonico del motore con l'induzione minore nel dente

Tab. 4.2.16

<i>Coppia media</i>	<i>Oscillazione di coppia</i>
5.304599 Nm	2.959124 Nm

In questo caso il contenuto armonico è affine a quello dei primi motori analizzati in questo capitolo, in questo caso però i valori della prima e della seconda armonica sono più bassi e risultano essere comparabili a quelli delle armoniche di ordine più alto. Questa riduzione delle prime due armoniche fa in modo che la percentuale di ripple sia più bassa rispetto a quella rilevata nelle prove parametriche. La geometria della cava stringe ed abbassa lo spigolo superiore e alza la punta centrale, questo conferisce allo slot una forma più longilinea e allarga il dente.

Dente con l'induzione maggiore



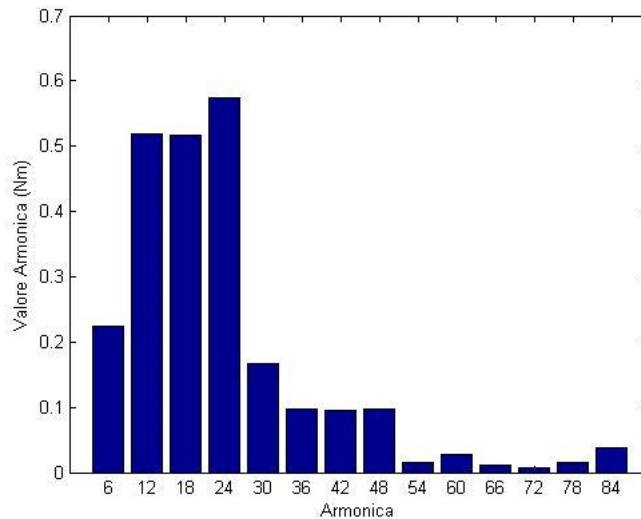


Fig.4.2.14 Coppia e contenuto armonico del motore con l'induzione maggiore nel dente

Tab. 4.2.17

<i>Coppia media</i>	<i>Oscillazione di coppia</i>
5.507652 Nm	3.103812 Nm

In questo motore la prima armonica e le armoniche oltre il quinto ordine hanno subito una riduzione. Il contenuto armonico è sbilanciato tutto nelle armoniche dalla seconda alla quarta, questo comporta un andamento della coppia privo di distorsioni ma con delle oscillazioni abbastanza ampie.

Osservazioni

Nelle analisi svolte si è potuto osservare l'influenza della geometria dello statore sul contenuto armonico. I due aspetti principali sono: la forma della cava e l'interfaccia tra statore e rotore. Per quanto riguarda il primo aspetto, il contenuto armonico migliora con un omogeneizzazione della magnetizzazione. La geometria delle cave e dei denti dev'essere tale da creare dei canali congeniali all'andamento delle linee di flusso, in particolare non si devono creare delle zone di saturazione. L'innalzamento della punta della cava e l'allargamento dello spigolo superiore hanno portato ad una riduzione delle armoniche di ordine più basso e hanno redistribuito il contenuto armonico verso gli ordini superiori. Per quanto riguarda la parte bassa del dente, restringere lo spigolo basso e alzare l'apertura di cava ha aumentato le armoniche di ordine più alto. L'altro aspetto molto importante emerso da queste prove è l'interfaccia tra lo statore e il rotore. Modificare la geometria del dente ridistribuisce le linee di flusso e ne modifica l'interazione con la geometria del rotore, in particolare durante la rotazione, il passaggio delle linee di flusso tra lo statore e il rotore è fondamentale per la riduzione delle oscillazioni maggiori. Come si è già visto nelle prime prove svolte, una variazione della geometria del rotore riduce in modo limitato le prime due armoniche redistribuendone il contenuto sugli ordini maggiori. Al fine di ottenere un risultato migliore non basta agire singolarmente sul rotore o lo statore, ma è necessario riadattare entrambe le geometrie in modo da integrarne gli aspetti positivi e ottenere così dei risultati migliori.

4.2.6 Analisi dei motori ottenuti con la seconda ottimizzazione dei rotori

Com'è stato osservato nel paragrafo precedente, i miglioramenti portati da un'ottimizzazione della geometria dello statore vengono limitati da un'interazione tra statore e rotore non del tutto ottimizzata. A tal proposito per i motori ottenuti dall'unione di statori e rotori ottimizzati è stata fatta una seconda ottimizzazione dei rotori. I risultati di queste prove sono stati molto buoni e hanno definiti un punto di arrivo per l'ottimizzazione geometrica. In questo paragrafo verranno analizzati questi motori dal punto di vista del contenuto armonico.

4.2.7.1 Motore a 4 barriere

In questo motore lo statore è quello con la massima induzione nel dente, mentre il rotore ha la seguente geometria:

Tab.4.2.18

Parametro	Valore
β_{bt}	16
β_1	22
β_2	28
β_3	34
β_4	42
t^*	2 mm
w_{bt}	1 mm
w_{43}	3 mm
w_{32}	2.5 mm
w_{21}	2.5 mm

*lo spessore di tutte le barriere è uguale

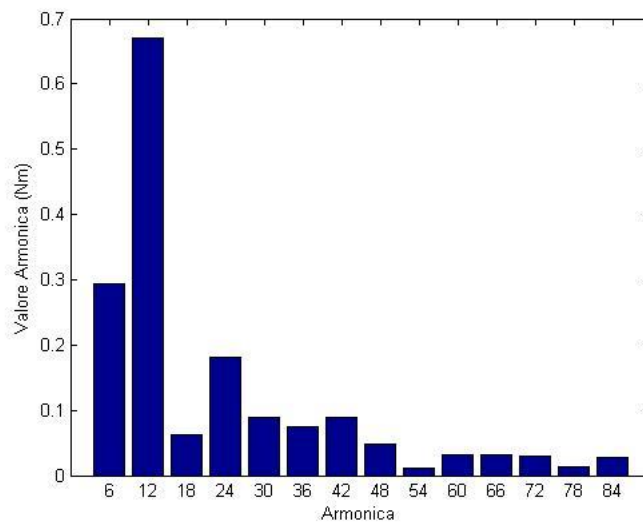
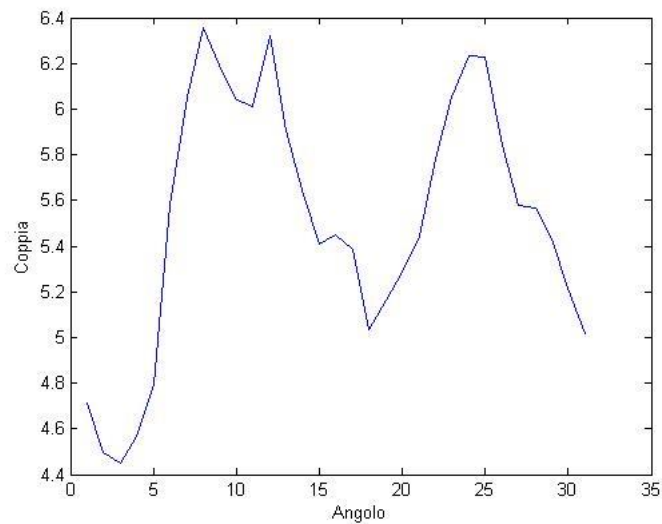


Fig.4.2.15 Andamento della coppia e contenuto armonico del motore analizzato

Tab. 4.2.19

<i>Coppia media</i>	<i>Oscillazione di coppia</i>
5.523548 Nm	1.904793 Nm

I risultati non sono in linea con le aspettative, infatti la marcata riduzione del ripple portata dal cambiamento nella geometria del rotore non ha portato ad una riduzione sostanziale della seconda armonica. Va tuttavia osservato che tutte le altre armoniche risultano avere un valore fortemente limitato. Nel complesso quindi il contenuto armonico si può ridurre solamente al valore della seconda armonica, questo ha portato ad una riduzione delle oscillazioni di coppia, un aumento della coppia media e ad un cambiamento nell'andamento della forma d'onda. Un ulteriore improvement dei risultati potrebbe essere ottenuto con lo skewing del rotore, questo verrà analizzato in seguito.

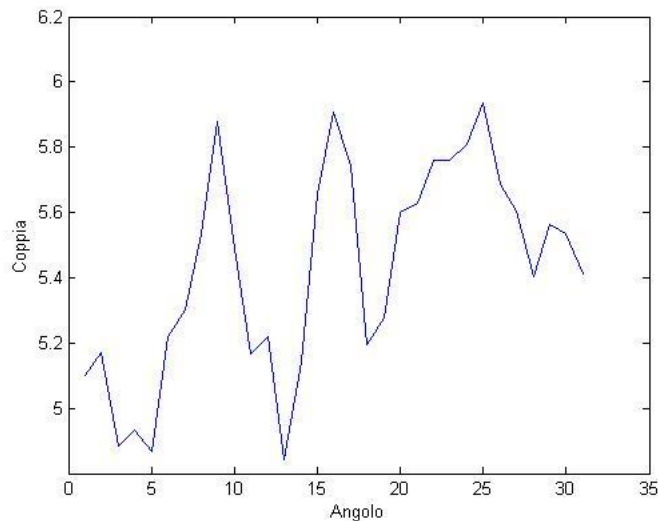
4.2.7.2 Motore a 3 barriere

In questo motore lo statore è quello con la massima induzione nella corona, mentre il rotore ha la geometria riportata in tabella:

Tab.4.2.20

Parametro	Valore
β_{bt}	16
β_2	26
β_3	35
β_4	40
t^*	2 mm
w_{bt}	2 mm
w_{43}	5.5 mm
w_{32}	3 mm

*lo spessore di tutte le barriere è uguale



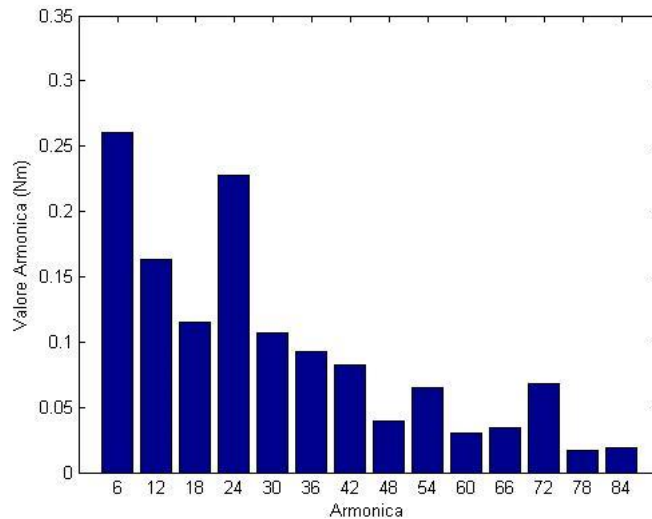


Fig.4.2.16 Andamento della coppia e contenuto armonico del motore analizzato

Tab. 4.2.21

<i>Coppia media</i>	<i>Oscillazione di coppia</i>
5.426748 Nm	1.092574 Nm

In questo motore il contenuto armonico è molto contenuto e praticamente quasi nullo, questo ha favorito una riduzione molto marcata delle oscillazioni di coppia. Analizzando i vari ordini armonici si può notare come solamente la prima e la quarta armonica siano ad un valore sufficientemente alto per influenzare in modo netto l'andamento della forma d'onda. Il resto delle armoniche è praticamente nullo e costituisce solamente una piccola distorsione nell'andamento della coppia.

Osservazioni

I risultati del motore a tre barriere sono nettamente superiori rispetto a quelli ottenuti con le 4 barriere, questo va in continuità con le considerazioni geometriche che hanno portato alla costruzione di questi motori. La seconda ottimizzazione dei rotori ha messo in luce l'importanza di una buona interazione tra la geometria dello statore e del rotore. I miglioramenti ottenuti attraverso i cambiamenti geometrici evidenziano lo stretto legame tra la geometria e il contenuto armonico, tale legame è definito in tutte le osservazioni fatte fin ora e nelle varie considerazioni che hanno accompagnato il processo di definizione di una geometria ottimale per il motore analizzato. L'ultimo step che si può applicare è lo skewing.

4.2.7 Analisi dei motori con lo skewing del rotore

Vengono ora analizzati i tre motori che hanno riportato le prestazioni migliori con l'applicazione dello skewing: il motore a 4 barriere con skewing 0.5 e i due motori a tre barriere con skewing 0.2.

4.2.7.1 Motore a 4 barriere

In questo paragrafo viene analizzato il motore a 4 barriere ottenuto nel paragrafo 3.1 del capitolo precedente. Questo motore ha uno skewing di 0.5, questo non è molto elevato ma comunque è risultato molto efficace nel ridurre la percentuale di ripple. Il motore di base è quello del paragrafo 4.2.6.1 di questo capitolo, in quel motore era molto forte la presenza della seconda armonica, mentre le altre armoniche erano molte ridotte. In seguito all'applicazione dello skewing la percentuale di ripple si è ridotta di circa l'11% e il valore della coppia media di è ridotto di circa 0.5 Nm. Questi due fattori vanno ad indicare una riduzione delle armoniche di ordine più basso. Qui di seguito vengono riportati i grafici per il confronto.

Inizialmente la coppia presentava questo andamento:

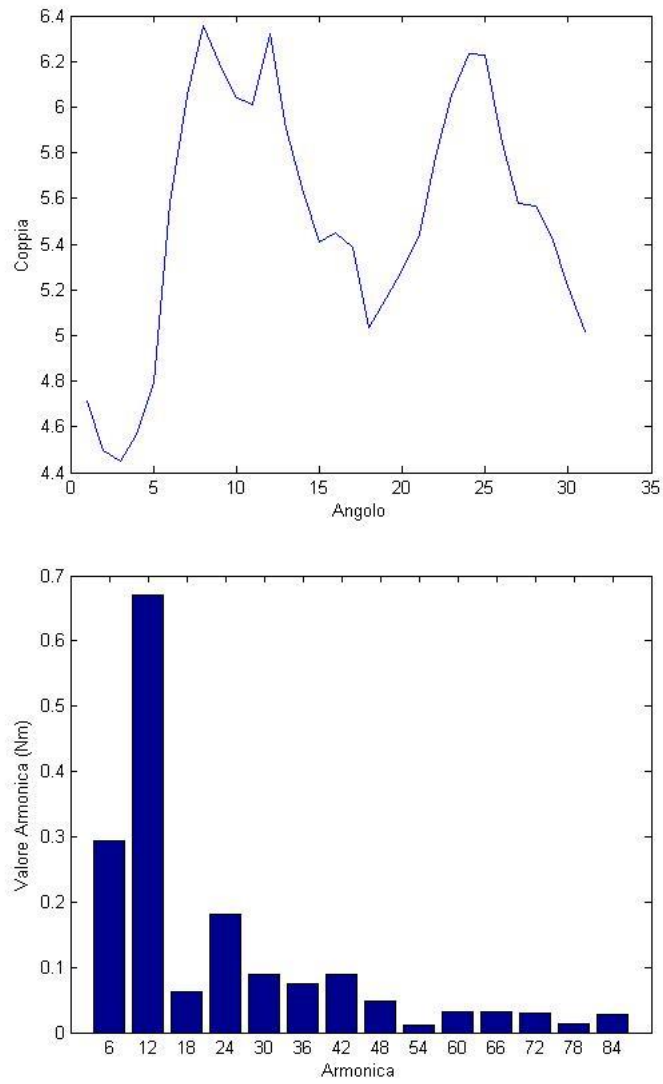
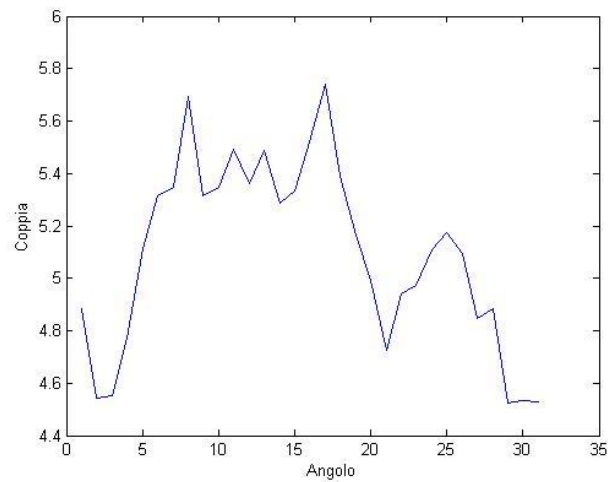


Fig.4.2.17 Andamento della coppia e contenuto armonico del motore analizzato pre-skewing

In seguito allo skewing:



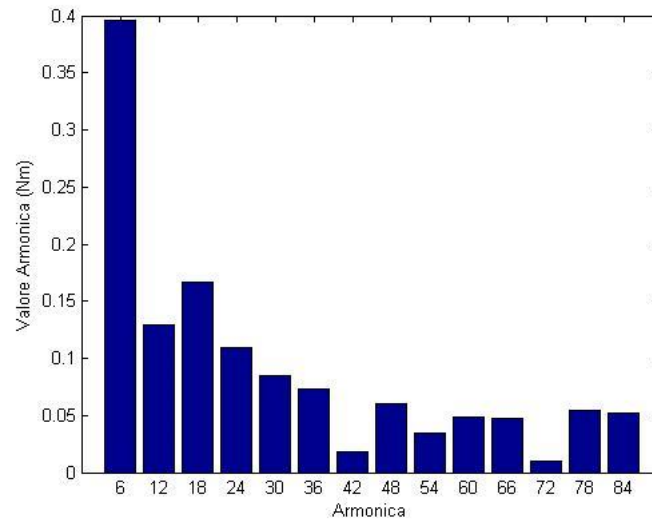


Fig.4.2.18 Andamento della coppia e contenuto armonico del motore analizzato post-skewing

Tab. 4.2.22

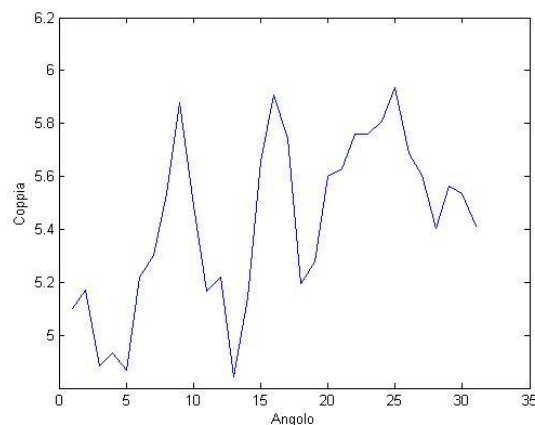
<i>Coppia media</i>	<i>Oscillazione di coppia</i>
5.095580 Nm	1.214513 Nm

Dal confronto dei due grafici si può notare come lo skewing abbia ridotto notevolmente la seconda armonica e anche le armoniche di ordine più alto. Ora l'andamento è definito principalmente dalla prima armonica, quest'ultima comunque ha un valore molto ridotto. Nel complesso la diminuzione molto marcata della seconda armonica ha comportato un abbassamento notevole della percentuale di ripple alla quale è si è affiancata una riduzione della coppia media. Considerato il notevole improvement ottenuto per le oscillazioni di coppia, il valore della coppia media può ritenersi comunque molto buono.

4.2.7.2 Motore a tre barriere

Viene ora analizzato il motore ottenuto con il primo step nel paragrafo 3.2 del capitolo precedente. Il motore di base è stato analizzato nel paragrafo 4.2.7 in questo capitolo. Le prestazioni di base, nonostante fossero già ottimali, hanno ottenuto un notevole improvement dallo skewing. Per quanto riguarda il contenuto armonico, nel motore di base tutti gli ordini armonici avevano dei valori molto bassi. Le due armoniche più alte, la prima e la quarta, comunque non risultavano molto elevate ed incidavano sull'andamento senza causare oscillazioni troppo elevate.

L'andamento della coppia prima dello skewing era il seguente:



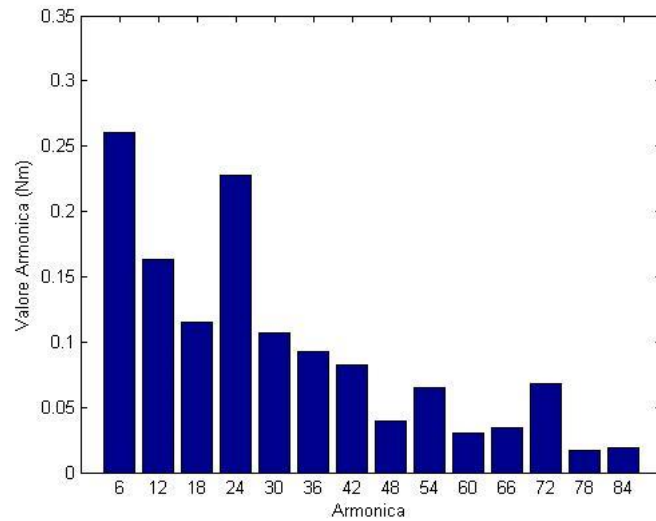


Fig.4.2.19 Andamento della coppia e contenuto armonico del motore analizzato pre-skewing

Con lo skewing:

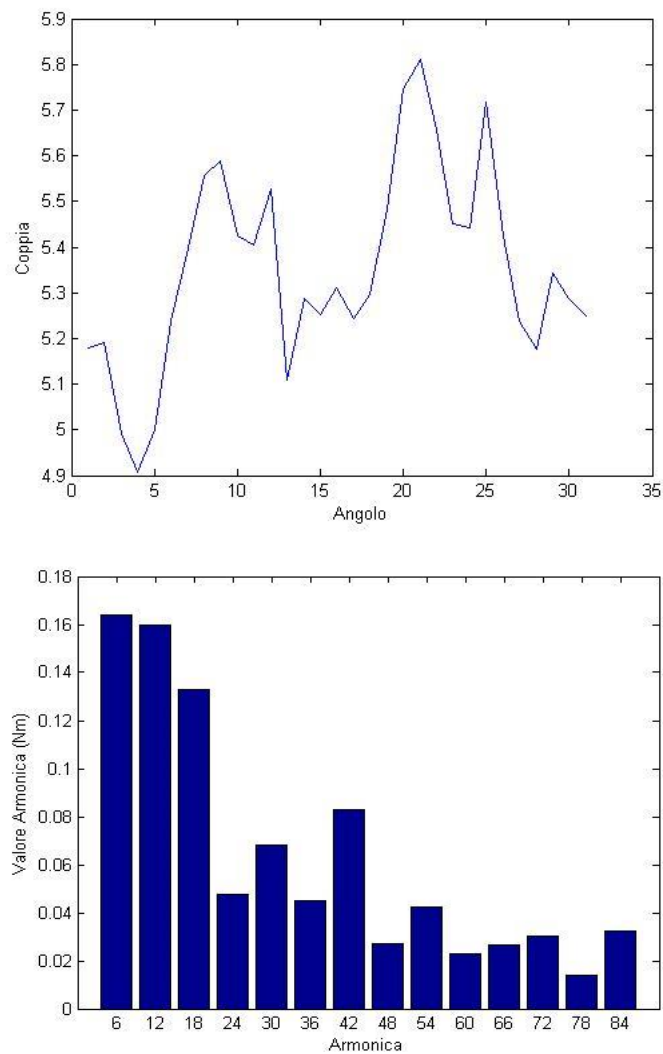


Fig.4.2.20 Andamento della coppia e contenuto armonico del motore analizzato post-skewing

Tab. 4.2.23

<i>Coppia media</i>	<i>Oscillazione di coppia</i>
5.352513 Nm	0.904313 Nm

In seguito all'applicazione dello skewing le armoniche più elevate si sono ridotte molto e si sono riequilibrare con le altre. Anche in questo caso la riduzione delle armoniche più alte ha enfatizzato molto gli ordini armonici più alti e ha portato molte più distorsioni nell'andamento della coppia. Per quanto riguarda il valore medio della coppia, questo risulta essere nella norma dei risultati ottenuti fin ora e non ha risentito di una riduzione elevata. La forma d'onda della coppia, nonostante le distorsioni non ha subito delle variazioni elevate ed ha conservato la sua periodicità.

4.2.7.3 Motore a tre barriere con le punte ottimizzate

Viene ora analizzato il motore ottenuto nel paragrafo 2.8.2 del capitolo 2, questo motore presenta una geometria uguale a quella del motore esaminato nella sezione precedente (paragrafo 4.2.6.3), salvo per la forma delle punte. Com'è già stato stabilito con le prove precedenti, una variazione della geometria delle punte interessa principalmente il contenuto armonico di ordine più elevato ed influenza poco le prestazioni. L'applicazione dello skewing agendo sulle armoniche più basse ha bilanciato il contenuto armonico e ridotto la percentuale di ripple.

Prima dell'applicazione dello skewing:

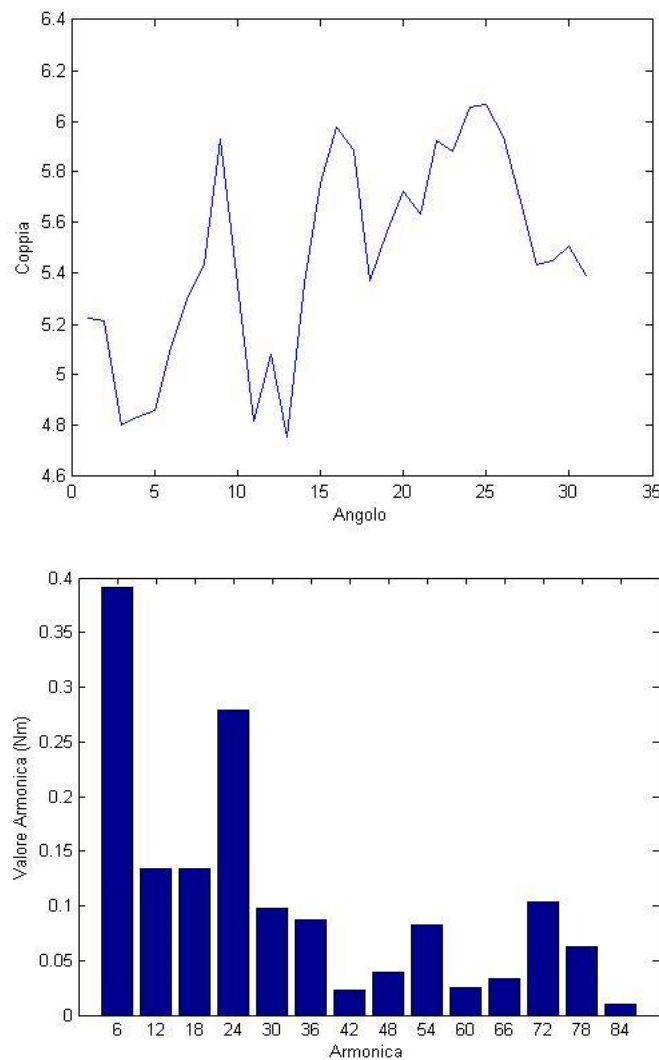


Fig.4.2.21 Andamento della coppia e contenuto armonico del motore analizzato pre-skewing

Tab. 4.2.24

<i>Coppia media</i>	<i>Oscillazione di coppia</i>
5.462876 Nm	1.309918 Nm

In seguito all'applicazione dello skewing:

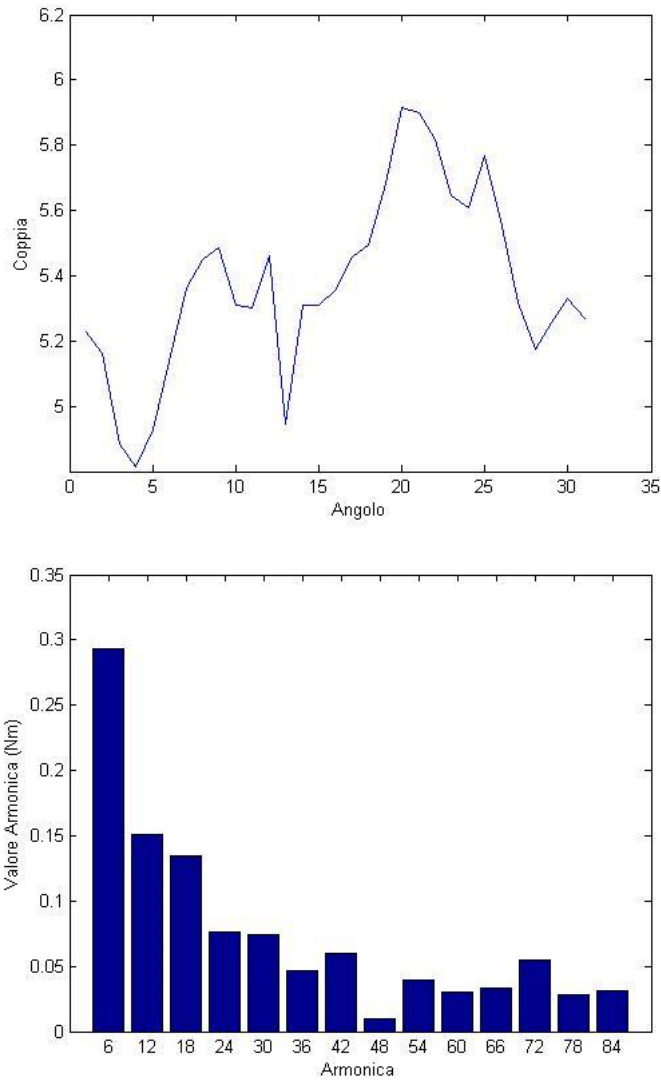


Fig.4.2.22 Andamento della coppia e contenuto armonico del motore analizzato post-skewing

Tab. 4.2.25

<i>Coppia media</i>	<i>Oscillazione di coppia</i>
5.374953 Nm	1.101099 Nm

Nel motore di base la prima e la quarta armonica avevano i valori maggiori e determinavano l'andamento della coppia. In seguito all'applicazione dello skewing c'è stata una redistribuzione delle armoniche che ha ridotto di molto la quarta armonica e in maniera più contenuta la prima armonica. Il livello generale delle armoniche, data la geometria delle punte, è rimasto molto basso, questo ha fatto in modo che il livello di distorsione, pre e post skewing, sia rimasto uguale. Non ci sono state variazioni nella periodicità. Per quanto riguarda le prestazioni sia la coppia media che la percentuale di ripple si sono ridotte leggermente.

4.3 Osservazioni e conclusioni

Con le prove svolte in questo capitolo è stato possibile definire un legame tra la geometria e l'andamento della coppia, in particolare con il suo contenuto armonico. Le singole variazioni geometriche hanno definito dei cambiamenti nelle prestazioni che sono direttamente legati ed influenzati dal contenuto armonico della coppia. Nelle prove svolte fin ora è emerso come le armoniche di ordine più basso, in particolare la prima e la seconda, siano determinanti per la percentuale di ripple e il valore della coppia media. Per ottenere le prestazioni migliori è stato determinante trovare ed ottimizzare i fattori che hanno maggiore influenza sul valore di queste armoniche. In particolare, dalle prove svolte fin ora è emerso che gli angoli delle barriere e gli spazi tra queste, insieme alla geometria dei denti di statore, sono i principali parametri da modificare. Per quanto riguarda lo statore; dei denti con la parte alta leggermente più stretta ed abbassata ed una base più alta hanno migliorato la distribuzione della magnetizzazione rendendola più omogenea. Il riequilibrio dell'induzione allo statore ha portato ad una riduzione delle armoniche di ordine più basso ed ha messo in luce l'importanza di una buona interfaccia tra statore e rotore. In particolare dalla redistribuzione della magnetizzazione nello statore è nata la necessità di ri-ottimizzare la geometria del rotore e di renderla così congeniale a quella dello statore. La seconda ottimizzazione del rotore ha portato ad una ulteriore riduzione delle prime due armoniche e ha migliorato in modo notevole le prestazioni. Le geometrie dei rotori ri-ottimizzati non hanno stravolto le osservazioni fatte fin ora e hanno confermato come una configurazione più alta di angoli ed una simmetrizzazione degli spazi vada a ridurre le armoniche più basse. Le variazioni geometriche che comportano dei miglioramenti nelle prestazioni sono tutte basate sul fatto di seguire il più possibile l'andamento naturale delle linee di flusso. Questo aspetto è messo in luce dal fatto che i motori a 3 barriere siano prestazionalmente migliori di quelli a 4 barriere. Il fatto di togliere la prima barriera ha ridotto la curvatura delle linee di flusso che arrivavano dallo statore e ha comportato una riduzione sostanziale del ripple pur mantenendo un buon valore di coppia media. Un'altro aspetto che è emerso è l'influenza esercitata dalla forma delle punte delle barriere. Durante la rotazione del rotore una forma più arrotondata delle punte ha ridotto le armoniche di ordine più alto ed ha leggermente aumentato il numero di linee di flusso concatenate. In tutte le prove svolte, più che una variazione del singolo parametro, è risultato più importante ottimizzare la combinazione tra i vari fattori geometrici. Questo fatto è molto importante per poter riprodurre lo stesso metodo di ottimizzazione con altri motori. Per quanto possano variare la geometria o il tipo di alimentazione (numero di cave, poli ecc.) il principio di base è sempre quello di adattare il più possibile la geometria all'andamento naturale delle linee di flusso.

Capitolo 5: Configurazione 9-6

In questo capitolo viene analizzata una diversa configurazione dello stesso motore, in particolare vengono mantenute le stesse dimensioni di base utilizzate fin ora e viene cambiata la configurazione di cave e poli. I cambiamenti apportati stravolgono la geometria ma non vanno a cambiare quanto ottenuto fin ora. I parametri su cui lavorare per migliorare le prestazioni rimangono gli stessi, quello che può cambiare sono le modifiche che gli vanno apportate. Per l'analisi di questo motore verrà utilizzata la stessa procedura vista in precedenza, in questo caso però verrà svolta in modo più sintetico. Il motore di partenza è basato su quelli ottimizzati in precedenza e presenta un rotore con sei gruppi di 3 barriere ciascuno. Per quanto riguarda lo statore, la geometria delle cave definisce un dente che tende a concentrare la magnetizzazione verso la parte più centrale e bassa.

5.1 Prove parametriche

Vengono ora svolte delle prove parametriche sul rotore. Per quanto riguarda lo statore non verranno svolte prove parametriche, infatti nel passaggio da 6 a 9 cave la ridefinizione della geometria è stata fatta in modo da ottimizzare la forma delle cave. Per la valutazione dei vari modelli verranno riutilizzati gli stessi due parametri visti per la prova precedente, in questo caso il parametro della coppia viene leggermente modificato. Per questa configurazione questo parametro sarà pari alla differenza tra 30 e la coppia media prodotta, questo cambiamento è legato all'aumento della coppia che interessa questa configurazione. Qui di seguito sono riportati i dati che rimarranno fissi durante tutte le prove parametriche.

Tab.5.1 Dati geometrici

<i>Parametro</i>	<i>Valore</i>
Q_s	9
L_{stk}	150 mm
D_{es}	150 mm
D_{slot}	126 mm
D_i	86 mm
w_{so}	3.33 mm
h_{so}	2.4 mm
w_t	16 mm
h_s	20 mm
w_s	26 mm
h_{hi}	12 mm
g	0.5 mm
D_{sh}	24 mm
S_{slot}	349.477 mm ²

Tab.5.2 Dati elettrici

Dato	Valore
p	3
n_c	52
α_{ie}	45°
k_{fill}	0.6
I_p	39 A

Tab.5.3 Matrice di cava

Fase A	0.5	0	-0.5	0.5	0	-0.5	0.5	0	-0.5
Fase B	-0.5	0.5	0	-0.5	0.5	0	-0.5	0.5	0
Fase C	0	-0.5	0.5	0	-0.5	0.5	0	-0.5	0.5

Prova 1

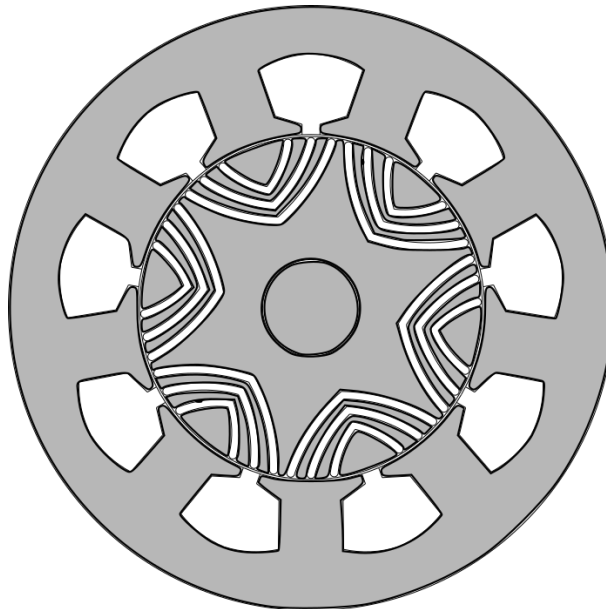
Per questa prova viene utilizzata una configurazione abbastanza semplice. Le tre barriere hanno degli angoli abbastanza bassi e sono distanziate in modo omogeneo. Non viene introdotto il taglio superiore, questo per vedere al meglio tutto il contenuto armonico. Com'è già stato visto in tutte le prove precedenti, il taglio superiore va a ridurre le armoniche di ordine più basso. In generale le barriere tendono ad essere molto alte, questo lascia uno strato di ferro nella parte interna del rotore e non direziona al meglio le linee di flusso. Qui di seguito vengono tabulati i dati del motore:

Tab. 5.4

<i>Spessori</i>	
t^*	2 mm
<i>Spazi tra le barriere</i>	
w_{sb}	8 mm
w_{32}	2 mm
w_{21}	2 mm
<i>Angoli</i>	
β_1	12°
β_2	20°
β_3	27°

*Gli spessori sono tutti uguali

I risultati mostrano un elevato contenuto di ripple, le oscillazioni sono molto elevate e sono principalmente determinate da una seconda armonica preponderante. In questo caso possono essere riscontrate delle affinità con le prime prove parametriche svolte per la configurazione 6-4, anche in quel caso l'assenza del taglio superiore e una posizione troppo alta delle barriere portava ad avere delle oscillazioni eccessive.



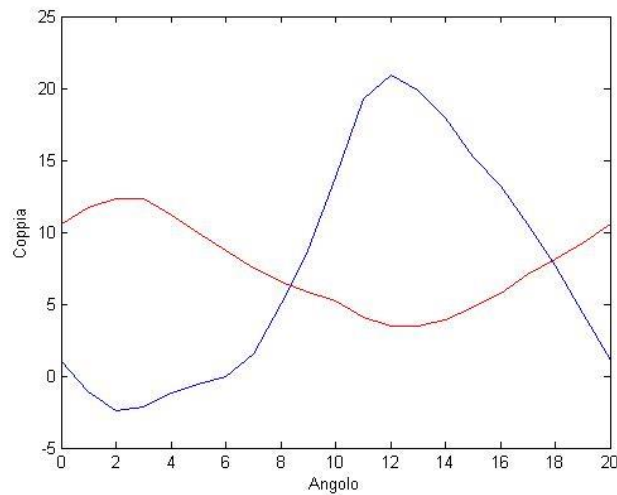


Fig. 5.1 Modello utilizzato per la prova e relativo andamento della coppia

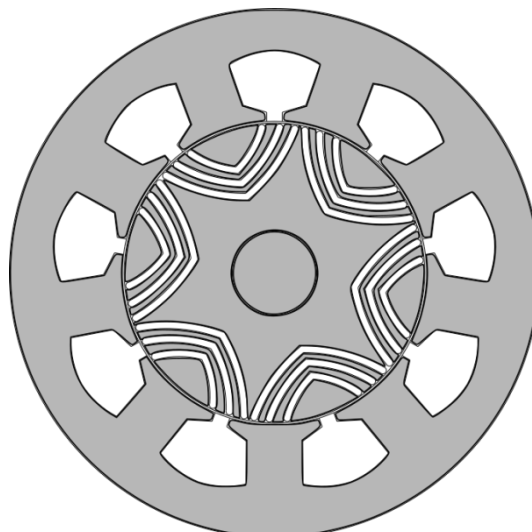
Prova 2

Per questa prova vengono mantenuti gli stessi spazi e spessori utilizzati nella prova 1 ma vengono aumentati gli angoli delle barriere. Questo aumento dovrebbe migliorare il contenuto armonico allargando i canali dove avviene la magnetizzazione e riducendo la curvatura delle linee di flusso. Nel complesso la geometria di questo rotore dovrebbe consentire una riduzione della prima e della seconda armonica e di conseguenza una riduzione del ripple. La geometria del rotore viene riportata in tabella:

Tab.5.5

<i>Angoli</i>	
β_1	12°
β_2	20°
β_3	27°

I risultati sono in linea con le ipotesi fatte e registrano una riduzione della percentuale di ripple. Per quanto riguarda la forma d'onda della coppia, questa è del tutto affine a quella vista in precedenza. In questo caso la diminuzione del ripple è abbastanza buona, considerato che sono stati variati solamente gli angoli delle barriere. Le oscillazioni non sono ancora accettabili e devono essere ridotte ancora molto.



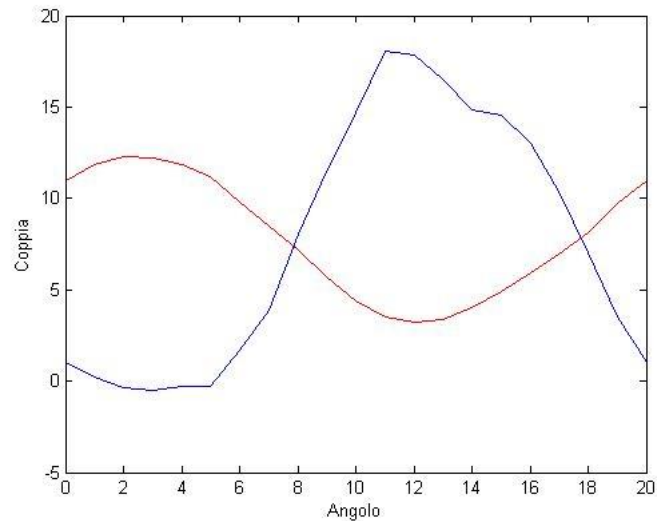


Fig. 5.2 Modello utilizzato per la prova e relativo andamento della coppia

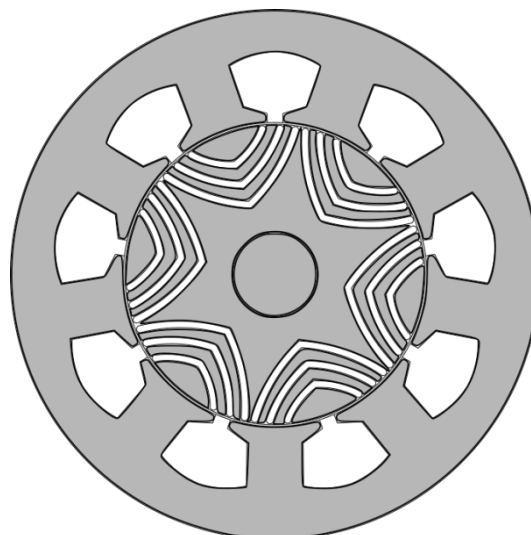
Prova 3

Per questa prova viene mantenuta la buona configurazione di angoli utilizzati nella seconda prova e vengono variati gli spazi tra le barriere. Questi sono tali da abbassare le barriere e portarle verso la parte più interna del rotore. La geometria del rotore dovrebbe diminuire ulteriormente le armoniche più basse e abbassare le oscillazioni che hanno interessato la coppia nelle prove svolte fin ora. Di seguito viene riportata la geometria del rotore:

Tab.5.6

<i>Spazi tra le barriere</i>	
w_{sb}	6 mm
w_{32}	4 mm
w_{21}	4 mm

I risultati sono in linea con le ipotesi fatte e vanno a ridurre leggermente la percentuale di ripple. Non ci sono cambiamenti nell'andamento della forma d'onda della coppia. Nel complesso i miglioramenti non sono ancora tali da poter esser ritenuti validi.



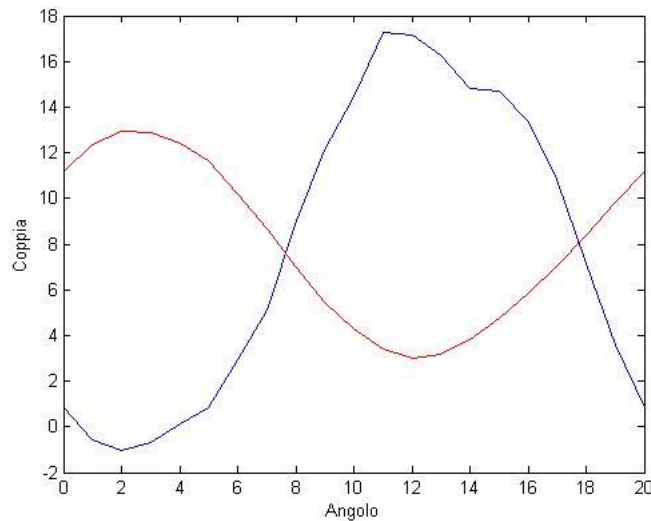


Fig. 5.3 Modello utilizzato per la prova e relativo andamento della coppia

Prova 4

In questa prova viene introdotto il taglio superiore, questo dovrebbe migliorare la percentuale di ripple e modificare anche la coppia media. Il resto della geometria rimane uguale alle prove svolte in precedenza salvo per la presenza del taglio superiore che viene messo a $\beta_{bt} = 13^\circ$. Qui di seguito vengono comunque riportati i dati, in modo da riepilogare la geometria.

Tab.5.7

<i>Spessori</i>	
t^*	2 mm
<i>Spazi tra le barriere</i>	
w_{sb}	6 mm
w_{32}	4 mm
w_{21}	4 mm
<i>Angoli</i>	
β_1	15°
β_2	22°
β_3	28°
β_{bt}	13°

*Gli spessori sono tutti uguali

I risultati registrano buon miglioramento delle prestazioni, l'introduzione del taglio superiore ha migliorato la percentuale di ripple, riducendo la seconda armonica. L'andamento della coppia è simile ai precedenti, ma comincia a risentire delle distorsioni delle armoniche di ordine più alto. Per quanto riguarda il valore della coppia media, questo non si è ridotto di molto. Per le prove successive verrà sempre utilizzato il taglio superiore e verranno abbassate le barriere. Questi due aspetti sono fondamentali per la riduzione della percentuale di ripple, infatti in tutte le prove svolte fin ora la densità di flusso e la distribuzione di magnetizzazione non omogenee hanno mostrato la loro influenza negativa.

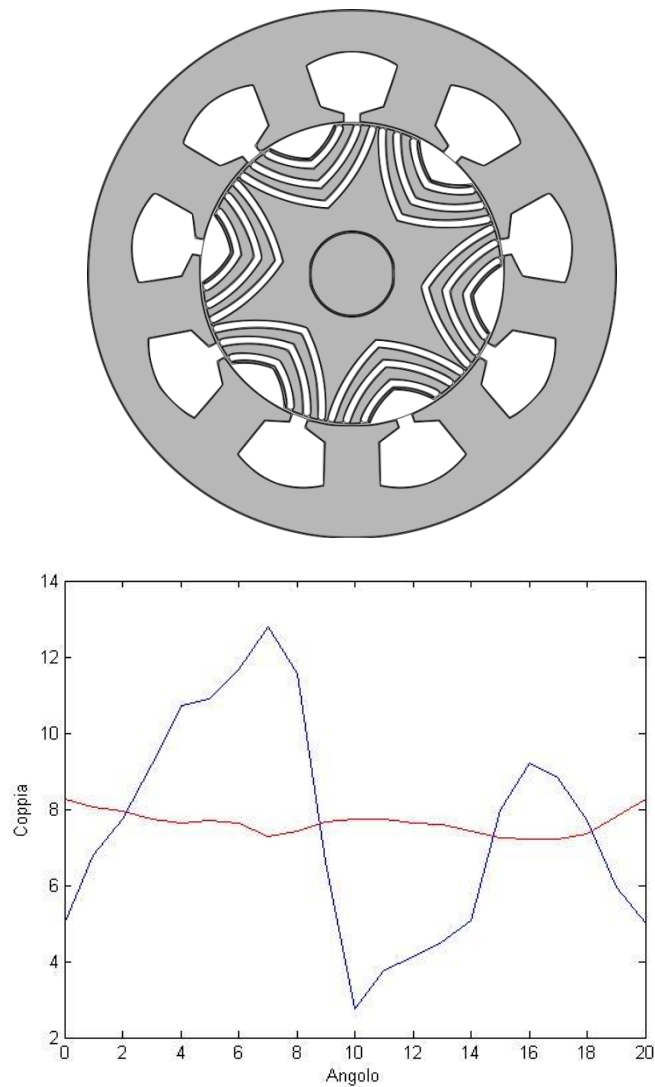


Fig.5.4 Modello utilizzato per la prova e relativo andamento della coppia

Prova 5

In questa prova vengono variati la configurazione degli spazi e gli angoli delle barriere. La geometria dello statore in questo caso viene designata in modo da abbassare la locaione delle barriere e aumentare il taglio superiore. Gli angoli delle barriere sono stati alzati leggermente, mentre gli spazi sono stati ridotti. Questo rende lo statore più copatto, con un distribuzione degli spazi migliore per l'aumento della densità di magnetizzazione. Di seguito viene riportata la geometria utilizzata:

Tab.5.8

<i>Spazi tra le barriere</i>	
w_{sb}	6 mm
w_{32}	4 mm
w_{21}	2 mm
w_{bt}	1 mm
<i>Angoli</i>	
β_1	18°
β_2	22°
β_3	27°
β_{bt}	15°

I risultati registrano un notevole miglioramento delle prestazioni, l'introduzione del taglio superiore ha migliorato molto la percentuale di ripple, riducendo di molto la seconda armonica. Questo miglioramento è visibile dall'andamento della coppia, questa infatti presenta più oscillazioni e comincia a risentire delle distorsioni dovute agli ordini armonici più alti. Per quanto riguarda il valore della coppia media, questo si è ridotto in linea con le aspettative. Nel complesso il notevole miglioramento delle prestazioni traccia la giusta direzione da intraprendere per migliorare la percentuale di ripple

Tab.5.9

<i>% Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
81.506639	23.075304

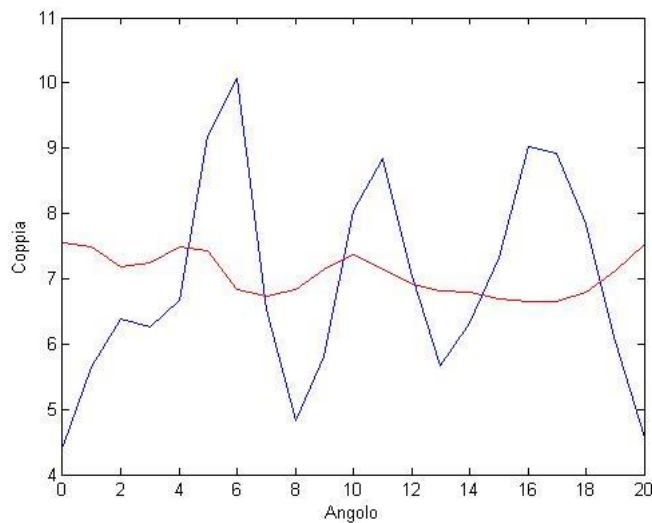
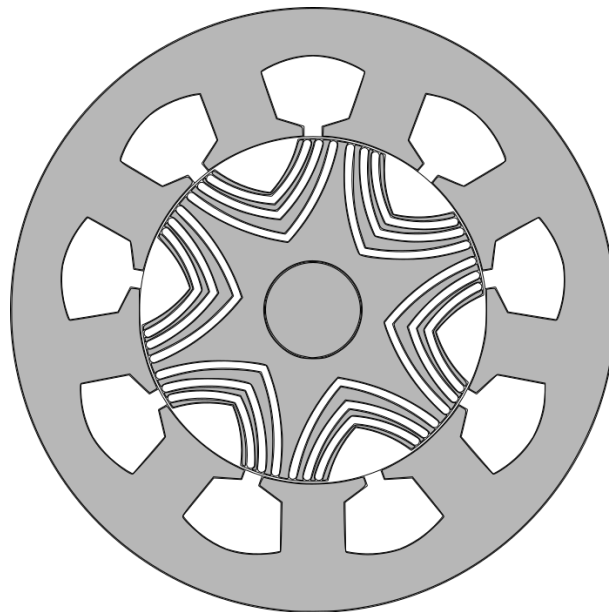


Fig.5.5 Modello utilizzato per la prova e relativo andamento della coppia

Prova 6

In questa prova viene simmettrizzate le configurazioni di spazi e angoli. Nel fare questo entrambi i parametri vengono definiti in leggera antitesi con quanto visto fin ora, questo viene fatto per sfruttare i miglioramenti che porta una distribuzione omogenea delle barriere del rotore. Nel complesso le aspettative per questa prova sono legate al miglioramento delle oscillazioni che interessano la coppia e alla riduzione delle sue distorsioni. Di seguito viene riportata la geometria utilizzata:

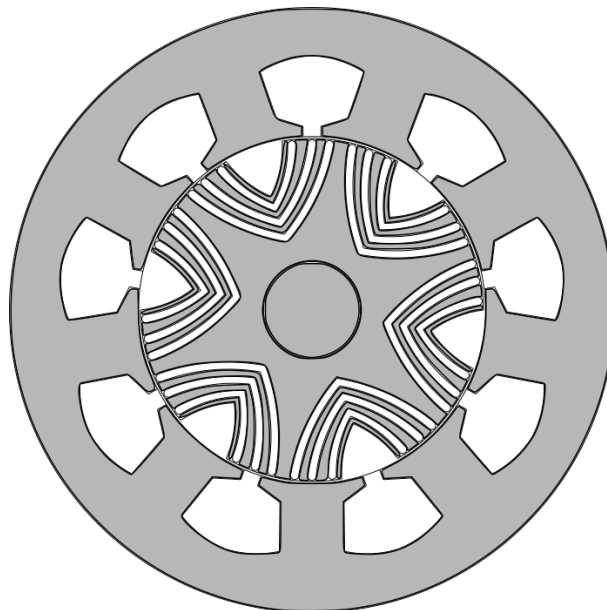
Tab.5.10

<i>Spazi tra le barriere</i>	
w_{sb}	6 mm
w_{32}	2 mm
w_{21}	2 mm
w_{bt}	2 mm
<i>Angoli</i>	
β_1	13°
β_2	20°
β_3	26°
β_{bt}	10°

I risultati rispettano le ipotesi fatte e mettono in luce come una simmettrizzazione della geometria di rotore sia efficiente per la diminuzione delle oscillazioni. In questo caso in particolare ci sono due oscillazioni molto grandi, tra i 5° e i 15° gradi, che determinano una percentuale di ripple molto alta, ma mediamente la forma d'onda non vede grosse oscillazioni. Anche la distorsione causata dalle armoniche di ordine più alto è diminuita molto, questo fa in modo che l'andamento sia abbastanza regolare in particolare si registra un'oscillazione ogni 5 gradi. Per quanto riguarda la coppia media si registra una leggera diminuzione che si può ritenere in linea con la riduzione delle oscillazioni medie. I risultati ottenuti, nonostante la percentuale molto elevata di ripple, sono comunque molto validi e utili per le ottimizzazioni future.

Tab.5.11

<i>% Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
130.274837	22.663718



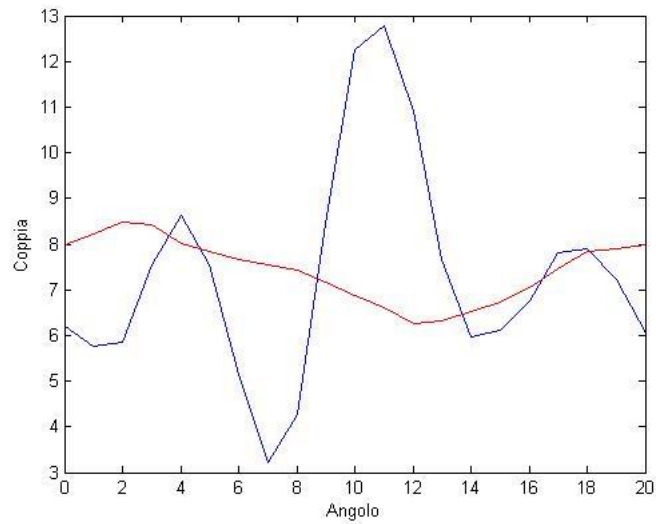


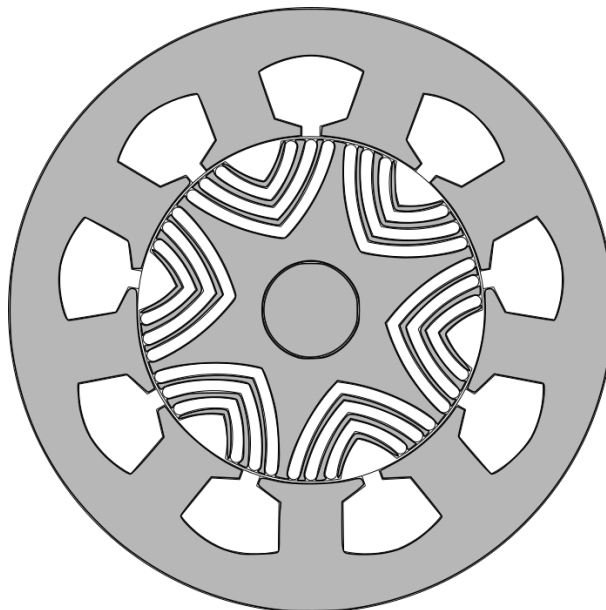
Fig. 5.6 Modello utilizzato per la prova e relativo andamento della coppia

Prova 7

In questa prova viene ripresa la stessa geometria utilizzata per la prova 6 ma vengono ingrossate le barriere. Questo cambiamento dovrebbe influire molto sull'entità delle oscillazioni di coppia tendendo ad aumentarle. Nella prova precedente i risultati nel complesso erano molto buoni, ma erano afflitti da delle oscillazioni massime molto elevate che aumentavano la percentuale di ripple in modo marcato. Per poter migliorare i risultati ottenuti è necessario trovare i parametri che influenzano maggiormente le oscillazioni di coppia e ridurre l'entità delle oscillazioni maggiori.

Tab.5.12

<i>% Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
171.310091	23.377406



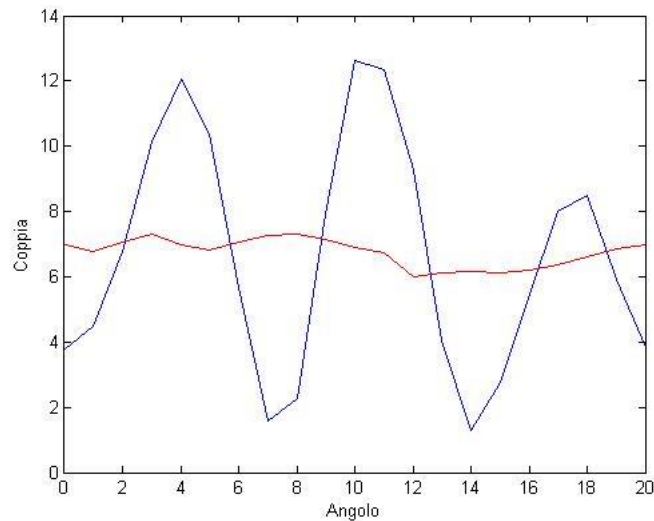


Fig. 5. 7 Modello utilizzato per la prova e relativo andamento della coppia

I risultati sono in linea con le aspettative, l'aumento dello spessore delle barriere ha inciso sull'aumento delle oscillazioni. Questo aumento ha portato ad una maggiore percentuale di ripple ma è stato utile per confermare le ipotesi fatte. Allo scopo di migliorare le prestazioni è quindi necessario diminuire lo spessore delle barriere. Per quanto riguarda la coppia media questa è diminuita ulteriormente, questo fatto è legato alla minor presenza di ferro dovuta alle barriere più grandi.

Prova 8

In questa prova viene dimezzato lo spessore delle barriere e viene apportato un leggero cambiamento alla configurazione degli spazi. I due parametri che sono stati cambiati sono legati tra di loro e vanno ad influire molto sulla localizzazione delle barriere. Nella geometria di questo rotore dato che le barriere sono molto fine, si è cercato di spostarle il più possibile nella parte più interna, questo è in linea con le osservazioni fatte nelle prove svolte fin ora e va a migliorare la magnetizzazione. Di seguito vengono riportati i dati utilizzati per la prova:

Tab.5.13

<i>Spessori</i>	
t^*	1.5 mm
<i>Spazi tra le barriere</i>	
w_{sb}	6 mm
w_{32}	2 mm
w_{21}	2 mm
w_{bt}	4 mm
<i>Angoli</i>	
β_1	13°
β_2	20°
β_3	26°
β_{bt}	10°

*Gli spessori sono tutti uguali

I risultati disattendono le ipotesi fatte, in questo caso c'è stato un aumento arcato della seconda armonica che ha cambiato nuovamente la forma d'onda della coppia e peggiorato la percentuale di ripple. Il fatto di avere le barriere più fine va ad aumentare il ferro di rotore e rompe anche gli equilibri che erano stati creati fin ora. La disposizione delle barriere viene in parte stravolta e risulta meno influente rispetto a quella di barriere più spesse. Sebbene la percentuale di ripple sia inferiore a quello della prova precedente, i risultati di questa prova non sono soddisfacenti, infatti la riduzione

eccessiva delle armoniche di ordine più elevato che determinavano l'andamento in precedenza ha stravolto le prestazioni allontanandole da quelle ricercate.

Tab.5.14

<i>% Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
163.094776	22.827948

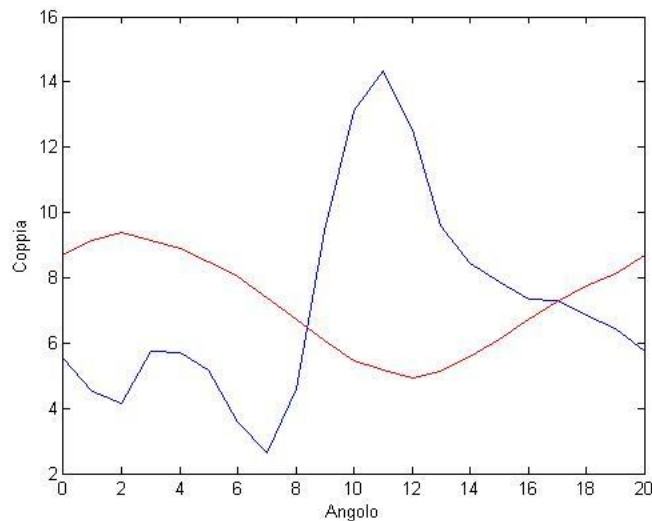
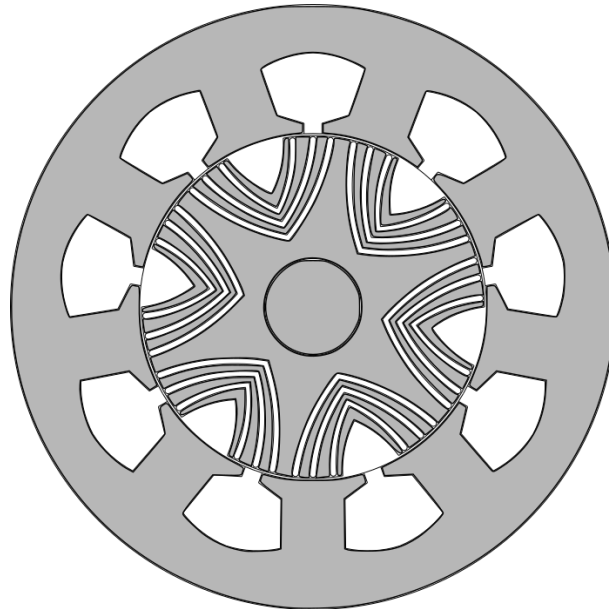


Fig. 5. 8 Modello utilizzato per la prova e relativo andamento della coppia

Prova 9

In questa prova vengono apportati dei cambiamenti alla geometria utilizzata nelle prove precedenti e viene provata una configurazione più ibrida. La configurazione degli spazi e degli angoli delle barriere viene mantenuta uguale a quella della prova 6, quello che viene cambiato sono gli spessori delle barriere. In questo caso vengono rese più fine le prime due barriere, mentre la terza barriera viene tenuta sui 2 mm. Questa configurazione serve per non ridurre troppo lo spessore complessivo delle barriere e compensare così le diminuzioni che interessano le armoniche di ordine più alto. In questo caso l'andamento tenderà comunque a seguire la seconda armonica, ma in modo meno marcato. Di seguito vengono riportati i dati utilizzati per la prova:

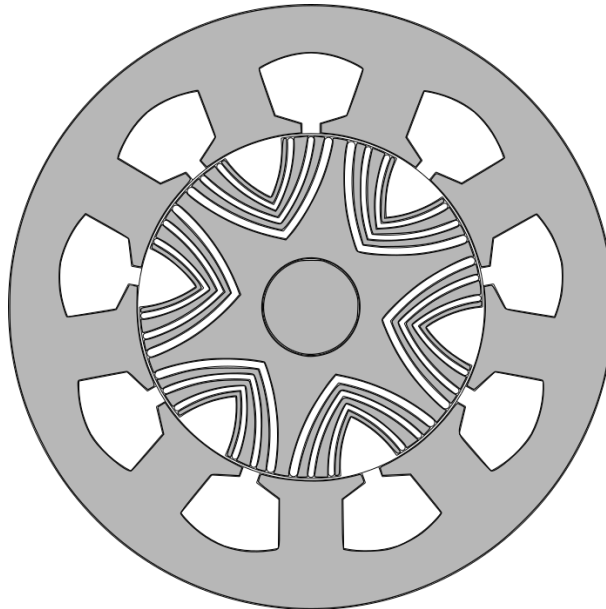
Tab.5.15

<i>Spessori</i>	
t_1	1.5 mm
t_2	1.5 mm
t_3	2 mm
<i>Spazi tra le barriere</i>	
w_{sb}	6 mm
w_{32}	2 mm
w_{21}	2 mm
w_{bt}	2 mm
<i>Angoli</i>	
β_1	13°
β_2	20°
β_3	26°
β_{bt}	10°

I risultati sono in linea con le aspettative ma risentono ancora della forte influenza della seconda armonica e presentano ancora due oscillazioni massime troppo elevate. Il valore medio della coppia è sceso in modo più marcato e risente del cambiamento dello spessore delle barriere. Nel complesso i risultati sono validi ma non del tutto soddisfacenti, per ridurre le due oscillazioni più elevate è necessario cambiare la configurazione degli angoli e degli spazi.

Tab.5.16

<i>% Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
123.795331	22.746361



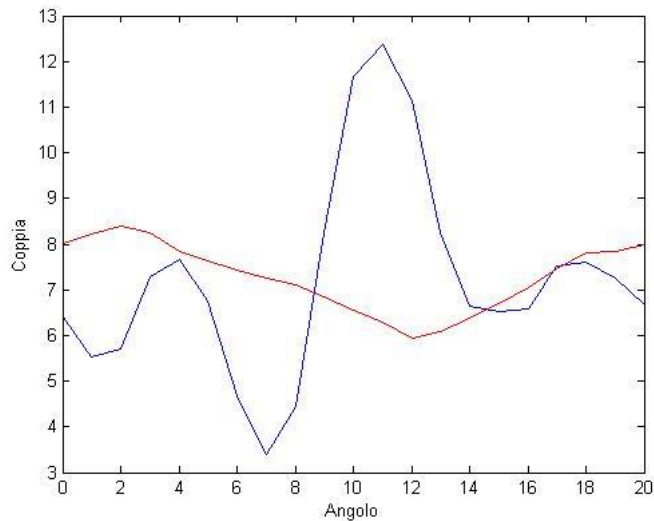


Fig. 5.9 Modello utilizzato per la prova e relativo andamento della coppia

Prova 10

Per questa prova vengono mantenuti gli spessori utilizzati per la prova precedente ma vengono variati gli angoli e gli spazi tra le barriere. Questo cambiamento si è reso necessario in seguito ai risultati non del tutto soddisfacenti delle ultime prove. Gli angoli delle barriere sono stati leggermente aumentati in modo da avvicinare le barriere alla parte più interna del rotore, chiaramente questo aumento è limitato dalla presenza di molti gruppi di barriere. Per quanto riguarda la configurazione degli spazi la posizione dell'ultima barriera è stata alzata leggermente. Di seguito vengono riportati i dati utilizzati per la prova:

Tab.5.17

<i>Spessori</i>	
t_1	1.5 mm
t_2	1.5 mm
t_3	2 mm
<i>Spazi tra le barriere</i>	
w_{sb}	8 mm
w_{32}	2 mm
w_{21}	2 mm
w_{bt}	2 mm
<i>Angoli</i>	
β_1	15°
β_2	20°
β_3	27°
β_{bt}	10°

I risultati vanno nella direzione ipotizzata, la percentuale si è abbassata molto e comincia a normalizzarsi. L'andamento della coppia è simile a quello che si cerca di ottenere nche se presenta ancora le due oscillazioni massie molto marcate. Anche il valore della coppia media è molto buono e risulta nella media ottenuta fin ora con questa configurazione. Nel complesso i risultati possono ritenersi molto buoni e saranno utilizzati come base per le ottimizzazioni.

Tab.5.18

<i>% Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
83.069932	22.659597

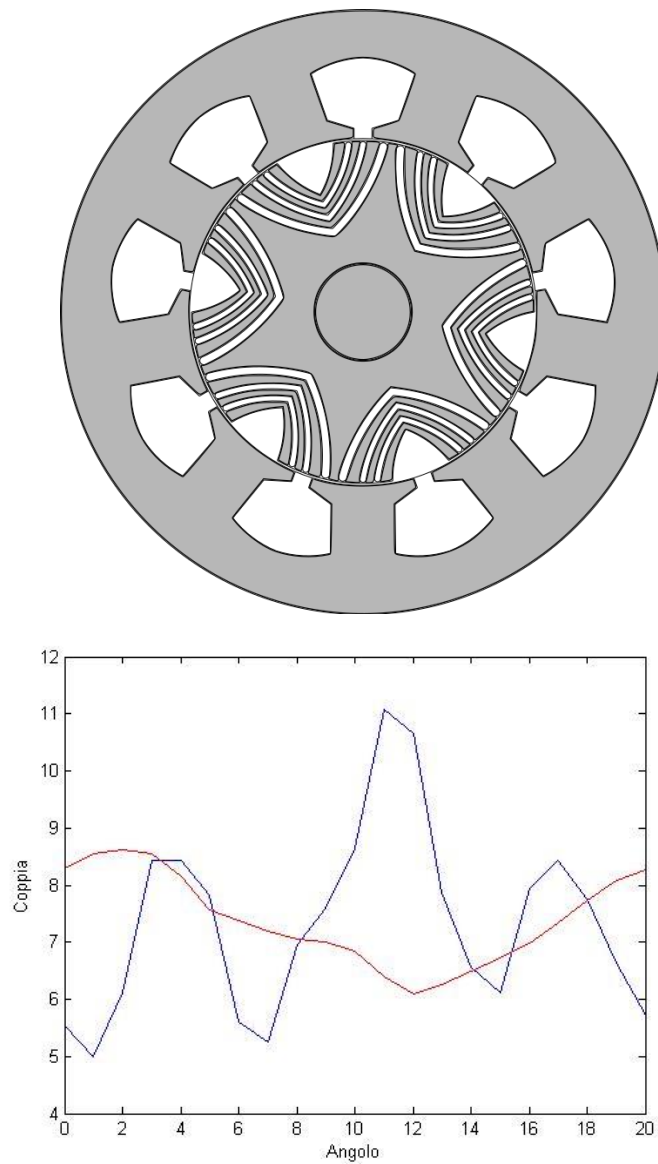


Fig. 5.10 Modello utilizzato per la prova e relativo andamento della coppia

Prova 11

Per questa prova viene ripresa la stessa geometria vista nella prova precedente ma vengono apportati dei cambiamenti. Gli angoli delle barriere vengono alzati, mentre gli spazi vengono leggermente modificati per omogenizzare al meglio la disposizione. Per quanto riguarda gli spessori delle barriere questi sono resi tutti pari a 2 mm, questo cambiamento serve per vedere quali cambiamenti influiscono di più sulle prestazioni, gli angoli o gli spessori. Di seguito viene riportata la geometria utilizzata per la prova:

Tab.5.19

<i>Spessori</i>	
t^*	2 mm
<i>Spazi tra le barriere</i>	
w_{sb}	4 mm
w_{32}	2 mm
w_{21}	2 mm
w_{ht}	4 mm

<i>Angoli</i>	
β_1	15°
β_2	22°
β_3	26°
β_{bt}	12°

*Gli spessori sono tutti uguali

I risultati sono molto buoni e registrano solo un leggero aumento della percentuale di ripple ed una diminuzione quasi nulla della coppia media. Nel complesso da questa prova si è potuto capire come gli angoli e gli spazi tra le barriere abbiano un'influenza maggiore sulle prestazioni rispetto agli spessori delle barriere.

Tab.5.20

<i>% Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
83.071026	22.659692

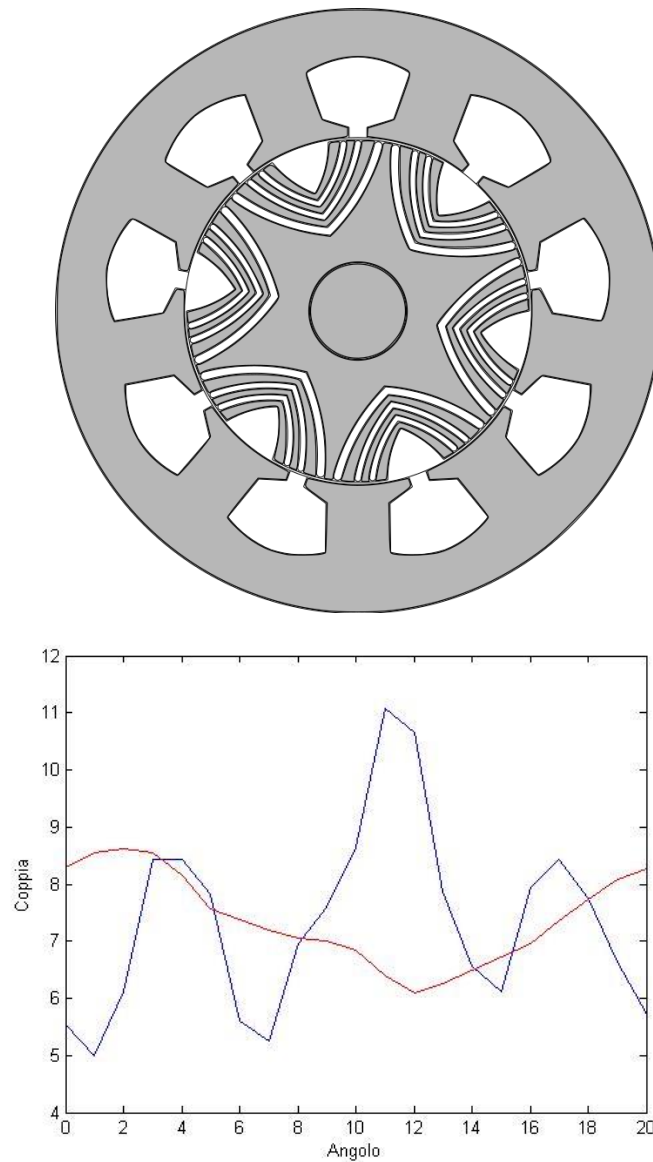


Fig. 5.11 Modello utilizzato per la prova e relativo andamento della coppia

Osservazioni e riepilogo dei risultati

Dalle prove svolte fin ora è stato possibile definire una base per le ottimizzazioni della geometria, in particolare si è potuto capire su quali parametri agire principalmente. Nel complesso le prestazioni che sono state ottenute non sono molto buone ma presentano un ottimo margine di miglioramento. Nelle ottimizzazioni che verranno svolte ci si concentrerà principalmente sulla variazione degli angoli e degli spazi tra le barriere. Per quanto riguarda gli spessori delle barriere, i motori con le prestazioni migliori sono quelli con le barriere con gli spessori differenti, questa configurazione infatti migliora il concatenamento delle linee di flusso allargando i primi due canali. Nel complesso i motori presentano un buon andamento della coppia e un buon valore di coppia media, il problema principale rimangono le oscillazioni maggiori, queste infatti sono troppo elevate. Nelle ottimizzazioni che seguiranno si cercherà di migliorare questo aspetto e di mantenere la forma d'onda e la coppia media fin ora ottenuti. I range di variazione, a causa dei molti gruppi di barriere presenti, sono molto limitati quindi ogni minima variazione può avere la sua influenza.

Qui di seguito viene riportata una tabella di riepilogo dei risultati, a causa dell'elevata percentuale di ripple che interessava alcuni motori in alcune prove questi parametri non sono stati calcolati.

Tab.5.21

<i>Prova</i>	<i>% Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
<i>Prova 5</i>	81.506639	23.075304
<i>Prova 6</i>	130.274837	22.663718
<i>Prova 7</i>	171.310091	23.377406
<i>Prova 8</i>	163.094776	22.827948
<i>Prova 9</i>	123.795331	22.746361
<i>Prova 10</i>	83.069932	22.659597
<i>Prova 11</i>	83.071026	22.659692

5.2 Ottimizzazioni

Dopo aver svolto una serie di prove parametriche è necessario proseguire con un'ottimizzazione della geometria. Come già accennato in precedenza, le ottimizzazioni che verranno svolte si concentreranno principalmente sulla variazione di angoli e spazi tra le barriere, per quanto riguarda gli altri parametri, in accordo con i risultati ottenuti fin ora, questi non verranno variati. La fase di ottimizzazione verrà svolta in due fasi: una prima fase di ottimizzazione degli angoli e una seconda fase di ottimizzazione degli spazi. Questa divisione è dovuta alla ristrettezza dei range di variazione, questi infatti impongono di usare degli step di variazione più ridotti quindi per evitare delle simulazioni troppo onerose è necessario dividere le ottimizzazioni. I parametri sui quali si va ad agire dovrebbero portare ad un notevole miglioramento delle prestazioni; la base di partenza è del tutto affine a quella già vista con la configurazione 6-4.

5.2.1 Prima fase: Ottimizzazione degli angoli

Per questa prima fase vengono ripresi i risultati delle prove parametriche per poter definire i range di variazione. Dalle prove precedenti è emerso come una configurazione di angoli più alta migliori i canali di concatenazione delle linee di flusso e ne riduca la curvatura. Per la definizione dei range da utilizzare per l'ottimizzazione va inoltre considerato come sia importante spostare le barriere di flusso verso la parte più interna del rotore, questo va in leggero contrasto con un allargamento delle barriere ma può essere integrato nella geometria definendo dei range non troppo larghi. A tal proposito gli angoli delle barriere nella prima fase verranno tenuti abbastanza alti con dei range abbastanza ampi. Di seguito vengono riportati i range utilizzati per l'ottimizzazione:

Tab.5.22

<i>Parametro</i>	<i>Range</i>
β_{bt}	10 ÷ 12
β_1	16 ÷ 18

β_2	20 ÷ 22
β_3	25 ÷ 27

Com'è possibile vedere dalla tabella sopra i range definiscono degli angoli abbastanza alti, l'angolo del taglio superiore non è stato alzato troppo, in modo da poter variare maggiormente gli altri angoli. Nel complesso si è cercato di creare delle combinazioni più simmetriche e più omogenee possibile. Di seguito vengono riportati i dati mantenuti fissi:

Tab.5.23

<i>Parametro</i>	<i>Valore</i>
w_{sb}	6 mm
w_{32}	2 mm
w_{21}	2 mm
w_{bt}	2 mm
t_1	1.5 mm
t_2	1.5 mm
t_3	2 mm

Dalle prove è stato ottenuto il seguente grafico:

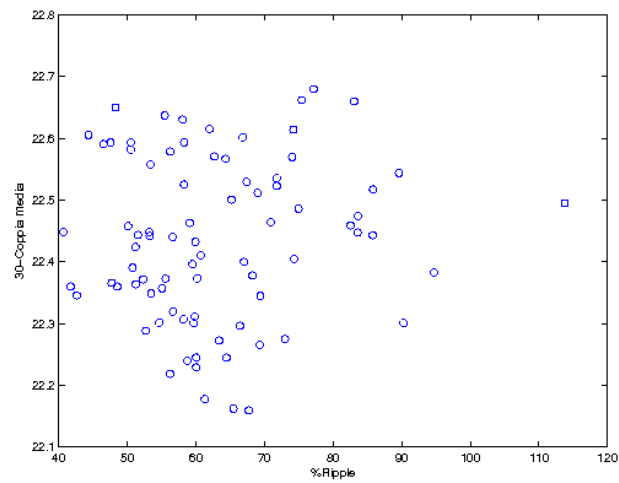


Fig.5.12 Grafico con i risultati ottenuti

Da questo grafico è stato ottenuto il seguente fronte di pareto:

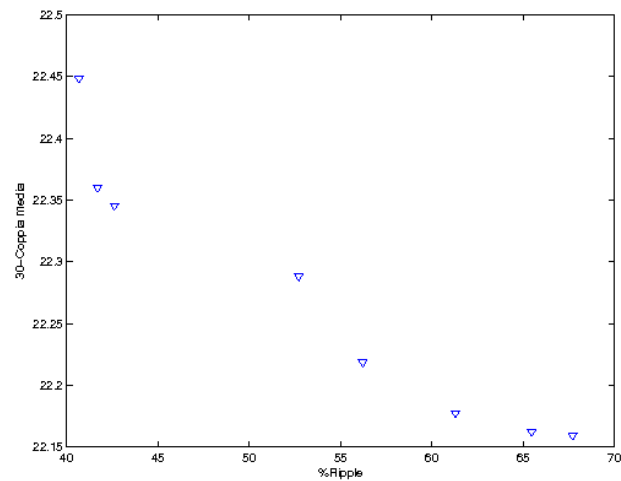


Fig.5.13 Fronte di pareto ottenuto dal grafico precedente

I risultati sono molto buoni, l'ottimizzazione degli angoli ha abbassato molto la percentuale di ripple, i risultati migliori si avvicinano al 40% di ripple. Il valore della coppia media non ha subito riduzioni eccessive e rimane negli standard di questa configurazione. Per quanto riguarda le forme d'onda della coppia, queste sono molto distorte e risentono molto delle armoniche di ordine più alto. Questo aspetto andrà analizzato meglio in seguito e verrà comunque migliorato con l'ottimizzazione degli spazi tra barriere. Questo primo step di ottimizzazione ha riportato notevoli risultati e indica che la direzione intrapresa è quella giusta. Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti:

Tab.5.24

β_1	β_2	β_3	β_{bt}	%Ripple	Parametro coppia
15	20	25	12	61.289609	22.177287
16	20	25	12	65.465721	22.161951
17	20	25	12	67.715998	22.158984
17	21	25	12	56.210764	22.218353
15	20	26	12	42.609235	22.345392
15	21	26	12	41.679189	22.359667
16	21	26	12	52.706305	22.288082
15	22	26	12	40.664306	22.448171

Qui di seguito vengono riportati gli andamenti e i modelli dei motori migliori ottenuti con questa ottimizzazione:

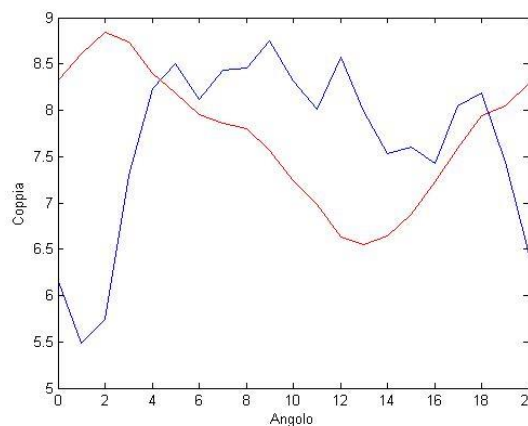
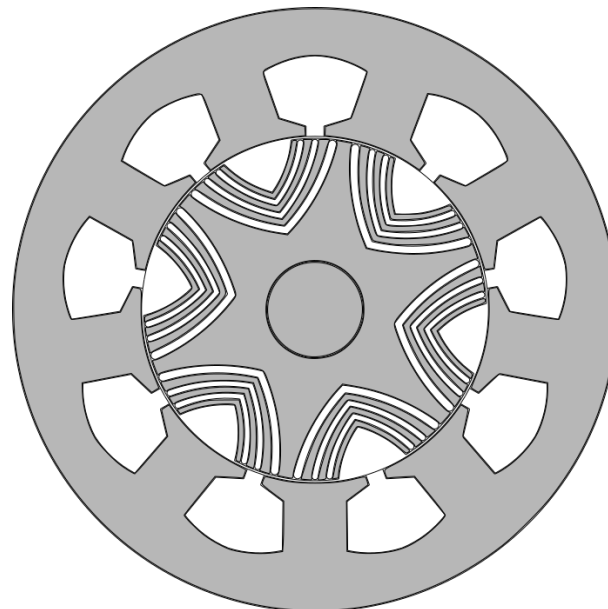


Fig.5.14 Modello e andamento della coppia del motore con il 42% di ripple

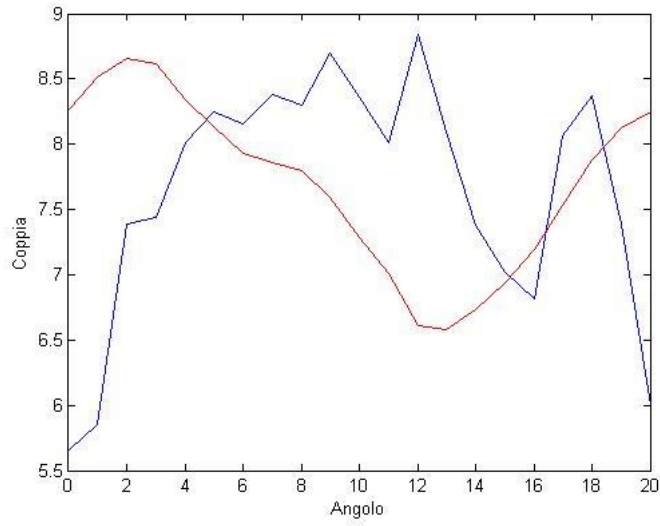
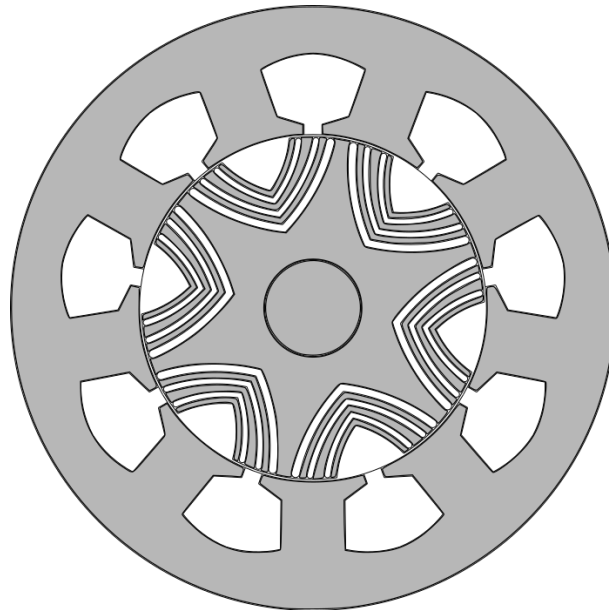
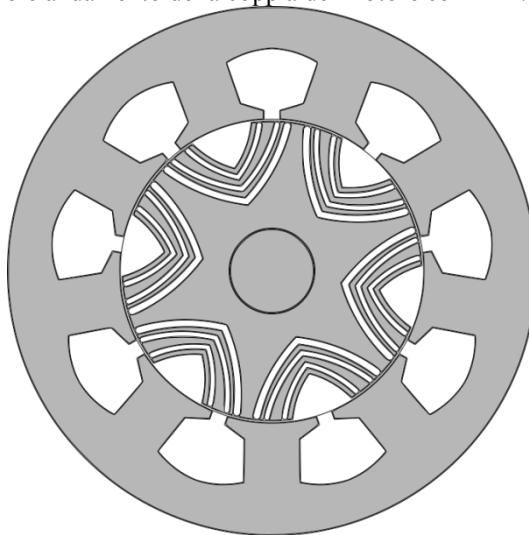


Fig.5.15 Modello e andamento della coppia del motore con il 41% di ripple



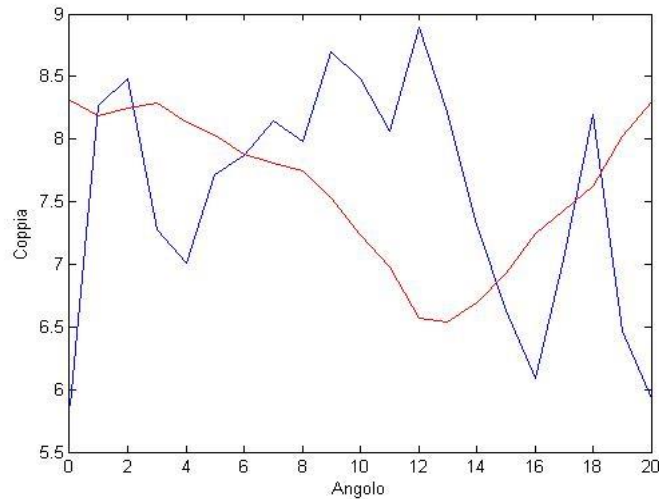


Fig.5.16 Modello e andamento della coppia del motore con il 40% di ripple

5.2.2 Seconda fase: Ottimizzazione degli spazi

In questa ottimizzazione verranno ottimizzati gli spazi tra le barriere. La configurazione degli angoli verrà mantenuta uguale a quella del miglior motore ottenuto nella prima fase e così anche per gli altri parametri. Per quanto riguarda gli spazi tra le barriere invece, dato che lo spazio di variazione risulta abbastanza ristretto, i range saranno contenuti e avranno degli step di variazione piccoli, ogni step sarà di 0.5 mm. Gli intervalli in cui si farà variare gli spazi tra le barriere sono tutti uguali, questo serve per creare un omogenizzazione della geometria del rotore. L'unico spazio che rimarrà fisso sarà quello tra la terza barriera e l'albero interno, questa scelta è stata fatta in continuità con quanto ottenuto con le prove parametriche. Per la variazione si è cercato inoltre di fare in modo che le barriere fossero spostate nella parte più interna del rotore, questo aspetto è utile per aumentare la densità di magnetizzazione. Nel complesso la configurazione degli spazi, considerando i risultati delle prove parametriche, per migliorare ulteriormente le prestazioni dovrebbe portare ad un omogenizzazione dei canali tra le barriere. Poiché i range di variazione sono molto limitati e con degli step piccoli il miglioramento della percentuale di ripple sarà abbastanza limitato, quello che varierà di più sarà l'andamento della forma d'onda della coppia. Quest'ultimo aspetto dev'essere migliorato, infatti nell'ottimizzazione precedente anche i risultati migliori erano affetti da una distorsione armonica eccessiva. I range utilizzati per la prova sono i seguenti:

Tab.5.25

<i>Spazio</i>	<i>Range</i>
w_{bt}	0.5 ÷ 0.5 ÷ 2 mm
w_{32}	0.5 ÷ 0.5 ÷ 2 mm
w_{21}	0.5 ÷ 0.5 ÷ 2 mm

I parametri fissi saranno invece:

Tab.5.26

<i>Parametro</i>	<i>Valore</i>
w_{sb}	6 mm
β_{bt}	12°
β_1	15°
β_2	22°
β_3	26°
t_1	1.5 mm
t_2	1.5 mm
t_3	2 mm

I risultati ottenuti sono i seguenti:

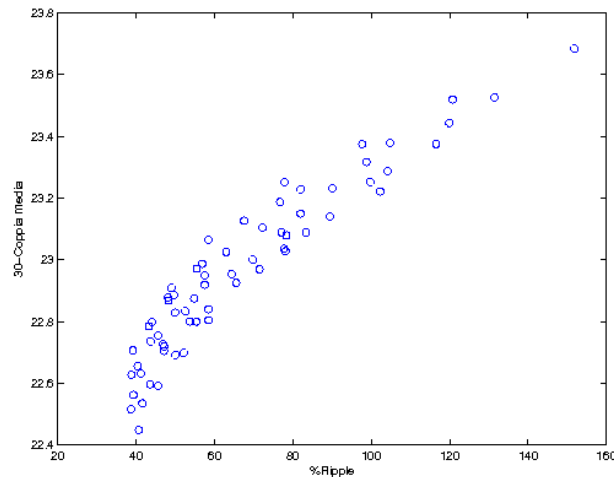


Fig.5.17 Risultati ottenuti dall'ottimizzazione

Da questo grafico è stato ottenuto il seguente fronte di pareto:

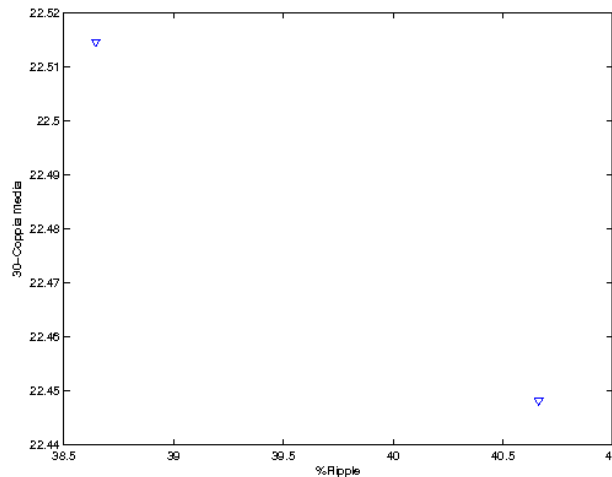


Fig.5.18 Fronte di pareto ottenuto dal grafico precedente

I risultati ottenuti confermano le ipotesi fatte ed evidenziano un leggero miglioramento della percentuale di ripple e della distorsione della forma d'onda. Per quanto riguarda la coppia media, questa ha subito una diminuzione in linea con quanto comporta la relativa riduzione del ripple. Nel complesso i risultati sono abbastanza soddisfacenti. Nei due risultati migliori, nella forma d'onda della coppia gli andamenti tendono ad essere più regolari con distorsioni meno marcate. L'aspetto che ancora non è migliorato è il distacco tra le oscillazioni medie e quelle maggiori, infatti osservando gli andamenti della coppia si può notare come questa si allontani maggiormente dal valore medio solo per brevi interalli. Queste oscillazioni, che sono presenti tra i 0° e i 5° gradi e tra i 15° e i 20°, sono quelle che vanno poi a definire la percentuale di ripple. Di seguito vengono riportati i risultati e i modelli ottenuti:

Tab.5.27

w_{bt}	w_{32}	w_{21}	% Ripple	Parametro coppia
2 mm	2 mm	1.5 mm	38.644722	22.514608
2 mm	2 mm	2 mm	40.664306	22.448171

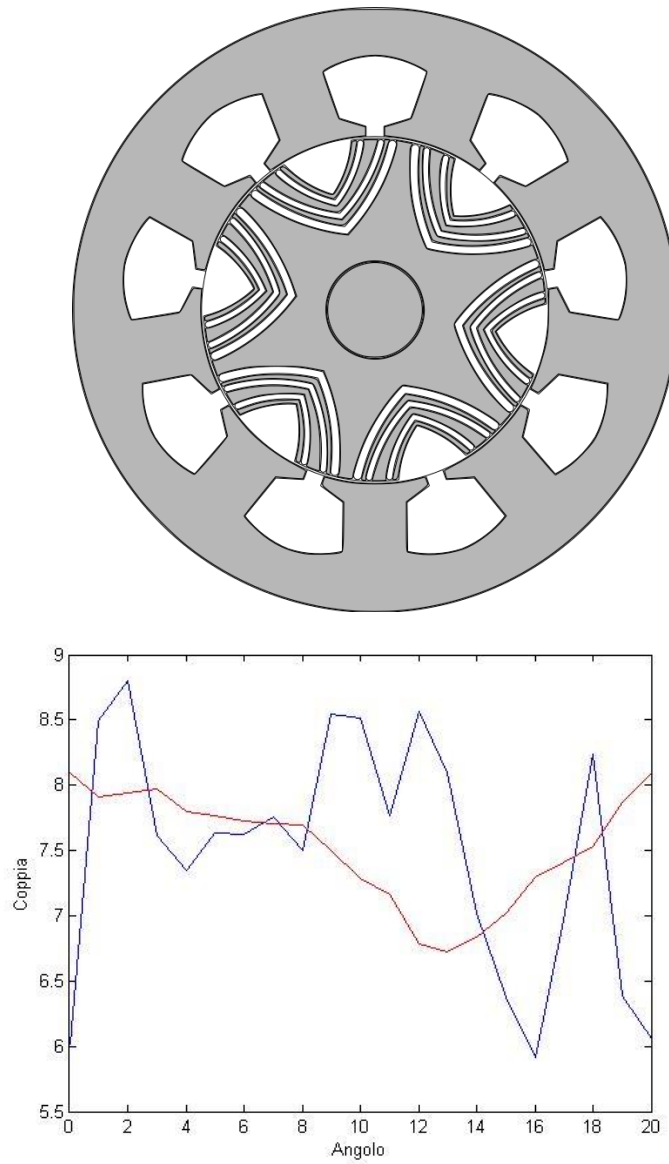
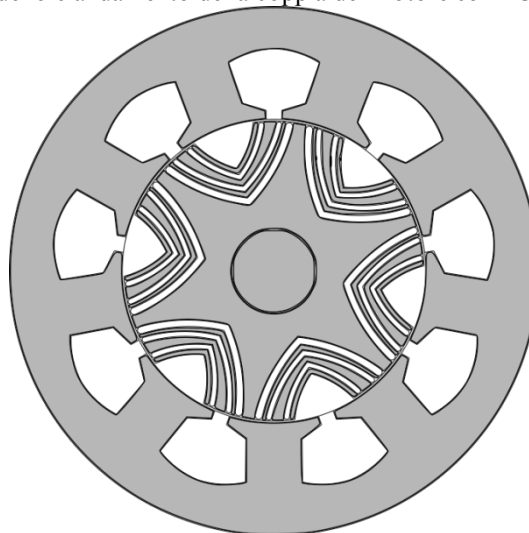


Fig. 5.19 Modello e andamento della coppia del motore con il 38% di ripple



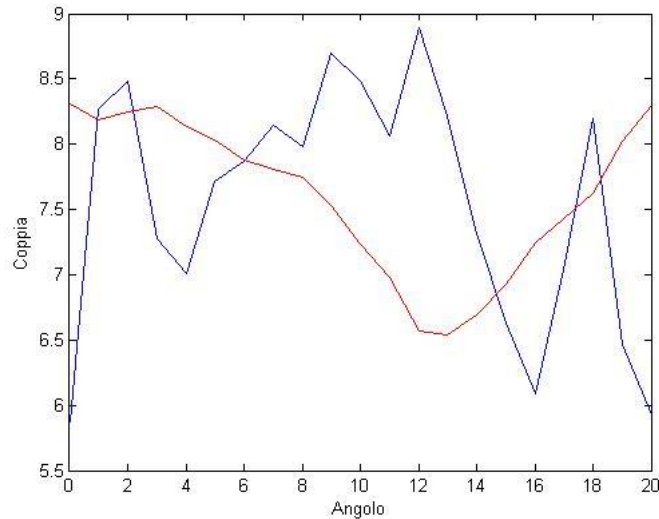


Fig.5.20 Modello e andamento della coppia del motore con il 40% di ripple

Riepilogo ed osservazioni

Tab.5.28

<i>Nome del motore</i>	<i>% Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
<i>Ottimizzazione Rotore: Prima fase</i>		
<i>Motore 1</i>	42.609235	22.345392
<i>Motore 2</i>	41.679189	22.359667
<i>Motore 3</i>	52.706305	22.288082
<i>Motore 4</i>	40.664306	22.448171
<i>Ottimizzazione Rotore: Seconda fase</i>		
<i>Motore 5</i>	38.644722	22.514608
<i>Motore 6</i>	40.664306	22.448171

Con l’ottimizzazione del rotore sono stati ottenuti dei risultati molto buoni. La percentuale di ripple si aggira intorno al 40% e nel motore migliore arriva al 38%. Anche il valore della coppia media è abbastanza buono e si aggira intorno ai 7.5 Nm. Osservando le configurazioni geometriche si può dire che, un innalzamento degli angoli delle barriere e una distribuzione abbastanza alta degli spazi tra barriere porta ad un miglioramento delle prestazioni. Nei rotori di questa configurazione essendoci più gruppi di barriere i range di variazione sono ridotti e i canali di concatenazione delle linee di flusso sono più stretti. Questi aspetti portano ad avere la maggior magnetizzazione negli spazi tra i vari gruppi di barriere e ad ottenere quindi le prestazioni migliori con delle configurazioni più strette delle barriere e del taglio superiore. Un aspetto che non è migliorato, è la forma d’onda della coppia e in particolare il suo contenuto armonico. L’influenza della prima armonica è molto forte e va a ad amplificare l’influenza delle molte distorsioni armoniche di ordine più alto. Questo aspetto può essere corretto con un’ottimizzazione della geometria dello statore e con una seconda ottimizzazione del rotore. Nella configurazione 6-4 questo processo ha fornito degli ottimi risultati, definendo quelli che sono i motori che fin ora hanno le prestazioni migliori. In questo capitolo verrà utilizzata la stessa metodologia di ottimizzazione ma in modo più sintetico. In particolare nel paragrafo successivo non verranno riportati gli step intermedi di unione tra le geometrie ottimizzate di statore e rotore, ma verranno riportati solamente i risultati dell’ottimizzazioni di statore e della seconda ottimizzazione del rotore.

5.2.3 Ottimizzazione dello statore e seconda ottimizzazione del rotore

Con l’ottimizzazione del rotore sono stati ottenuti dei motori con delle buone prestazioni ma con un andamento della coppia ancora troppo determinato dalla prima armonica. A tal proposito un

ottimizzazione dello statore dovrebbe migliorare questo aspetto e ridurre la prima e la seconda armonica. La definizione dello statore di base è già stata fatta in modo da avere una buona distribuzione della magnetizzazione, ma il cambiamento della geometria del rotore ha portato a dei cambiamenti negli equilibri nel motore. Qui di seguito vengono riportati i range utilizzati per l'ottimizzazione dello statore:

Tab.5.29

<i>Valore</i>	<i>Range</i>
X_{wedav}	$0 \div -1 \div -2$
Y_{wedav}	$1 \div 1 \div 2$
X_{wedbv}	6
Y_{wedbv}	$0 \div 1 \div 2$
Y_{wsor1}	$0 \div 1 \div 1$
Y_{wsor}	$0 \div 1 \div 2$
Y_{pv}	$1 \div 1 \div 2$

I range che sono stati definiti tendono a restringere la cava e a conferirle una forma più spigolosa e alzata. I range tendono ad appiattire l'inclinazione che c'è tra lo spigolo alto e quello basso e ad alzare la punta della cava. Tutti questi aspetti geometrici servono per ridistribuire in modo omogeneo la magnetizzazione attorno alla cava e vanno a rendere i denti più larghi e alti. L'area dello slot di base è 349.477 mm^2 , con i range che sono stati definiti questa tenderà a ridursi o ad aumentare per via dell'aumento dell'altezza della cava. In seguito alle ottimizzazioni sono stato ottenuti i seguenti statori:

Tab.5.30

<i>Motori con i valori minimi d'induzione</i>	
<i>Corona</i>	
<i>Geometria cava</i>	
<i>Parameto</i>	<i>Valore</i>
X_{wedav}	0
Y_{wedav}	2
X_{wedbv}	6
Y_{wedbv}	0
Y_{wsor1}	1
X_{wsor}	0
Y_{pv}	1
<i>Valore d'induzione</i>	
0.022704 T	
S_{slot}	
423.112 mm^2	
<i>Dente</i>	
<i>Geometria cava</i>	
<i>Parameto</i>	<i>Valore</i>
X_{wedav}	0
Y_{wedav}	2
X_{wedbv}	6
Y_{wedbv}	2
Y_{wsor1}	1
X_{wsor}	0
Y_{pv}	1
<i>Valore d'induzione</i>	
0.067951 T	
S_{slot}	
396.852 mm^2	

<i>Spigolo basso</i>	
<i>Geometria motore</i>	
<i>Parameto</i>	<i>Valore</i>
X_{wedav}	0
Y_{wedav}	2
X_{wedbv}	6
Y_{wedbv}	0
Y_{wsor1}	0
X_{wsor}	2
Y_{pv}	1
<i>Valore d'induzione</i>	
0.702513 T	
S_{slot}	
447.567 mm ²	

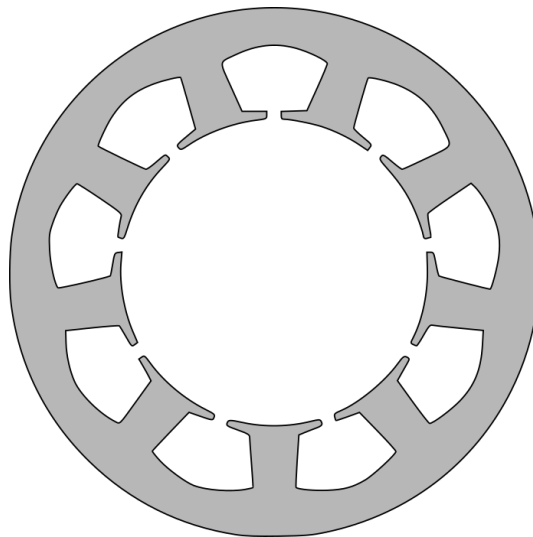


Fig.5.21 Statore con la minima induzione nella corona

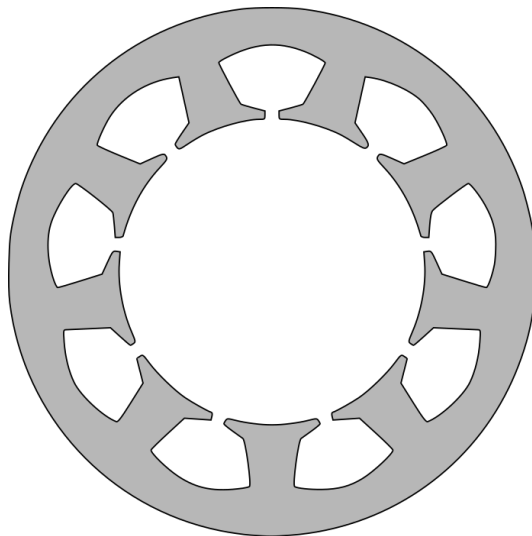


Fig.5.22 Statore con la minima induzione nel dente

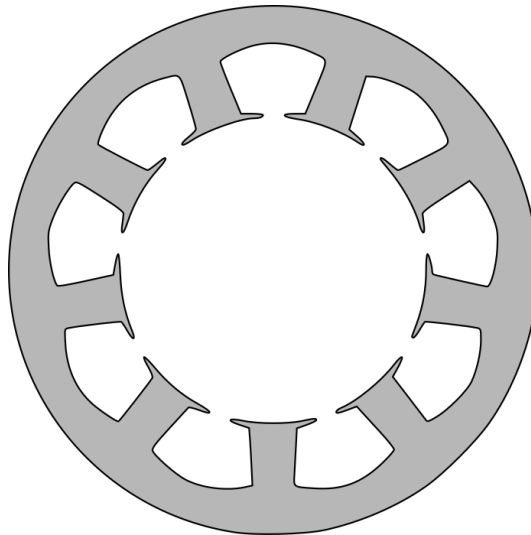


Fig.5.23 Statore con la minima induzione nello spigolo basso

I tre statori con le induzioni minime presentano delle geometrie affini. In tutti e tre i casi le cave di statore sono diventate più grandi e i denti sono diventati più stretti e longilinei, in particolare nella parte alta. Questa geometria ha portato ad una distribuzione della magnetizzazione sbilanciata e non del tutto ottimale per la riduzione delle armoniche di ordine più basso, infatti sono aumentate le zone con saturazione.

Tab.5.31

<i>Motori con i valori massimi d'induzione</i>	
<i>Corona</i>	
<i>Geometria cava</i>	
<i>Parameto</i>	<i>Valore</i>
X_{wedav}	-2
Y_{wedav}	1
X_{wedbv}	6
Y_{wedbv}	2
Y_{wsov1}	0
X_{wsov}	2
Y_{pv}	2
<i>Valore d'induzione</i>	
0.033164 T	
S_{slot}	
405.161 mm ²	
<i>Dente</i>	
<i>Geometria cava</i>	
<i>Parameto</i>	<i>Valore</i>
X_{wedav}	-2
Y_{wedav}	2
X_{wedbv}	6
Y_{wedbv}	0
Y_{wsov1}	1
X_{wsov}	2
Y_{pv}	2
<i>Valore d'induzione</i>	
0.101252 T	
S_{slot}	
401.278 mm ²	

<i>Spigolo basso</i>	
<i>Geometria cava</i>	
<i>Parameto</i>	<i>Valore</i>
X_{wedav}	-2
Y_{wedav}	1
X_{wedbv}	6
Y_{wedbv}	2
Y_{wsor1}	1
X_{wsor}	0
Y_{pv}	2
<i>Valore d' induzione</i>	
0.865879 T	
<i>S_{slot}</i>	
380.81 mm ²	

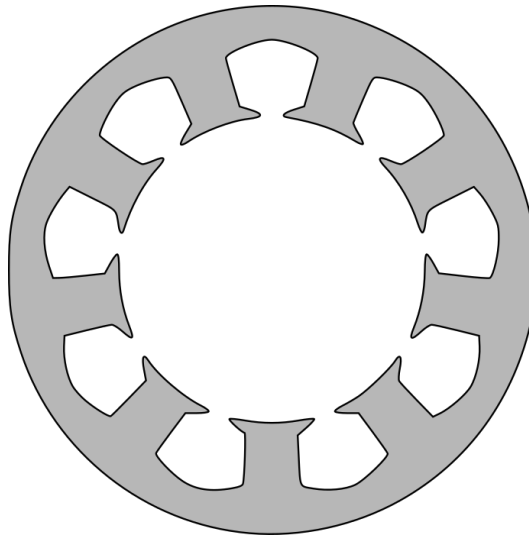


Fig.5.24 Statore con la minima induzione nella corona

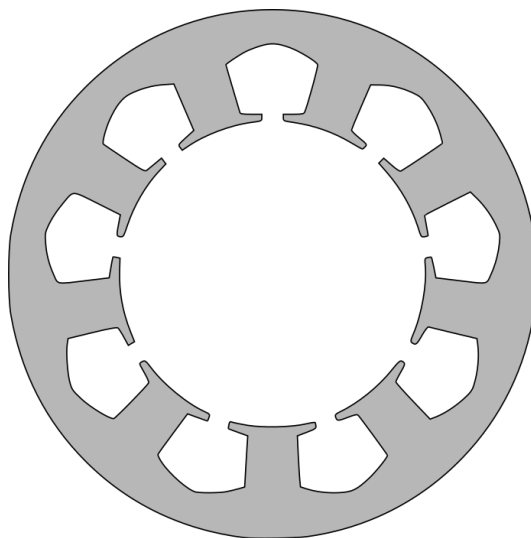


Fig.5.25 Statore con la minima induzione nel dente

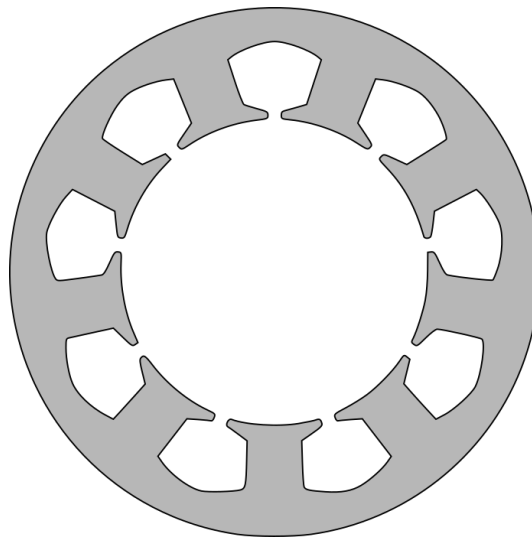


Fig.5.26 Statore con la minima induzione nello spigolo basso

Nei tre statori ottenuti le aree degli slot sono più piccole o uguali a quelle dello statore di partenza. Questo aspetto fa in modo che i denti siano più larghi ed alti e che consentano di avere un maggior spazio per una distribuzione ottimale della magnetizzazione. Tra i sei statori riportati quello che si combina al meglio con i rotori visti fin ora è quello con la maggior induzione nella corona. Questo è in continuità con quanto visto nella configurazione 6-4, infatti anche in questa i migliori risultati sono stati ottenuti con lo statore con la maggior induzione nella corona unito al rotore a tre barriere. Com'è già stato scritto in precedenza in questo caso verranno riportati direttamente i risultati della seconda ottimizzazione del rotore.

5.2.4 Seconda ottimizzazione del rotore

Anche per questa configurazione viene svolta una seconda ottimizzazione del rotore. La metodologia utilizzata è la stessa vista in precedenza, vengono svolte due fasi: prima fase di ottimizzazione degli angoli e una seconda fase di ottimizzazione degli spazi.

Prima fase: ottimizzazione degli angoli

Viene svolta ora la prima fase della seconda ottimizzazione del rotore. I range che sono stati definiti per ottimizzare gli angoli sono otto simili a quelli utilizzati nella prima ottimizzazione del rotore. Questa similitudine è data dal fatto che i range di variazione possibili sono molto limitati e che gli andamenti delle prestazioni non sono cambiati. Di seguito vengono riportati i range utilizzati:

Tab.5.32

<i>Parametro</i>	<i>Range</i>
β_{bt}	11 ÷ 13
β_1	15 ÷ 17
β_2	20 ÷ 22
β_3	25 ÷ 27

I parametri fissi sono:

Tab.5.33

<i>Parametro</i>	<i>Valore</i>
w_{sb}	6 mm
w_{32}	2 mm
w_{21}	2 mm

w_{bt}	1.5 mm
t_1	1.5 mm
t_2	1.5 mm
t_3	2 mm

I risultati ottenuti sono i seguenti:

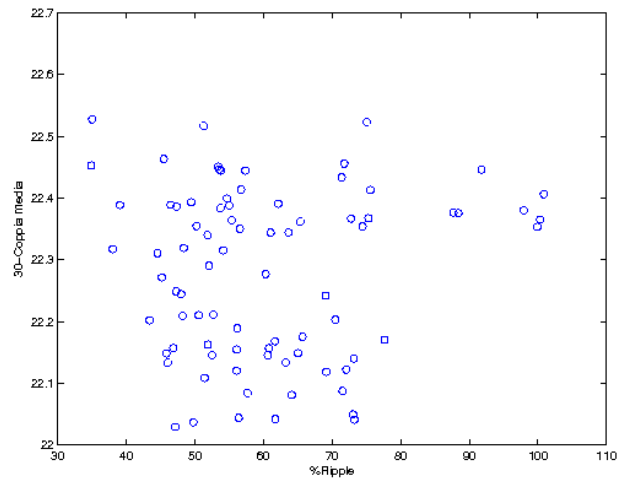


Fig.5.27 Risultati ottenuti con le ottimizzazioni

Da questo grafico è stato ottenuto il seguente fronte di pareto:

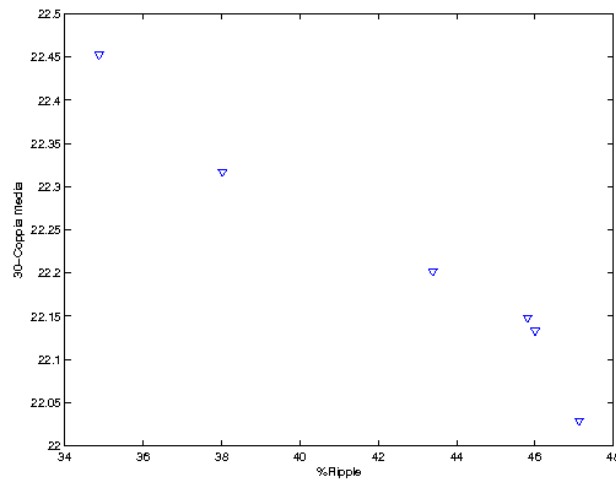


Fig.5.28 Fronte di pareto ottenuto dal grafico precedente

Del fronte di pareto solamente due motori possono essere ritenuti validi, infatti solo due motori hanno una percentuale uguale o minore rispetto a quella ottenuta con la prima ottimizzazione del rotore:

Tab.5.34

β_{bt}	β_1	β_2	β_3	%Ripple	Parametro coppia
12°	16°	22°	26°	38.023676	22.316971
11°	16°	22°	27°	34.872715	22.452446

In entrambi i motori ottenuti si può notare un miglioramento sia nelle prestazioni che nell'andamento della forma d'onda della coppia, in questo caso l'influenza della prima armonica sembra molto ridotta rispetto ai casi precedenti. Le distorsioni sono nella norma e la periodicità è di circa un'oscillazione ogni 4° gradi. Nel complesso i risultati sono molto buoni ma possono essere ulteriormente migliorati con la fase due. Di seguito vengono riportati i modelli utilizzati e i relativi andamenti della coppia.

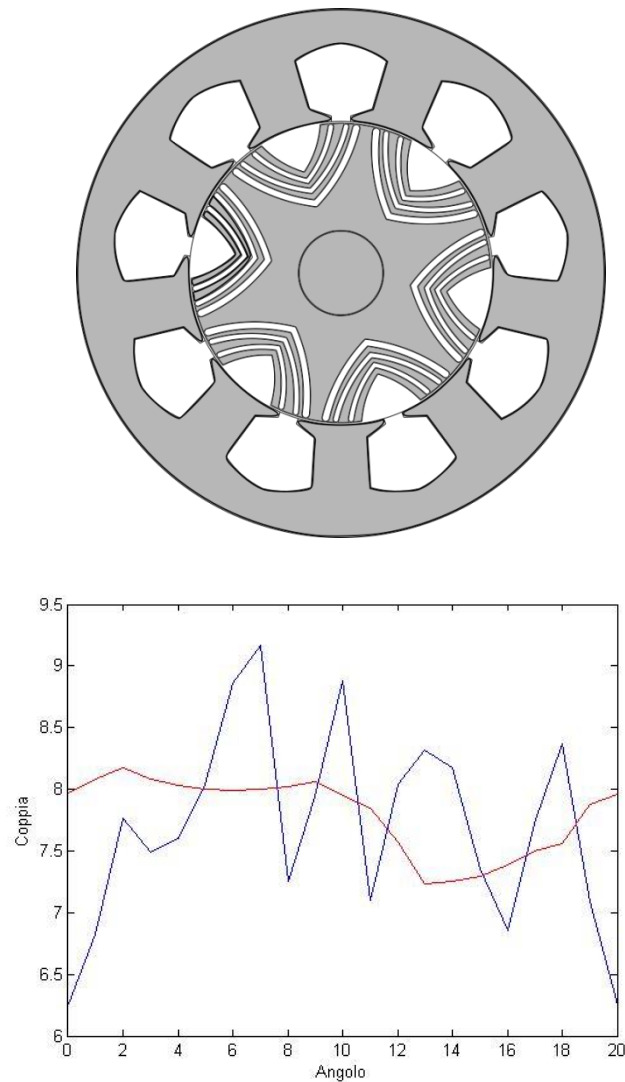


Fig.5.29 Modello e relativo andamento della coppia del motore con il 38% di ripple

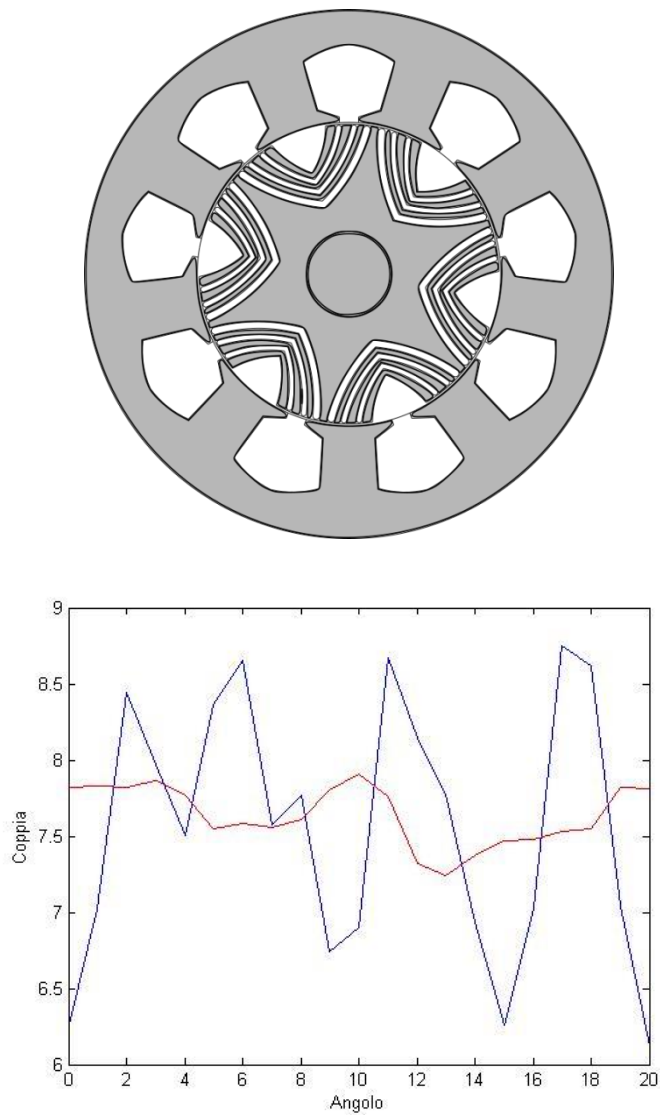


Fig.5.30 Modello e relativo andamento della coppia del motore con il 34% di ripple

Seconda fase: Ottimizzazione degli spazi

In questa seconda fase verranno ottimizzati gli spazi tra le barriere. I range che verranno utilizzati sono gli stessi che sono stati utilizzati nella seconda fase della prima ottimizzazione del rotore. Qui di seguito vengono riportati i range utilizzati.

Tab.5.35

Spazio	Range
w_{ht}	$0.5 \div 0.5 \div 2 \text{ mm}$
w_{32}	$0.5 \div 0.5 \div 2 \text{ mm}$
w_{21}	$0.5 \div 0.5 \div 2 \text{ mm}$

I parametri fissi saranno invece:

Tab.5.36

Parametro	Valore
w_{sb}	6 mm
β_{bt}	11°

β_1	16°
β_2	22°
β_3	27°
t_1	1.5 mm
t_2	1.5 mm
t_3	2 mm

I risultati ottenuti sono i seguenti:

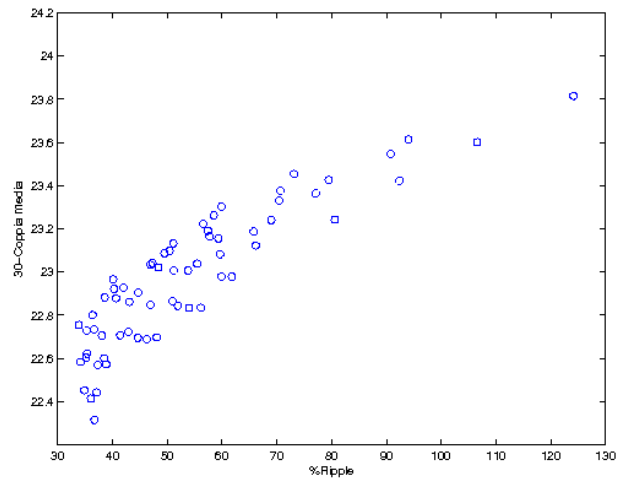


Fig.5.31 Parametri dei motori ottenuti con l'ottimizzazione

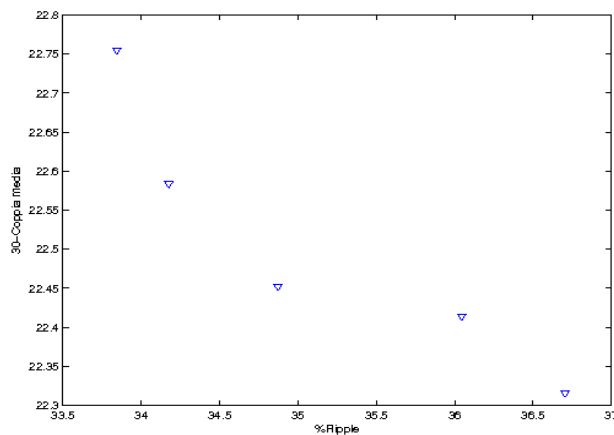


Fig.5.32 Fronte di pareto ottenuto dal grafico precedente

Al fronte di pareto appartengono solamente due motori con le prestazioni migliori rispetto alla prima fase:

Tab.5.37

w_{bt}	w_{32}	w_{21}	%Ripple	Parametro coppia
2 mm	1.5 mm	1 mm	33.844588	22.754712
2 mm	1.5 mm	1.5 mm	34.175968	22.583777

I motori ottenuti con questa ottimizzazioni sono molto buoni, sia la forma d'onda che le prestazioni sono molto buone. In generale rispetto alle configurazioni ottenute con la prima ottimizzazione del rotore non è cambiato molto nella geometria del rotore. Questo vuol dire che la geometria dello statore gioca un ruolo molto importante e fondamentale per ottenere delle prestazioni ottimali come quello

ottenute in questo caso. La forma d'onda non è cambiata molto rispetto alla prima fase, mentre la percentuale di ripple e il valore della coppia media sono migliorate abbastanza.

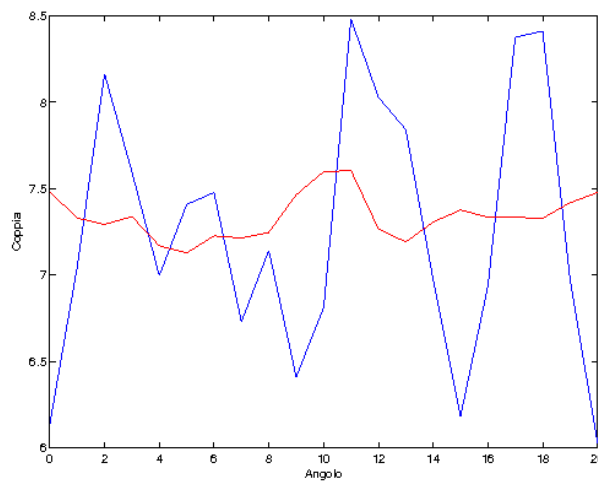
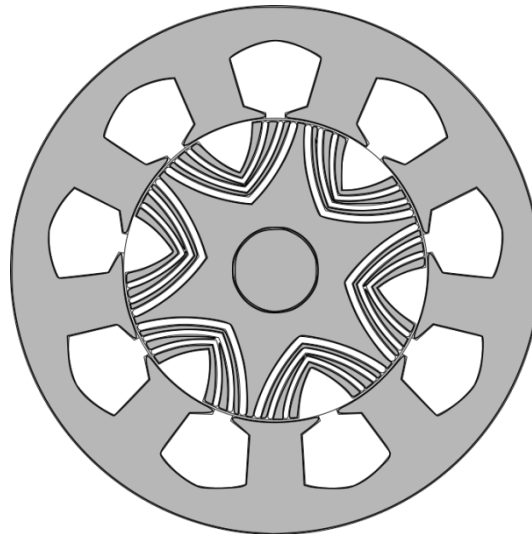


Fig.5.33 Modello e andamento della coppia del motore con il 33% di ripple

Osservazioni e riepilogo

Tab.5.38

<i>Nome motore</i>	<i>%Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
<i>Prima fase: ottimizzazione angoli</i>		
<i>Motore 1</i>	38.023676	22.316971
<i>Motore 2</i>	34.872715	22.452446
<i>Seconda fase: ottimizzazione spazi</i>		
<i>Motore 3</i>	33.844588	22.754712
<i>Motore4</i>	34.175968	22.583777

La seconda ottimizzazione del rotore ha sentito di ottenere dei risultati nettamente superiori sia dal punto di vista delle prestazioni che dal punto di vista dell'andamento della forma d'onda della coppia. La differenza sostanziale tra la prima e la seconda ottimizzazione fatta è la geometria dello statore, infatti le geometrie dei rotori non cambiano molto.

5.3 Skewing

Concluse le ottimizzazioni per migliorare ulteriormente le prestazioni viene ora applicato lo skewing ai motori migliori ottenuti con le ottimizzazioni. Anche in questo caso le forme d'onda della coppia ottenute nei motori ottimizzati hanno una periodicità che consente di non avere delle deformazioni troppo elevate. Come per la configurazione precedente i livelli di skewing sono mantenuti a 0.2 e 0.5, infatti anche nei motori 9-6 durante la fasatura è stata registrata una notevole sensibilità alle piccole variazioni d'angolo.

5.3.1 Motore ottenuto con la prima ottimizzazione del rotore

In questo paragrafo viene analizzato il motore 5 (vedi tab. 5.28) ottenuto con la seconda fase dell'ottimizzazione del rotore. In questo motore l'andamento della coppia risente di molte distorsioni, questo fa in modo che non si possa definire una periodicità precisa e significa che questo motore renderà al meglio con uno skewing più elevato. Le prestazioni di base sono le seguenti:

Tab.5.39

<i>%Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
38.644722	22.514608

In seguito all'applicazione dello skewing pari a 0.2:

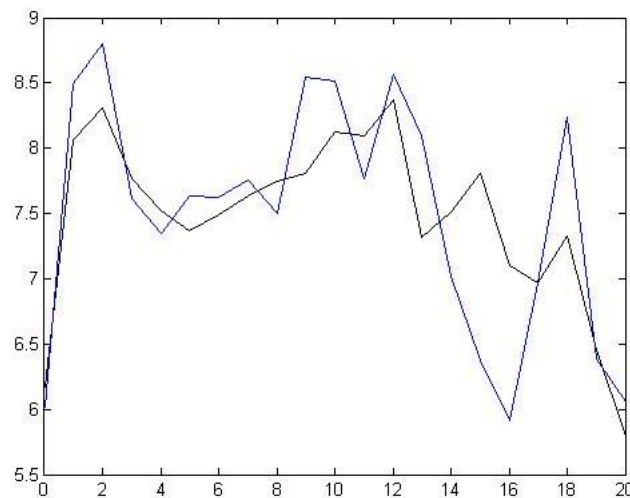


Fig.5.34 Confronto della coppia tra il motore di base(blù) e con lo skewing(nero) pari a 0.2

Le prestazioni ottenute sono:

Tab.5.40

<i>%Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
34.571837	22.537003

La percentuale di ripple è leggermente migliorata mentre la coppia media non ha subito abbassamenti eccessivi. Per quanto riguarda la forma d'onda della coppia, questa risente meno delle distorsioni armoniche di ordine più alto ma non ha ancora assunto un andamento con una periodicità precisa.

Viene ora applicato uno skewing di 0.5:

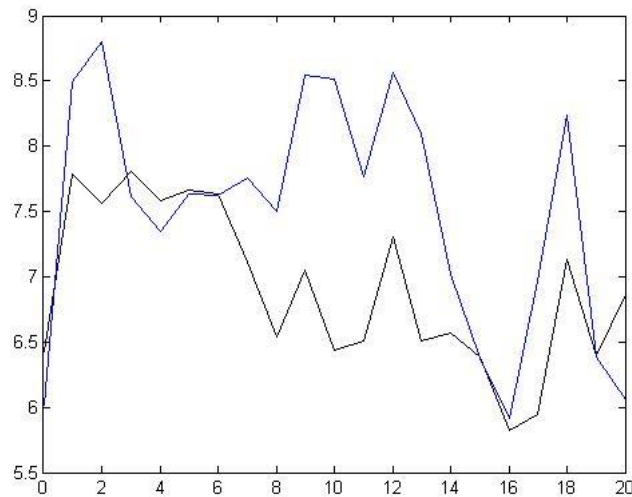


Fig.5.35 Confronto della coppia tra il motore di base(blu) e con lo skewing(nero) pari a 0.5

Le prestazioni ottenute sono:

Tab.5.41

<i>%Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
28.756685	23.094176

In questo caso le prestazioni sono migliorate molto, la percentuale di ripple si è abbassata molto e il valore della coppia media non ha subito riduzioni eccessive. Per quanto riguarda la forma d'onda della coppia, questo risente la fortissima distorsione delle armoniche di ordine più alto, in questo caso grazie allo skewing la seconda armonica si è ridotta e quindi si comincia ad intravedere una periodicità di 2 gradi, quest'ultima è però ancora molto velata a causa delle distorsioni. Nel complesso le prestazioni ottenute sono molto buone e costituiscono un punto di arrivo per quanto riguarda questa configurazione.

5.3.2 Motore ottenuto con la seconda ottimizzazione del rotore

In questo paragrafo viene applicato lo skewing al miglior motore ottenuto nella seconda fase di ottimizzazione del rotore (motore 3, paragrafo 5.2.4). Le prestazioni di base di questo motore sono:

Tab.5.42

<i>%Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
33.844588	22.754712

Applicando uno skewing pari a 0.2:

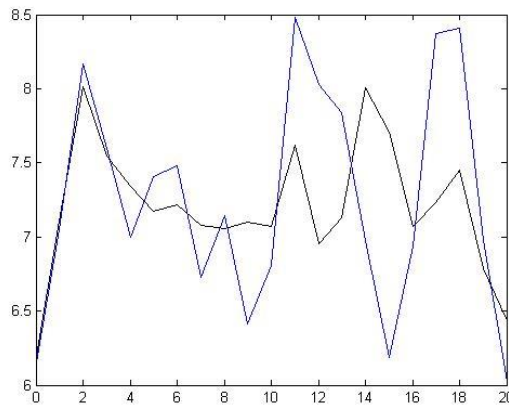


Fig.5.36 Confronto della coppia tra il motore di base(blù) e con lo skewing(nero) pari a 0.2

Le prestazioni ottenute sono:

Tab.5.43

<i>%Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
25.509240	22.796660

Con l'applicazione dello skewing pari a 0.2 le prestazioni hanno ottenuto un notevole improvement. La percentuale di ripple è scesa di quasi 10 punti percentuali e il valore della coppia media è rimasto pressochè invariato. Per quanto riguarda la forma d'onda della coppia, lo skewing ha peggiorato il contenuto armonico variando molto la periodicità della coppia.

Applicando uno skewing pari a 0.5:

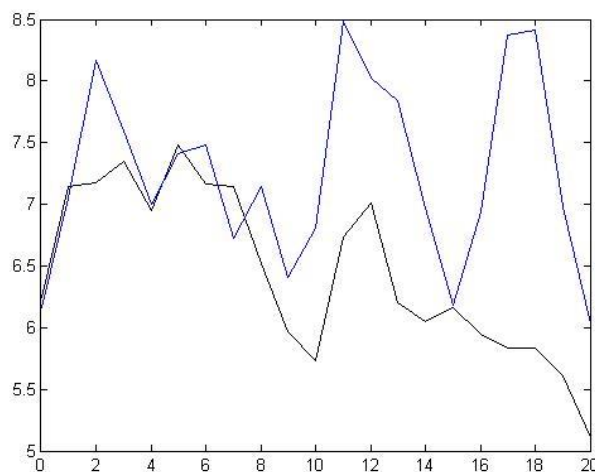


Fig.5.37 Confronto della coppia tra il motore di base(blù) e con lo skewing(nero) pari a 0.5

Le prestazioni ottenute sono:

Tab.5.44

<i>%Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
36.838271	23.554924

Le prestazioni sono peggiorate rispetto a quelle base, questo è dovuto all'elevata sensibilità che ha il motore alle variazioni di fasatura. Nel complesso anche la forma d'onda è peggiorata molto, infatti è variata la periodicità e ci sono più distorsioni.

5.4 Analisi armonica

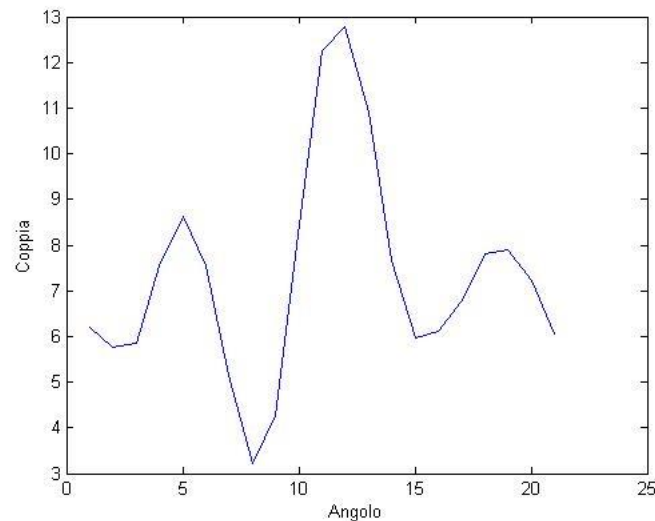
In questo paragrafo verranno ripresi alcuni dei motori analizzati in questo capitolo e ne verrà analizzato il contenuto armonico. Questo tipo di analisi consente di analizzare il legame tra la geometria e le armoniche e di poterlo confrontare con quello della configurazione precedente.

5.4.1 Analisi dei motori delle prove parametriche

In questo paragrafo verranno analizzate le prove parametriche che hanno riportato i cambiamenti più significativi nell'andamento della forma d'onda della coppia. In particolare verranno analizzate le prove 6,9,10 e 11. Queste prove hanno riportato un andamento il più simile possibile a quello ricercato e, nonostante le percentuali di ripple alte, sono significative per definire il legame tra la geometria e il contenuto armonico.

Analisi della prova 6

In questo motore la configurazione degli spazi e degli angoli delle barriere è stata definita in modo da omogenizzare il più possibile la geometria delle barriere.



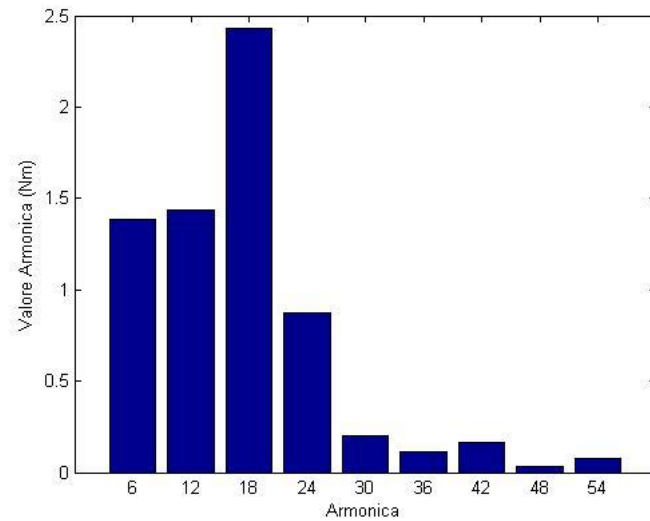


Fig.5.38 Andamento della coppia e relativo contenuto armonico del motore analizzato

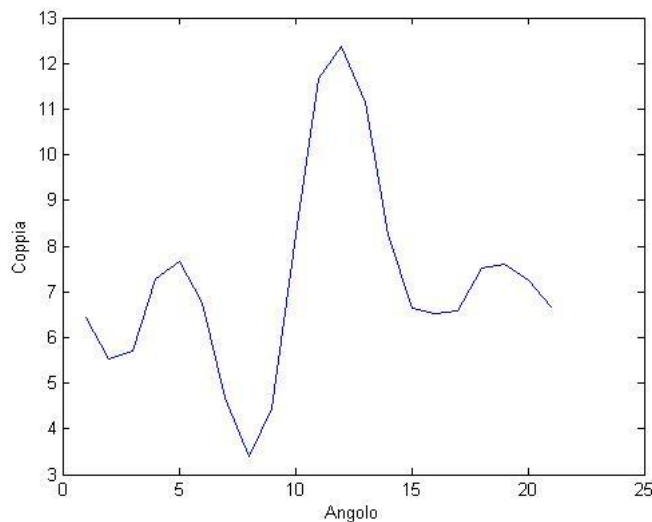
Tab. 5.45

<i>Coppia media</i>	<i>Oscillazione di coppia</i>
7.336282 Nm	9.557330 Nm

In questo motore il contenuto armonico è nettamente sbilanciato verso la terza armonica con una forte influenza dettata dalla prima e dalla seconda armonica. Questo contenuto armonico s'identifica perfettamente nell'andamento della coppia e nella percentuale di ripple molto alta, infatti la periodicità della forma d'onda e l'ampiezza delle oscillazioni sono proprio derivati dalle prime tre armoniche. Tenendo conto della geometria del rotore si può dire che la disposizione alta delle barriere vada a spostare il contenuto armonico verso la terza armonica.

Analisi della prova 9

In questa prova sono stati variati gli spessori delle barriere rendendo più fine le prime due barriere e mantenendo lo spessore della terza barriera. Questa configurazione dovrebbe avere notevoli influenze sul contenuto armonico di ordine più alto.



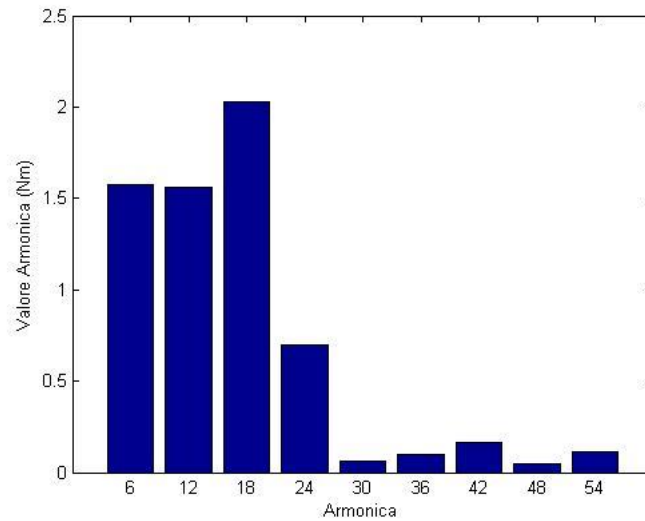


Fig. 5.39 Andamento della coppia e relativo contenuto armonico del motore analizzato

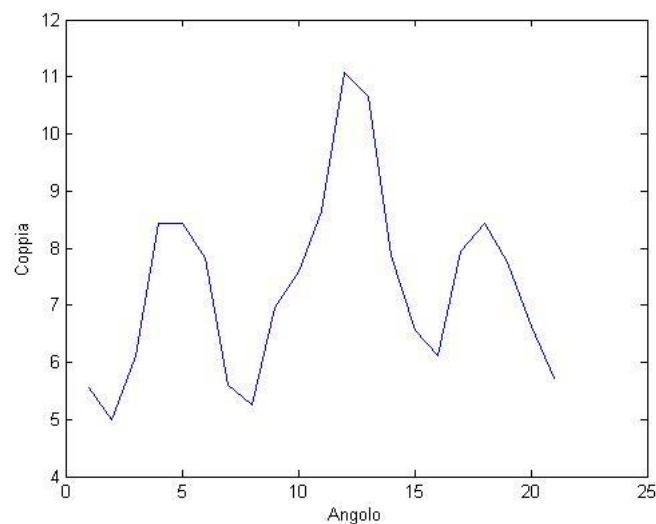
Tab. 5.46

<i>Coppia media</i>	<i>Oscillazione di coppia</i>
7.253639 Nm	8.979666 Nm

In questo caso la riduzione dello spessore delle barriere ha portato ad una piccola riduzione della terza armonica, influenzando direttamente sulle oscillazioni di coppia e sul valore della coppia media. Mediamente le oscillazioni sono molto ridotte ma risentono dell'influenza della prima e della seconda armonica che sono ancora troppo elevate.

Analisi della prova 10

In questa prova è stata creata una maggior separazione tra il taglio superiore e la prima barriera, questo espediente consente di avere un canale maggiore per la concatenazione delle linee di flusso nella parte alta del rotore.



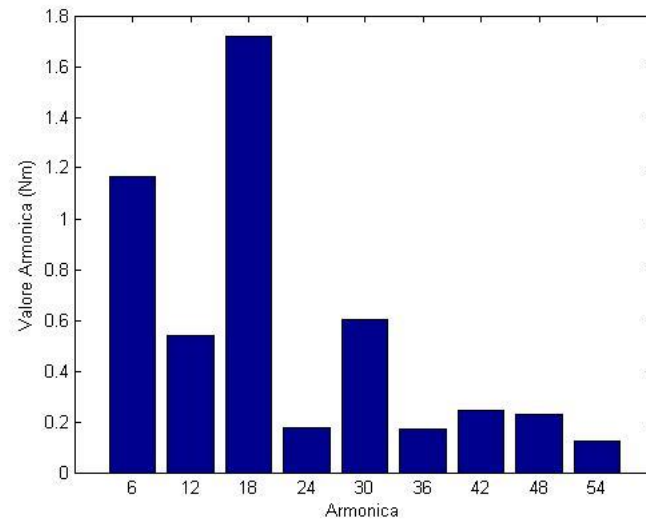


Fig.5.40 Andamento della coppia e relativo contenuto armonico del motore analizzato

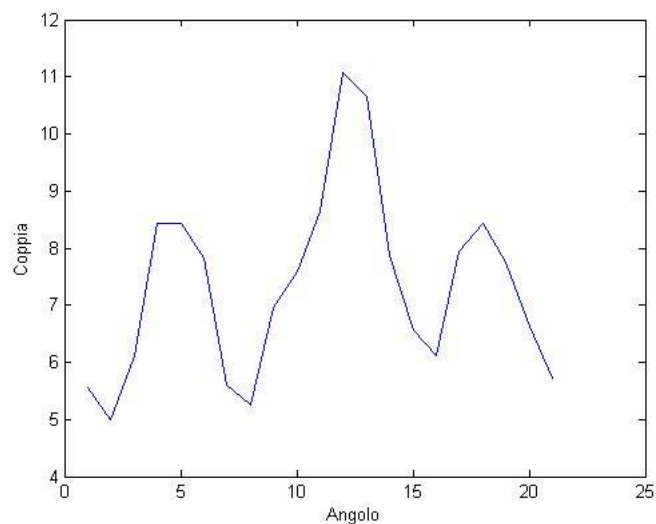
Tab. 5.47

<i>Coppia media</i>	<i>Oscillazione di coppia</i>
7.340403 Nm	6.097668 Nm

In questo caso c'è stato una diminuzione di tutte le armoniche che componevano il contenuto armonico. In particolare c'è stata una marcata diminuzione della seconda armonica, questo ha influito positivamente sulla percentuale di ripple e non ha avuto effetti negativi sul valore della coppia media. La forma d'onda della coppia risulta essere molto pulita e con una periodicità ben definita. Le oscillazioni maggiori sono ancora molto marcate e risentono dell'elevato valore della prima armonica.

Analisi della prova 11

In questa prova sono stati cambiati gli spessori di tutte le barriere aumentandoli a 2 mm. Questo cambiamento dovrebbe portare una ridistribuzione del contenuto armonico e in particolare della prima e della seconda armonica.



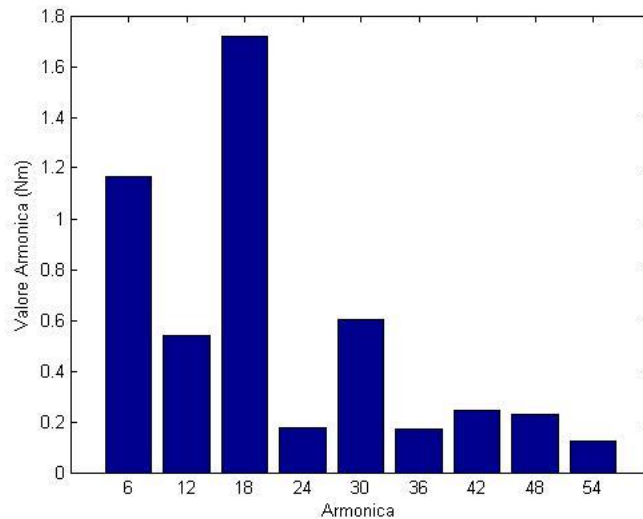


Fig.5.41 Andamento della coppia e relativo contenuto armonico del motore analizzato

Tab. 5.48

<i>Coppia media</i>	<i>Oscillazione di coppia</i>
7.340308 Nm	6.097669 Nm

In questo caso l'andamento della coppia e le prestazioni rimangono del tutto affini a quelli della prova precedente. Il cambiamento dello spessore delle barriere non ha portato a grosse variazioni, si può registrare solamente un aumento delle oscillazioni che però può essere ritenuto praticamente nullo.

5.4.2 Analisi dei motori ottenuti con l'ottimizzazione del rotore

In questo paragrafo vengono analizzati i migliori motori ottenuti con le due fasi di ottimizzazione del rotore. Questi motori hanno delle prestazioni molto buone ma hanno un andamento della forma d'onda della coppia non molto buono, infatti sono affetti da molte distorsioni e non hanno una periodicità del tutto definita.

Analisi dei motori ottenuti con la prima fase di ottimizzazione

Nella prima fase di ottimizzazione sono stati variati gli angoli delle barriere mantenendo costanti gli altri parametri. La variazione degli angoli delle barriere ha ridotto di molto la percentuale di ripple ma ha peggiorato l'andamento della forma d'onda della coppia. I tre migliori motori ottenuti sono i seguenti:

Tab.49

<i>%Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
42.609235	22.345392
41.679189	22.359667
40.664306	22.448171

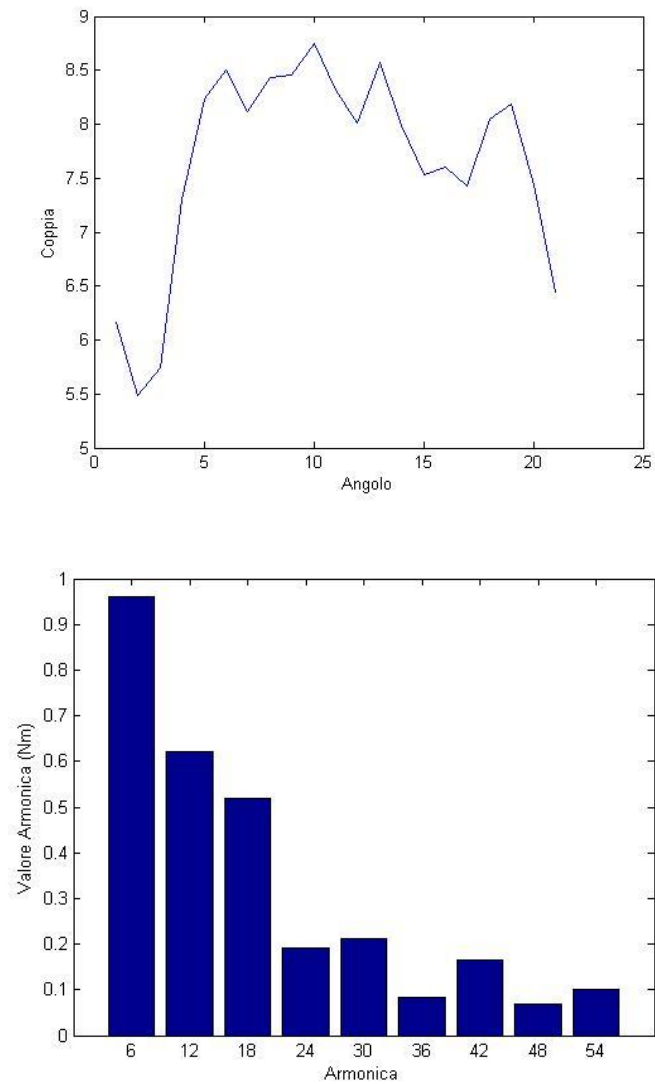


Fig.5.42 Andamento della coppia e relativo contenuto armonico del motore con il 42% di ripple

Tab. 5.50

<i>Coppia media</i>	<i>Oscillazione di coppia</i>
7.654608 Nm	3.261570 Nm

In questo caso il contenuto armonico si è ridistribuito tutto verso la prima e la seconda armonica, queste due sono più grandi rispetto ai casi precedenti, ma soprattutto hanno un contributo più importante di quello della terza armonica. Tra i 5° e i 15° sono presenti delle distorsioni che però risultano minime rispetto al contributo della prima armonica.

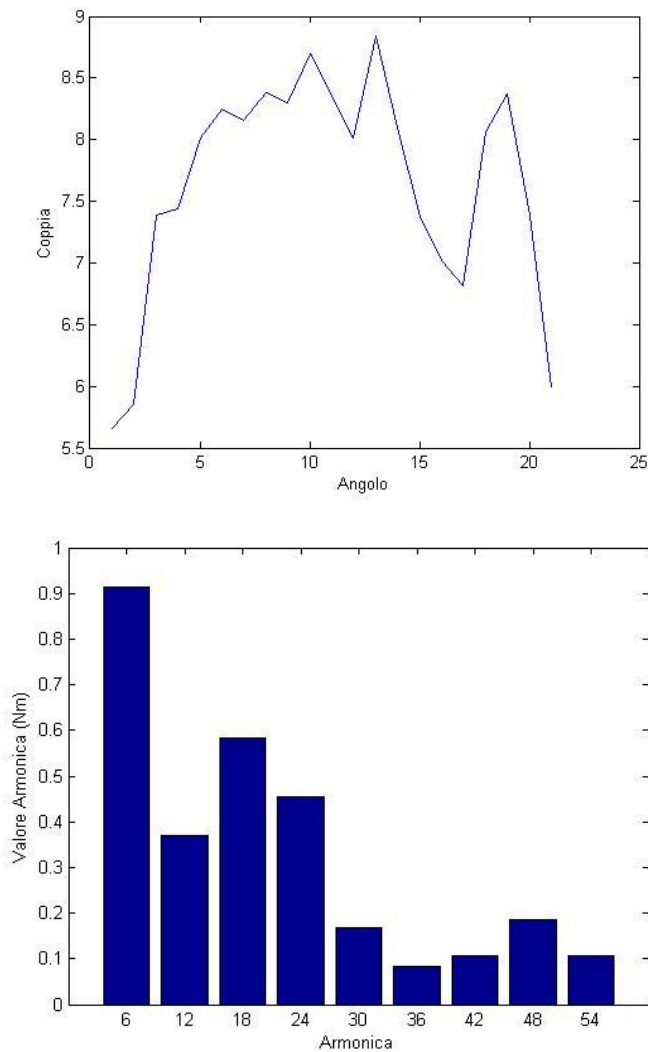


Fig.5.43 Andamento della coppia e relativo contenuto armonico del motore con il 41% di ripple

Tab. 5.51

<i>Coppia media</i>	<i>Oscillazione di coppia</i>
7.640333 Nm	3.184429 Nm

Anche in questo caso la redistribuzione del contenuto armonico ha favorito la prima armonica, a differenza dei casi precedenti però la terza e la quarta armonica hanno un'influenza maggiore, questo lo si può notare nell'andamento della coppia. Il differenziale tra i valori della prima e della terza e quarta armonica genera un andamento non del tutto definito e colpito da molte distorsioni, infatti la periodicità della forma d'onda, pur seguendo di base la prima armonica, risente dell'influenza delle distorsioni di ordini più alti e non è del tutto definita.

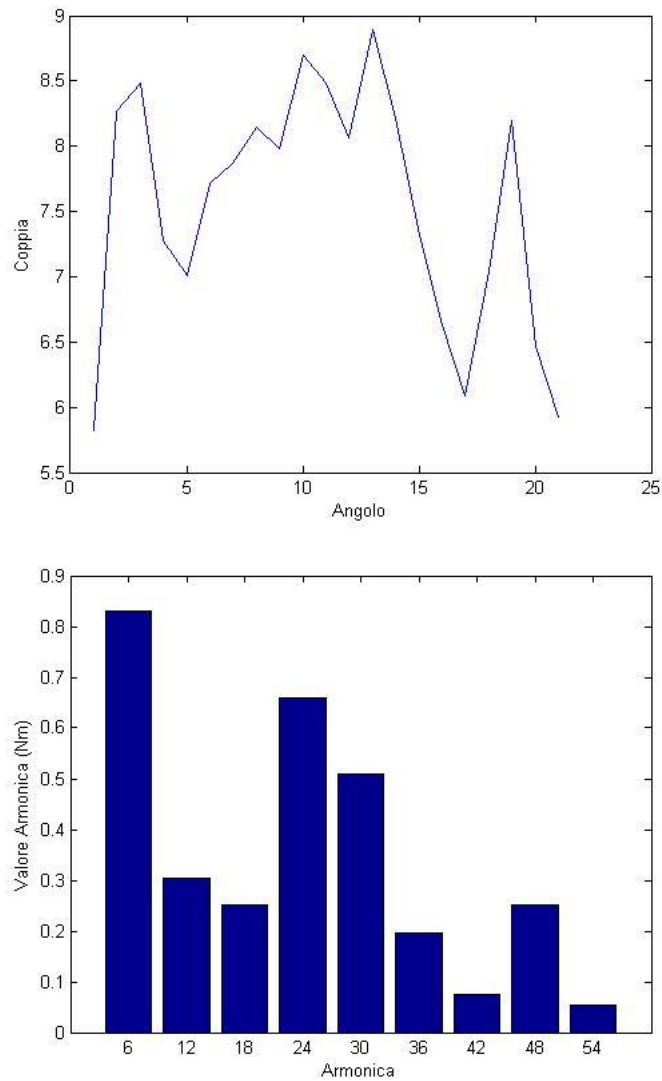


Fig.5.44 Andamento della coppia e relativo contenuto armonico del motore con il 40% di ripple

Tab. 5.52

<i>Coppia media</i>	<i>Oscillazione di coppia</i>
7.551829 Nm	3.070899 Nm

In questo motore, assieme alla riduzione della percentuale di ripple, c'è stato un abbassamento della prima armonica e un aumento della terza. Questo cambiamento ha portato un miglioramento nell'andamento della forma d'onda della coppia. Nel complesso il risultato ottenuto è abbastanza valido come base per la seconda fase.

Analisi dei motori ottenuti con la seconda fase di ottimizzazione

In questa seconda fase sono stati ottimizzati gli spazi tra le barriere, quest'ottimizzazione dovrebbe migliorare ulteriormente la percentuale di ripple e ridistribuire il contenuto armonico diminuendo la prima armonica. I migliori motori ottenuti sono i seguenti:

Tab.5.53

<i>%Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
38.644722	22.514608
40.664306	22.448171

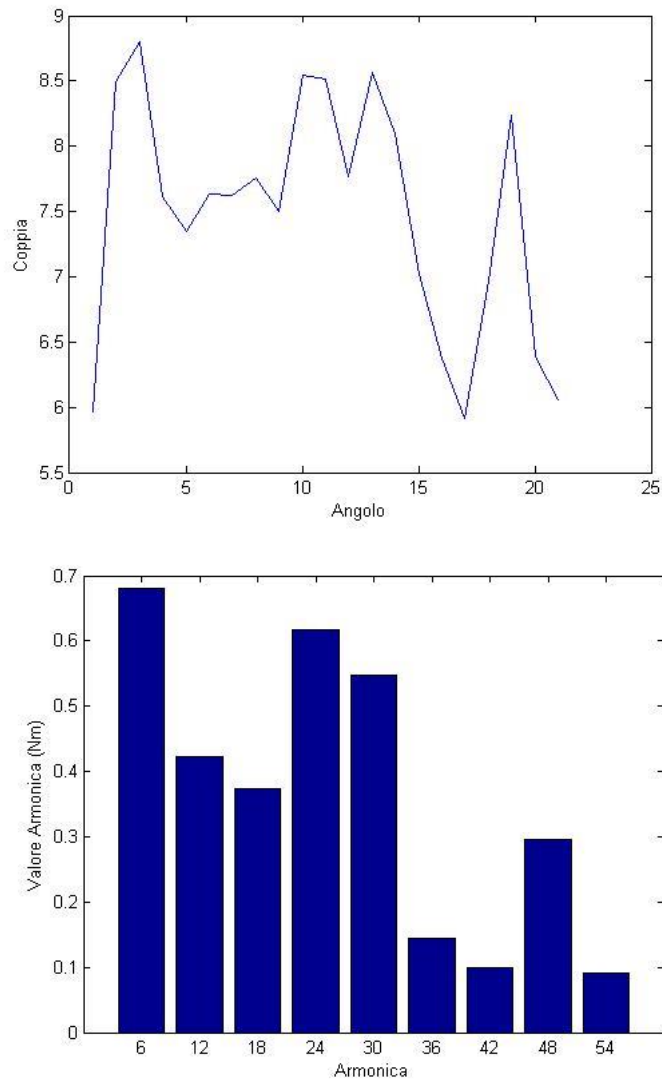


Fig.5.45 Andamento della coppia e relativo contenuto armonico del motore con il 38% di ripple

Tab. 5.54

<i>Coppia media</i>	<i>Oscillazione di coppia</i>
7.485392 Nm	2.892709 Nm

In questo motore la prima armonica è diminuita ulteriormente raggiungendo un valore paragonabile a quello della quarta e della quinta armonica. Questa riduzione del differenziale ha portato ad un miglioramento della forma d'onda, e ad una riduzione della percentuale di ripple. La configurazione con gli angoli delle barriere più alti e gli spazi tra queste più omogenei ha migliorato le prestazioni e reso più pulita la forma d'onda della coppia.

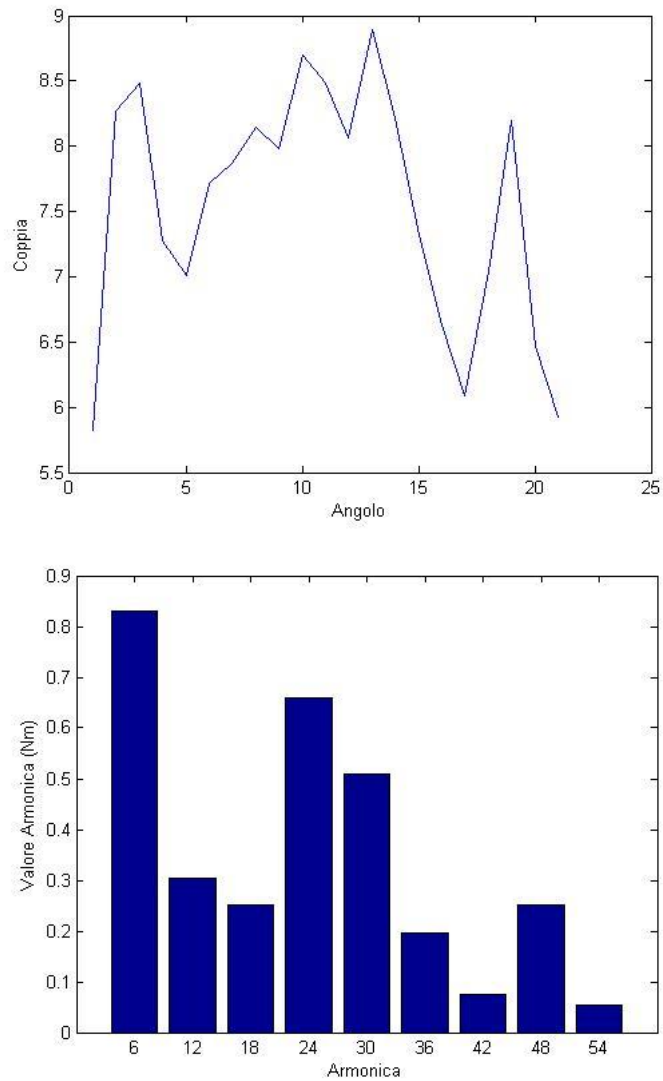


Fig.5.46 Andamento della coppia e relativo contenuto armonico del motore con il 40% di ripple

Tab. 5.55

<i>Coppia media</i>	<i>Oscillazione di coppia</i>
7.551829 Nm	3.070899 Nm

Il contenuto armonico e le prestazioni di questo motore sono del tutto affini a quello analizzato in precedenza. In questo caso il valore più alto della prima armonica ha influito sulla percentuale di ripple, aumentandola. La forma d'onda della coppia ha lo stesso livello di distorsioni, queste però risultano essere meno influenti sull'andamento.

Analisi del motore ottenuto con la seconda ottimizzazione del rotore

Viene ora analizzato il miglior motore ottenuto con la seconda fase di ottimizzazione del rotore (motore 3, paragrafo 5.2.4). Questo motore ha una buona percentuale di ripple e giova di una geometria ottimizzata dello statore.

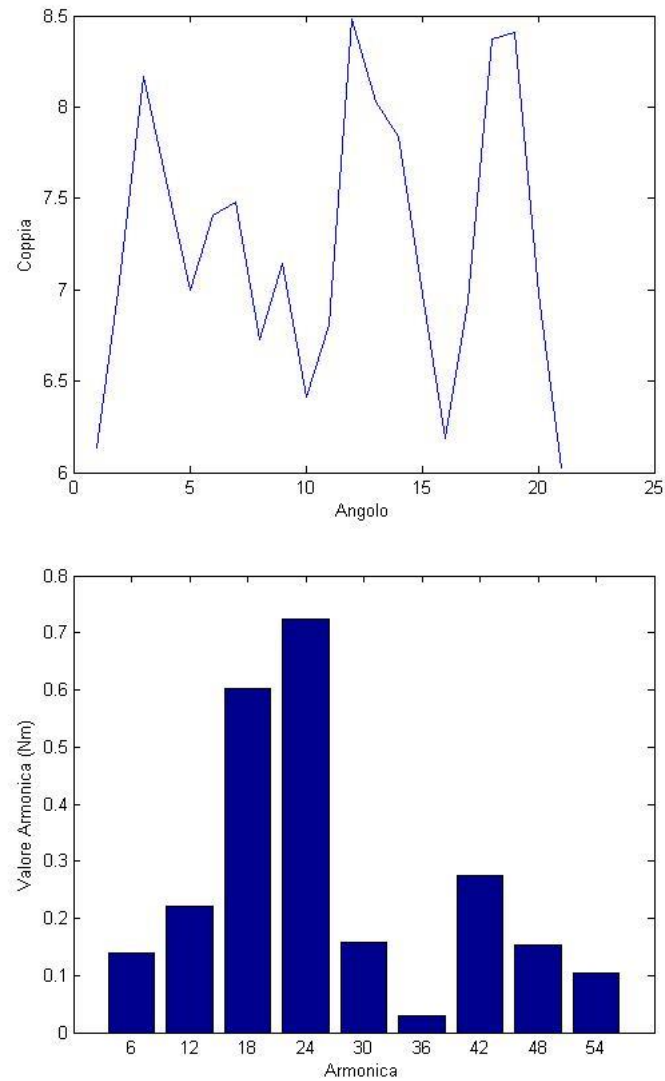


Fig.5.47 Andamento della coppia e relativo contenuto armonico del motore analizzato

Tab. 5.56

<i>Coppia media</i>	<i>Oscillazione di coppia</i>
7.245288 Nm	2.452138 Nm

In questo motore il contenuto armonico è abbastanza ottimale. Le prime due armoniche sono quasi nulle e l'andamento è determinato principalmente dalla terza e dalla quarta armonica. La geometria ottimizzata dello statore ha giocato un ruolo fondamentale all'annullamento delle prime due armoniche, purtroppo la ridistribuzione del contenuto armonico ha alzato i valori della terza e della quarta armonica influenzando negativamente sulla percentuale di ripple.

5.4.3 Analisi dei motori con lo skewing

In questo paragrafo vengono riportate le analisi armoniche fatte sui motori ai quali è stato applicato lo skewing, verranno ripresi solamente i migliori risultati.

Ottimizzazione del rotore

In questo paragrafo viene analizzato il motore ottenuto nella fase due dell'ottimizzazione del rotore (paragrafo 5.2.2). Questo motore di base presenta le seguenti prestazioni:

Tab.5.57

<i>%Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
38.644722	22.514608

I suoi andamenti di base sono riportati nel paragrafo precedente, quelli ottenuti in seguito all'applicazione di uno skewing di 0.2 invece sono:

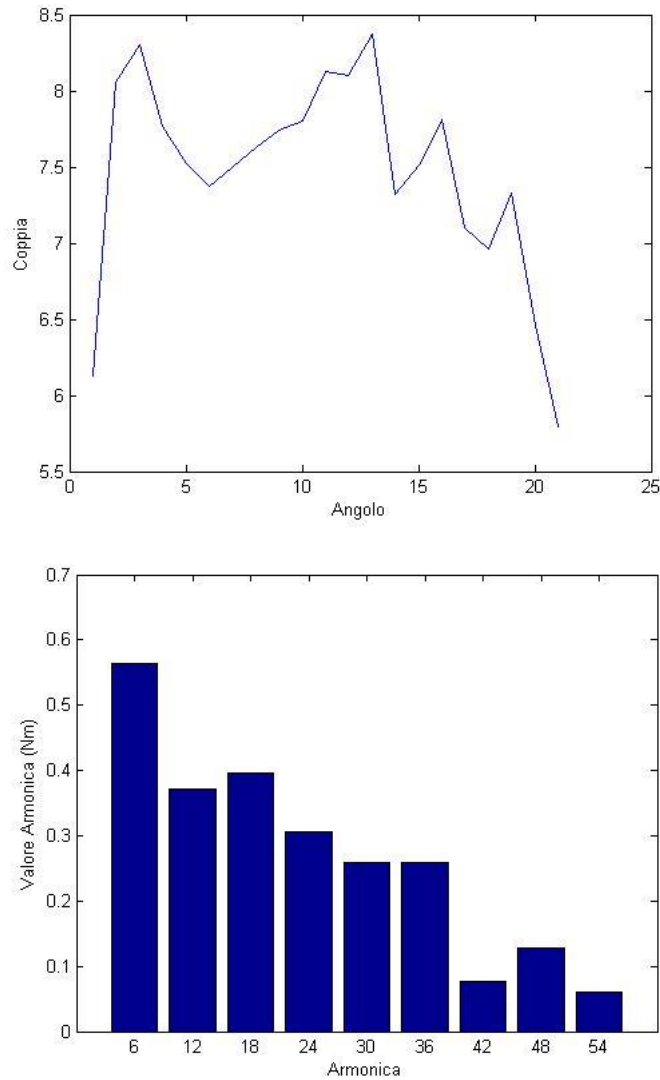


Fig.5.48 Andamento della coppia e relativo contenuto armonico del motore con lo skewing 0.2

Tab. 5.58

<i>Coppia media</i>	<i>Oscillazione di coppia</i>
7.462997 Nm	2.580095 Nm

In questo caso lo skewing ha portato ad una diminuzione di tutte le armoniche, in particolare la quarta e la quinta armonica si sono ridotte molto. La percentuale di ripple si è abbassata fino al 34%, mentre la coppia media non ha subito riduzioni eccessive. Nel complesso il contenuto armonico, nonostante la diminuzione di tutti gli ordini, presenta ancora un differenziale elevato tra la prima armonica e le altre. L'andamento della forma d'onda della coppia, a causa di questo differenziale, non presenta una periodicità definita.

Applicando uno skewing di 0.5 i risultati sono:

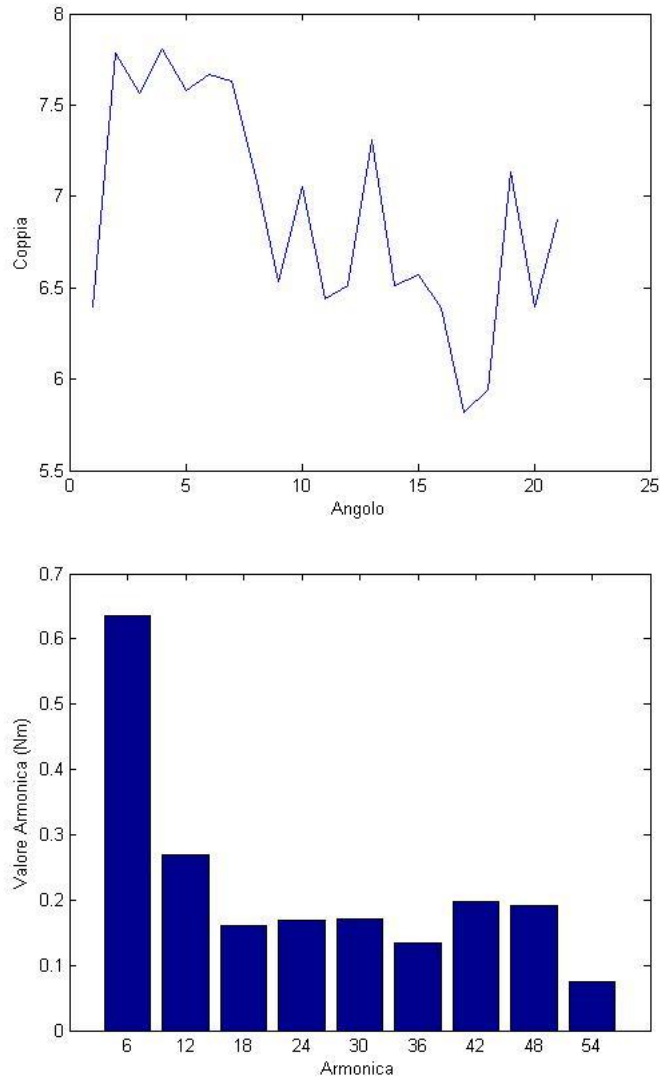


Fig.5.49 Andamento della coppia e relativo contenuto armonico del motore con lo skewing 0.5

Tab. 5.59

<i>Coppia media</i>	<i>Oscillazione di coppia</i>
6.905824 Nm	1.985886 Nm

In questo caso l'aumento dello skewing ha portato ad una diminuzione della percentuale di ripple fino al 28%. Questa diminuzione è stata causata da una riduzione delle armoniche di ordine più alto, nel complesso infatti l'andamento della coppia è definito dalla prima armonica e in misura minore dalle altre armoniche. Questa redistribuzione del contenuto armonico ha fatto in modo che la forma d'onda abbia una periodicità non definita e che sia affetta da molte distorsioni.

Seconda ottimizzazione del rotore

In questo paragrafo viene analizzato il miglior motore ottenuto con la seconda ottimizzazione del rotore e al quale è stato applicato uno skewing di 0.2. Le prestazioni e il contenuto armonico del motore di base sono state analizzate nei paragrafi precedenti.

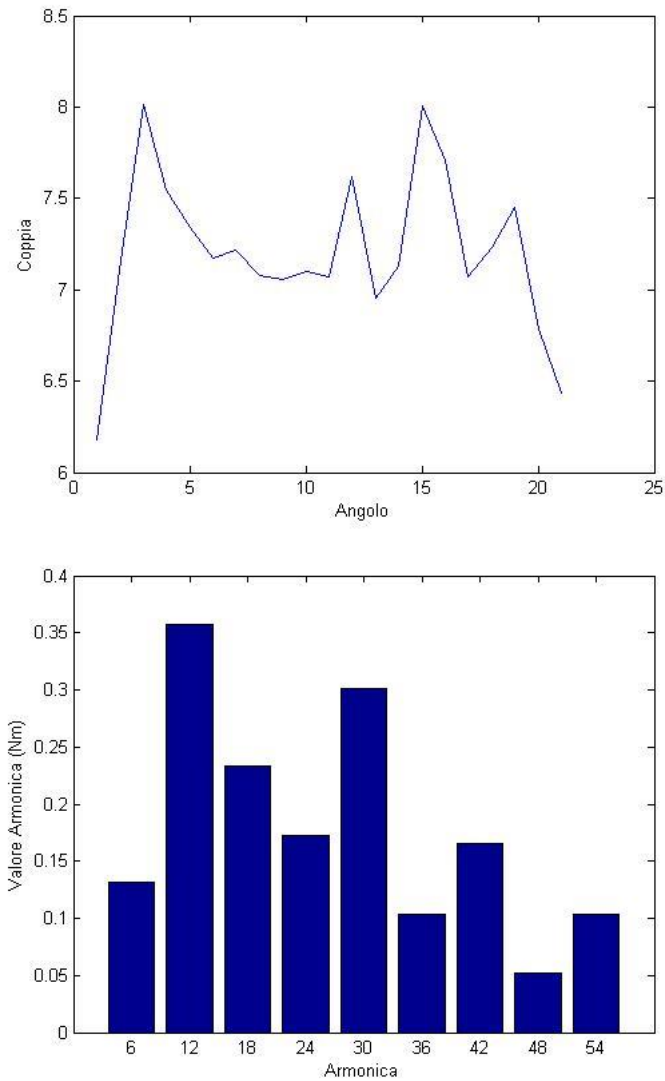


Fig.5.50 Andamento della coppia e relativo contenuto armonico del motore analizzato

Tab. 5.60

<i>Coppia media</i>	<i>Oscillazione di coppia</i>
7.203340 Nm	1.837517 Nm

In questo caso lo skewing ha portato una notevole diminuzione di tutte le armoniche e in particolare della terza e della quarta armonica. Questo abbassamento ha favorito la seconda e la quinta armonica che, pur avendo un valore molto basso, vanno a determinare l'andamento della coppia. Nel complesso il basso contenuto armonico si traduce in una bassa percentuale di ripple. Sebbene l'andamento della coppia non sia quello cercato, questo è comunque compensato dalle buone prestazioni di questo motore.

5.5 Conclusioni

In questo capitolo è stata utilizzata la stessa procedura di ottimizzazione vista nei capitoli precedenti per l'ottimizzazione della configurazione 6-4. I risultati sono molto buoni e mettono in luce l'importanza della geometria del motore per le prestazioni. Nel complesso è stata rafforzata anche la validità della procedura con cui sono stati ottenuti tutti i miglioramenti dei motori presi in esame. In questo caso la configurazione 9-6 ha evidenziato degli andamenti diversi ma basati sugli stessi principi, infatti anche in questo caso l'ottimizzazione delle prestazioni è dovuta passare per la

diminuzione delle armoniche. Ulteriori miglioramenti o improvement delle prestazioni richiedono delle prove diverse e finalizzate a esaminare degli aspetti diversi, come per esempio la variazione della coppia al variare dell'angolo alpha. Tali prove e considerazioni verranno riprese nel capitolo successivo.

Tab.5.61

<i>ID Motore</i>	<i>Percentuale di ripple</i>	<i>Coppia media</i>
<i>Prove parametriche</i>		
<i>Prova 5</i>	81.506639	6.923696 Nm
<i>Prova 6</i>	130.274837	7.336282 Nm
<i>Prova 7</i>	171.310091	6.622594 Nm
<i>Prova 8</i>	163.094776	7.172052 Nm
<i>Prova 9</i>	123.795331	7.253639 Nm
<i>Prova 10</i>	83.069932	7.340403 Nm
<i>Prova 11</i>	83.071026	7.340308 Nm
<i>Ottimizzazioni</i>		
<i>Ottimizzazione Rotore: Prima fase</i>		
<i>Motore 1</i>	42.609235	7.654608 Nm
<i>Motore 2</i>	41.679189	7.640333 Nm
<i>Motore 3</i>	52.706305	7.711918 Nm
<i>Motore 4</i>	40.664306	7.551829 Nm
<i>Ottimizzazione Rotore: Seconda fase</i>		
<i>Motore 5</i>	38.644722	7.485392 Nm
<i>Motore 6</i>	40.664306	7.51829 Nm
<i>Seconda ottimizzazione Rotore</i>		
<i>Prima fase: ottimizzazione angoli</i>		
<i>Motore 7</i>	38.023676	7.683029 Nm
<i>Motore 8</i>	34.872715	7.547554 Nm
<i>Seconda fase: ottimizzazione spazi</i>		
<i>Motore 9</i>	33.844588	7.245288 Nm
<i>Motore 10</i>	34.175968	7.416223 Nm
<i>Skewing</i>		
<i>Prima ottimizzazione del Rotore</i>		
<i>Motore con skew = 0</i>	38.644722	7.485392 Nm
<i>Motore con skew = 0.2</i>	34.571837	7.462997 Nm
<i>Motore con skew = 0.5</i>	28.756685	6.905824 Nm
<i>Seconda ottimizzazione del Rotore</i>		
<i>Motore con skew = 0</i>	33.844588	7.245288 Nm
<i>Motore con skew = 0.2</i>	25.509240	7.20334 Nm
<i>Motore con skew = 0.5</i>	36.838271	6.445076 Nm

Capitolo 6: Lavoro sulle prestazioni

Con il lavoro di ottimizzazione geometrica svolto fin ora è stato possibile definire tre motori, due motori ottimizzati per la configurazione 6-4, uno a 4 e uno a 3 barriere, e un motore per la configurazione 9-6. Applicando lo skewing del rotore, è stato inoltre possibile migliorare ulteriormente la percentuale di ripple senza avere un abbassamento eccessivo della coppia media. I tre motori ottenuti differiscono nella geometria o nella configurazione dei poli, ma sono del tutto uguali per quanto riguarda le dimensioni di base. Nelle prove svolte fin ora tutti i motori sono stati alimentati con una corrente di picco pari a 39 A e con un angolo elettrico $\alpha_{ie} = 45^\circ$. Per poter finalizzare ulteriormente le prestazioni può essere molto utile analizzare i motori ottenuti variando l'angolo elettrico e verificando se effettivamente le prestazioni migliori si ottengono con i 45° . Qui di seguito vengono riepilogate le prestazioni e le geometrie dei tre motori ottenute fin ora:

Tab.6.1

<i>Configurazione 6 – 4</i>		
<i>Statori</i>		
<i>Parametro</i>	<i>Motore a 3 barriere</i>	<i>Motore a 4 barriere</i>
X_{wedav}	6	5
Y_{wedav}	4	4
X_{wedbv}	0	0
Y_{wedbv}	0	0
Y_{wsor1}	1	1
X_{wsor}	1	1
Y_{pv}	0	0
S_{slot}	586.917 mm ²	565.879 mm ²
<i>Rotori</i>		
β_{bt}	16	16
β_1	\	22
β_2	26	28
β_3	35	34
β_4	40	42
w_{43}	5.5 mm	3 mm
w_{32}	3 mm	2.5 mm
w_{21}	\	2.5 mm
w_{bt}	2 mm	1 mm
w_{sb}	1 mm	1 mm
t^*	2 mm	2 mm
<i>Configurazione 9 – 6</i>		
<i>Statore</i>		
<i>Parametro</i>	<i>Valore</i>	
X_{wedav}	-2	
Y_{wedav}	1	
X_{wedbv}	6	
Y_{wedbv}	2	
Y_{wsor1}	0	
X_{wsor}	2	
Y_{pv}	2	
S_{slot}	405.161 mm ²	
<i>Rotore</i>		
β_{bt}	11°	
β_1	16°	
β_2	22°	
β_3	27°	
w_{32}	1.5 mm	
w_{21}	1 mm	

w_{bt}	2 mm
w_{sb}	6 mm
t_1	1.5 mm
t_2	1.5 mm
t_3	2 mm

Le prestazioni sono:

Tab.6.2

Nome motore	%Ripple	Parametro coppia
<i>Configurazione 6 – 4</i>		
<i>Motore a 4 barriere</i>		
<i>Motore 1</i>	34.4455	4.48018
<i>Motore a 4 barriere con skewing 0.5</i>		
<i>Motore 2</i>	23.834635	4.519526
<i>Motore a 3 barriere</i>		
<i>Motore 3</i>	20.1331	4.57325
<i>Motore a 3 barriere con lo skewing a 0.2</i>		
<i>Motore 4</i>	16.89511	4.647487
<i>Configurazione 9 – 6</i>		
<i>Motore 5</i>	33.844588	22.754712
<i>Motore 5 con lo skewing pari a 0.2</i>		
<i>Motore 6</i>	25.509240	22.796660

Questi tre motori, verranno ora analizzati con una prova che serve per determinare a quale angoli α_{ie} questi raggiungano le prestazioni migliori. Questa prova viene fatta perchè molto spesso nei motori di piccola taglia le prestazioni migliori vengono ottenute con un angolo elettrico diverso dai 45°. Nei dati di partenza il motore di base otteneva le migliori prestazioni con l'angolo che è stato imposto fin ora, tuttavia la variazione geometrica che è stata fatta può aver variato quest'angolo.

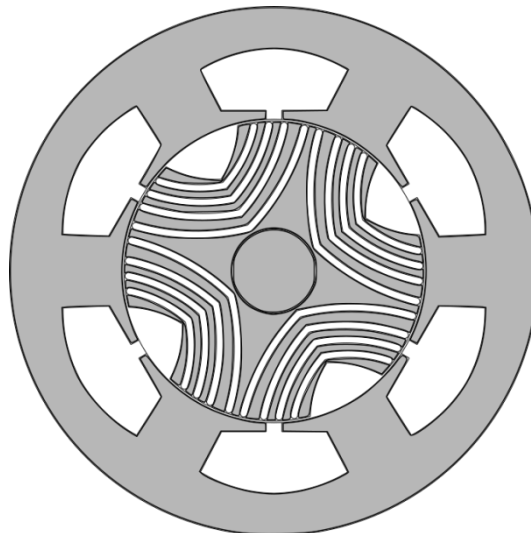


Fig.6.1 Modello del Motore 1 riportato in tabella 6.2

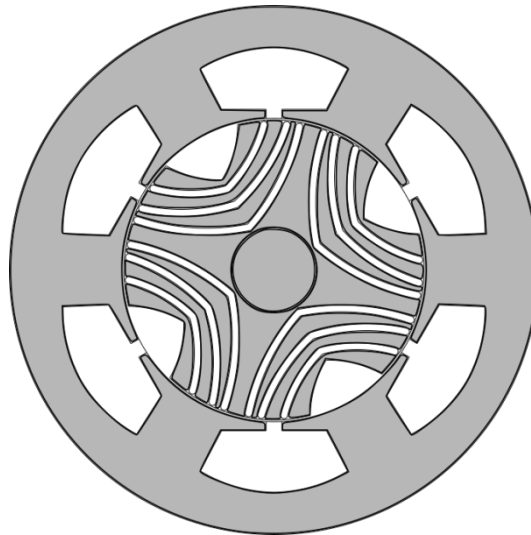


Fig.6.2 Modello del Motore 3 riportato in tabella 6.2

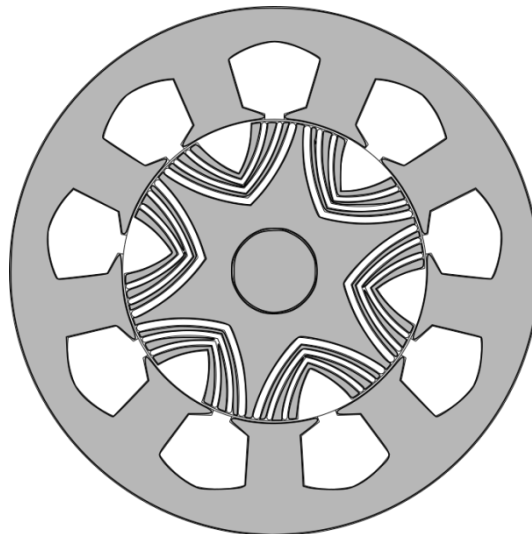


Fig.6.3 Modello del Motore 5 riportato in tabella 6.2

6.1 Prove di variazione dell'angolo α_{ie}

In questo paragrafo verranno svolte le prove che servono per verificare la variazione delle prestazioni al variare degli angoli alpha. Queste prove vengono svolte mantenendo costante la corrente e tenendo fermo il rotore variando solamente l'angolo α_{ie} entro un range definito. In questo caso è stato definito un range che va dai 40 agli 80 gradi, questo range è stato definito per individuare quello che più plausibilmente è l'intervallo dove cade il punto d'interesse.

Motore a 4 barriere

Viene ora analizzato il motore a 4 barriere della configurazione 6-4, questo motore ha un valore di coppia media del tutto affine a quello del motore a 3 barriere ma tende ad avere una percentuale di ripple più alta a causa della presenza di una barriera in più.

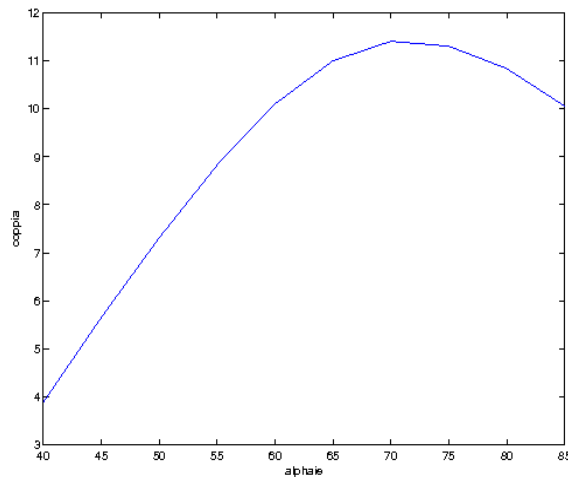


Fig. 6.4 Andamento della coppia al variare dell'angolo α_{ie}

Com'era stato ipotizzato l'angolo elettrico al quale si ha la coppia maggiore è diverso dai 45° gradi utilizzati fin ora. In particolare il picco di coppia lo si ottiene con un angolo di 70°. Per poter determinare a quale angolo elettrico le prestazioni siano migliori però bisogna verificare anche quali sono le relative percentuali di ripple, è possibile infatti che queste subiscano delle leggere variazioni. A tal proposito verranno esaminati i motori in tre punti: $\alpha_{ie} = 60^\circ, 65^\circ, 70^\circ$. Questi tre punti appartengono alla parte ascendente della curva e sono i punti ai quali corrispondono i valori maggiori della coppia. Chiaramente questo stesso andamento degli angoli alpha vale anche per i motori con lo skewing del rotore, a tal proposito le prove verranno svolte proprio sui motori con lo skewing, infatti questi sono anche i motori con le prestazioni migliori. Qui di seguito vengono tabulati i risultati ottenuti:

Tab.6.3

α_{ie}	%Ripple	Parametro coppia
60°	22.853917	-0.657896
65°	27.469809	-1.886488
70°	33.789884	-2.748422

Le tre prove svolte evidenziano come le prestazioni migliori siano raggiunte con un angolo alpha pari a 60°. Sebbene con angoli elettrici superiori sia possibile aumentare la coppia media, questo aumento non compensa l'innalzamento della percentuale di ripple, che nel caso con $\alpha_{ie} = 60^\circ$ è anche diminuita. Va inoltre considerato che con un aumento della lunghezza del motore è possibile alzare il valore della coppia mantenendo intatte, sia la percentuale di ripple che la forma d'onda. Tale aumento, anche se comporta un ingombro maggiore, è del tutto accettabile viste le dimensioni molto ridotte del motore. Qui di seguito viene riportato il confronto tra la coppia del motore esaminato con e senza skewing e con $\alpha_{ie} = 60^\circ$.

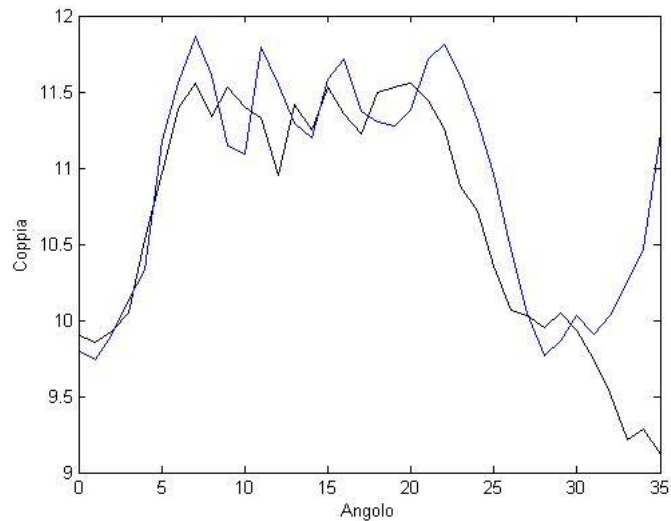


Fig.6.5 confronto tra le coppie ottenute con $\alpha_{ie} = 60^\circ$

Motore a 3 barriere

Come fatto per il motore a 4 barriere, viene analizzato anche il motore a 3 barriere, in particolare si tratta del motore 3 della tabella 6.2. Anche in questo caso, una volta esaminati quali sono i punti migliori, verranno svolte delle prove sul relativo motore con lo skewing. In questo caso il fatto di avere tre barriere dovrebbe influire solamente sul valore della coppia media, che potrebbe essere leggermente superiore a quello visto in precedenza.

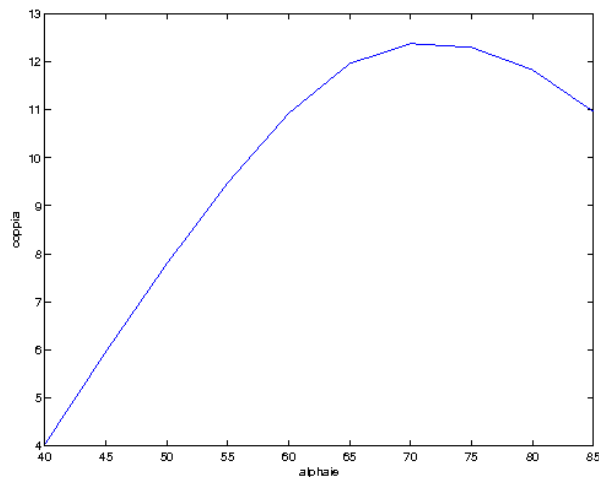


Fig.6.6 Andamento della coppia al variare dell'angolo α_{ie}

L'andamento ottenuto è del tutto affine a quello visto in precedenza. Anche questo caso verranno svolte le stesse prove.

Tab.6.4

α_{ie}	%Ripple	Parametro coppia
60°	14.079600	-0.636896
65°	16.748447	-1.901527
70°	21.882229	-2.772107

Anche in questo caso le prestazioni migliori, come rapporto tra percentuale di ripple e aumento di coppia, sono quelle ottenute con $\alpha_{ie} = 60^\circ$. In generale le prestazioni sono nettamente superiori a quelle ottenute con il motore a 4 barriere, infatti, nonostante le percentuali di ripple siano molto più basse, i valori della coppia media sono più o meno uguali.

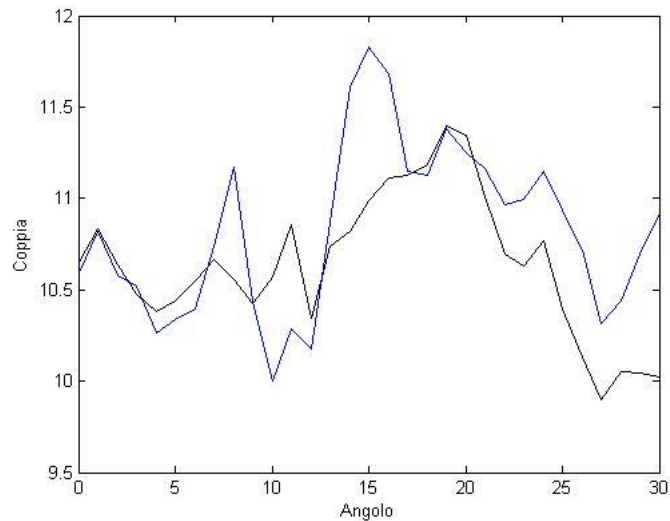


Fig.6.7 confronto tra le coppie ottenute con $\alpha_{ie} = 60^\circ$

In questo caso anche la forma d'onda della coppia risulta migliore di quella del motore a 4 barriere, infatti sia la periodicità che il livello delle distorsioni sono rimasti molto buoni sia nel caso con che in quello senza skewing.

Motore con la configurazione 9-6

In questo motore il cambio di configurazione ha modificato il legame e gli andamenti che erano stati osservati con la configurazione 6-4. L'aumento del numero di cave ha portato ad un aumento della coppia media in uscita, mentre la variazione del numero di poli ha modificato il tipo di magnetizzazione del rotore. Questi cambiamenti tuttavia non dovrebbero aver modificato l'andamento della coppia al variare dell'angolo alpha.

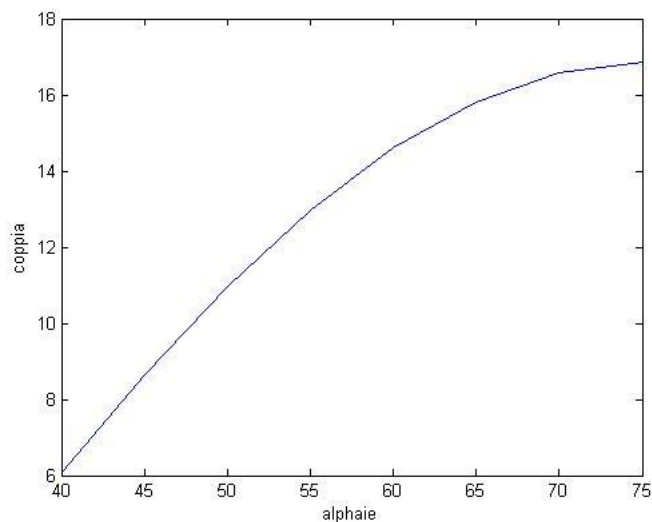


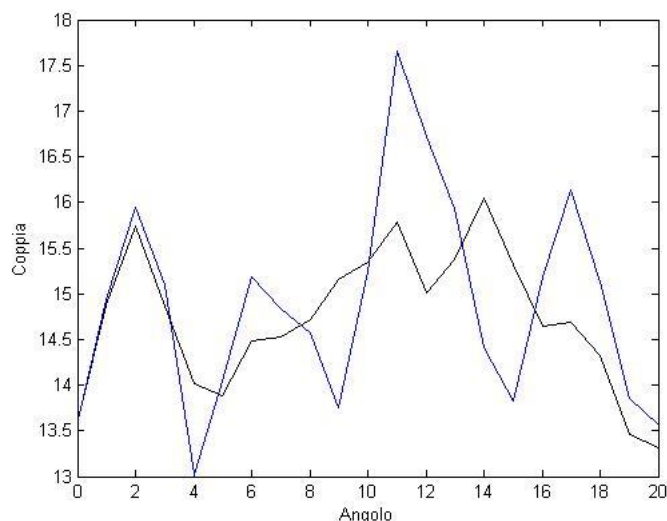
Fig.6.8 Andamento della coppia al variare dell'angolo α_{ie}

In questo caso l'andamento delle prestazioni è leggermente spostato rispetto ai casi precedenti, in particolare il picco avviene più verso i 75° per poi avere una stabilizzazione. Nonostante questo leggero spostamento del picco, le prove verranno svolte negli stessi punti utilizzati in precedenza, infatti questi comunque fanno parte del picco di coppia e si avvicinano all'ottimo.

Tab.6.5

α_{ie}	%Ripple	Parametro coppia
60°	18.581680	15.277146
65°	20.724830	13.444079
70°	25.131861	12.069982

Come nei due casi analizzati in precedenza le prestazioni migliori sono state ottenute con l'angolo alpha a 60°. In questo caso la coppia media è molto più alta rispetto ai motori della configurazione 6-4, mentre la percentuale di ripple ha un valore intermedio tra i due ottimi.


 Fig.6.7 confronto tra le coppie ottenute con $\alpha_{ie} = 60^\circ$

Osservazioni

Nelle prove svolte si è visto come la variazione dell'angolo elettrico delle correnti possa influire sia sul valore della coppia media che sulla percentuale di ripple. Nelle prove svolte i motori migliori sono stati quello a 3 barriere e quello della configurazione 9-6. Entrambi questi motori sono risultati ottimali sia dal punto di vista del ripple che di quello della coppia media. Per quanto riguarda l'andamento della coppia, in entrambi i casi citati non ci sono armoniche eccessivamente elevate rispetto alle altre. Nel complesso i tre motori analizzati possono essere ritenuti del tutto finalizzati ed ottimizzati.

6.2 Confronto delle prestazioni

Come fase conclusiva del lavoro svolto è necessario confrontare i motori ottenuti con degli altri motori della stessa taglia. Questo confronto permetterà di classificare i motori ottimizzati e di poter valorizzare di più i risultati ottenuti. Per confrontare le prestazioni verranno utilizzati due motori: Un modello del prototipo costruito da *Spargo, Mecrow e Widmer*^[1] e un motore più standard a 36 cave e 4 poli. Qui di seguito verranno riportati i dati geometrici ed elettrici di base, va notato che per quanto riguarda il prototipo, alcuni dati non possono essere divulgati, quindi verranno riportati solamente i dati basilari riportati nell'*articolo*^[1].

Prototipo

Tab.6.6

<i>Dato</i>	<i>Valore</i>
Q_s	6
L_{stk}	150 mm
D_{est}	150 mm
D_{slot}	123 mm
D_i	89 mm
S_{slot}	560 mm ²
g	0.5 mm
D_{rest}	88 mm
D_{sh}	20 mm

Tab.6.7

Dato	Valore
p	2
n_c	104
α_{ie}	45°
k_{fill}	0.6
I_p	21 A

Tab.6.8

Fase A	-0.5	0	0.5	-0.5	0	0.5
Fase B	0.5	-0.5	0	0.5	-0.5	0
Fase C	0	0.5	-0.5	0	0.5	-0.5

Il prototipo utilizzato per le prove è molto simile a quello riportato nell'articolo sia per quanto riguarda la geometria che per le prestazioni. Le approssimazioni del modello, dovute ad una conoscenza dei dati non del tutto completa, posso ritenersi accettabili e comunque utili per il tipo di confronto che si vuole fare.

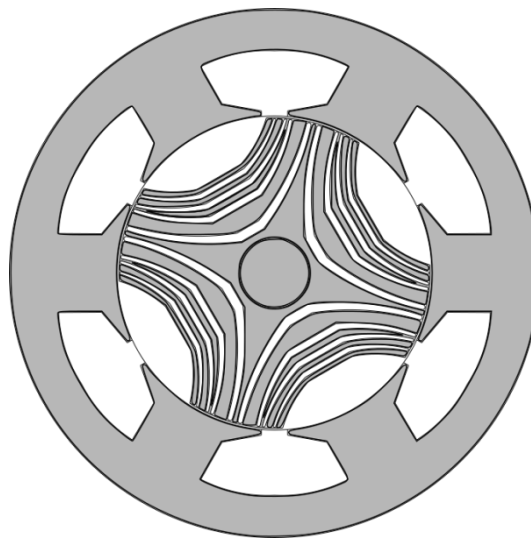


Fig.6.8 Modello del prototipo analizzato

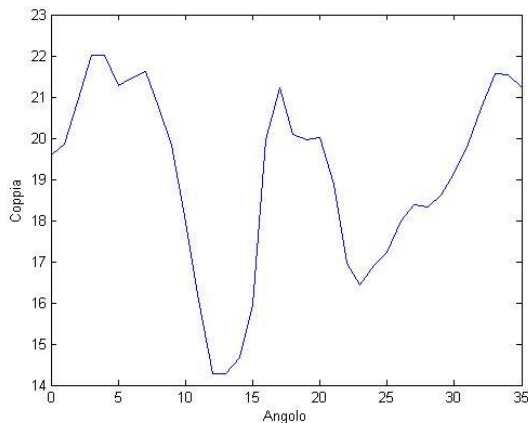


Fig.6.9 Andamento della coppia del prototipo analizzato

Tab.6.9

<i>%Ripple</i>	<i>Parametro coppia</i>
40.588314	-9.097142

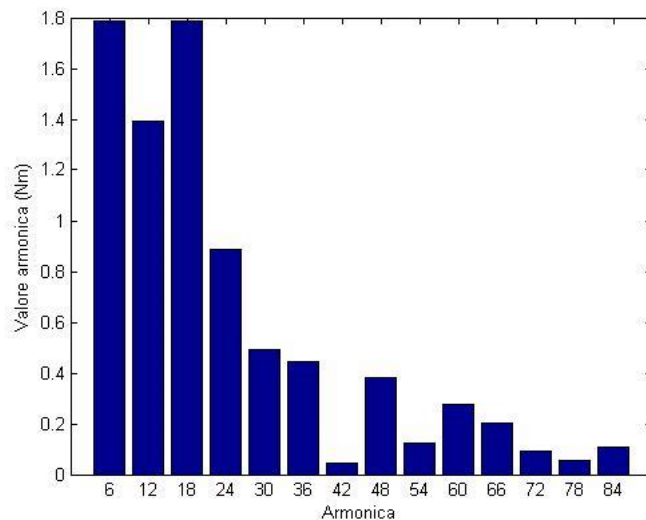


Fig. 6.10 Contenuto armonico del prototipo analizzato

Tab.6.10

<i>Coppia media</i>	<i>Oscillazioni di coppia</i>
19.097142 Nm	7.751208 Nm

Le prestazioni evidenziano un valore di coppia media intorno ai 20 Nm ed una percentuale di ripple del 40%. Il contenuto armonico e l'andamento della coppia mettono in evidenza la forte influenza esercitata dalle prime tre armoniche. Le prestazioni ottenute presentano delle differenze con il modello dell'articolo ma, visti i dati che sono stati forniti, si può ritenere che lo approssimino abbastanza bene. Il pregio maggiore di questo motore è quello di avere una densità di coppia molto elevata, infatti la coppia media ottenuta, nonostante la corrente di picco fosse minore, è nettamente superiore a quella ottenuta nei motori definiti nel lavoro svolto. Questo aumento della densità è dovuto al maggiore diametro del rotore e al maggior numero di conduttori nelle cave di statore. La percentuale di ripple è abbastanza elevata e risente di un contenuto armonico quasi totalmente sbilanciato verso le prime armoniche.

Motore 36-4

Tab.6.11

<i>Dato</i>	<i>Valore</i>
Q_s	36
L_{stk}	150 mm
D_{est}	150 mm
D_{slot}	118 mm
D_i	86 mm
S_{slot}	112.28 mm ²
g	0.5 mm
D_{rest}	85 mm
D_{sh}	24 mm

Tab.6.12

Dato	Valore
p	2
n_c	50
α_{ie}	45°
k_{fill}	0.6
I_p	39 A

Tab.6.13

<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>
0.5	0	-0.5
0.5	0	-0.5
0	0.5	-0.5
0	0.5	-0.5
0	0.5	-0.5
-0.5	0.5	0
-0.5	0.5	0
-0.5	0.5	0
-0.5	0	0.5
-0.5	0	0.5
-0.5	0	0.5
0	-0.5	0.5
0	-0.5	0.5
0	-0.5	0.5
0.5	-0.5	0
0.5	-0.5	0
0.5	-0.5	0
0.5	0	-0.5
0.5	0	-0.5
0.5	0	-0.5
0	0.5	-0.5
0	0.5	-0.5
0	0.5	-0.5
-0.5	0.5	0
-0.5	0.5	0
-0.5	0.5	0

-0.5	0	0.5
-0.5	0	0.5
-0.5	0	0.5
0	-0.5	0.5
0	-0.5	0.5
0	-0.5	0.5
0.5	-0.5	0
0.5	-0.5	0
0.5	-0.5	0
0.5	0	-0.5

L'avvolgimento utilizzato per questo motore è a doppio strato con raccorciamento di una cava, questa tipologia è molto diffusa e consente di ridurre il contenuto armonico. Il motore viene alimentato con la stessa corrente e lo stesso angolo elettrico utilizzati per i motori che sono stati ottimizzati. Nel complesso l'aumento del numero di cave dovrebbe portare ad un aumento della coppia media prodotta. Per quanto riguarda la geometria generale, questa è stata resa abbastanza simile agli standard che solitamente vengono utilizzati per questi motori.

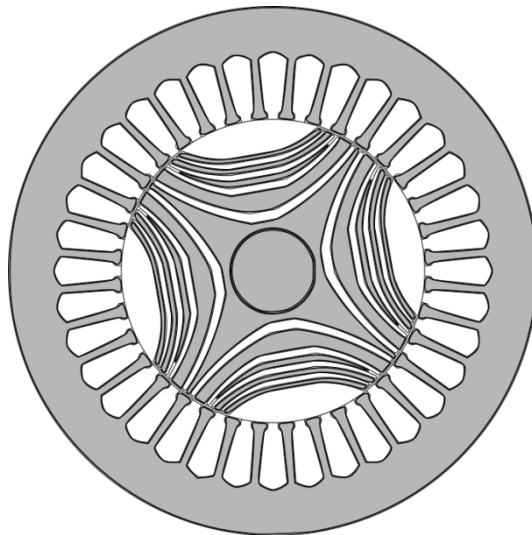


Fig.6.11 Modello utilizzato per la prova sul motore 36-4

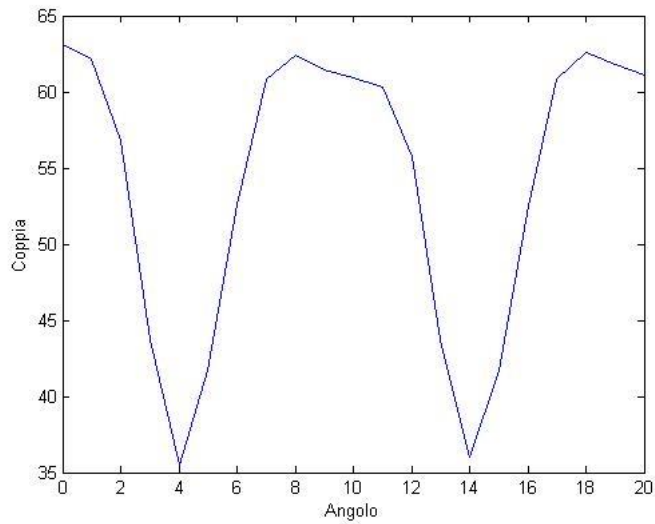


Fig. 6.12 Andamento della coppia del motore analizzato

Tab.6.14

<i>%Ripple</i>	<i>Coppia media</i>
50.975988	54.166 Nm

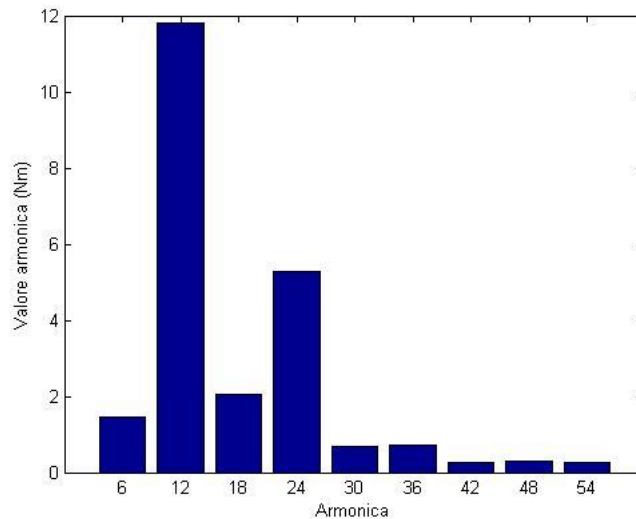


Fig.6.13 Contenuto armonico del motore 36-4

Tab.6.15

<i>Coppia media</i>	<i>Oscillazioni di coppia</i>
54.166 Nm	27.6118 Nm

In questo caso l'aumento del numero di cave, a parità di corrente di alimentazione, porta ad un aumento notevole della coppia media. Per quanto riguarda la percentuale di ripple, questa, considerato il valore della coppia media, è eccessivamente elevata e dettata principalmente da un contenuto armonico totalmente sbilanciato verso la seconda armonica.

6.3 Osservazioni e conclusioni

Le analisi svolte sui due motori utilizzati come confronto hanno permesso di avere un riferimento con il quale poter fare alcune osservazioni riguardo i motori che sono stati ottenuti con le ottimizzazioni. Le differenze più evidenti riguardano il valore della coppia media e la percentuale di ripple. Sia nel prototipo che nel motore 36-4 il valore della coppia media è molto più alto rispetto a quello dei motori che sono stati ottimizzati. Dato che le dimensioni sono del tutto affini, questo aspetto evidenzia che nei due motori utilizzati come confronto è presente una maggiore densità di magnetizzazione e di coppia. Nei motori ottenuti con le ottimizzazioni svolte, il fatto di avere la metà dei conduttori nello statore ha portato ad una diminuzione della densità di magnetizzazione e ha fatto diminuire il valore della coppia. Aumentando il numero di conduttori il tipo di magnetizzazione subirebbe un cambiamento, quindi per ottenere di nuovo le prestazioni ottenute sarebbe necessario procedere ad una nuova ottimizzazione della geometria del rotore. Considerando le percentuali di ripple sia i due motori 6-4 che il motore 9-6, che sono stati ottimizzati, hanno delle percentuali di ripple nettamente migliori rispetto a quelle dei due motori di confronto. Questo aspetto è molto importante e risulta una chiave fondamentale nella valutazione delle prestazioni, infatti la maggior stabilità della coppia in uscita è un aspetto determinante e più difficile da ottenere rispetto all'aumento della coppia media. Andando a variare la lunghezza dei motori esaminati è possibile aumentare il valore della coppia in uscita senza far variare le prestazioni. Questa soluzione appena descritta può essere ritenuta la più valida e semplice per poter innalzare il valore della coppia dei motori ottimizzati. Qui di seguito verranno riportati i rapporti tra le coppie in uscita e il volume di ciascun motore analizzato in questo capitolo.

Tab.6.16

<i>Coppia media</i>	<i>%Ripple</i>	<i>Coppia media/Volume</i>
<i>Prototipo</i>		
19.097142 Nm	40.588314	$7.2 * 10^{-6} \text{ Nm/mm}^3$
<i>Motore 36 – 4</i>		
54.166 Nm	50.975988	$20.44 * 10^{-6} \text{ Nm/mm}^3$
<i>Motore 6 – 4 a 3 barriere</i>		
10.636896 Nm	14.079600	$4.014 * 10^{-6} \text{ Nm/mm}^3$
<i>Motore 6 – 4 a 4 barriere</i>		
10.657896 Nm	22.853917	$4.0218 * 10^{-6} \text{ Nm/mm}^3$
<i>Motore 9 – 6</i>		
14.722854 Nm	18.581680	$5.556 * 10^{-6} \text{ Nm/mm}^3$

Il volume di ogni motore è pari a $2.65 * 10^6 \text{ mm}^3$. Dalla tabella si può notare la differenza di densità di coppia tra i motori ottimizzati e quelli utilizzati come confronto. In particolare si può notare che i motori ottimizzati sono caratterizzati da una densità molto bassa rispetto a quella dei motori di confronto.

Qui di seguito vengono riportati gli andamenti delle coppie dei due motori ottimizzati, ottenuti con un raddoppio della lunghezza dei motori. Il fatto di aver raddoppiato la lunghezza raddoppia la coppia e la porta ad essere paragonabile se non superiore a quella ottenuta con i motori di confronto.

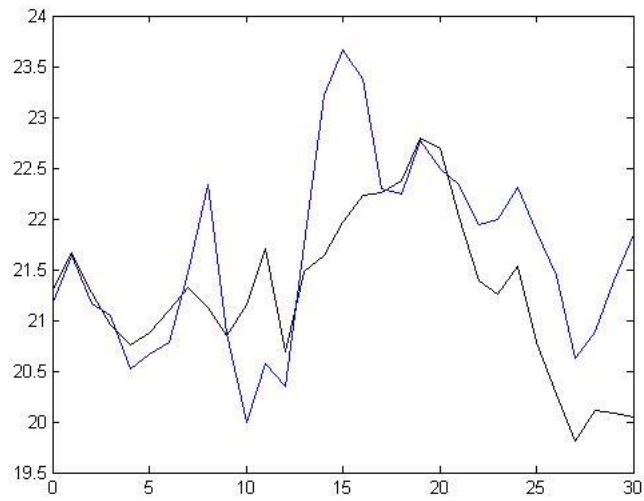


Fig. 6.14 Andamento della coppia nel motore 6-4 a tre barriere con la lunghezza doppia

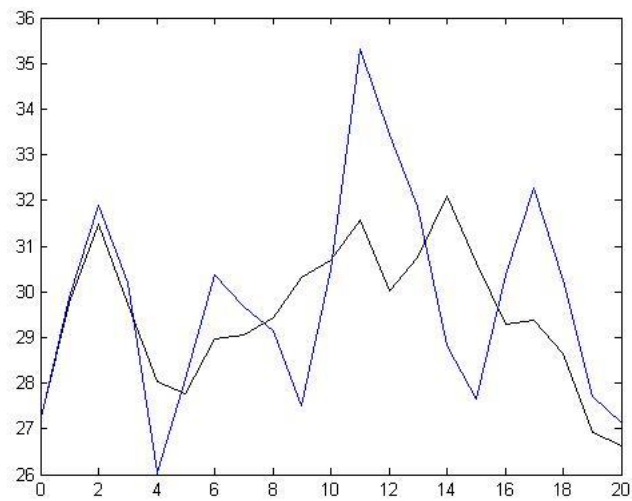


Fig. 6.14 Andamento della coppia nel motore 9-6 con la lunghezza doppia

Conclusioni

Nello studio che è stato svolto sono state ottimizzate le prestazioni di alcuni motori di piccola taglia. Partendo da un modello di base è stato possibile ottenere un notevole miglioramento della percentuale di ripple andando ad agire sulla configurazione geometrica. In particolare lo studio è stato concentrato principalmente sul legame tra il contenuto armonico, la geometria e le oscillazioni di coppia. Il tipo di sperimentazioni che sono state svolte hanno permesso di differenziare l'influenza che ogni singolo componente dello statore e del rotore esercita sulle prestazioni e sul contenuto armonico. Per confermare ulteriormente i risultati ottenuti la metodologia di ottimizzazione è stata implementata anche su un motore con configurazione differente. Come risultato delle prove è stato possibile confermare l'importanza che la definizione della geometria del motore esercita sulle prestazioni ed è stato definito un possibile modus operandi applicabile anche a motori a riluttanza di taglia e configurazione diversa. I migliori motori che sono stati ottenuti in questo lavoro sono risultati molto buoni sotto il profilo della stabilità della coppia. Rispetto agli standard o ad altri prototipi, la percentuale di ripple è nettamente più bassa e compensa del tutto il basso valore di coppia. Quest'ultima può essere compensata infatti con un ragionevole aumento dell'ingombro del motore. Le sperimentazioni che sono state sviluppate, costituiscono una buona base per lo svolgimento dell'ottimizzazione delle prestazioni, e possono essere ulteriormente implementate e migliorate.

Tab. 7.1 Riepilogo prestazioni ottenute con la configurazione 6-4

<i>ID Motore</i>	<i>Percentuale di ripple</i>	<i>Coppia media</i>
<i>Prove parametriche</i>		
<i>Prototipo di base</i>		
<i>Prototipo di base</i>	114.183577	5.85638 Nm
<i>Quarto ciclo simulazioni</i>		
<i>Motore 4.1</i>	72.554792	5.888147 Nm
<i>Motore 4.2</i>	79.849072	5.86419 Nm
<i>Motore 4.3</i>	100.920177	5.856429 Nm
<i>Quinto ciclo simulazioni</i>		
<i>Motore 5.1</i>	115.436897	5.120719 Nm
<i>Motore 5.2</i>	63.040045	5.455378 Nm
<i>Motore 5.3</i>	90.555842	5.673473 Nm
<i>Sesto ciclo di prove</i>		
<i>Motore 6.1</i>	121.869984	5.508378 Nm
<i>Motore 6.2</i>	117.821266	5.2345 Nm
<i>Motore 6.3</i>	69.392820	5.903556 Nm
<i>Settimo ciclo di prove</i>		
<i>Motore 7.1</i>	74.362008	5.482138 Nm
<i>Motore 7.2</i>	61.247078	5.541775 Nm
<i>Motore 7.3</i>	114.851236	5.806658 Nm
<i>Motore 7.4</i>	73.255621	5.708796 Nm
<i>Motore 7.5</i>	64.014442	5.53195 Nm
<i>Motore 7.6</i>	95.224895	5.662841 Nm
<i>Ottimizzazioni</i>		
<i>Ottimizzazione Rotore a 4 barriere: angoli</i>		
<i>Motore 1</i>	50.833355	5.640537 Nm
<i>Motore 2</i>	48.192951	5.617473 Nm
<i>Motore 3</i>	45.803446	5.563461 Nm
<i>Ottimizzazione Rotore a 4 barriere: spazi</i>		
<i>Motore 4</i>	40.5094	5.42074 Nm
<i>Motore 5</i>	40.5094	5.42074 Nm
<i>Ottimizzazione Rotore a 3 barriere</i>		
<i>Motore 6</i>	39.8046	5.66115 Nm
<i>Prima ottimizzazione delle punte</i>		
<i>Motore 7</i>	43.733414	5.584192 Nm

Motore 8	43.346478	5.57816 Nm
<i>Seconda ottimizzazione delle punte</i>		
Motore 9	42.596167	5.574429 Nm
Motore 10	42.957656	5.580451 Nm
<i>Seconda ottimizzazione rotore</i>		
<i>Rotore a 4 barriere: Fase 1</i>		
Motore 11	37.2503	5.4938 Nm
Motore 12	40.8229	5.49547 Nm
<i>Rotore a 4 barriere: Fase 2</i>		
Motore 13	34.485	5.52355 Nm
Motore 14	34.4455	5.51982 Nm
<i>Rotore a 3 barriere: Fase 1</i>		
Motore 15	20.3477	5.41939 Nm
Motore 16	25.8866	5.42394 Nm
<i>Rotore a 3 barriere: Fase 2</i>		
Motore 17	20.1331	5.42675 Nm
Motore 18	20.6898	4.56901 Nm
<i>Unione Rotori ottimi e punte ottimizzate</i>		
<i>Rotore a 4 barriere con gli angoli ottimizzati</i>		
Motore 19	45.134892	5.75656 Nm
<i>Rotore a 3 barriere con gli angoli ottimizzati</i>		
Motore 20	23.978540	5.62876 Nm
<i>Skewing</i>		
<i>Motore a 4 barriere</i>		
Motore con skew = 0	34.4455	5.51982 Nm
Motore con skew = 0.2	32.35777	5.480474 Nm
Motore con skew = 0.5	23.834635	5.480474 Nm
<i>Motore a 3 barriere</i>		
Motore con skew = 0	20.1331	5.42675 Nm
Motore con skew = 0.2	16.89511	5.352513 Nm
Motore con skew = 0.5	21.275474	4.93498 Nm
<i>Motore a 3 barriere con le punte ottimizzate</i>		
Motore con skew = 0	23.97854	5.462876 Nm
Motore con skew = 0.2	20.485744	5.374952 Nm
Motore con skew = 0.5	25.923452	4.961141 Nm
<i>Cambio angolo α_{ie}</i>		
Motore $\alpha_{ie} = 60^\circ$	14.079600	10.636896
Motore $\alpha_{ie} = 65^\circ$	16.748447	11.901527
Motore $\alpha_{ie} = 70^\circ$	21.882229	12.772107

Tab. 7.1 Riepilogo prestazioni ottenute con la configurazione 9-6

ID Motore	Percentuale di ripple	Coppia media
<i>Prove parametriche</i>		
Prova 5	81.506639	6.923696 Nm
Prova 6	130.274837	7.336282 Nm
Prova 7	171.310091	6.622594 Nm
Prova 8	163.094776	7.172052 Nm
Prova 9	123.795331	7.253639 Nm
Prova 10	83.069932	7.340403 Nm
Prova 11	83.071026	7.340308 Nm
<i>Ottimizzazioni</i>		
<i>Ottimizzazione Rotore: Prima fase</i>		
Motore 1	42.609235	7.654608 Nm
Motore 2	41.679189	7.640333 Nm

<i>Motore 3</i>	52.706305	7.711918 Nm
<i>Motore 4</i>	40.664306	7.551829 Nm
<i>Ottimizzazione Rotore: Seconda fase</i>		
<i>Motore 5</i>	38.644722	7.485392 Nm
<i>Motore 6</i>	40.664306	7.51829 Nm
<i>Seconda ottimizzazione Rotore</i>		
<i>Prima fase: ottimizzazione angoli</i>		
<i>Motore 7</i>	38.023676	7.683029 Nm
<i>Motore 8</i>	34.872715	7.547554 Nm
<i>Seconda fase: ottimizzazione spazi</i>		
<i>Motore 9</i>	33.844588	7.245288 Nm
<i>Motore 10</i>	34.175968	7.416223 Nm
<i>Skewing</i>		
<i>Prima ottimizzazione del Rotore</i>		
<i>Motore con skew = 0</i>	38.644722	7.485392 Nm
<i>Motore con skew = 0.2</i>	34.571837	7.462997 Nm
<i>Motore con skew = 0.5</i>	28.756685	6.905824 Nm
<i>Seconda ottimizzazione del Rotore</i>		
<i>Motore con skew = 0</i>	33.844588	7.245288 Nm
<i>Motore con skew = 0.2</i>	25.509240	7.20334 Nm
<i>Motore con skew = 0.5</i>	36.838271	6.445076 Nm
<i>Cambio angolo α_{ie}</i>		
<i>Motore $\alpha_{ie} = 60^\circ$</i>	18.581680	14.722854 Nm
<i>Motore $\alpha_{ie} = 65^\circ$</i>	20.724830	16.555921 Nm
<i>Motore $\alpha_{ie} = 70^\circ$</i>	25.131861	17.930018 Nm

Ringraziamenti

Vorrei ringraziare la mia famiglia per avermi sempre sostenuto e sopportato in tutti questi anni di studio. Un ringraziamento va anche ai miei amici del gruppo B.T. che da sempre mi accompagnano e sopportano, nonostante le liti e le incomprensioni sono stati e sempre saranno gli amici più cari che ho.

Bibliografia

Articoli

[1] Christopher Spargo, Barrie Mecrow, James Widmer, "Design of Synchronous Reluctance Motor with Non-Overlapping Fractional-Slot Concentrated Windings", IEE, pp.1393-1399, 2014.

[2] Hiroyuki Kiriyama, Shinichiro Kawano, Yukio Honda, Toshiro Higaki, Shigeo Morimoto, Yoji Takeda, "High Performance Synchronous Reluctance Motor with Multi-flux Barrier for the appliance Industry", IEE, pp.111-116, 1998.

[3] Masayuki Sanada, Kenji Hiramoto, Shigeo Morimoto, Yoji Takeda, "Torque Ripple Improvement for synchronous reluctance motor using an asymmetric flux barrier arrangement", IEE, 2004.

[4] Luigi Alberti, Massimo Barcaro, Nicola Bianchi, "Design of a low Torque Ripple Fractional-slot Interior Permanent Magnet Motor", IEE, 2013.

Libri

[5] Nicola Bianchi, Thomas M. Jahns, Silverio Bolognani, Alfio Consoli, Robert D. Lorentz, Edward C. Lovelace, Shigeo Morimoto, Alfredo Vagati, "Design, Analysis, and control of interior PM synchronous Machines", Cleup, October 2004.

[6] Silverio Bolognani, Nicola Bianchi, "Metodologie di progettazione delle macchine elettriche", Cleup, gennaio 2001.

[7] Nicola Bianchi, "Calcolo delle Macchine elettriche col metodo degli elementi finiti", Cleup, gennaio 2001.