

Ad Alessia, per la traduzione in italiano

UNIVERSITÁ DEGLI STUDI DI PADOVA
Facoltá di Ingegneria
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica

TESI DI LAUREA

**OTTIMIZZAZIONE E CONFRONTO
DI MOTORI A MAGNETI PERMANENTI
SUPERFICIALI DI PICCOLA POTENZA**

Relatore: prof. ing. NICOLA BIANCHI

Laureando: GALZENATI FABIO

Anno Accademico 2011/2012

Indice

Introduzione	9
1 Analisi primo motore (6/4)	11
1.1 Premessa	11
1.2 Dati geometrici	12
1.3 Dati magnete permanente	12
1.4 Dati avvolgimento	13
1.5 Matrice di cava	14
1.6 Stella di cava	14
1.7 Calcoli analitici, vuoto	16
1.8 Simulazioni FEMM, vuoto	19
1.9 Calcoli analitici, carico	27
1.10 Simulazioni FEMM, carico	28
1.11 Induzioni	33
1.12 Potenza e perdite	37
2 Analisi secondo motore (12/4)	41
2.1 Premessa	41
2.2 Dati geometrici	42
2.3 Dati magnete permanente	42
2.4 Dati avvolgimento	43
2.5 Matrice di cava	43
2.6 Stella di cava	44
2.7 Calcoli analitici, vuoto	46
2.8 Simulazioni FEMM, vuoto	49
2.9 Calcoli analitici, carico	57
2.10 Simulazioni FEMM, carico	58
2.11 Induzioni	63
2.12 Potenza e perdite	66
3 Analisi terzo motore (24/4)	69
3.1 Premessa	69
3.2 Dati geometrici	70

3.3	Dati magneti permanente	70
3.4	Dati avvolgimento	71
3.5	Matrice di cava	71
3.6	Stella di cava	72
3.7	Calcoli analitici, vuoto	74
3.8	Simulazioni FEMM, vuoto	77
3.9	Calcoli analitici, carico	85
3.10	Simulazioni FEMM, carico	86
3.11	Induzioni	91
3.12	Potenza e perdite	94
4	Analisi quarto motore (12/4)	97
4.1	Premessa	97
4.2	Dati geometrici	98
4.3	Dati magneti permanente	98
4.4	Dati avvolgimento	99
4.5	Matrice di cava	99
4.6	Stella di cava	100
4.7	Calcoli analitici, vuoto	102
4.8	Simulazioni FEMM, vuoto	105
4.9	Calcoli analitici, carico	113
4.10	Simulazioni FEMM, carico	114
4.11	Induzioni	119
4.12	Potenza e perdite	122
5	Ottimizzazione primo motore (6/4)	127
5.1	Premessa	127
5.2	Modifica denti di statore	129
5.3	Modifica altezza corona	132
5.4	Modifica diametro interno di statore	135
5.5	Configurazione ottima raggiunta	138
	5.5.1 Geometria	138
	5.5.2 Prestazioni offerte dal motore ottimizzato	139
5.6	Verifica con software FEMM	139
6	Ottimizzazione secondo motore (12/4)	141
6.1	Premessa	141
6.2	Modifica altezza corona	143
6.3	Modifica diametro interno di statore	146
6.4	Modifica denti di statore	149
6.5	Configurazione ottima raggiunta	152
	6.5.1 Geometria	152
	6.5.2 Prestazioni offerte dal motore ottimizzato	153

6.6	Verifica con software FEMM	153
7	Ottimizzazione terzo motore (24/4)	155
7.1	Premessa	155
7.2	Modifica denti di statore	157
7.3	Modifica spessore magneti permanente	160
7.4	Configurazione ottima raggiunta	163
7.4.1	Geometria	163
7.4.2	Prestazioni offerte dal motore ottimizzato	164
7.5	Verifica con software FEMM	164
8	Ottimizzazione quarto motore (12/4)	167
8.1	Premessa	167
8.2	Modifica altezza corona	169
8.3	Modifica diametro interno di statore	172
8.4	Modifica denti di statore	175
8.5	Modifica spessore magneti permanente	178
8.6	Configurazione ottima raggiunta	181
8.6.1	Geometria	181
8.6.2	Prestazioni offerte dal motore ottimizzato	182
8.7	Verifica con software FEMM	182
9	Confronto varie configurazioni	185
	Conclusioni	189
	Bibliografia	191
	Ringraziamenti	193

Introduzione

In questo lavoro di tesi sono stati analizzati diversi motori, caratteristica comune é che si tratta di motori sincroni a quattro poli con magneti permanenti superficiali, di piccola potenza ($\simeq 200$ W), facenti parte di servizi ausiliari in apparecchiature piú importanti.

Il rotore é comune a tutte e quattro le macchine, ovvero resta inalterato l'angolo occupato dal magnete (α_m), il foro in cui é inserito l'albero, ed in tre di esse anche il diametro di rotore.

Altro aspetto comune é la lunghezza dei diversi motori, pari a venti millimetri. Nel primo caso si tratta di una lamiera a sei cave con avvolgimento raccorciato, in cui le matasse sono avvolte attorno ad un solo dente quindi viene minimizzata la lunghezza delle testate.

Nella seconda configurazione si tratta di una lamiera standard per motori asincroni a dodici cave, l'avvolgimento é a passo intero, non raccorciato.

Nella terza configurazione si ha una lamiera standard per motori asincroni a ventiquattro cave, con avvolgimento sempre a passo intero, non raccorciato.

La quarta macchina torna a essere a dodici cave con avvolgimento raccorciato, in cui le matasse sono avvolte attorno a un solo dente minimizzando anche in questo caso la lunghezza delle testate.

Lo scopo di questo studio é di analizzare le macchine nella loro configurazione di partenza, per poi andare a svolgere un'ulteriore analisi parametrica, cioé verificarne le prestazioni al variare di alcuni parametri geometrici.

L'obiettivo da raggiungere riguarda il rendimento, da valutare con precisione, il costo complessivo della macchina, da minimizzare preferendo quindi "bobine di dente"; tenendo sempre sotto controllo i vincoli dati dalle specifiche di progetto.

Tali vincoli riguardano: l'ingombro massimo rappresentato dal diametro esterno che non deve superare gli 80 millimetri; la coppia meccanica all'albero che deve rimanere attorno agli $0,2 \text{ N} \cdot \text{m}$ e la velocità di rotazione in sincronismo che deve essere di 10^4 giri al minuto.

Capitolo 1

Analisi del primo motore (config.6/4)

1.1 Premessa

Questa prima macchina é costituita da una lamiera statorica a sei cave con diametro esterno 80 millimetri e diametro interno 40 millimetri; su cui viene montato un avvolgimento a quattro poli raccorciato di mezza cava, doppio strato; quindi si vengono ad avere delle matasse avvolte attorno ad un solo dente.

In questo modo la lunghezza delle testate risulterà minimizzata, riducendo il volume di rame impiegato per la realizzazione degli avvolgimenti stessi.

Il coefficiente di avvolgimento risultante é pari a 0,866.

Si ha un rapporto cave-poli pari a $3/2$; lunghezza pacco statorico pari a 20 millimetri.

Il rotore (diametro esterno 38 millimetri e foro per inserimento dell'albero 15 millimetri) monta quattro magneti permanenti superficiali in ferrite di spessore 3,5 millimetri.

Questi magneti occupano praticamente tutti i 90 gradi a disposizione, lasciando solo un piccolo gioco per il loro inserimento.

1.2 Dati geometrici

Grandezza	Unitá di misura	Valore	Simbolo
Diametro esterno	mm	80	De
Diametro interno	mm	40	D
Numero cave		6	Qs
Sezione cava	mm^2	180	Sslot
Altezza cava	mm	10,25	hs
Apertura cava di statore	mm	3,3	wso
Altezza corona	mm	9,75	hbi
Larghezza dente	mm	8,8	wt
Traferro	mm	1	g
Diametro rotore	mm	38	Dr
Diametro foro rotore	mm	15	
Numero fasi		3	m
Numero poli		4	2p
Lunghezza pacco	mm	20	Lz
Frequenza	Hz	333,34	f
Velocita sincrona	rpm	10000	Ω

1.3 Dati magnete permanente

Grandezza	Unitá di misura	Valore	Simbolo
Tipo		Ferrite	
Forza coercitiva	A/m	289373	Hc
Permeabilitá relativa differenziale		1,1	μ_r
Induzione residua	T	0,4	Brem
Spessore magnete	mm	3,5	tm
Lunghezza magnete	mm	20	
Angolo coperto dal magnete	gradi	90	
Angolo realmente coperto dal magnete	gradi	87	α_m

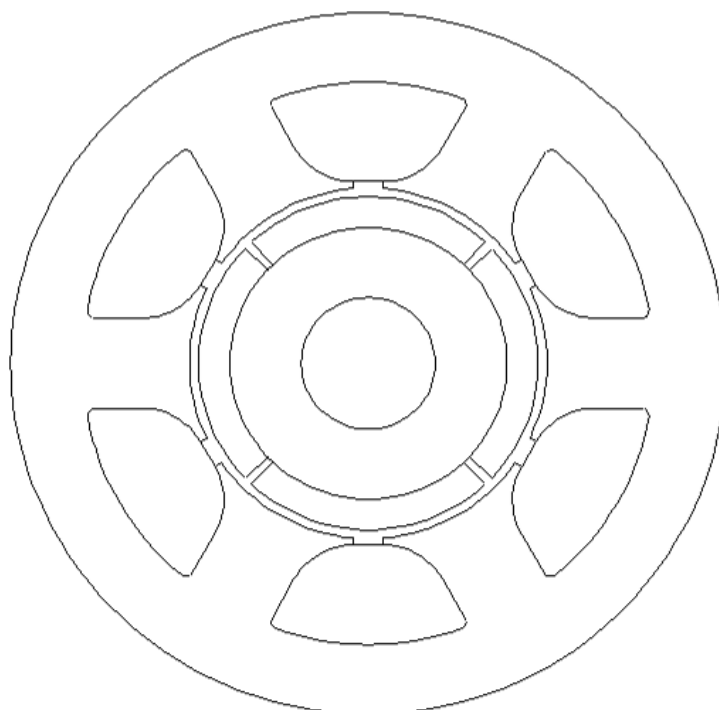


Figura 1.1: Geometria di statore e rotore.

1.4 Dati avvolgimento

Grandezza	Unità di misura	Valore	Simbolo
Numero strati in cava		2	nss
Numero spire serie per fase		1492	Ns
Conduttori in cava		746	ncs
Percorsi in parallelo		1	np
Conduttori per matassa		373	Nt
Numero matasse		2	nm
Sezione conduttore (filo) teorica	mm^2	0,0965	S'c
Sezione conduttore (filo)	mm^2	0,0989	Sc
Diametro conduttore (filo) teorico	mm	0,350	d'c
Diametro conduttore (filo)	mm	0,355	dc
Fattore di avvolgimento		0,866	kw

1.5 Matrice di cava

La matrice di cava indica la disposizione dell'avvolgimento nelle cave statoriche.

Per ciascuna fase (a, b, c) viene indicato il verso della corrente in cava (segno positivo o negativo) e la presenza di una o pi fasi nella cava (rispettivamente indicati con 1 o 0,5).

$$\begin{aligned} ka &= \{ -0,5 & 0,5 & 0 & -0,5 & 0,5 & 0 \} \\ kb &= \{ 0 & -0,5 & 0,5 & 0 & -0,5 & 0,5 \} \\ kc &= \{ 0,5 & 0 & -0,5 & 0,5 & 0 & -0,5 \} \end{aligned}$$

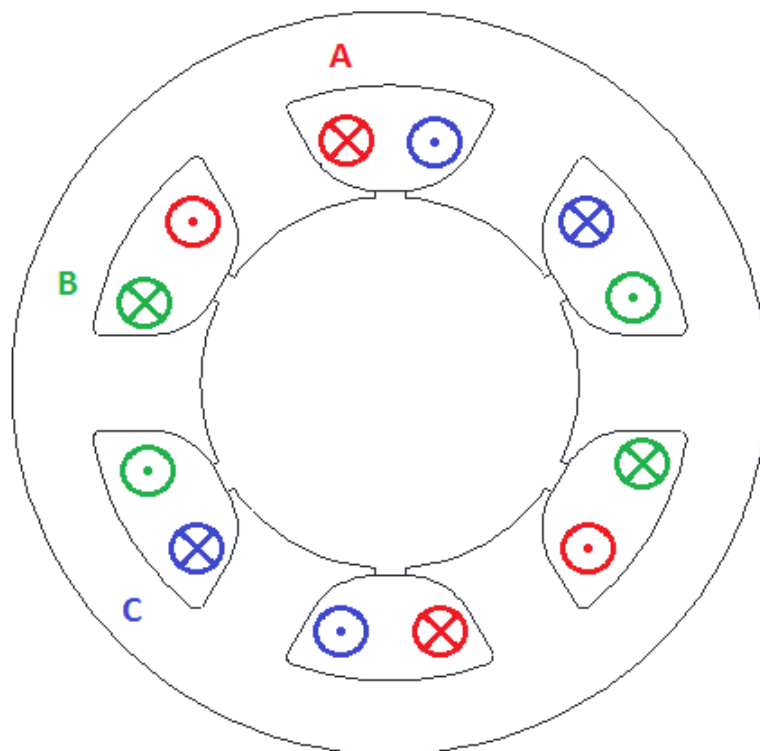


Figura 1.2: Collegamenti avvolgimento statorico: fase A, fase B, fase C.

1.6 Stella di cava

Realizzabilità dell'avvolgimento frazionario in questione:

$$t = M.C.D\{Q_s, p\} = 2 \tag{1.1}$$

$$\frac{Q_s}{m \cdot t} = \frac{6}{3 \cdot 2} = 1 \quad (1.2)$$

In questo caso l'avvolgimento può essere realizzato in quanto è risultato un numero intero.

$$\alpha_s = \frac{360}{Q_s} = \frac{360}{6} = 60 \quad (1.3)$$

$$\alpha_{se} = p \cdot \alpha_s = 120 \quad (1.4)$$

esprime la periodicità della stella di cava.

$$\frac{Q_s}{t} = 3 \quad (1.5)$$

$$t = 2 \quad (1.6)$$

Risulta una stella di cava composta da tre raggi, ciascuno con due vettori.

Lunghezza matassa:

$$y_q = \frac{Q_s}{2p} = 1,5 \simeq 1 \quad (1.7)$$

Si ottiene una bobina di dente, vengono ridotte al minimo le testate, ne consegue un risparmio di rame.

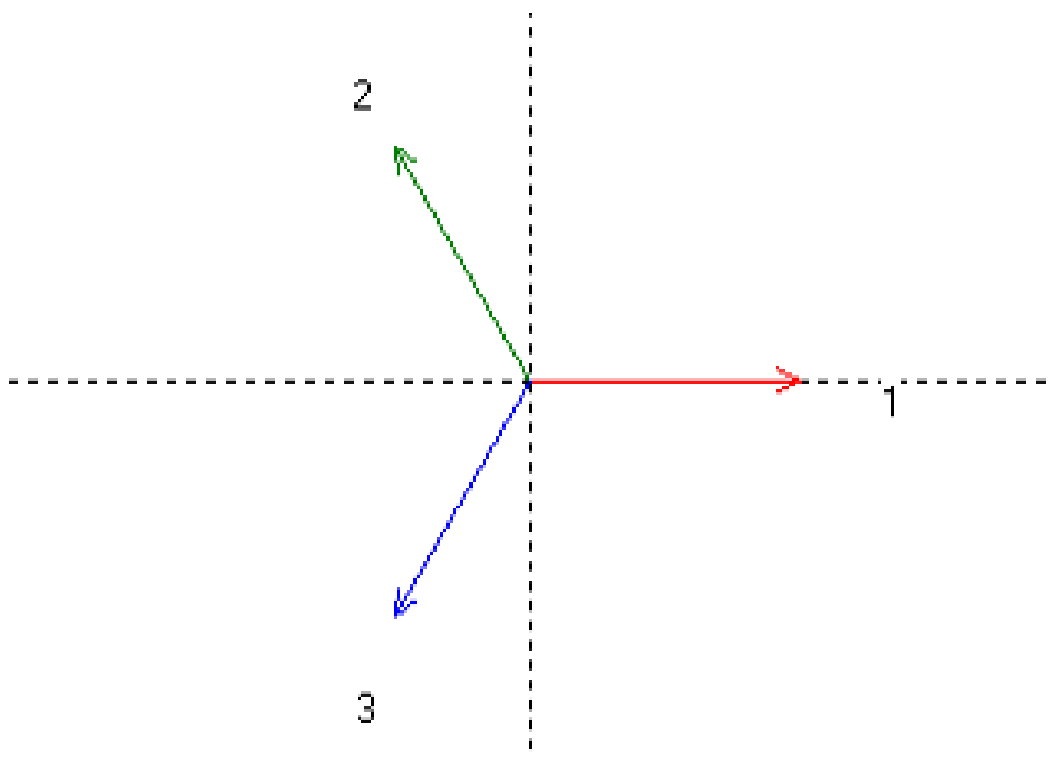


Figura 1.3: Stella di cava.

1.7 Calcoli analitici, vuoto

Data la geometria della macchina e le caratteristiche dei magneti montati a bordo del rotore, si possono ricavare alcune grandezze caratteristiche del funzionamento a vuoto. Ipotizzata la tensione in uscita ai morsetti che si vuole ottenere, si determina anche il numero di conduttori costituenti l'avvolgimento di ciascuna fase.

Nell'idealità del funzionamento della macchina si possono fare alcuni calcoli relativi alle grandezze in gioco, senza considerare lo spanciamiento del flusso e altri fenomeni indesiderati per presenti al suo interno. Induzione al traferro:

$$\hat{B}_g = \frac{B_{rem}}{1 + \frac{g \cdot \mu_r}{tm}} = \frac{0,4}{1 + \frac{1 \cdot 1,1}{3,5}} = 0,304 \text{ T} \quad (1.8)$$

il cui valore medio:

$$B_{avg} = \frac{87}{90} \cdot \hat{B}_g = \frac{87}{90} \cdot 0,304 = 0,294 \text{ T} \quad (1.9)$$

Induzione media nel dente:

$$B_t = \frac{ps}{wt} \cdot B_{avg} = \frac{21}{8,8} \cdot 0,294 = 0,701 \text{ T} \quad (1.10)$$

dove:

$$ps = \frac{\pi \cdot D}{Q_s} = \frac{\pi \cdot 0,040}{6} \simeq 21 \text{ mm} \quad (1.11)$$

Flusso nel dente, flusso concatenato da una spira:

$$\Phi_t = \hat{\Lambda}_{1sp} = 1 \cdot B_t \cdot wt \cdot Lz = 1 \cdot 0,701 \cdot 0,0088 \cdot 0,020 = 0,000123 \text{ Wb} \quad (1.12)$$

Moltiplico per 1 in quanto la spira abbraccia un solo dente di statore. Questo valore di flusso non é però quello reale, devo introdurre delle correzioni per tenere conto del suo spanciamento al traferro e dell'effetto delle cave. Viene introdotto un coefficiente correttivo $k\sigma$:

$$k\sigma = \frac{Sm}{Sg} = \frac{\tau_m}{\tau_m \cdot 2g} = \frac{30,35}{32,35} = 0,94 \quad (1.13)$$

dove:

$$\tau_m = \frac{\pi \cdot D}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,040}{4} = 30,35 \text{ mm} \quad (1.14)$$

Quindi ora l'induzione al traferro:

$$\hat{B}_g = \frac{B_{rem} \cdot k\sigma}{1 + \frac{g \cdot \mu_r \cdot k\sigma}{tm}} = \frac{0,4 \cdot 0,94}{1 + \frac{1 \cdot 1 \cdot 0,94}{3,5}} = 0,290 \text{ T} \quad (1.15)$$

il cui valore medio:

$$B_{avg} = \frac{87}{90} \cdot \hat{B}_g = \frac{87}{90} \cdot 0,290 = 0,281 \text{ T} \quad (1.16)$$

Induzione media nel dente:

$$B_t = \frac{ps}{wt} \cdot B_{avg} = \frac{21}{8,8} \cdot 0,281 = 0,669 \text{ T} \quad (1.17)$$

Flusso nel dente, flusso concatenato da una spira:

$$\Phi_t = \hat{\Lambda}_{1sp} = 1 \cdot B_t \cdot wt \cdot Lz = 1 \cdot 0,669 \cdot 0,0088 \cdot 0,020 = 0,000117 \text{ Wb} \quad (1.18)$$

Chiedendo di avere una tensione ai morsetti del generatore di 130 V, con collegamento esterno delle fasi a triangolo, viene ad essere determinato un numero di conduttori per matassa:

$$\hat{E}_{avv} = \omega \cdot \Phi_t \cdot 2 \cdot Nt = 184 \text{ V di picco} \quad (1.19)$$

$$Nt = \frac{\hat{E}_{avv}}{\omega \cdot \Phi_t \cdot 2} = \frac{184}{2 \cdot \pi \cdot 333.34 \cdot 0,0001177 \cdot 2} = 373 \quad (1.20)$$

Conduttori in cava:

$$ncs = Nt \cdot 2 = 746 \text{ perché doppio strato} \quad (1.21)$$

Conduttori totali equivalenti serie:

$$N_s = \frac{ncs \cdot Q_s}{m} = \frac{746 \cdot 6}{6} = 1492 \quad (1.22)$$

Flusso concatenato da una fase:

$$\hat{\Lambda} = \Phi_t \cdot 2 \cdot Nt = 0,0001177 \cdot 2 \cdot 373 = 0,0878 \text{ V}\cdot\text{s} \quad (1.23)$$

1.8 Simulazioni FEMM, vuoto

Le simulazioni fatte utilizzando il software di calcolo agli elementi finiti FEMM, hanno avuto come scopo la verifica dai calcoli analitici precedentemente eseguiti e l'accertamento della bontà delle scelte fino ad ora eseguite. Questo software calcola il vettore potenziale magnetico \vec{A} , per ogni elemento della mesh, sul piano trasversale rispetto alla lunghezza della macchina; per questo motivo il flusso concatenato con le varie fasi pu essere calcolato mediante le equazioni:

$$\hat{\Lambda}_A = ncs \cdot Lz \cdot \sum ka(i) \cdot \frac{1}{Sslot} \cdot \int A_z \cdot ds \quad (1.24)$$

$$\hat{\Lambda}_B = ncs \cdot Lz \cdot \sum kb(i) \cdot \frac{1}{Sslot} \cdot \int A_z \cdot ds \quad (1.25)$$

$$\hat{\Lambda}_C = ncs \cdot Lz \cdot \sum kc(i) \cdot \frac{1}{Sslot} \cdot \int A_z \cdot ds \quad (1.26)$$

Mentre le tensioni:

$$\hat{E}_A = \omega \cdot \hat{\Lambda}_A \quad (1.27)$$

$$\hat{E}_B = \omega \cdot \hat{\Lambda}_B \quad (1.28)$$

$$\hat{E}_C = \omega \cdot \hat{\Lambda}_C \quad (1.29)$$

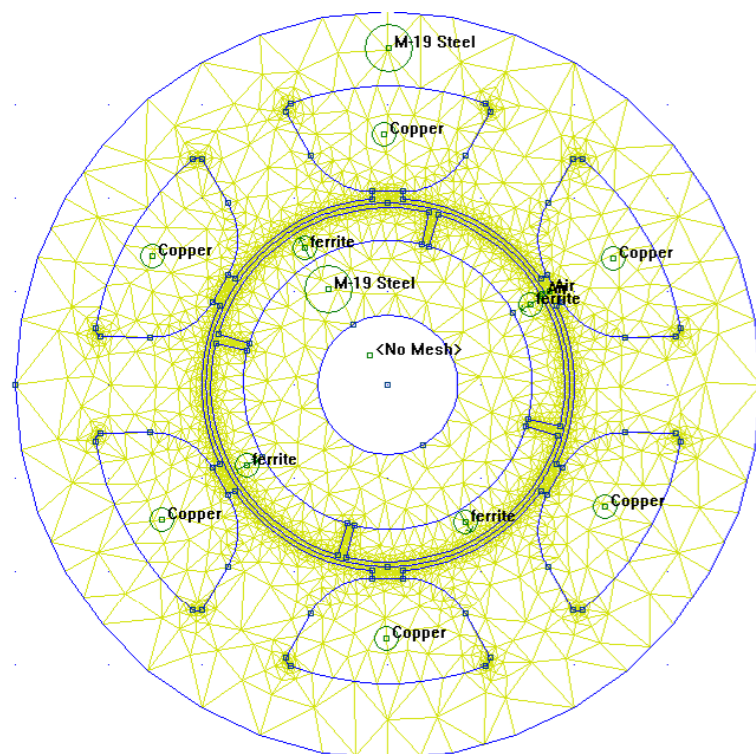


Figura 1.4: Mesh creata dal programma FEMM che va a discretizzare il dominio del problema, successivamente attraverso un'analisi agli elementi finiti, il programma estrapola i valori delle grandezze elettriche e magnetiche di nostro interesse.

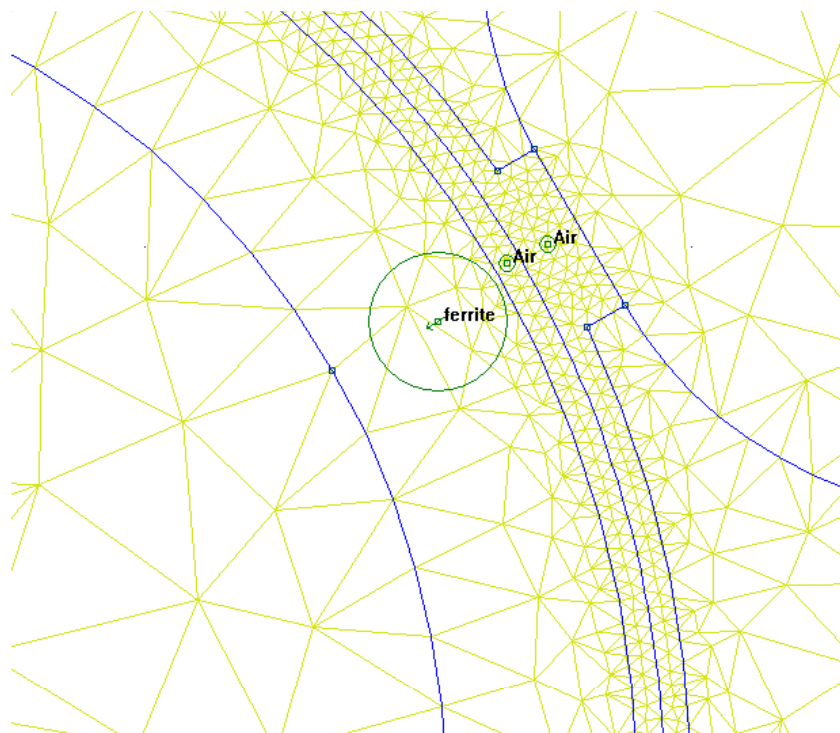


Figura 1.5: Il processo di discretizzazione del dominio deve essere fatto con cura al fine di ottenere una buona precisione nei risultati e per questo la mesh deve essere piú fitta possibile nel traferro, dove si concentra l'energia magnetica.

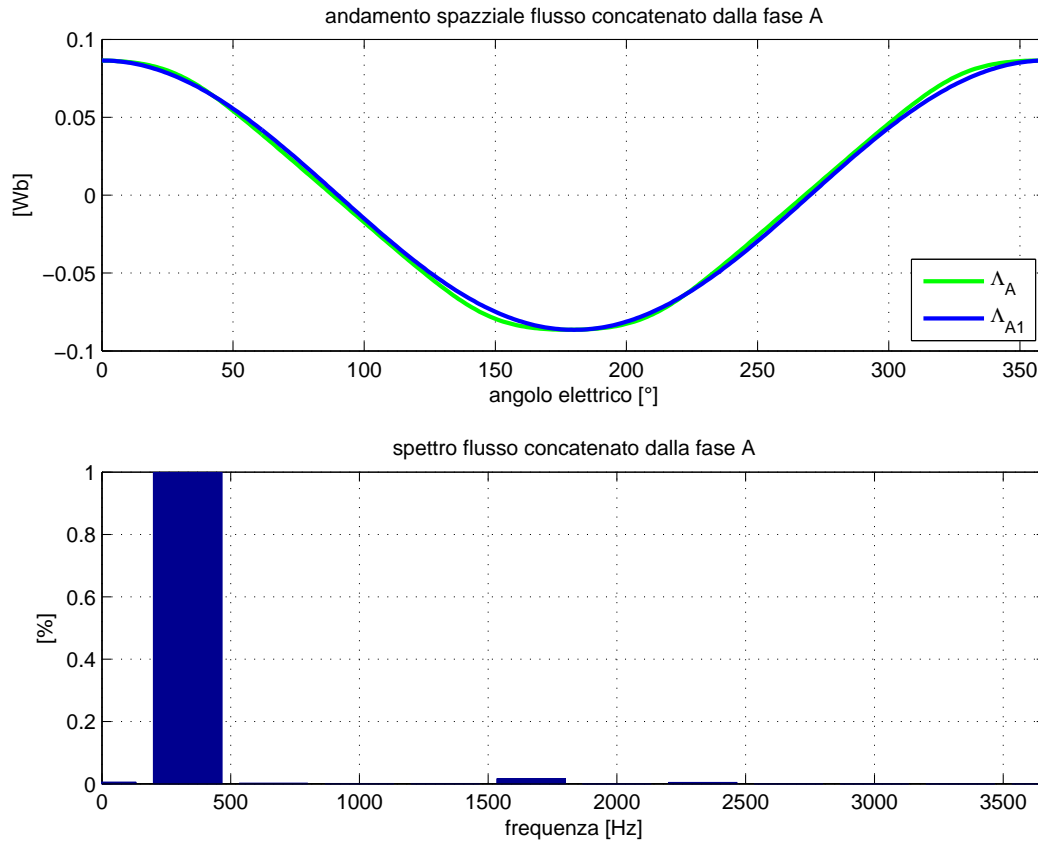


Figura 1.6: Flusso concatenato e relativo spettro della Fase A. Da questa figura si può notare l'andamento abbastanza sinusoidale del flusso concatenato di questa fase, ciò è confermato dal suo spettro che evidenzia la presenza preponderante della componente fondamentale e mette in luce che la leggera distorsione è dovuta a una lieve presenza di quinta armonica.

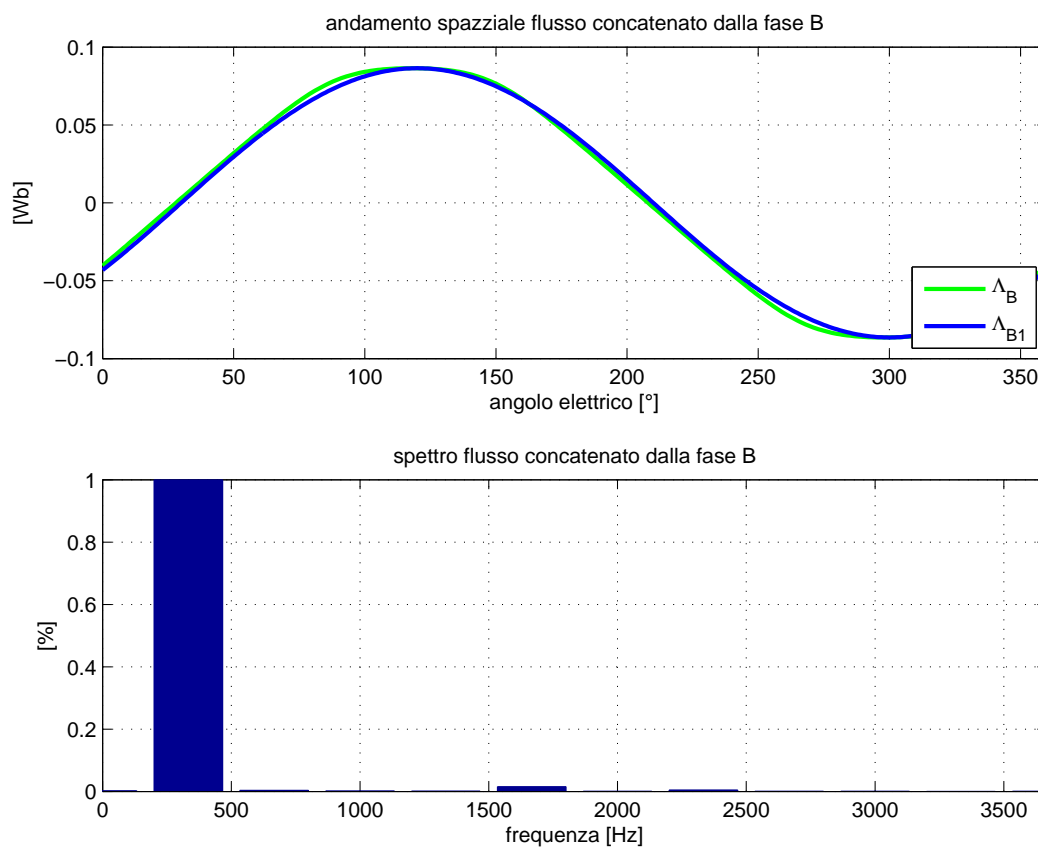


Figura 1.7: Flusso concatenato e relativo spettro della Fase B. Da questa figura si può notare l'andamento abbastanza sinusoidale del flusso concatenato di questa fase, ciò è confermato dal suo spettro che evidenzia la presenza preponderante della componente fondamentale e mette in luce che la leggera distorsione è dovuta a una lieve presenza di quinta armonica.

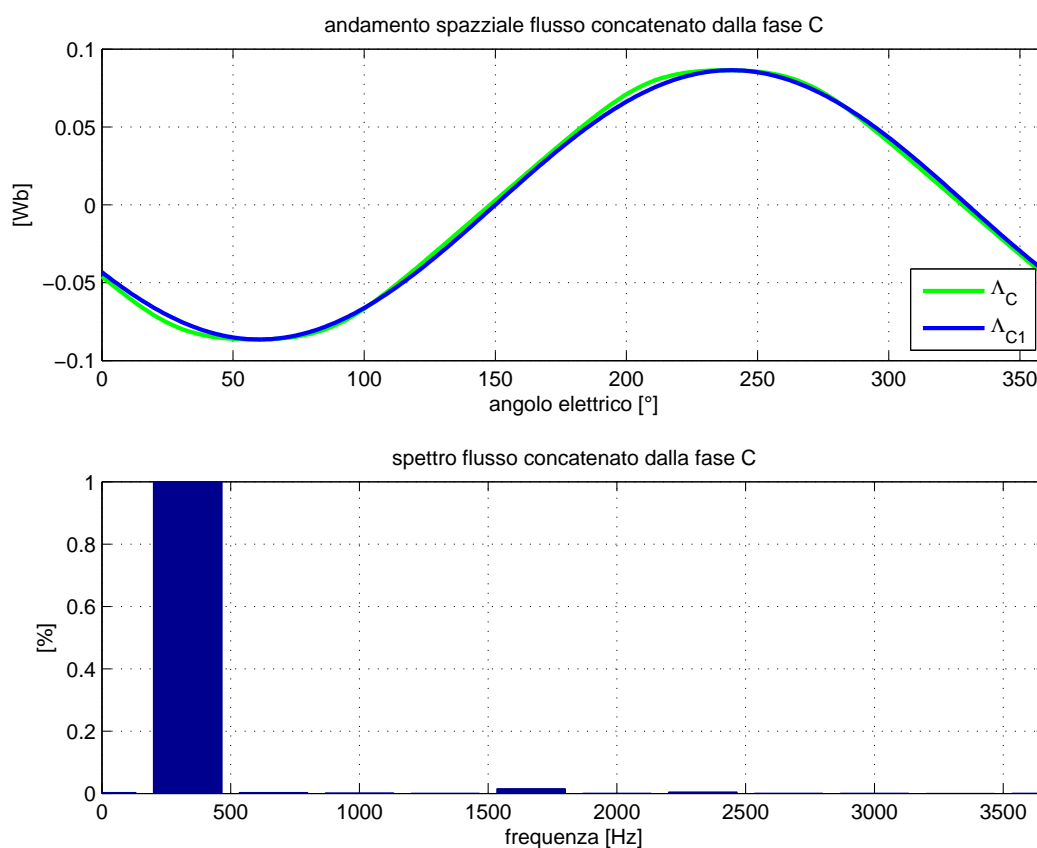


Figura 1.8: Flusso concatenato e relativo spettro della Fase C. Da questa figura si può notare l'andamento abbastanza sinusoidale del flusso concatenato di questa fase, ciò è confermato dal suo spettro che evidenzia la presenza preponderante della componente fondamentale e mette in luce che la leggera distorsione è dovuta a una lieve presenza di quinta armonica.

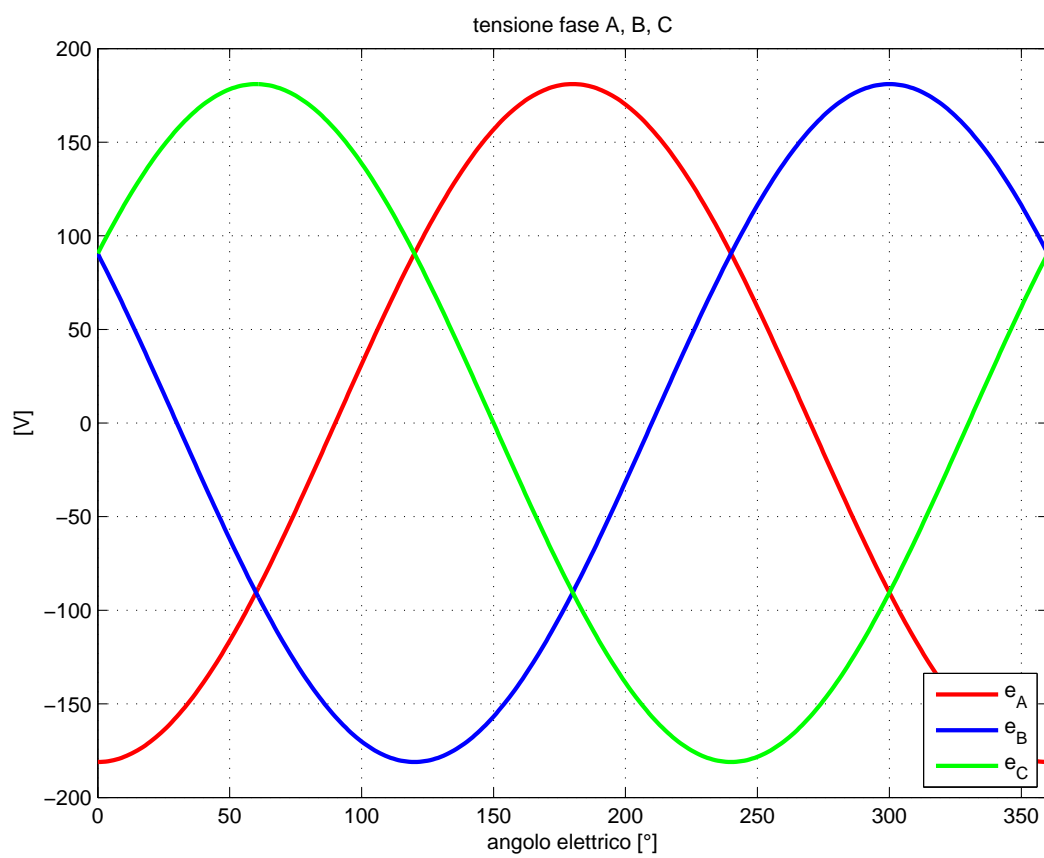


Figura 1.9: Componente fondamentale delle tensioni indotte sulla fase A, B, C; conseguenza diretta del flusso concatenato calcolato sopra.

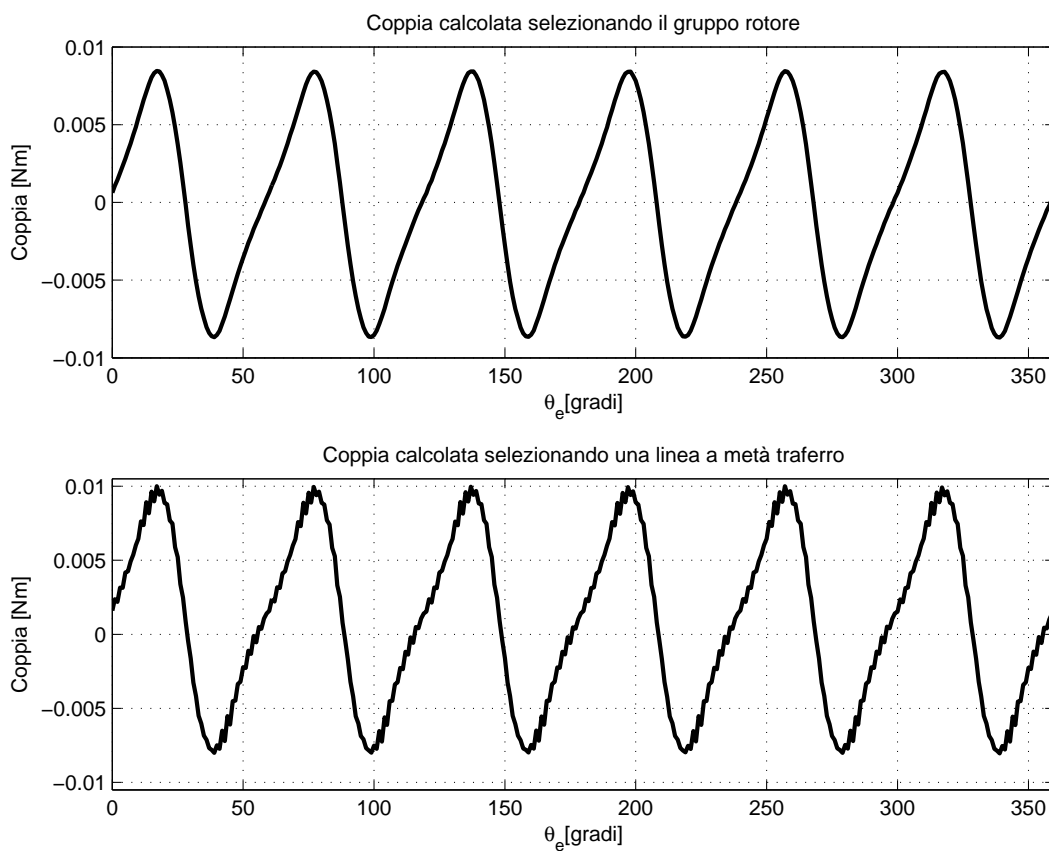


Figura 1.10: Coppia sviluppata nel funzionamento a vuoto del motore, teoricamente nulla, ma in conseguenza alle inevitabili irregolarità nella geometria di statore e rotore risulta diversa da zero. Prende il nome di coppia di impuntamento (cogging).

1.9 Calcoli analitici, carico

Innanzitutto é necessario stimare una certa densità di corrente nei conduttori, funzione della possibilità di smaltire il calore prodotto dalle perdite della macchina. Altro parametro di stima é il coefficiente di riempimento della cava, cioè in che percentuale la sezione di cava viene realmente riempita di conduttori attivi, quindi di rame.

La scelta é stata entro valori tipici, in particolare:

- $J=5 \text{ A/mm}^2$;
- $k_{fill}=0,4$.

Si potuto ricavare in conseguenza la corrente in cava:

$$I = S_{slot} \cdot k_{fill} \cdot J = 180 \cdot 0,4 \cdot 5 = 360 \text{ A} \quad (1.30)$$

Oltre alla corrente di avvolgimento:

$$I_{avv} = \frac{I}{ncs} = \frac{360}{746} = 0,482 \text{ A} \quad (1.31)$$

Sezione conduttore:

$$S_c = \frac{S_{slot} \cdot k_{fill}}{ncs} = \frac{180 \cdot 0,4}{746} = 0,0965 \text{ mm}^2 \quad (1.32)$$

il cui diametro risulta:

$$dc = 0,350 \text{ mm} \quad (1.33)$$

Diametro commerciale:

$$dc = 0,355 \text{ mm} \quad (1.34)$$

Il carico elettrico generato dalla corrente calcolata sopra risulta:

$$\hat{K}_s = \frac{3 \cdot kw \cdot N_s \cdot \hat{I}}{\pi \cdot D} = \frac{3 \cdot 0,866 \cdot 1492 \cdot 0,6825}{\pi \cdot 0,040} = 21052,36 \text{ A/m} \quad (1.35)$$

La coppia prodotta risulta infine:

$$T = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot L_z \cdot \hat{K}_s \cdot \hat{B}_g = \frac{\pi}{4} \cdot 0,040^2 \cdot 0,020 \cdot 21052,36 \cdot 0,304 = 0,161 \text{ N}\cdot\text{m} \quad (1.36)$$

1.10 Simulazioni FEMM, carico

Il funzionamento a carico é stato simulato inviando nello statore della macchina le tre correnti di fase nominali, fasate in modo da far risultare il carico elettrico \hat{K}_s in fase con l'induzione a vuoto \hat{B}_g , affinché la macchina si trovasse a lavorare in coppia massima; come ipotizzato nei calcoli analitici.

Anche in questo caso sono stati calcolati i flussi concatenati e le tensioni ai morsetti della macchina, oltre che la coppia sviluppata.

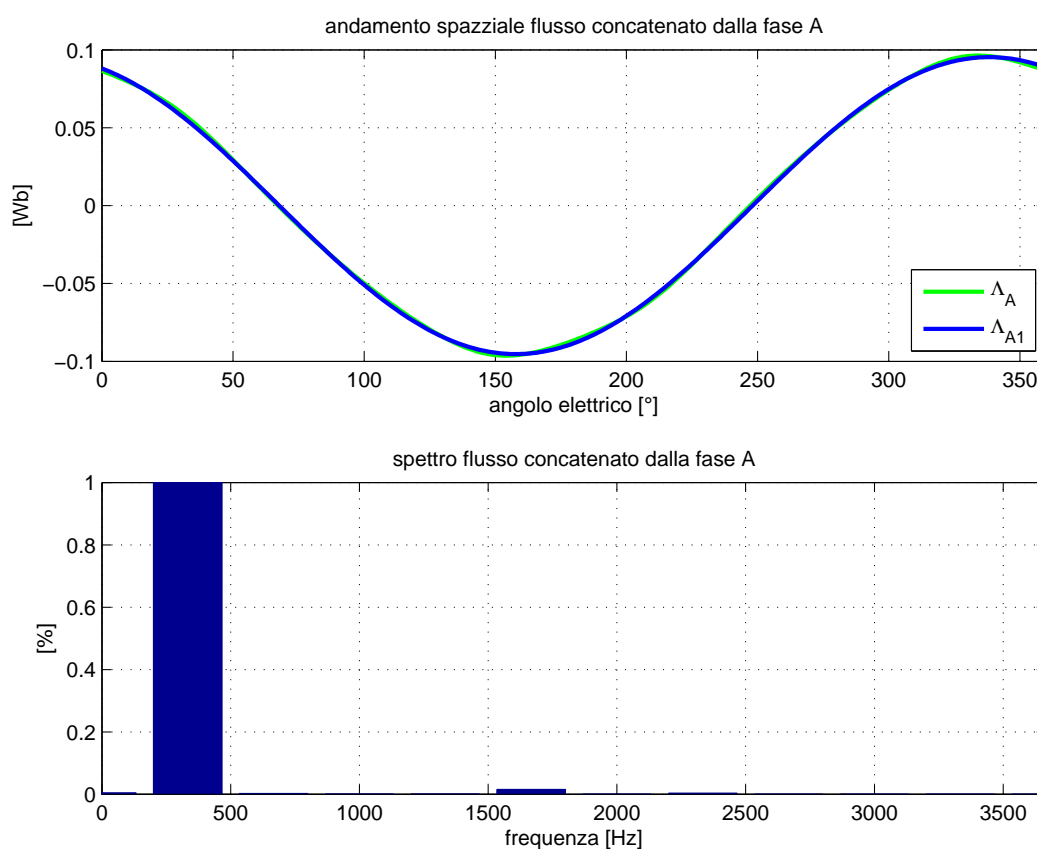


Figura 1.11: Flusso concatenato e relativo spettro della Fase A. Da questa figura si può notare l'andamento abbastanza sinusoidale del flusso concatenato di questa fase a carico, ciò é confermato dal suo spettro che evidenzia la presenza preponderante della componente fondamentale e mette in luce che la leggera distorsione é dovuta a una lieve presenza di quinta armonica.

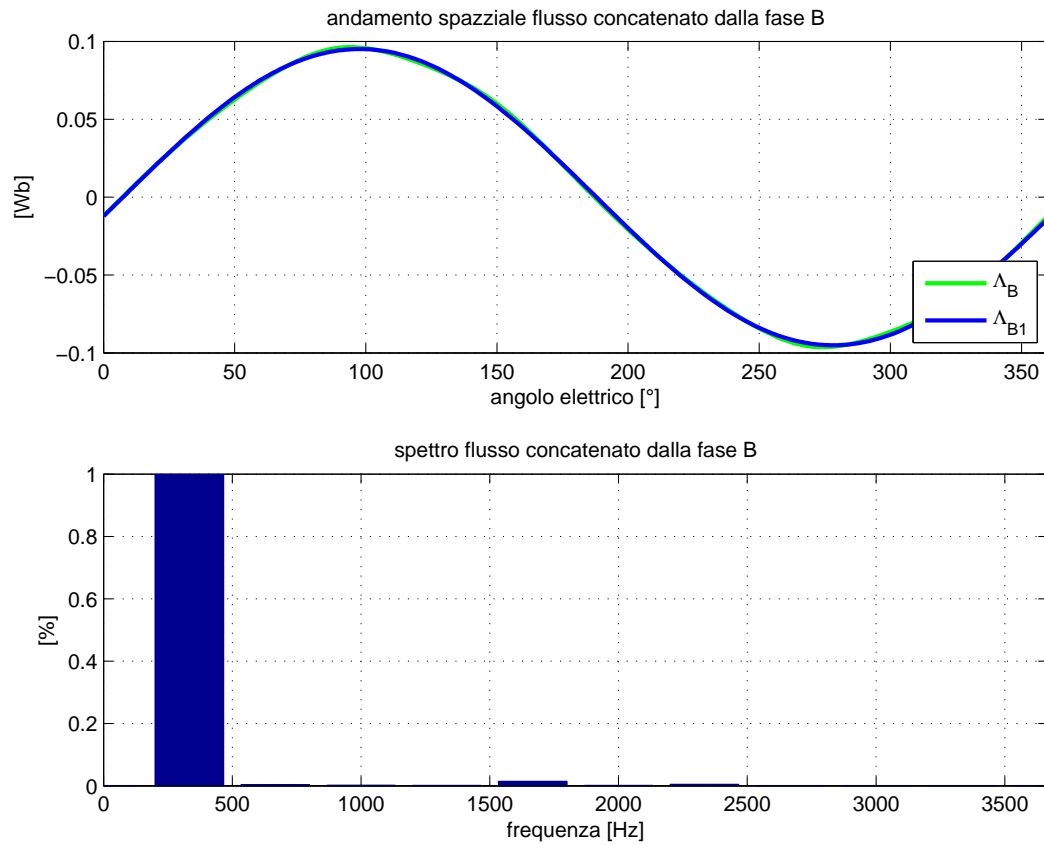


Figura 1.12: Flusso concatenato e relativo spettro della Fase B. Da questa figura si può notare l'andamento abbastanza sinusoidale del flusso concatenato di questa fase a carico, ciò è confermato dal suo spettro che evidenzia la presenza preponderante della componente fondamentale e mette in luce che la leggera distorsione è dovuta a una lieve presenza di quinta armonica.

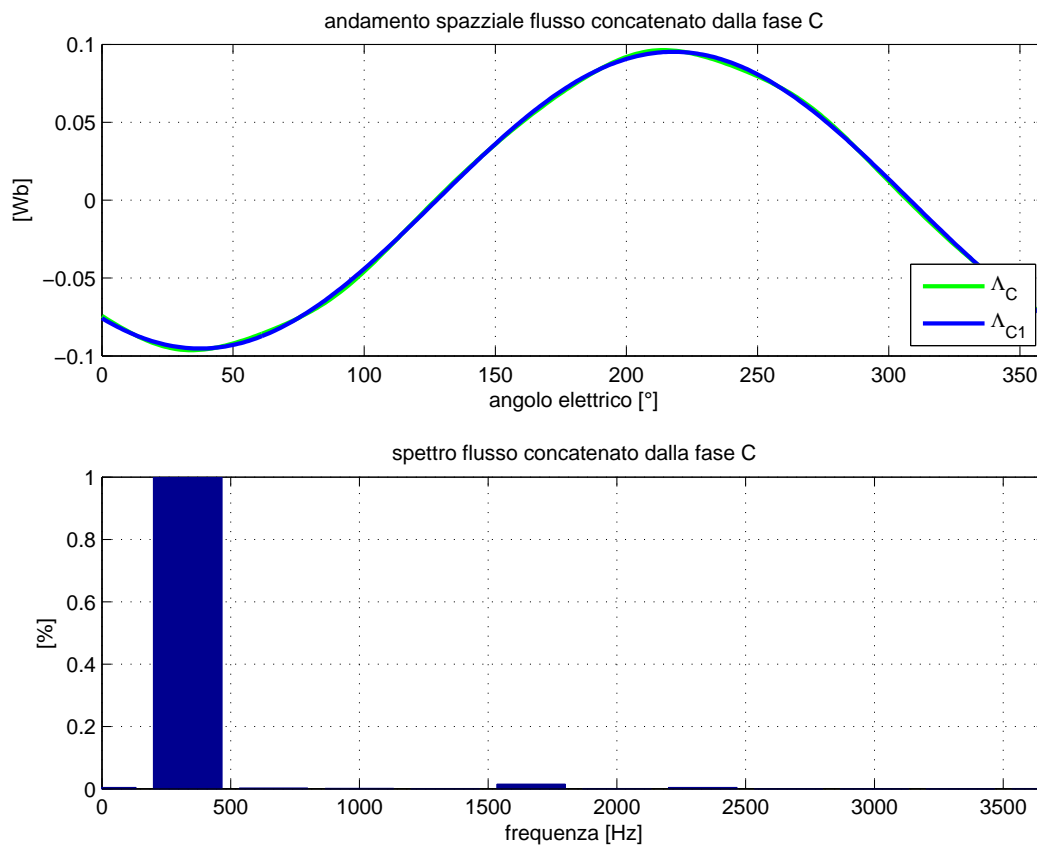


Figura 1.13: Flusso concatenato e relativo spettro della Fase C. Da questa figura si può notare l'andamento abbastanza sinusoidale del flusso concatenato di questa fase a carico, ciò è confermato dal suo spettro che evidenzia la presenza preponderante della componente fondamentale e mette in luce che la leggera distorsione è dovuta a una lieve presenza di quinta armonica.

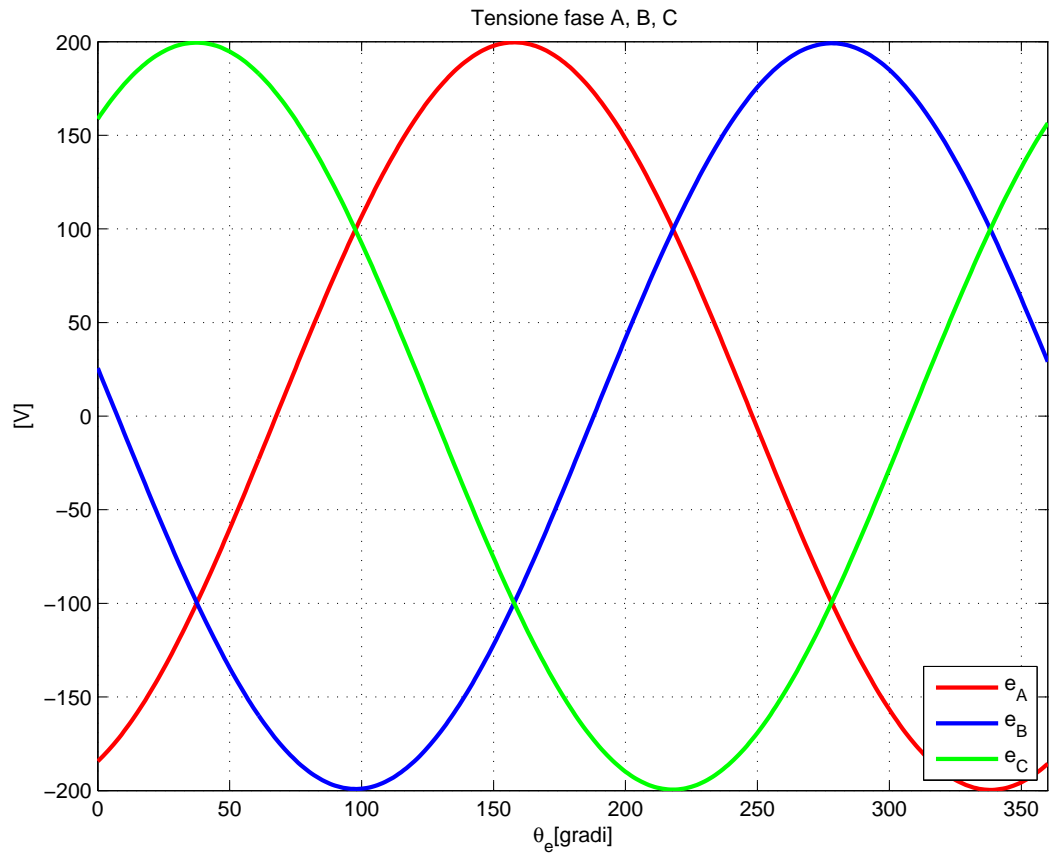


Figura 1.14: Componente fondamentale delle tensioni indotte sulla fase A, B, C a carico; conseguenza diretta del flusso concatenato calcolato sopra.

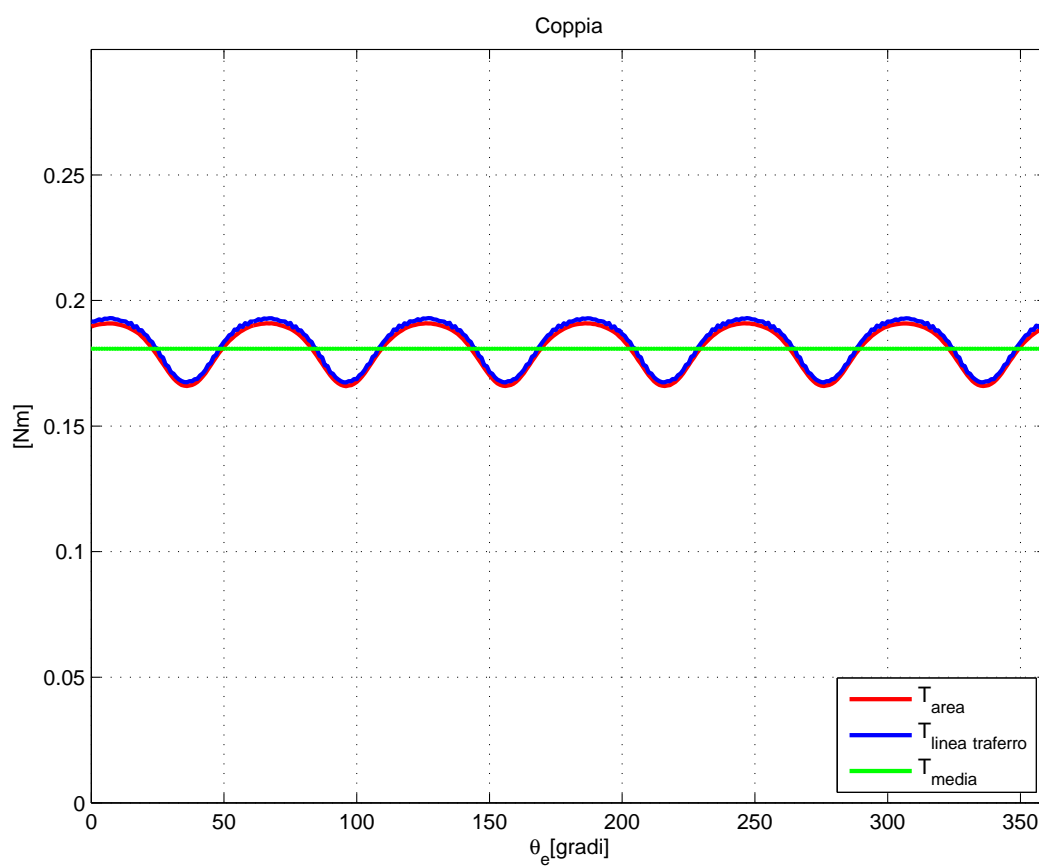


Figura 1.15: Coppia sviluppata dalla macchina a carico nominale. Oltre al suo valore medio si nota sovrapposta a esso una certa oscillazione, la stessa che si aveva nel funzionamento a vuoto dovuta all'impuntamento cioè alle irregolarità geometriche di statore e rotore.

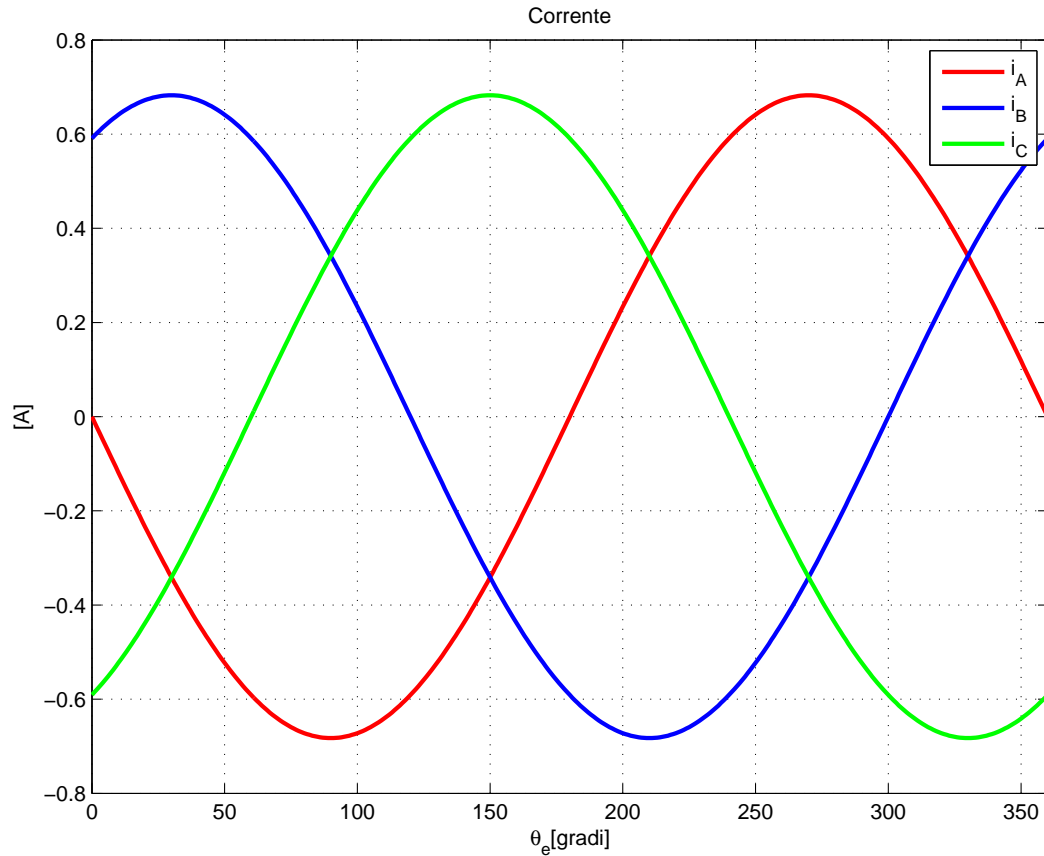


Figura 1.16: Correnti nominali assorbite dalla macchina e circolanti sulle fasi di statore.

1.11 Induzioni

Utilizzando il software di calcolo agli elementi finiti FEMM, si é potuta calcolare l'induzione al traferro della macchina e tracciarne l'andamento in funzione dell'angolo elettrico.

É stato possibile verificare la variazione nel passaggio da vuoto a carico, dovuta alla reazione di indotto, cioé all'opporci delle correnti indotte alla causa che le ha generate secondo la legge di Lenz. In alcuni tratti si assiste a un abbassamento e in altri a un innalzamento della curva a vuoto.

Il medesimo procedimento é stato applicato anche per le induzioni del magnete permanente. Anche in questo caso la reazione di indotto consente l'innalzamento e l'abbassamento dell'induzione residua del magnete. Si deve quindi prestare attenzione alla sua smagnetizzazione non caricando la macchina a tal punto da far abbassare l'induzione residua del magnete al di sotto del ginocchio del suo ciclo di isteresi.

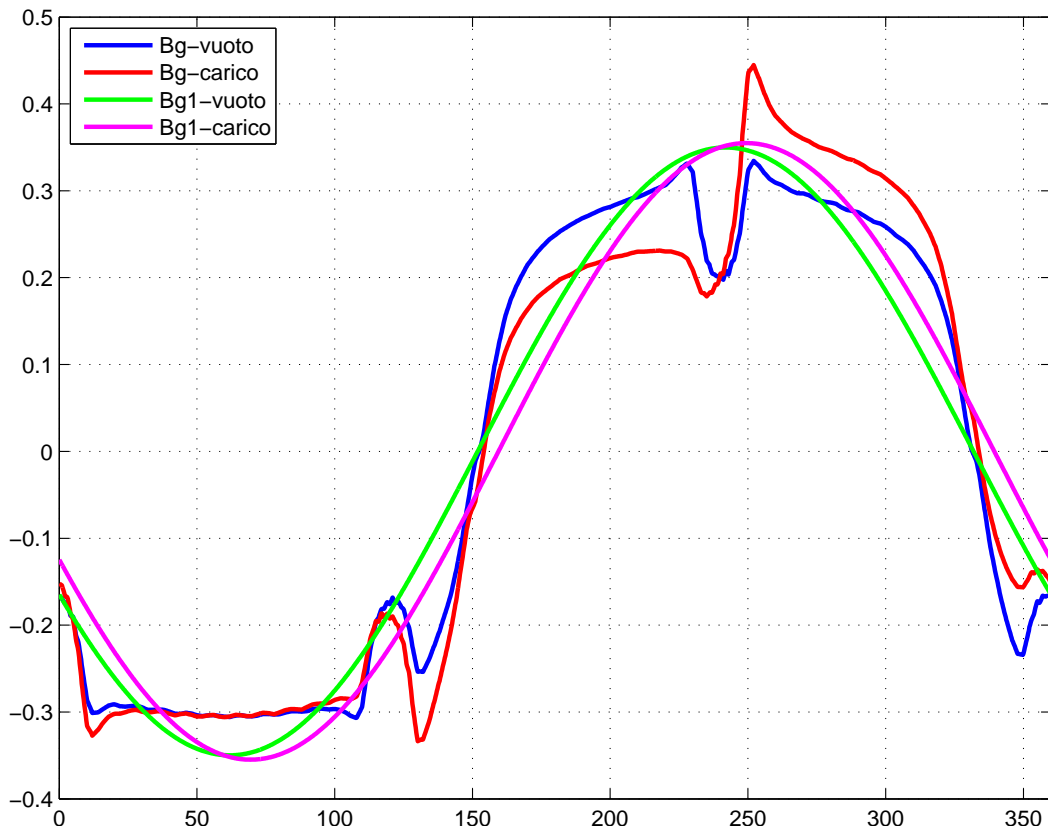


Figura 1.17: Andamento delle forme d'onda dell'induzione al traferro sotto un polo, quindi in 360 gradi elettrici. Nella forma d'onda a vuoto si notano i buchi dovuti alle aperture di cava, cioè l'abbassamento del valore di induzione nei punti in cui non vi è ferro affacciato al magnete ma aria. Nella forma d'onda a carico si nota invece l'effetto della reazione di indotto che in alcuni punti fa abbassare il valore di induzione al traferro e in altri invece lo esalta dando luogo a un picco subito dopo l'abbassamento dovuto all'apertura di cava.

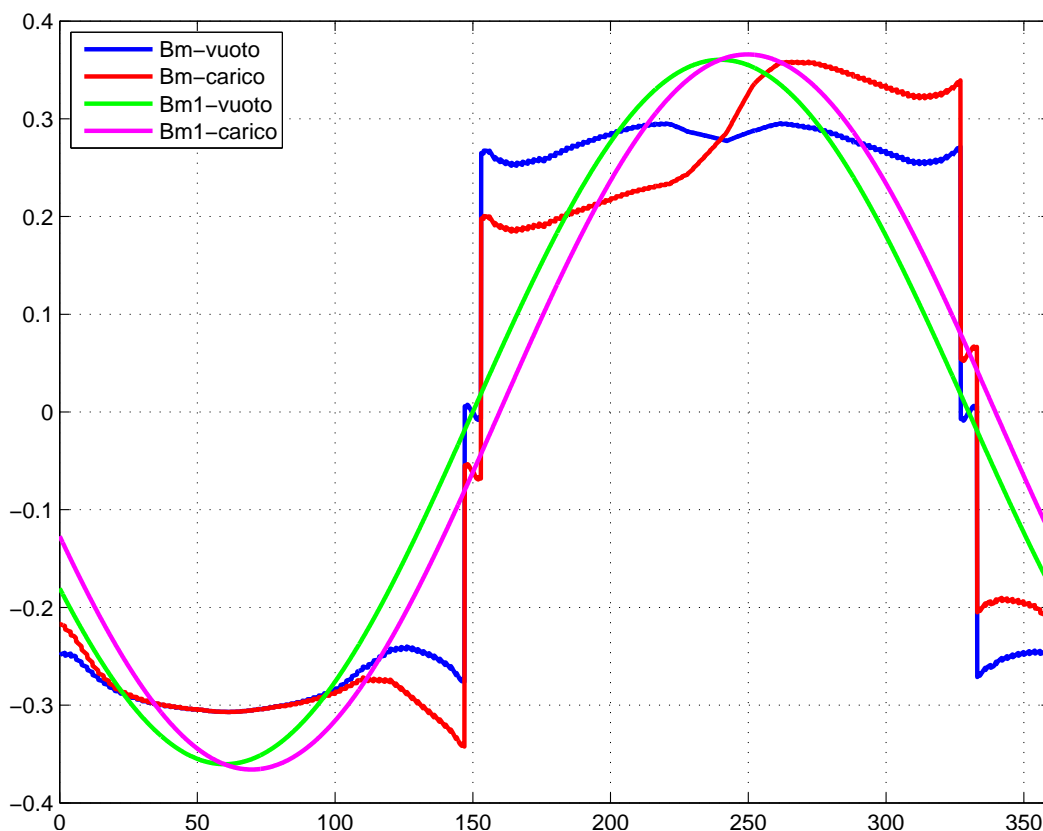


Figura 1.18: Andamento delle forme d'onda dell'induzione a metà dello spessore del magnete sotto un polo, quindi in 360 gradi elettrici. Nella forma d'onda a vuoto si notano le oscillazioni dovute alle aperture di cava, cioè l'abbassamento del valore di induzione nei punti in cui non ho ferro affacciato al magnete, ma aria. Nella forma d'onda a carico si nota invece l'effetto della reazione di indotto che in alcuni punti fa abbassare il valore di induzione all'interno del magnete ed in altri invece lo esalta dando luogo ad un picco subito dopo l'abbassamento dovuto all'apertura di cava. Si deve prestare attenzione agli abbassamenti del valore di induzione perché se vengono a superare il ginocchio della curva di B/H del magnete stesso si va incontro alla sua smagnetizzazione irreversibile.

1.12 Potenza e perdite

Un dato di partenza della macchina in esame é la velocità di rotazione in sincronismo, ovvero:

$$n_0 = \frac{60 \cdot f}{p} = 10000 \text{ rpm} \quad (1.37)$$

$$\Omega_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_0}{60} = 1047,2 \text{ rad/s} \quad (1.38)$$

ne deriva quindi la necessità di alimentare con frequenza:

$$f = \frac{n_0 \cdot p}{60} = \frac{10000 \cdot 2}{60} = 333,34 \text{ Hz} \quad (1.39)$$

Avendo in precedenza calcolato la coppia sviluppata, si può risalire alla potenza meccanica:

$$P_m = T \cdot \Omega_m = 0,161 \cdot 1047,2 = 168,6 \text{ W} \quad (1.40)$$

Dal programma di calcolo FEMM é stato possibile ricavare l'induzione massima nel dente e l'induzione massima nella corona:

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{B}_t = 0,723 \text{ T} \\ \hat{B}_{bi} = 0,578 \text{ T} \end{array} \right\}$$

1. Perdite Joule di Statore

Raggio medio testata:

$$r_{ew} = \frac{ps \cdot \frac{2}{3}}{2} = \frac{0,021 \cdot \frac{2}{3}}{2} = 0,007 \text{ m} \quad (1.41)$$

Lunghezza media rame di testata:

$$l_{ew} = \pi \cdot r_{ew} = \pi \cdot 0,007 = 0,022 \text{ m} \quad (1.42)$$

Sezione commerciale conduttore in rame: $Sc=0,0989 \text{ mm}^2$

Resistenza di fase statorica:

$$\begin{aligned} R_{f_{ase,s}} &= \rho_{cu,75} \cdot \frac{Ns \cdot (Lz + l_{ew})}{Sc} \\ &= 0,022 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1492 \cdot (0,020 + 0,022)}{0,0989 \cdot 10^{-6}} \\ &= 14,8 \Omega \end{aligned} \quad (1.43)$$

$$P_{J,s} = 3 \cdot R_{f_{ase,s}} \cdot I^2 = 3 \cdot 14,8 \cdot 0,4825^2 = 9,93 \text{ W} \quad (1.44)$$

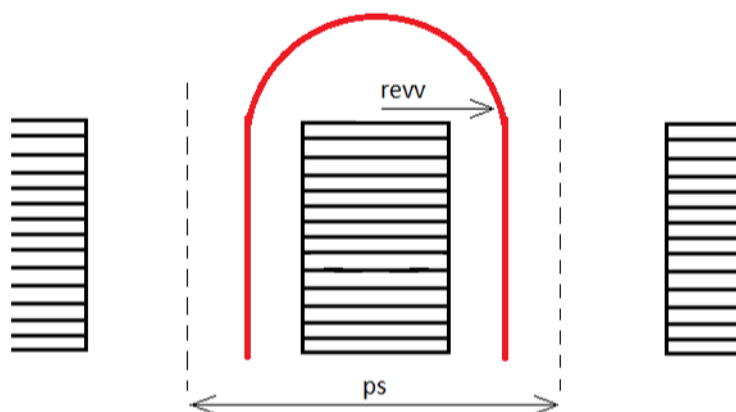


Figura 1.19: Lunghezza media rame di testata per il calcolo della resistenza degli avvolgimenti, in questo caso si ha la bobina avvolta attorno ad un solo dente e per un calcolo preciso é bene valutare il raggio di curvatura medio del conduttore.

2. Perdite nel Ferro dei Denti

Per quanto riguarda i lamierini utilizzati, si assumono delle perdite specifiche $p_s=10$ [W/kg], considerando induzione di valore 1,5 [T] e frequenza 50 [Hz]; devono essere riportate al valore massimo di induzione calcolata nel dente e al valore di frequenza di alimentazione.

$$\begin{aligned}
 p_s &= k_{ist} \cdot \left(\frac{f}{50}\right) \cdot \left(\frac{B}{1,5}\right)^2 + k_{cp} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^2 \cdot \left(\frac{B}{1,5}\right)^2 \\
 &= 10 \cdot 0,7 \cdot \left(\frac{333,34}{50}\right) \cdot \left(\frac{0,7227}{1,5}\right)^2 + 10 \cdot 0,3 \cdot \left(\frac{333,34}{50}\right)^2 \cdot \left(\frac{0,7227}{1,5}\right)^2 \\
 &= 41,75 \text{ W/kg}
 \end{aligned} \tag{1.45}$$

Volume denti di statore:

$$\begin{aligned}
 V_t &= Q_s \cdot (Area_t \cdot Lz) \\
 &= 6 \cdot (129,61 \cdot 10^{-6} \cdot 0,020) \\
 &= 15,55 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3
 \end{aligned} \tag{1.46}$$

Peso dei denti di statore:

$$G_t = V_t \cdot \gamma_{fe} = 15,55 \cdot 10^{-6} \cdot 7800 = 0,121 \text{ kg} \tag{1.47}$$

$$P_{fe,t} = G_t \cdot p_s \cdot k_{magg} = 0,1213 \cdot 41,75 \cdot 1,7 = 8,6 \text{ W} \tag{1.48}$$

3. Perdite nel Ferro della Corona

Per quanto riguarda i lamierini utilizzati, si assumono delle perdite specifiche $p_s=10$ [W/kg], considerando induzione di valore 1,5 [T] e frequenza 50 [Hz]; devono essere riportate al valore massimo di induzione calcolata nel dente e al valore di frequenza di alimentazione.

$$\begin{aligned}
 p_s &= k_{ist} \cdot \left(\frac{f}{50}\right) \cdot \left(\frac{B}{1,5}\right)^2 + k_{cp} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^2 \cdot \left(\frac{B}{1,5}\right)^2 \\
 &= 10 \cdot 0,7 \cdot \left(\frac{333,34}{50}\right) \cdot \left(\frac{0,5784}{1,5}\right)^2 + 10 \cdot 0,3 \cdot \left(\frac{333,34}{50}\right)^2 \cdot \left(\frac{0,5784}{1,5}\right)^2 \\
 &= 26,76 \text{ W/kg}
 \end{aligned} \tag{1.49}$$

Volume denti di statore:

$$V_{bi} = \left[\frac{\pi \cdot D_e^2}{4} - \frac{(D + 2 \cdot ht)^2 \cdot \pi}{4} \right] = 0,0000432 \text{ m}^3 \quad (1.50)$$

Peso dei denti di statore:

$$G_{bi} = V_{bi} \cdot \gamma_{fe} = 0,0000432 \cdot 7800 = 0,337 \text{ kg} \quad (1.51)$$

$$P_{fe,bi} = G_{bi} \cdot ps \cdot k_{magg} = 0,337 \cdot 26,76 \cdot 1,5 = 13,53 \text{ W} \quad (1.52)$$

4. Potenza Assorbita e Rendimento

La potenza elettrica assorbita dalla macchina é la somma della potenza meccanica fornita all'asse e delle perdite nel ferro e nel rame della macchina stessa.

Le perdite totali calcolate sono:

$$P_{J,s} + P_{fe,t} + P_{fe,bi} = 9,93 + 8,6 + 13,53 = 32,06 \text{ W} \quad (1.53)$$

Si deve tenere conto anche di un'ulteriore voce di perdita dovuta ad altri fenomeni dissipativi minori all'interno della macchina; prende il nome di perdite addizionali e viene empiricamente calcolata come:

$$P_{add} = 5\%(\text{perdite totali}) = 1,6 \text{ W} \quad (1.54)$$

Risulta infine una potenza complessivamente assorbita, elettrica:

$$\begin{aligned} P_e &= P_m + \text{perdite totali} + P_{add} \\ &= 168,6 + 32,06 + 1,6 \\ &= 202,3 \text{ W} \end{aligned} \quad (1.55)$$

Quindi un rendimento:

$$\eta = \frac{P_m}{P_e} = \frac{168,6}{202,3} = 0,833 \quad (1.56)$$

Capitolo 2

Analisi del secondo motore (config.12/4)

2.1 Premessa

Questa seconda macchina é costituita da una lamiera statorica standard per motori asincroni a dodici cave con diametro esterno 80 millimetri e diametro interno 40 millimetri su cui viene montato un avvolgimento a quattro poli a passo intero, non raccorciato, singolo strato; ne conseguiranno testate di lunghezza maggiore. Per questo motivo mi aspetto perdite Joule maggiori rispetto al caso precedente, ma anche densità di coppia maggiore essendo che il coefficiente di avvolgimento in questo caso é pari a 1.

Si ha un rapporto cave-poli pari a $6/2$; lunghezza pacco statorico pari a 20 millimetri.

Il rotore, diametro esterno 38 millimetri e foro per inserimento dell'albero 15 millimetri, monta quattro magneti permanenti superficiali in ferrite di spessore 3,5 millimetri.

Questi magneti occupano praticamente tutti i 90 gradi a disposizione, lasciando solo un piccolo gioco per il loro inserimento.

2.2 Dati geometrici

Grandezza	Unitá di misura	Valore	Simbolo
Diametro esterno	mm	80	De
Diametro interno	mm	40	D
Numero cave		12	Qs
Sezione cava	mm^2	85	Sslot
Altezza cava	mm	10,25	hs
Apertura cava di statore	mm	3,3	wso
Altezza corona	mm	9,75	hbi
Larghezza dente	mm	4,4	wt
Traferro	mm	1	g
Diametro rotore	mm	38	Dr
Diametro foro rotore	mm	15	
Numero fasi		3	m
Numero poli		4	2p
Lunghezza pacco	mm	20	Lz
Frequenza	Hz	333,34	f
Velocita sincrona	rpm	10000	Ω

2.3 Dati magnete permanente

Grandezza	Unitá di misura	Valore	Simbolo
Tipo		Ferrite	
Forza coercitiva	A/m	289373	Hc
Permeabilitá relativa differenziale		1,1	μ_r
Induzione residua	T	0,4	Brem
Spessore magnete	mm	3,5	tm
Lunghezza magnete	mm	20	
Angolo coperto dal magnete	gradi	90	
Angolo realmente coperto dal magnete	gradi	87	α_m

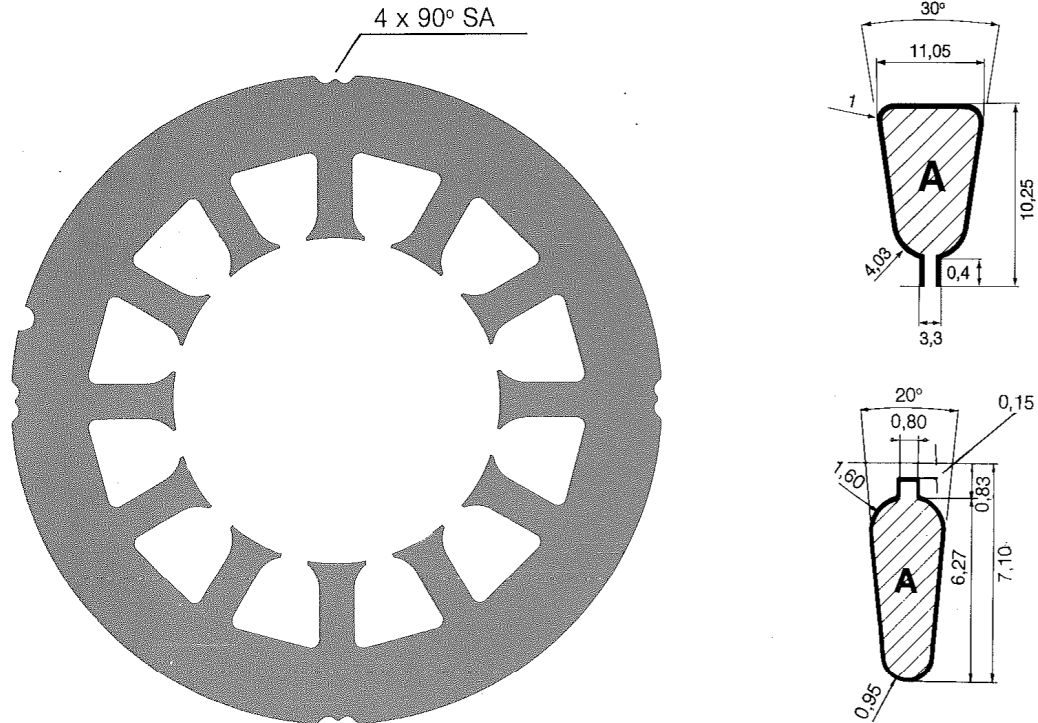


Figura 2.1: Geometria di statore.

2.4 Dati avvolgimento

Grandezza	Unità di misura	Valore	Simbolo
Numero strati in cava		1	nss
Numero spire serie per fase		1036	Ns
Conduttori in cava		259	ncs
Percorsi in parallelo		1	np
Conduttori per matassa		259	Nt
Numero matasse		2	nm
Sezione conduttore (filo) teorica	mm^2	0,131	S'c
Sezione conduttore (filo)	mm^2	0,125	Sc
Diametro conduttore (filo) teorico	mm	0,408	d'c
Diametro conduttore (filo)	mm	0,400	dc
Fattore di avvolgimento		1	kw

2.5 Matrice di cava

La matrice di cava indica la disposizione dell'avvolgimento nelle cave statoriche.

Per ciascuna fase (a, b, c) viene indicato il verso della corrente in cava (segno positivo o negativo) e la presenza di una o pi fasi nella cava (rispettivamente indicati con 1 o 0,5).

$$\begin{aligned} ka &= \{ -1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ -1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \} \\ kb &= \{ 0 \ 0 \ -1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ -1 \ 0 \ 0 \ 1 \} \\ kc &= \{ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ -1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ -1 \ 0 \} \end{aligned}$$

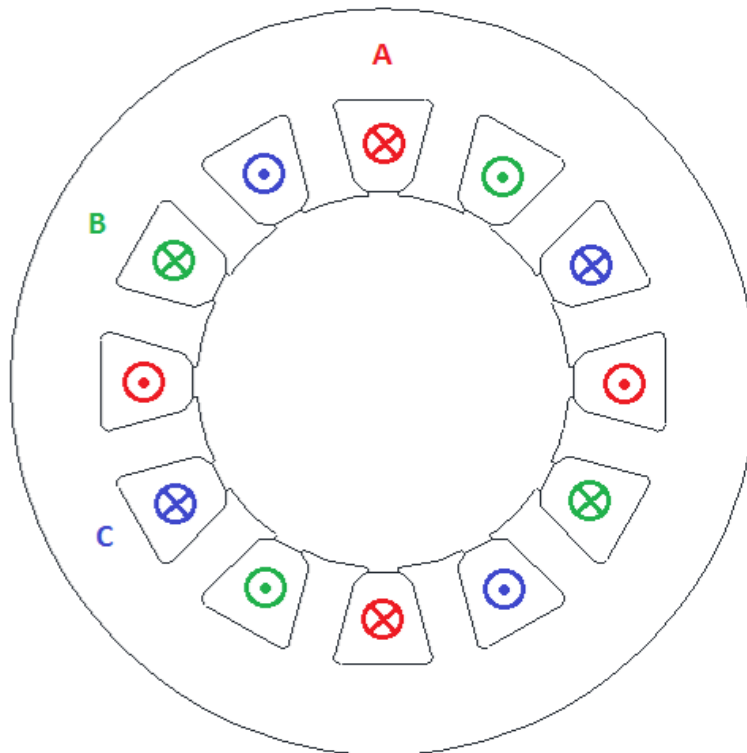


Figura 2.2: Collegamenti avvolgimento statorico: fase A, fase B, fase C.

2.6 Stella di cava

Realizzabilità dell'avvolgimento frazionario in questione:

$$t = M.C.D\{Q_s, p\} = 2 \quad (2.1)$$

$$\frac{Q_s}{m \cdot t} = \frac{12}{3 \cdot 2} = 2 \quad (2.2)$$

In questo caso l'avvolgimento può essere realizzato in quanto è risultato un numero intero.

$$\alpha_s = \frac{360}{Q_s} = \frac{360}{12} = 30 \quad (2.3)$$

$$\alpha_{se} = p \cdot \alpha_s = 60 \quad (2.4)$$

esprime la periodicit  della stella di cava.

$$\frac{Q_s}{t} = 6 \quad (2.5)$$

$$t = 2 \quad (2.6)$$

Risulta una stella di cava composta da sei raggi, ciascuno con due vettori.

Lunghezza matassa:

$$y_q = \frac{Q_s}{2p} = 3 \quad (2.7)$$

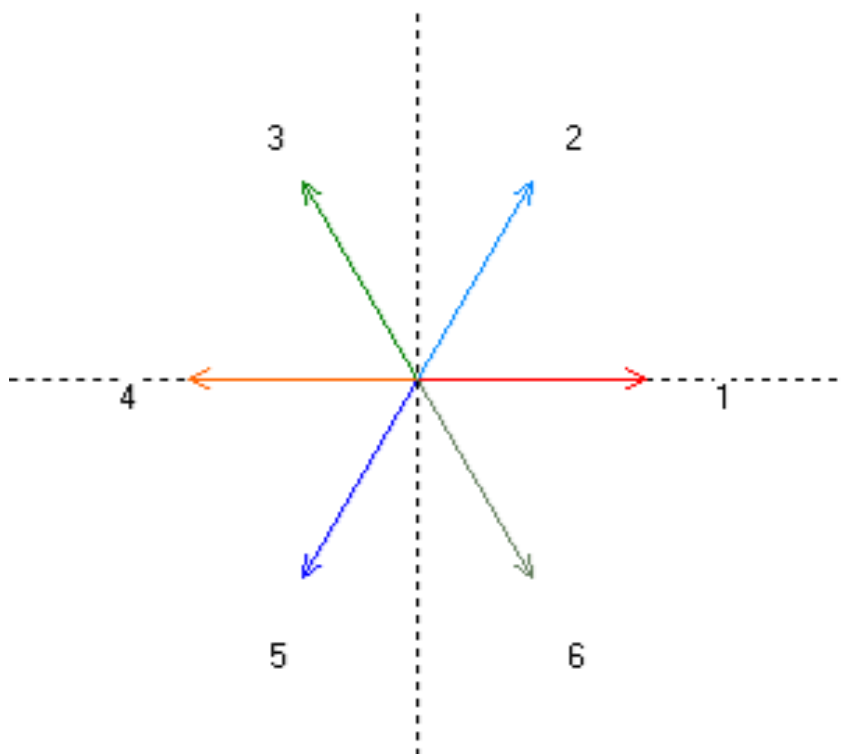


Figura 2.3: Stella di cava.

2.7 Calcoli analitici, vuoto

Data la geometria della macchina e le caratteristiche dei magneti montati a bordo del rotore, si possono ricavare alcune grandezze caratteristiche del funzionamento a vuoto. Ipotizzata la tensione in uscita ai morsetti che si vuole ottenere, si determina anche il numero di conduttori costituenti l'avvolgimento di ciascuna fase.

Nell'idealità del funzionamento della macchina si possono fare alcuni calcoli relativi alle grandezze in gioco, senza considerare lo spanciamento del flusso e altri fenomeni indesiderati per presenti al suo interno. Induzione al traferro:

$$\hat{B}_g = \frac{B_{rem}}{1 + \frac{g \cdot \mu_r}{tm}} = \frac{0,4}{1 + \frac{1 \cdot 1,1}{3,5}} = 0,304 \text{ T} \quad (2.8)$$

il cui valore medio:

$$B_{avg} = \frac{87}{90} \cdot \hat{B}_g = \frac{87}{90} \cdot 0,304 = 0,294 \text{ T} \quad (2.9)$$

Induzione media nel dente:

$$B_t = \frac{ps}{wt} \cdot B_{avg} = \frac{10,5}{5} \cdot 0,294 = 0,617 \text{ T} \quad (2.10)$$

dove:

$$ps = \frac{\pi \cdot D}{Q_s} = \frac{\pi \cdot 0,040}{12} \simeq 10,5 \text{ mm} \quad (2.11)$$

Flusso nel dente, flusso concatenato da una spira:

$$\Phi_t = \hat{\Lambda}_{1sp} = 3 \cdot B_t \cdot wt \cdot Lz = 3 \cdot 0,6174 \cdot 0,005 \cdot 0,020 = 0,000185 \text{ Wb} \quad (2.12)$$

Moltiplico per 3 inquanto la spira abbraccia tre denti di statore.

Questo valore di flusso non però quello reale, devo introdurre delle correzioni per tenere conto del suo spanciamento al traferro e dell'effetto delle cave.

Vengono introdotti due coefficienti correttivi $k\sigma$ e k_{carter} :

$$k\sigma = \frac{Sm}{Sg} = \frac{\tau_m}{\tau_m \cdot 2g} = \frac{30,35}{32,35} = 0,94 \quad (2.13)$$

dove:

$$\tau_m = \frac{\pi \cdot D}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,040}{4} = 30,35 \text{ mm} \quad (2.14)$$

$$k_{carter} = \frac{ps}{ps + g - \frac{3}{4} \cdot wso} = \frac{0,0105}{0,0105 + 0,001 - \frac{3}{4} \cdot 0,0033} = 1,16 \quad (2.15)$$

Il traferro viene maggiorato:

$$g' = g \cdot k_{carter} = 0,00116 \text{ m} \quad (2.16)$$

Quindi ora l'induzione al traferro:

$$\hat{B}_g = \frac{B_{rem} \cdot k\sigma}{1 + \frac{g' \cdot \mu_r \cdot k\sigma}{tm}} = \frac{0,4 \cdot 0,94}{1 + \frac{1,163 \cdot 1,1 \cdot 0,94}{3,5}} = 0,279 \text{ T} \quad (2.17)$$

il cui valore medio:

$$B_{avg} = \frac{87}{90} \cdot \hat{B}_g = \frac{87}{90} \cdot 0,2798 = 0,270 \text{ T} \quad (2.18)$$

Induzione media nel dente:

$$B_t = \frac{ps}{wt} \cdot B_{avg} = \frac{10,5}{5} \cdot 0,2705 = 0,568 \text{ T} \quad (2.19)$$

Flusso nel dente, flusso concatenato da una spira:

$$\Phi_t = \hat{\Lambda}_{1sp} = 3 \cdot B_t \cdot wt \cdot Lz = 3 \cdot 0,568 \cdot 0,005 \cdot 0,020 = 0,00017 \text{ Wb} \quad (2.20)$$

Chiedendo di avere una tensione ai morsetti del generatore di 130 V, con collegamento esterno delle fasi a triangolo, viene ad essere determinato un numero di conduttori per matassa:

$$\hat{E}_{avv} = \omega \cdot \Phi_t \cdot 2 \cdot Nt = 184 \text{ V di picco} \quad (2.21)$$

$$Nt = \frac{\hat{E}_{avv}}{\omega \cdot \Phi_t \cdot 2} = \frac{184}{2 \cdot \pi \cdot 333.34 \cdot 0,00017 \cdot 2} = 259 \quad (2.22)$$

Conduttori in cava:

$$ncs = Nt = 259 \text{ perché singolo strato} \quad (2.23)$$

Conduttori totali equivalenti serie:

$$N_s = \frac{ncs \cdot Q_s}{m} = \frac{259 \cdot 12}{3} = 1036 \quad (2.24)$$

Flusso concatenato da una fase:

$$\hat{\Lambda} = \Phi_t \cdot 2 \cdot Nt = 0,00017 \cdot 2 \cdot 259 = 0,088 \text{ V}\cdot\text{s} \quad (2.25)$$

2.8 Simulazioni FEMM, vuoto

Le simulazioni fatte utilizzando il software di calcolo agli elementi finiti FEMM, hanno avuto come scopo la verifica dai calcoli analitici precedentemente eseguiti e l'accertamento della bontà delle scelte fino ad ora eseguite. Questo software calcola il vettore potenziale magnetico \vec{A} , per ogni elemento della mesh, sul piano trasversale rispetto alla lunghezza della macchina; per questo motivo il flusso concatenato con le varie fasi pu essere calcolato mediante le equazioni:

$$\hat{\Lambda}_A = ncs \cdot Lz \cdot \sum ka(i) \cdot \frac{1}{Sslot} \cdot \int A_z \cdot ds \quad (2.26)$$

$$\hat{\Lambda}_B = ncs \cdot Lz \cdot \sum kb(i) \cdot \frac{1}{Sslot} \cdot \int A_z \cdot ds \quad (2.27)$$

$$\hat{\Lambda}_C = ncs \cdot Lz \cdot \sum kc(i) \cdot \frac{1}{Sslot} \cdot \int A_z \cdot ds \quad (2.28)$$

Mentre le tensioni:

$$\hat{E}_A = \omega \cdot \hat{\Lambda}_A \quad (2.29)$$

$$\hat{E}_B = \omega \cdot \hat{\Lambda}_B \quad (2.30)$$

$$\hat{E}_C = \omega \cdot \hat{\Lambda}_C \quad (2.31)$$

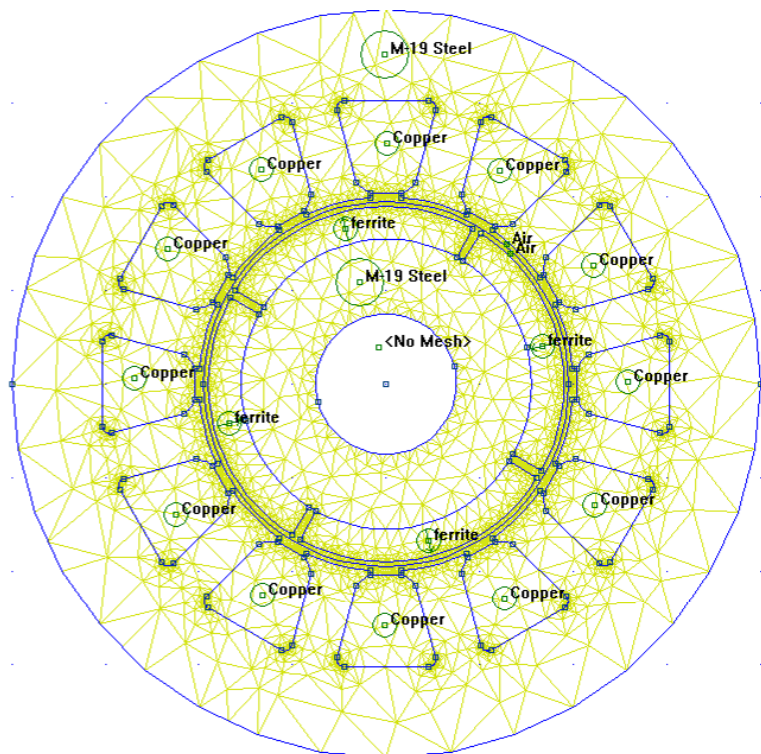


Figura 2.4: Mesh creata dal programma FEMM che va a discretizzare il dominio del problema, successivamente attraverso un'analisi agli elementi finiti, il programma estrapola i valori delle grandezze elettriche e magnetiche di nostro interesse.

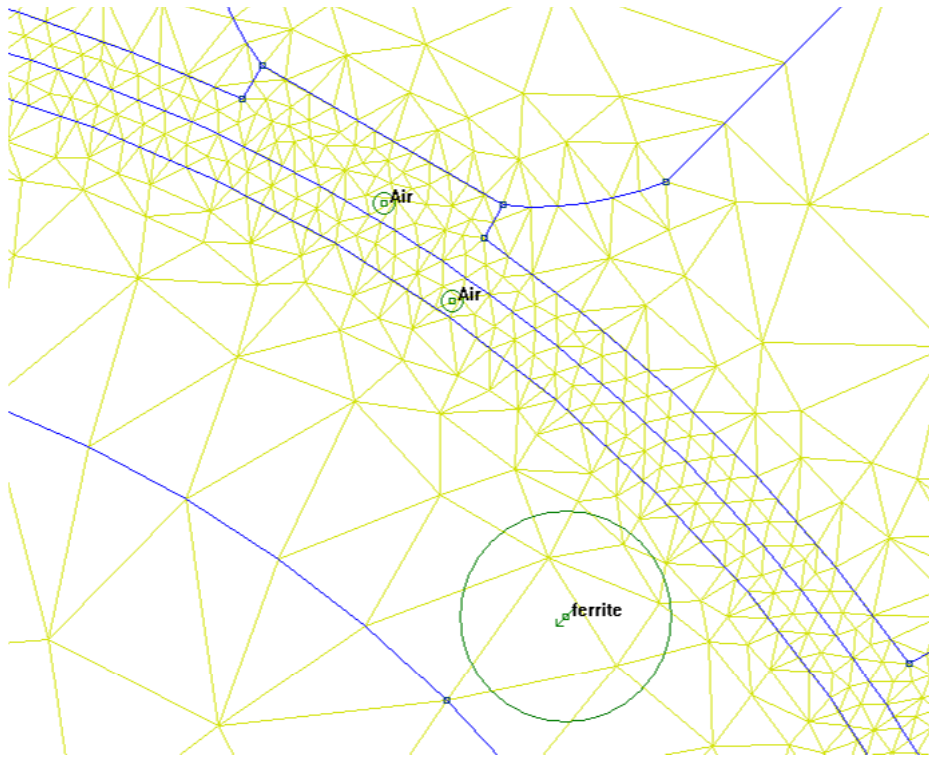


Figura 2.5: Il processo di discretizzazione del dominio deve essere fatto con cura al fine di ottenere una buona precisione nei risultati e per questo la mesh deve essere piú fitta possibile nel traferro, dove si concentra l'energia magnetica.

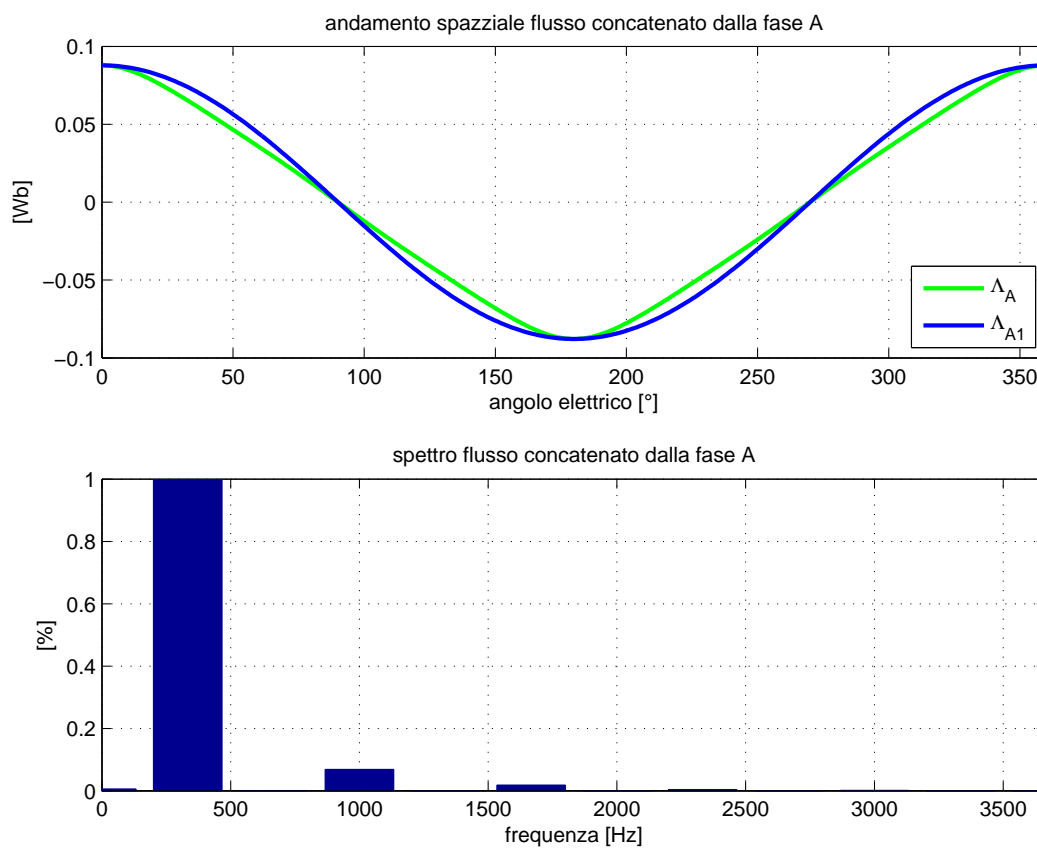


Figura 2.6: Flusso concatenato e relativo spettro della Fase A. Da questa figura si può notare l'andamento abbastanza sinusoidale del flusso concatenato di questa fase, ciò è confermato dal suo spettro che evidenzia la presenza preponderante della componente fondamentale e mette in luce che la leggera distorsione è dovuta a una lieve presenza di terza e quinta armonica.

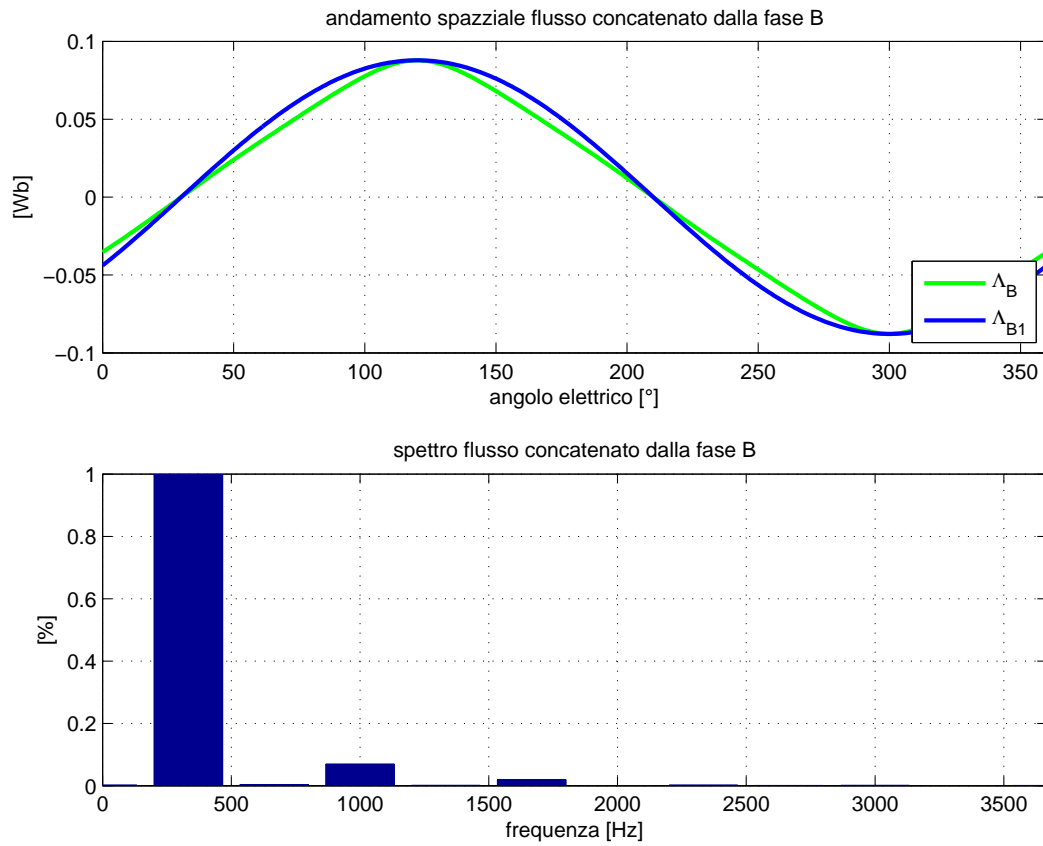


Figura 2.7: Flusso concatenato e relativo spettro della Fase B. Da questa figura si può notare l'andamento abbastanza sinusoidale del flusso concatenato di questa fase, ciò è confermato dal suo spettro che evidenzia la presenza preponderante della componente fondamentale e mette in luce che la leggera distorsione è dovuta a una lieve presenza di terza e quinta armonica.

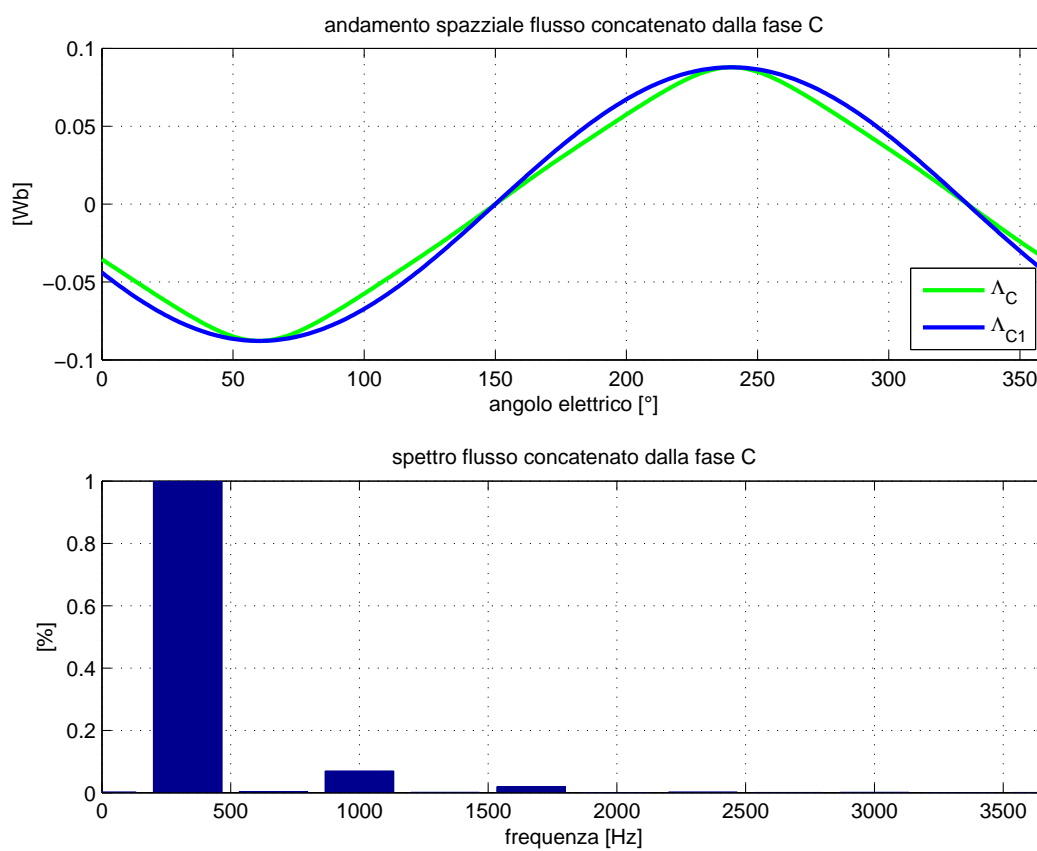


Figura 2.8: Flusso concatenato e relativo spettro della Fase C. Da questa figura si può notare l'andamento abbastanza sinusoidale del flusso concatenato di questa fase, ciò è confermato dal suo spettro che evidenzia la presenza preponderante della componente fondamentale e mette in luce che la leggera distorsione è dovuta a una lieve presenza di terza e quinta armonica.

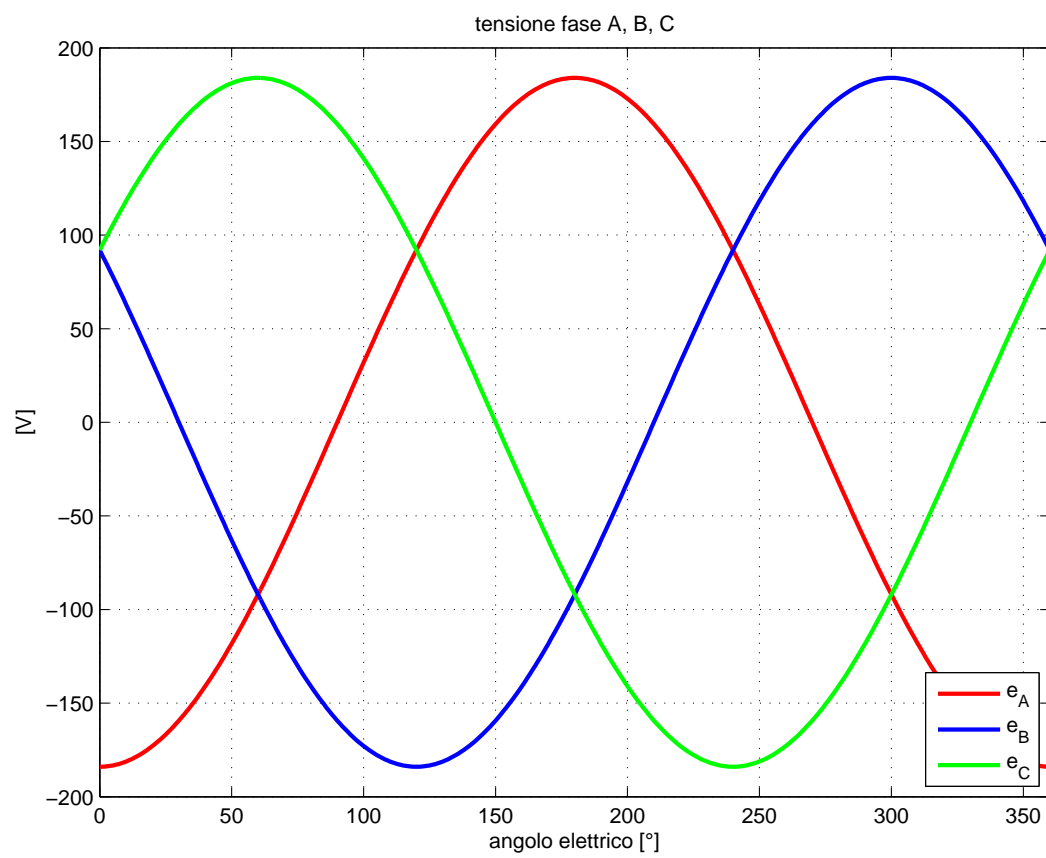


Figura 2.9: Componente fondamentale delle tensioni indotte sulla fase A, B, C; conseguenza diretta del flusso concatenato calcolato sopra.

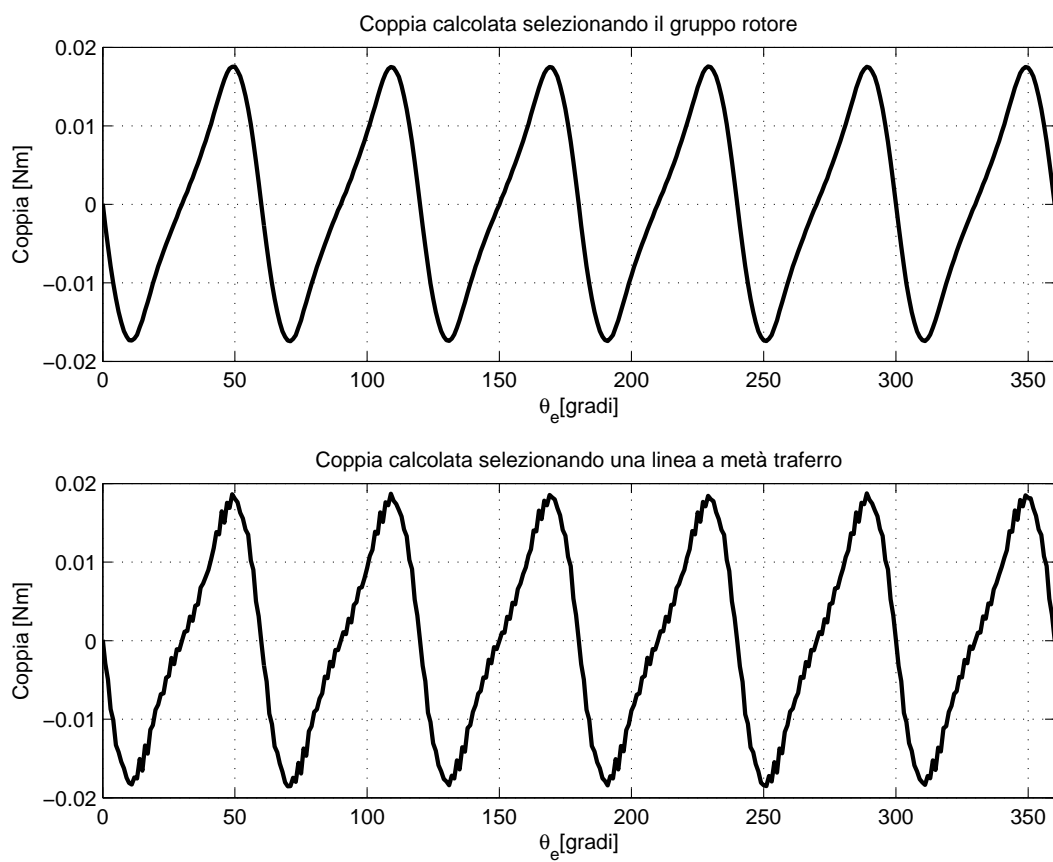


Figura 2.10: Coppia sviluppata nel funzionamento a vuoto del motore, teoricamente nulla, ma in conseguenza alle inevitabili irregolarità nella geometria di statore e rotore risulta diversa da zero. Prende il nome di coppia di impuntamento (cogging).

2.9 Calcoli analitici, carico

Innanzitutto é necessario stimare una certa densità di corrente nei conduttori, funzione della possibilità di smaltire il calore prodotto dalle perdite della macchina. Altro parametro di stima é il coefficiente di riempimento della cava, cioè in che percentuale la sezione di cava viene realmente riempita di conduttori attivi, quindi di rame.

La scelta é stata entro valori tipici, in particolare:

- $J=5 \text{ A/mm}^2$;
- $k_{fill}=0,4$.

Si potuto ricavare in conseguenza la corrente in cava:

$$I = S_{slot} \cdot k_{fill} \cdot J = 85 \cdot 0,4 \cdot 5 = 170 \text{ A} \quad (2.32)$$

Oltre alla corrente di avvolgimento:

$$I_{avv} = \frac{I}{ncs} = \frac{170}{259} = 0.656 \text{ A} \quad (2.33)$$

Sezione conduttore:

$$S_c = \frac{S_{slot} \cdot k_{fill}}{ncs} = \frac{85 \cdot 0,4}{259} = 0,131 \text{ mm}^2 \quad (2.34)$$

il cui diametro risulta:

$$dc = 0,408 \text{ mm} \quad (2.35)$$

Diametro commerciale:

$$dc = 0,400 \text{ mm} \quad (2.36)$$

Il carico elettrico generato dalla corrente calcolata sopra risulta:

$$\hat{K}_s = \frac{3 \cdot kw \cdot N_s \cdot \hat{I}}{\pi \cdot D} = \frac{3 \cdot 1 \cdot 1036 \cdot 0,928}{\pi \cdot 0,040} = 22952 \text{ A/m} \quad (2.37)$$

La coppia prodotta risulta infine:

$$T = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot Lz \cdot \hat{K}_s \cdot \hat{B}_g = \frac{\pi}{4} \cdot 0,040^2 \cdot 0,020 \cdot 22952 \cdot 0,304 = 0,175 \text{ N}\cdot\text{m} \quad (2.38)$$

2.10 Simulazioni FEMM, carico

Il funzionamento a carico é stato simulato inviando nello statore della macchina le tre correnti di fase nominali, fasate in modo da far risultare il carico elettrico \hat{K}_s in fase con l'induzione a vuoto \hat{B}_g , affinché la macchina si trovasse a lavorare in coppia massima; come ipotizzato nei calcoli analitici.

Anche in questo caso sono stati calcolati i flussi concatenati e le tensioni ai morsetti della macchina, oltre che la coppia sviluppata.

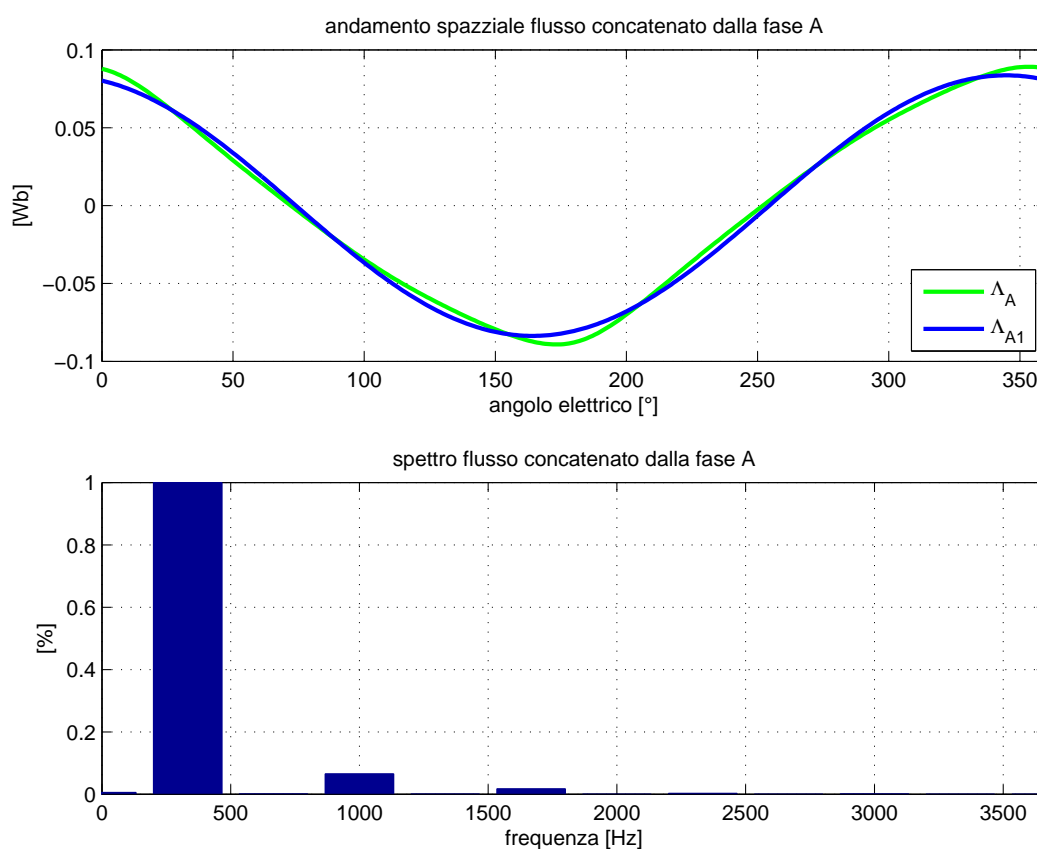


Figura 2.11: Flusso concatenato e relativo spettro della Fase A. Da questa figura si può notare l'andamento abbastanza sinusoidale del flusso concatenato di questa fase a carico, ciò é confermato dal suo spettro che evidenzia la presenza preponderante della componente fondamentale e mette in luce che la leggera distorsione é dovuta a una lieve presenza di terza e quinta armonica.

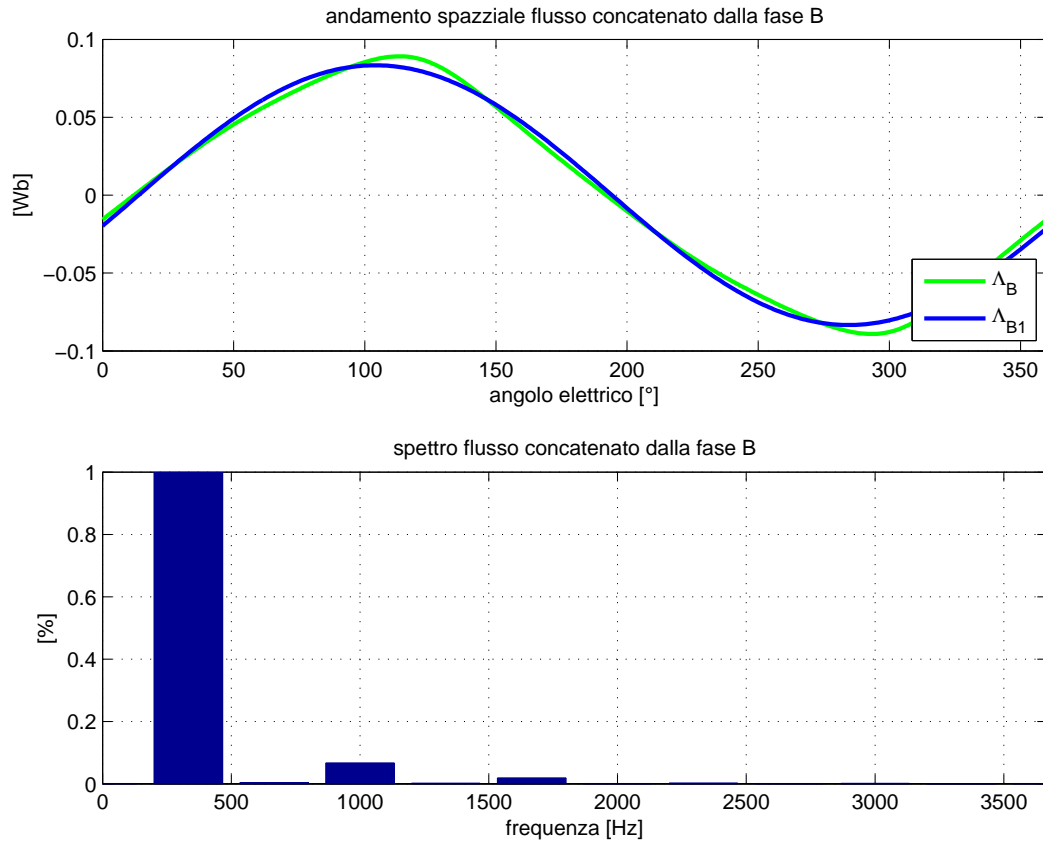


Figura 2.12: Flusso concatenato e relativo spettro della Fase B. Da questa figura si può notare l'andamento abbastanza sinusoidale del flusso concatenato di questa fase a carico, ciò è confermato dal suo spettro che evidenzia la presenza preponderante della componente fondamentale e mette in luce che la leggera distorsione è dovuta a una lieve presenza di terza e quinta armonica.

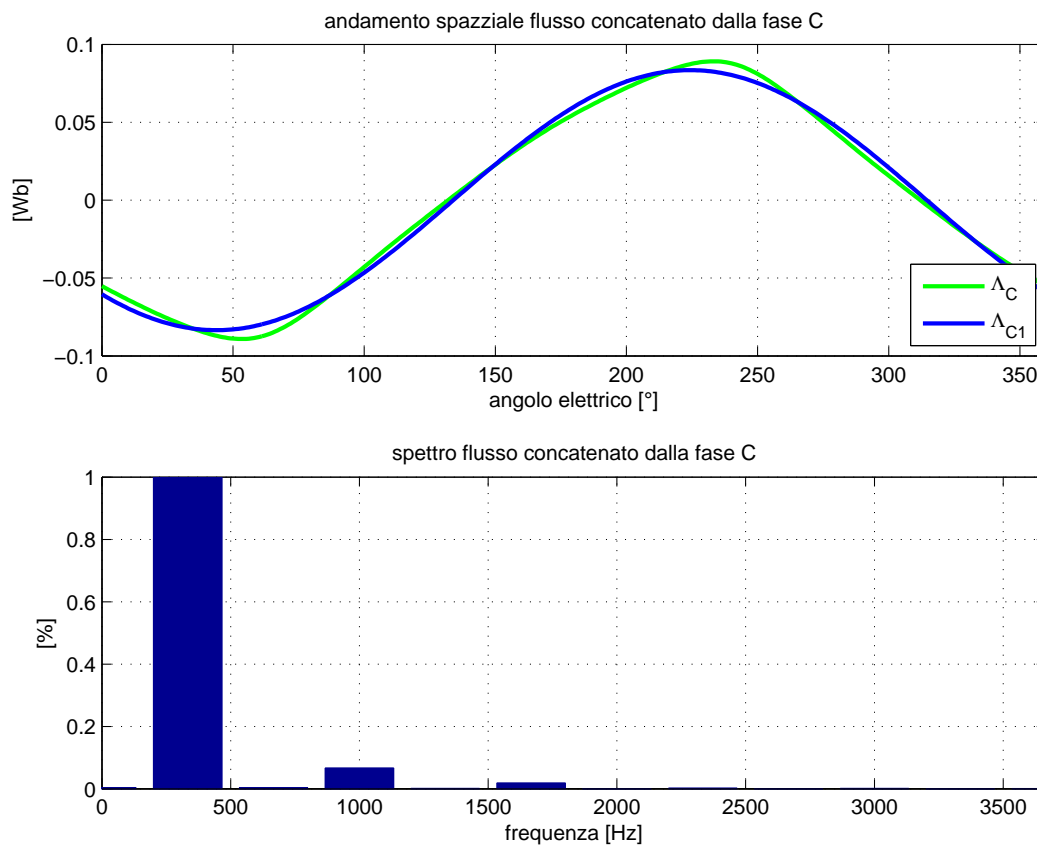


Figura 2.13: Flusso concatenato e relativo spettro della Fase C. Da questa figura si può notare l'andamento abbastanza sinusoidale del flusso concatenato di questa fase a carico, ciò è confermato dal suo spettro che evidenzia la presenza preponderante della componente fondamentale e mette in luce che la leggera distorsione è dovuta a una lieve presenza di terza e quinta armonica.

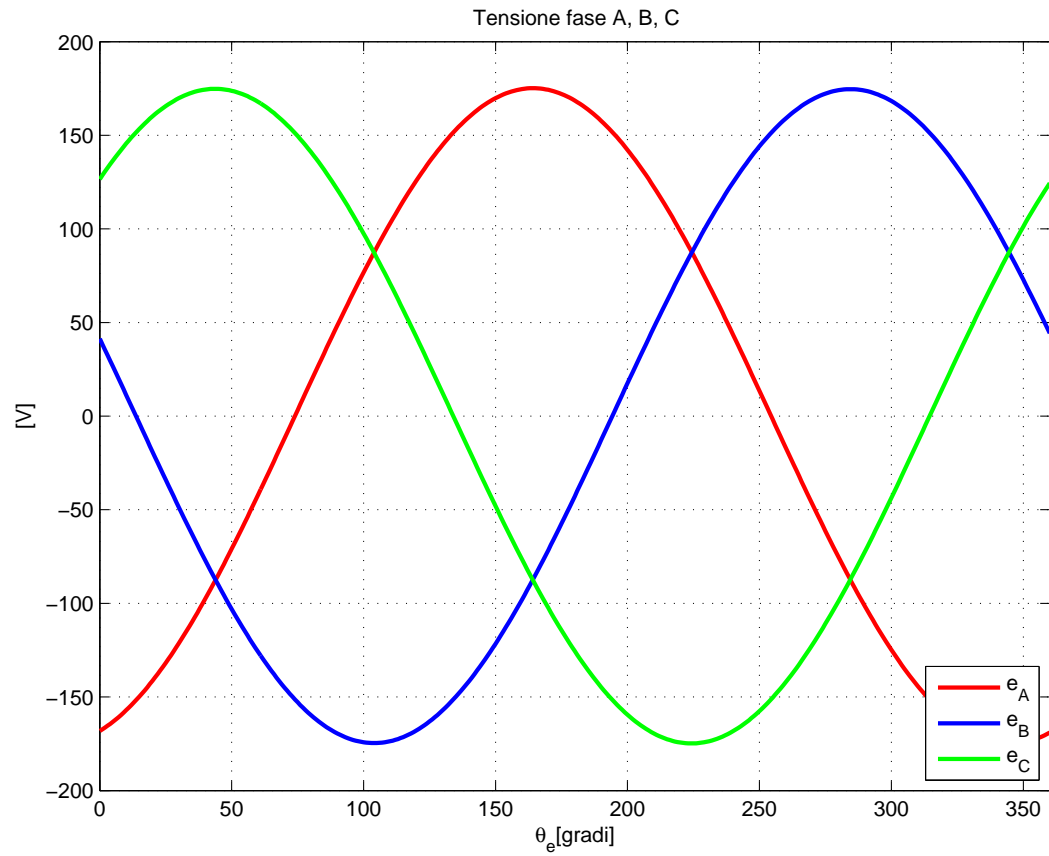


Figura 2.14: Componente fondamentale delle tensioni indotte sulla fase A, B, C a carico; conseguenza diretta del flusso concatenato calcolato sopra.

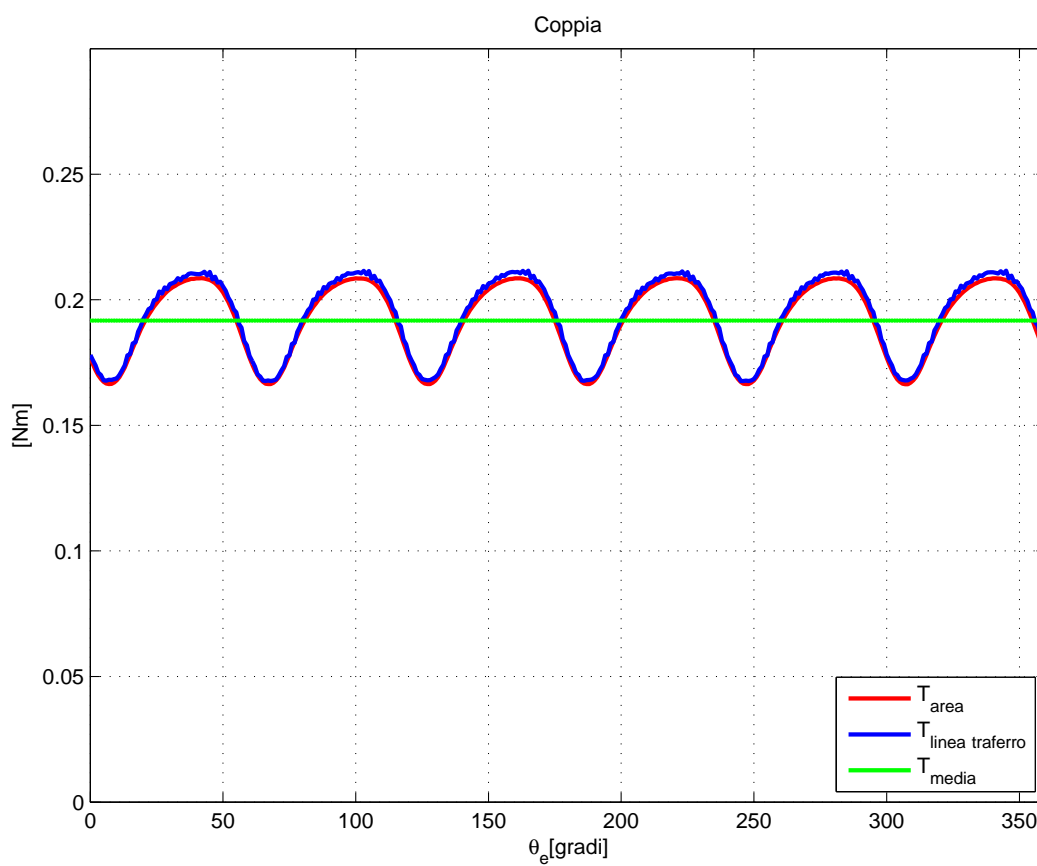


Figura 2.15: Coppia sviluppata dalla macchina a carico nominale. Oltre al suo valore medio si nota sovrapposta a esso una certa oscillazione, la stessa che si aveva nel funzionamento a vuoto dovuta all'impuntamento cioè alle irregolarità geometriche di statore e rotore.

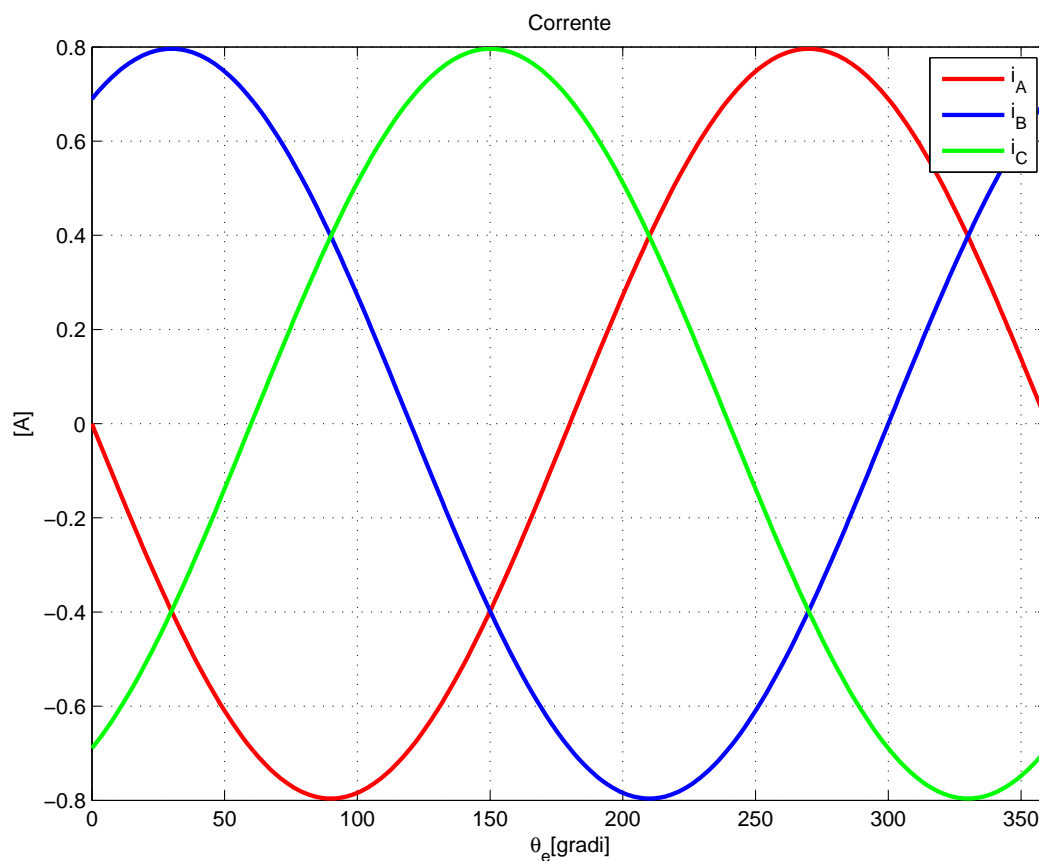


Figura 2.16: Correnti nominali assorbite dalla macchina e circolanti sulle fasi di statore.

2.11 Induzioni

Utilizzando il software di calcolo agli elementi finiti FEMM, si é potuta calcolare l'induzione al traferro della macchina e tracciarne l'andamento in funzione dell'angolo elettrico.

É stato possibile verificare la variazione nel passaggio da vuoto a carico, dovuta alla reazione di indotto, cioé all'opporci delle correnti indotte alla causa che le ha generate secondo la legge di Lenz. In alcuni tratti si assiste a un abbassamento e in altri a un innalzamento della curva a vuoto.

Il medesimo procedimento é stato applicato anche per le induzioni del magnete permanente. Anche in questo caso la reazione di indotto consente l'innalzamento e l'abbassamento dell'induzione residua del magnete. Si deve quindi prestare attenzione alla sua smagnetizzazione non caricando la macchina a tal punto da far abbassare l'induzione residua del magnete al di sotto del ginocchio del suo ciclo di isteresi.

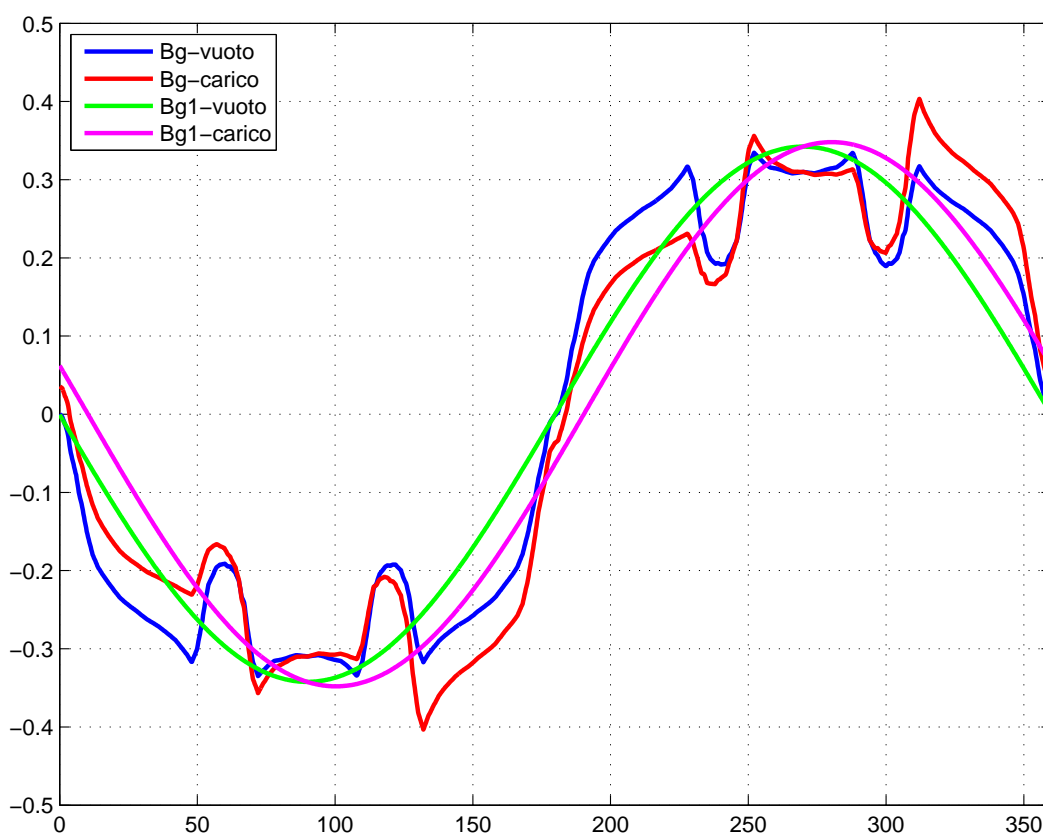


Figura 2.17: Andamento delle forme d'onda dell'induzione al traferro sotto un polo, quindi in 360 gradi elettrici. Nella forma d'onda a vuoto si notano i buchi dovuti alle aperture di cava, cioè l'abbassamento del valore di induzione nei punti in cui non vi è ferro affacciato al magnete ma aria. Nella forma d'onda a carico si nota invece l'effetto della reazione di indotto che in alcuni punti fa abbassare il valore di induzione al traferro e in altri invece lo esalta dando luogo a un picco subito dopo l'abbassamento dovuto all'apertura di cava.

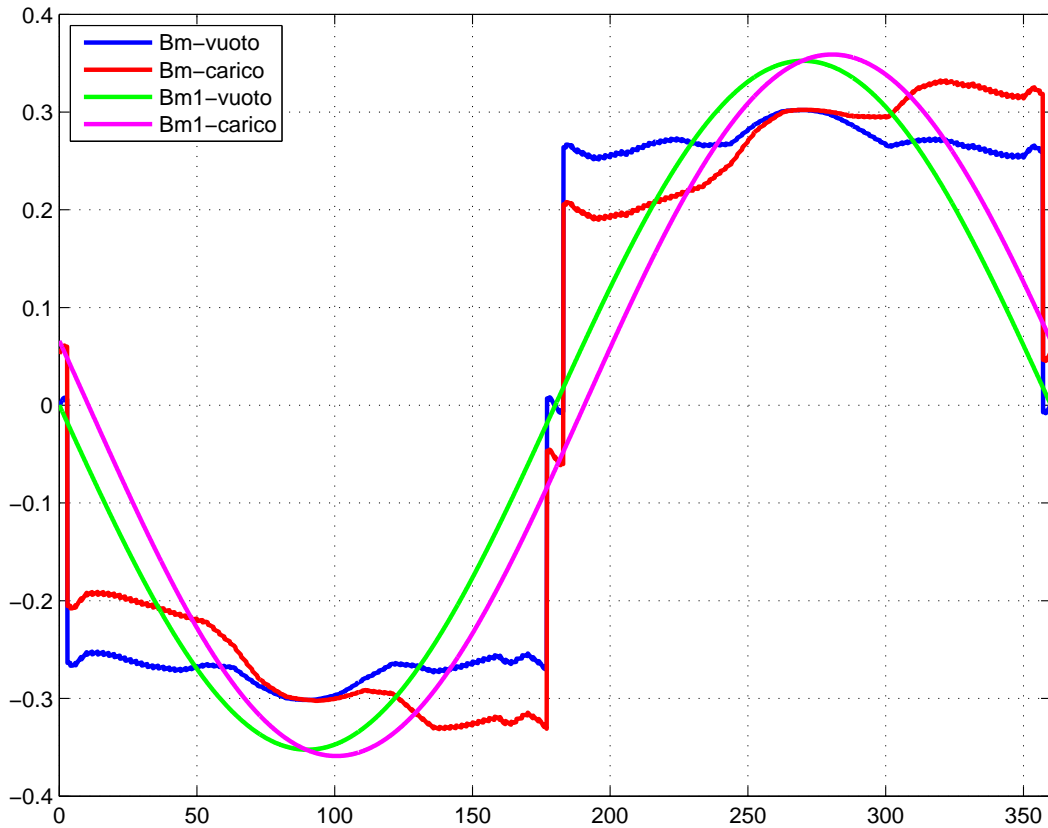


Figura 2.18: Andamento delle forme d'onda dell'induzione a metà dello spessore del magnete sotto un polo, quindi in 360 gradi elettrici. Nella forma d'onda a vuoto si notano le oscillazioni dovute alle aperture di cava, cioè l'abbassamento del valore di induzione nei punti in cui non ho ferro affacciato al magnete, ma aria. Nella forma d'onda a carico si nota invece l'effetto della reazione di indotto che in alcuni punti fa abbassare il valore di induzione all'interno del magnete ed in altri invece lo esalta dando luogo ad un picco subito dopo l'abbassamento dovuto all'apertura di cava. Si deve prestare attenzione agli abbassamenti del valore di induzione perché se vengono a superare il ginocchio della curva di B/H del magnete stesso si va incontro alla sua smagnetizzazione irreversibile.

2.12 Potenza e perdite

Un dato di partenza della macchina in esame é la velocità di rotazione in sincronismo, ovvero:

$$n_0 = \frac{60 \cdot f}{p} = 10000 \text{ rpm} \quad (2.39)$$

$$\Omega_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_0}{60} = 1047,2 \text{ rad/s} \quad (2.40)$$

ne deriva quindi la necessità di alimentare con frequenza:

$$f = \frac{n_0 \cdot p}{60} = \frac{10000 \cdot 2}{60} = 333,34 \text{ Hz} \quad (2.41)$$

Avendo in precedenza calcolato la coppia sviluppata, si può risalire alla potenza meccanica:

$$P_m = T \cdot \Omega_m = 0,175 \cdot 1047,2 = 184 \text{ W} \quad (2.42)$$

Dal programma di calcolo FEMM é stato possibile ricavare l'induzione massima nel dente e l'induzione massima nella corona:

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{B}_t = 0,613 \text{ T} \\ \hat{B}_{bi} = 0,407 \text{ T} \end{array} \right\}$$

1. Perdite Joule di Statore

Lunghezza rame di testata:

$$l_{ew} = 2,5 \cdot \frac{D}{p} = 2,5 \cdot \frac{0,040}{2} = 0,050 \text{ m} \quad (2.43)$$

Sezione commerciale conduttore in rame: $S_c = 0,125 \text{ mm}^2$

Resistenza di fase statorica:

$$\begin{aligned} R_{fase,s} &= \rho_{cu,75} \cdot \frac{Ns \cdot (Lz + l_{ew})}{S_c} \\ &= 0,022 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1036 \cdot (0,020 + 0,050)}{0,125 \cdot 10^{-6}} \\ &= 12,76 \Omega \end{aligned} \quad (2.44)$$

$$P_{J,s} = 3 \cdot R_{fase,s} \cdot I^2 = 3 \cdot 12,76 \cdot 0,656^2 = 16,47 \text{ W} \quad (2.45)$$

2. Perdite nel Ferro dei Denti

Per quanto riguarda i lamierini utilizzati, si assumono delle perdite specifiche $ps=10$ [W/kg], considerando induzione di valore 1,5 [T] e frequenza 50 [Hz]; devono essere riportate al valore massimo di induzione calcolata nel dente e al valore di frequenza di alimentazione.

$$\begin{aligned}
 ps &= k_{ist} \cdot \left(\frac{f}{50}\right) \cdot \left(\frac{B}{1,5}\right)^2 + k_{cp} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^2 \cdot \left(\frac{B}{1,5}\right)^2 \\
 &= 10 \cdot 0,7 \cdot \left(\frac{333,34}{50}\right) \cdot \left(\frac{0,6133}{1,5}\right)^2 + 10 \cdot 0,3 \cdot \left(\frac{333,34}{50}\right)^2 \cdot \left(\frac{0,6133}{1,5}\right)^2 \\
 &= 30,1 \text{ W/kg}
 \end{aligned}
 \tag{2.46}$$

Volume denti di statore:

$$\begin{aligned}
 V_t &= Q_s \cdot (Area_t \cdot Lz) \\
 &= 12 \cdot (65 \cdot 10^{-6} \cdot 0,020) \\
 &= 15,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3
 \end{aligned}
 \tag{2.47}$$

Peso dei denti di statore:

$$G_t = V_t \cdot \gamma_{fe} = 15,6 \cdot 10^{-6} \cdot 7800 = 0,122 \text{ kg} \tag{2.48}$$

$$P_{fe,t} = G_t \cdot ps \cdot k_{magg} = 0,12168 \cdot 30,1 \cdot 1,7 = 6,22 \text{ W} \tag{2.49}$$

3. Perdite nel Ferro della Corona

Per quanto riguarda i lamierini utilizzati, si assumono delle perdite specifiche $ps=10$ [W/kg], considerando induzione di valore 1,5 [T] e frequenza 50 [Hz]; devono essere riportate al valore massimo di induzione calcolata nel dente e al valore di frequenza di alimentazione.

$$\begin{aligned}
 ps &= k_{ist} \cdot \left(\frac{f}{50}\right) \cdot \left(\frac{B}{1,5}\right)^2 + k_{cp} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^2 \cdot \left(\frac{B}{1,5}\right)^2 \\
 &= 10 \cdot 0,7 \cdot \left(\frac{333,34}{50}\right) \cdot \left(\frac{0,4074}{1,5}\right)^2 + 10 \cdot 0,3 \cdot \left(\frac{333,34}{50}\right)^2 \cdot \left(\frac{0,4074}{1,5}\right)^2 \\
 &= 13,27 \text{ W/kg}
 \end{aligned}
 \tag{2.50}$$

Volume denti di statore:

$$V_{bi} = \left[\frac{\pi \cdot D_e^2}{4} - \frac{(D + 2 \cdot ht)^2 \cdot \pi}{4} \right] = 0,0000432 \text{ m}^3 \quad (2.51)$$

Peso dei denti di statore:

$$G_{bi} = V_{bi} \cdot \gamma_{fe} = 0,0000432 \cdot 7800 = 0,337 \text{ kg} \quad (2.52)$$

$$P_{fe,bi} = G_{bi} \cdot ps \cdot k_{magg} = 0,337 \cdot 13,27 \cdot 1,5 = 6,7 \text{ W} \quad (2.53)$$

4. Potenza Assorbita e Rendimento

La potenza elettrica assorbita dalla macchina é la somma della potenza meccanica fornita all'asse e delle perdite nel ferro e nel rame della macchina stessa.

Le perdite totali calcolate sono:

$$P_{J,s} + P_{fe,t} + P_{fe,bi} = 16,47 + 6,22 + 6,7 = 29,4 \text{ W} \quad (2.54)$$

Si deve tenere conto anche di un'ulteriore voce di perdita dovuta ad altri fenomeni dissipativi minori all'interno della macchina; prende il nome di perdite addizionali e viene empiricamente calcolata come:

$$P_{add} = 5\%(perdite\ totali) = 1,47 \text{ W} \quad (2.55)$$

Risulta infine una potenza complessivamente assorbita, elettrica:

$$\begin{aligned} P_e &= P_m + perdite\ totali + P_{add} \\ &= 184 + 29,4 + 1,47 \\ &= 214,87 \text{ W} \end{aligned} \quad (2.56)$$

Quindi un rendimento:

$$\eta = \frac{P_m}{P_e} = \frac{184}{214,87} = 0,856 \quad (2.57)$$

Capitolo 3

Analisi del terzo motore (config.24/4)

3.1 Premessa

Questa terza macchina é costituita da una lamiera statorica standard per motori asincroni a ventiquattro cave con diametro esterno 80 millimetri e diametro interno 45 millimetri su cui viene montato un avvolgimento a quattro poli a passo intero, non raccorciato, singolo strato; ne conseguiranno testate di lunghezza maggiore.

Il coefficiente di avvolgimento risultante é pari a 0,966.

Si ha un rapporto cave-poli pari a 12/2; lunghezza pacco statorico pari a 20 millimetri.

Il rotore (diametro esterno 43 millimetri e foro per inserimento dell'albero 15 millimetri) monta quattro magneti permanenti superficiali in ferrite di spessore 3,5 millimetri.

Questi magneti occupano praticamente tutti i 90 gradi a disposizione, lasciando solo un piccolo gioco per il loro inserimento.

3.2 Dati geometrici

Grandezza	Unitá di misura	Valore	Simbolo
Diametro esterno	mm	80	De
Diametro interno	mm	45	D
Numero cave		24	Qs
Sezione cava	mm^2	48,2	Sslot
Altezza cava	mm	11	hs
Apertura cava di statore	mm	2,3	wso
Altezza corona	mm	6,5	hbi
Larghezza dente	mm	2,7	wt
Traferro	mm	1	g
Diametro rotore	mm	43	Dr
Diametro foro rotore	mm	15	
Numero fasi		3	m
Numero poli		4	2p
Lunghezza pacco	mm	20	Lz
Frequenza	Hz	333,34	f
Velocita sincrona	rpm	10000	Ω

3.3 Dati magnete permanente

Grandezza	Unitá di misura	Valore	Simbolo
Tipo		Ferrite	
Forza coercitiva	A/m	289373	Hc
Permeabilitá relativa differenziale		1,1	μ_r
Induzione residua	T	0,4	Brem
Spessore magnete	mm	3,5	tm
Lunghezza magnete	mm	20	
Angolo coperto dal magnete	gradi	90	
Angolo realmente coperto dal magnete	gradi	87	α_m

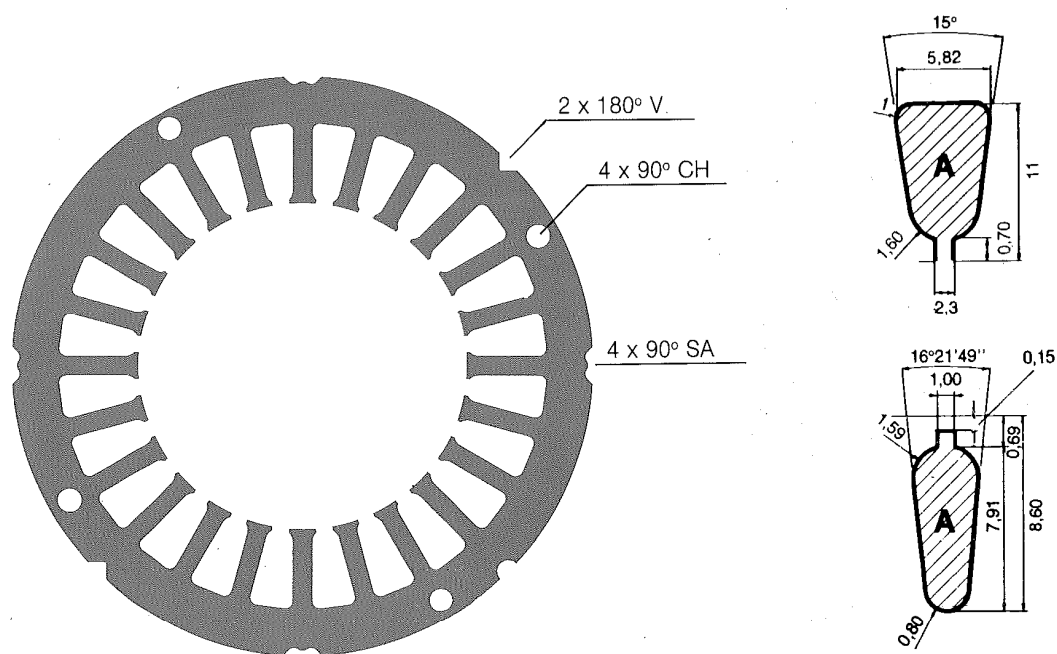


Figura 3.1: Geometria di statore.

3.4 Dati avvolgimento

Grandezza	Unità di misura	Valore	Simbolo
Numero strati in cava		1	nss
Numero spire serie per fase		1096	Ns
Conduttori in cava		137	ncs
Percorsi in parallelo		1	np
Conduttori per matassa		137	Nt
Numero matasse		2	nm
Sezione conduttore (filo) teorica	mm^2	0,140	S'c
Sezione conduttore (filo)	mm^2	0,159	Sc
Diametro conduttore (filo) teorico	mm	0,423	d'c
Diametro conduttore (filo)	mm	0,450	dc
Fattore di avvolgimento		0,966	kw

3.5 Matrice di cava

La matrice di cava indica la disposizione dell'avvolgimento nelle cave statoriche.

Per ciascuna fase (a, b, c) viene indicato il verso della corrente in cava (segno positivo o negativo) e la presenza di una o pi fasi nella cava (rispettivamente indicati con 1 o 0,5).

$$\begin{aligned}
 ka &= \{ \begin{array}{cccccccccccc} -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{array} \} \\
 kb &= \{ \begin{array}{cccccccccccc} 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \} \\
 kc &= \{ \begin{array}{cccccccccccc} 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \end{array} \}
 \end{aligned}$$

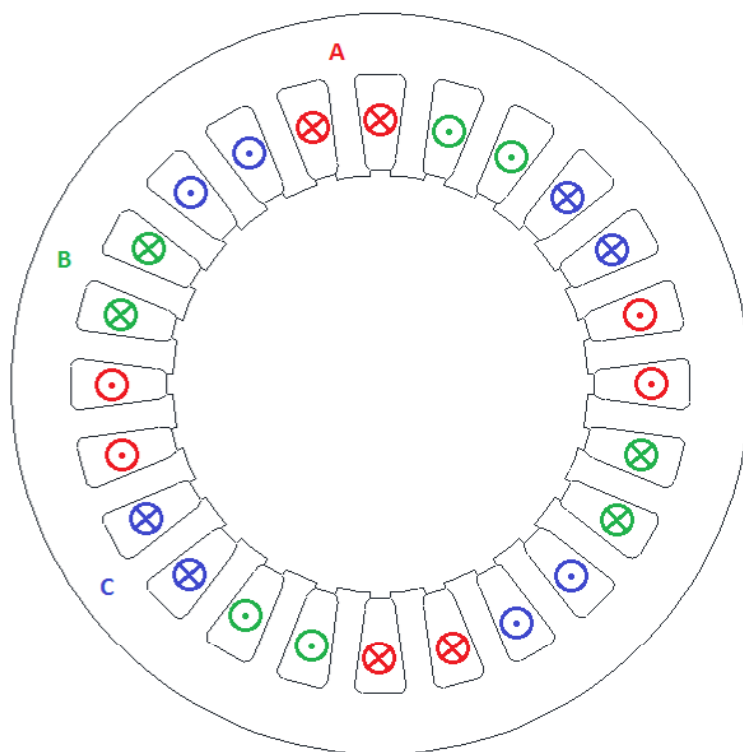


Figura 3.2: Collegamenti avvolgimento statorico: fase A, fase B, fase C.

3.6 Stella di cava

Realizzabilità dell'avvolgimento frazionario in questione:

$$t = M.C.D\{Q_s, p\} = 2 \quad (3.1)$$

$$\frac{Q_s}{m \cdot t} = \frac{24}{3 \cdot 2} = 4 \quad (3.2)$$

In questo caso l'avvolgimento può essere realizzato in quanto è risultato un numero intero.

$$\alpha_s = \frac{360}{Q_s} = \frac{360}{24} = 15 \quad (3.3)$$

$$\alpha_{se} = p \cdot \alpha_s = 30 \quad (3.4)$$

esprime la periodicità della stella di cava.

$$\frac{Q_s}{t} = 12 \quad (3.5)$$

$$t = 2 \quad (3.6)$$

Risulta una stella di cava composta da dodici raggi, ciascuno con due vettori.
Lunghezza matassa:

$$y_q = \frac{Q_s}{2p} = 6 \quad (3.7)$$

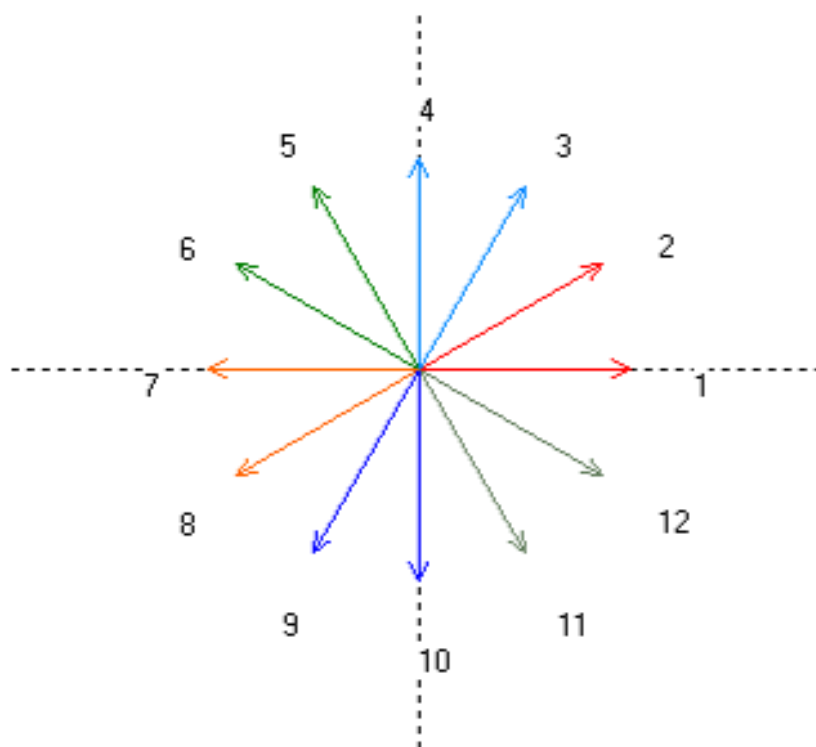


Figura 3.3: Stella di cava.

3.7 Calcoli analitici, vuoto

Data la geometria della macchina e le caratteristiche dei magneti montati a bordo del rotore, si possono ricavare alcune grandezze caratteristiche del funzionamento a vuoto. Ipotizzata la tensione in uscita ai morsetti che si vuole ottenere, si determina anche il numero di conduttori costituenti l'avvolgimento di ciascuna fase.

Nell'idealità del funzionamento della macchina si possono fare alcuni calcoli relativi alle grandezze in gioco, senza considerare lo spanciamento del flusso e altri fenomeni indesiderati per presenti al suo interno. Induzione al traferro:

$$\hat{B}_g = \frac{B_{rem}}{1 + \frac{g \cdot \mu_r}{tm}} = \frac{0,4}{1 + \frac{1 \cdot 1,1}{3,5}} = 0,304 \text{ T} \quad (3.8)$$

il cui valore medio:

$$B_{avg} = \frac{87}{90} \cdot \hat{B}_g = \frac{87}{90} \cdot 0,304 = 0,294 \text{ T} \quad (3.9)$$

Induzione media nel dente:

$$B_t = \frac{ps}{wt} \cdot B_{avg} = \frac{5,89}{3} \cdot 0,294 = 0,577 \text{ T} \quad (3.10)$$

dove:

$$ps = \frac{\pi \cdot D}{Q_s} = \frac{\pi \cdot 0,045}{24} \simeq 5,89 \text{ mm} \quad (3.11)$$

Flusso nel dente, flusso concatenato da una spira:

$$\Phi_t = \hat{\Lambda}_{1sp} = 5 \cdot B_t \cdot wt \cdot Lz = 3 \cdot 0,577 \cdot 0,003 \cdot 0,020 = 0,000173 \text{ Wb} \quad (3.12)$$

Moltiplico per 5 inquanto la spira abbraccia cinque denti di statore.

Questo valore di flusso non però quello reale, devo introdurre delle correzioni per tenere conto del suo spanciamento al traferro e dell'effetto delle cave.

Vengono introdotti due coefficienti correttivi $k\sigma$ e k_{carter} :

$$k\sigma = \frac{Sm}{Sg} = \frac{\tau_m}{\tau_m \cdot 2g} = \frac{35,34}{37,34} = 0,946 \quad (3.13)$$

dove:

$$\tau_m = \frac{\pi \cdot D}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,045}{4} = 35,34 \text{ mm} \quad (3.14)$$

$$k_{carter} = \frac{ps}{ps + g - \frac{3}{4} \cdot wso} = \frac{0,00589}{0,00589 + 0,001 - \frac{3}{4} \cdot 0,0023} = 1,14 \quad (3.15)$$

Il traferro viene maggiorato:

$$g' = g \cdot k_{carter} = 0,00114 \text{ m} \quad (3.16)$$

Quindi ora l'induzione al traferro:

$$\hat{B}_g = \frac{B_{rem} \cdot k\sigma}{1 + \frac{g' \cdot \mu_r \cdot k\sigma}{tm}} = \frac{0,4 \cdot 0,946}{1 + \frac{1,14 \cdot 1,1 \cdot 0,946}{3,5}} = 0,283 \text{ T} \quad (3.17)$$

il cui valore medio:

$$B_{avg} = \frac{87}{90} \cdot \hat{B}_g = \frac{87}{90} \cdot 0,283 = 0,273 \text{ T} \quad (3.18)$$

Induzione media nel dente:

$$B_t = \frac{ps}{wt} \cdot B_{avg} = \frac{5,89}{3} \cdot 0,273 = 0,536 \text{ T} \quad (3.19)$$

Flusso nel dente, flusso concatenato da una spira:

$$\Phi_t = \hat{\Lambda}_{1sp} = 5 \cdot B_t \cdot wt \cdot Lz = 5 \cdot 0,536 \cdot 0,003 \cdot 0,020 = 0,000161 \text{ Wb} \quad (3.20)$$

Chiedendo di avere una tensione ai morsetti del generatore di 130 V, con collegamento esterno delle fasi a triangolo, viene ad essere determinato un numero di conduttori per matassa:

$$\hat{E}_{avv} = \omega \cdot \Phi_t \cdot 4 \cdot Nt = 184 \text{ V di picco} \quad (3.21)$$

$$Nt = \frac{\hat{E}_{avv}}{\omega \cdot \Phi_t \cdot 2} = \frac{184}{2 \cdot \pi \cdot 333.34 \cdot 0,000161 \cdot 4} = 137 \quad (3.22)$$

Conduttori in cava:

$$ncs = Nt = 137 \text{ perché singolo strato} \quad (3.23)$$

Conduttori totali equivalenti serie:

$$N_s = \frac{ncs \cdot Q_s}{m} = \frac{137 \cdot 24}{3} = 1096 \quad (3.24)$$

Flusso concatenato da una fase:

$$\hat{\Lambda} = \Phi_t \cdot 4 \cdot Nt = 0,000161 \cdot 4 \cdot 137 = 0,0882 \text{ V}\cdot\text{s} \quad (3.25)$$

3.8 Simulazioni FEMM, vuoto

Le simulazioni fatte utilizzando il software di calcolo agli elementi finiti FEMM, hanno avuto come scopo la verifica dai calcoli analitici precedentemente eseguiti e l'accertamento della bontà delle scelte fino ad ora eseguite. Questo software calcola il vettore potenziale magnetico \vec{A} , per ogni elemento della mesh, sul piano trasversale rispetto alla lunghezza della macchina; per questo motivo il flusso concatenato con le varie fasi pu essere calcolato mediante le equazioni:

$$\hat{\Lambda}_A = ncs \cdot Lz \cdot \sum ka(i) \cdot \frac{1}{Sslot} \cdot \int A_z \cdot ds \quad (3.26)$$

$$\hat{\Lambda}_B = ncs \cdot Lz \cdot \sum kb(i) \cdot \frac{1}{Sslot} \cdot \int A_z \cdot ds \quad (3.27)$$

$$\hat{\Lambda}_C = ncs \cdot Lz \cdot \sum kc(i) \cdot \frac{1}{Sslot} \cdot \int A_z \cdot ds \quad (3.28)$$

Mentre le tensioni:

$$\hat{E}_A = \omega \cdot \hat{\Lambda}_A \quad (3.29)$$

$$\hat{E}_B = \omega \cdot \hat{\Lambda}_B \quad (3.30)$$

$$\hat{E}_C = \omega \cdot \hat{\Lambda}_C \quad (3.31)$$

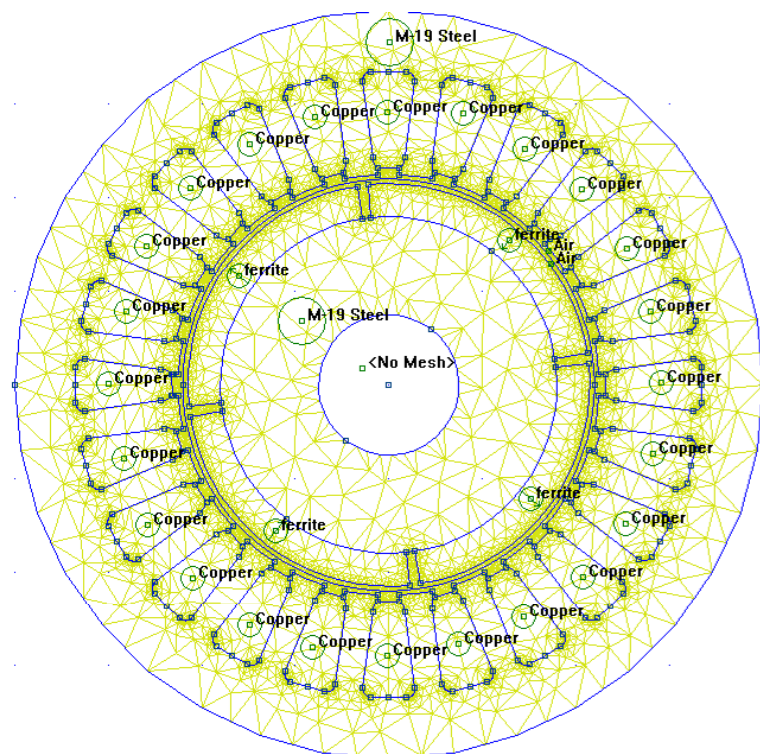


Figura 3.4: Mesh creata dal programma FEMM che va a discretizzare il dominio del problema, successivamente attraverso un'analisi agli elementi finiti, il programma estrapola i valori delle grandezze elettriche e magnetiche di nostro interesse.

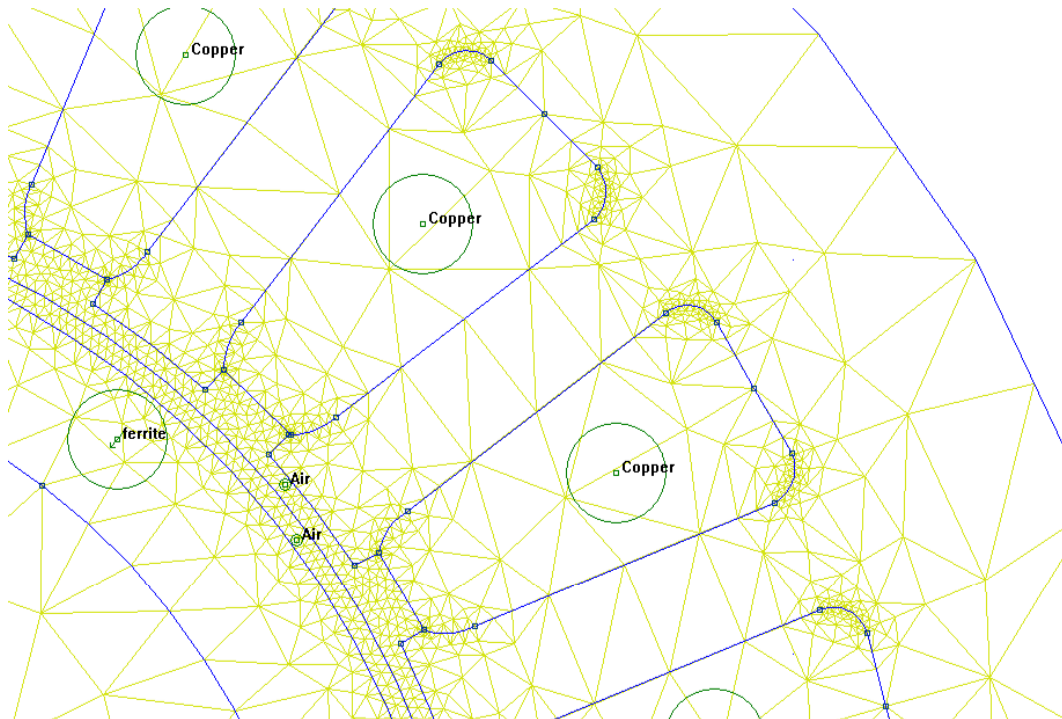


Figura 3.5: Il processo di discretizzazione del dominio deve essere fatto con cura al fine di ottenere una buona precisione nei risultati e per questo la mesh deve essere piú fitta possibile nel traferro, dove si concentra l'energia magnetica.

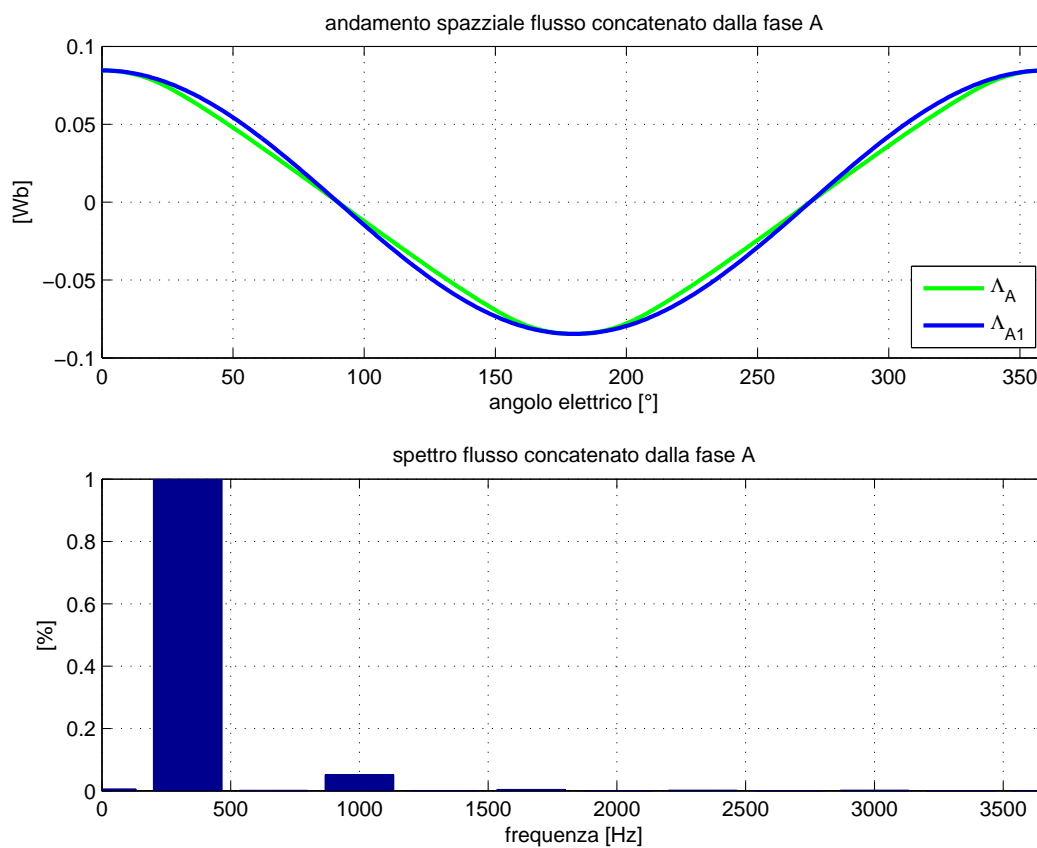


Figura 3.6: Flusso concatenato e relativo spettro della Fase A. Da questa figura si può notare l'andamento abbastanza sinusoidale del flusso concatenato di questa fase, ciò è confermato dal suo spettro che evidenzia la presenza preponderante della componente fondamentale e mette in luce che la leggera distorsione è dovuta a una lieve presenza di terza e quinta armonica.

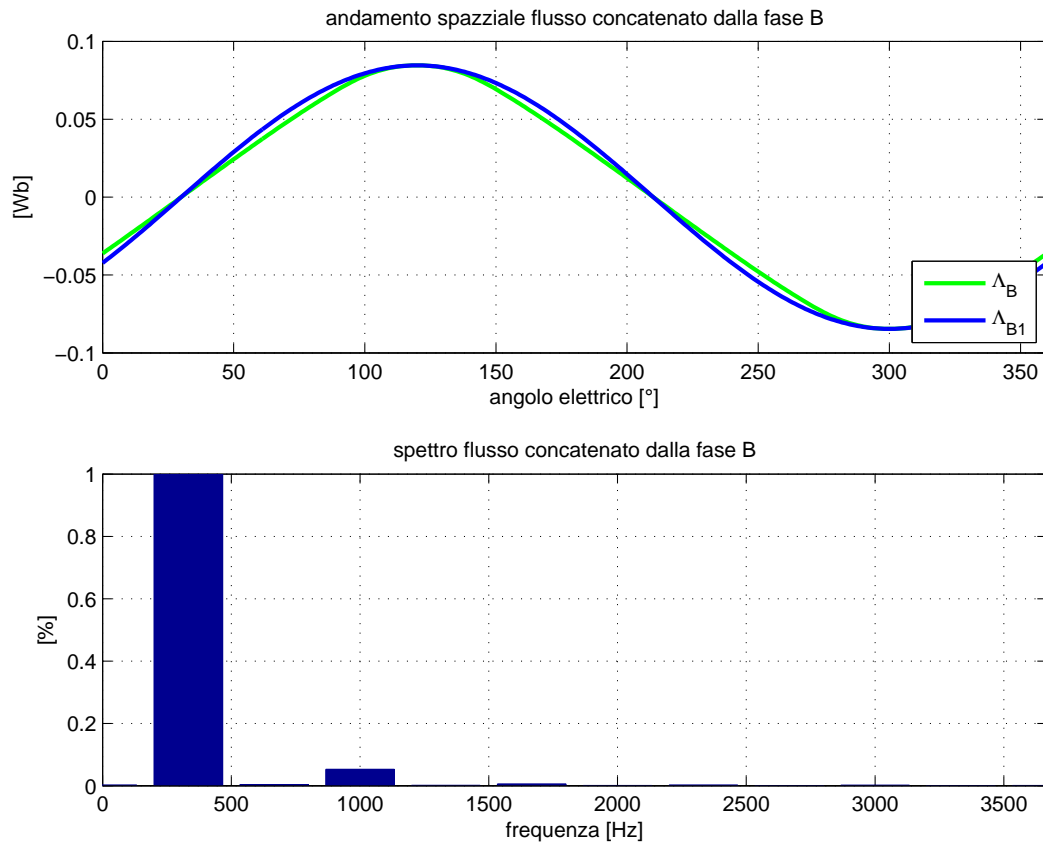


Figura 3.7: Flusso concatenato e relativo spettro della Fase B. Da questa figura si può notare l'andamento abbastanza sinusoidale del flusso concatenato di questa fase, ciò è confermato dal suo spettro che evidenzia la presenza preponderante della componente fondamentale e mette in luce che la leggera distorsione è dovuta a una lieve presenza di terza e quinta armonica.

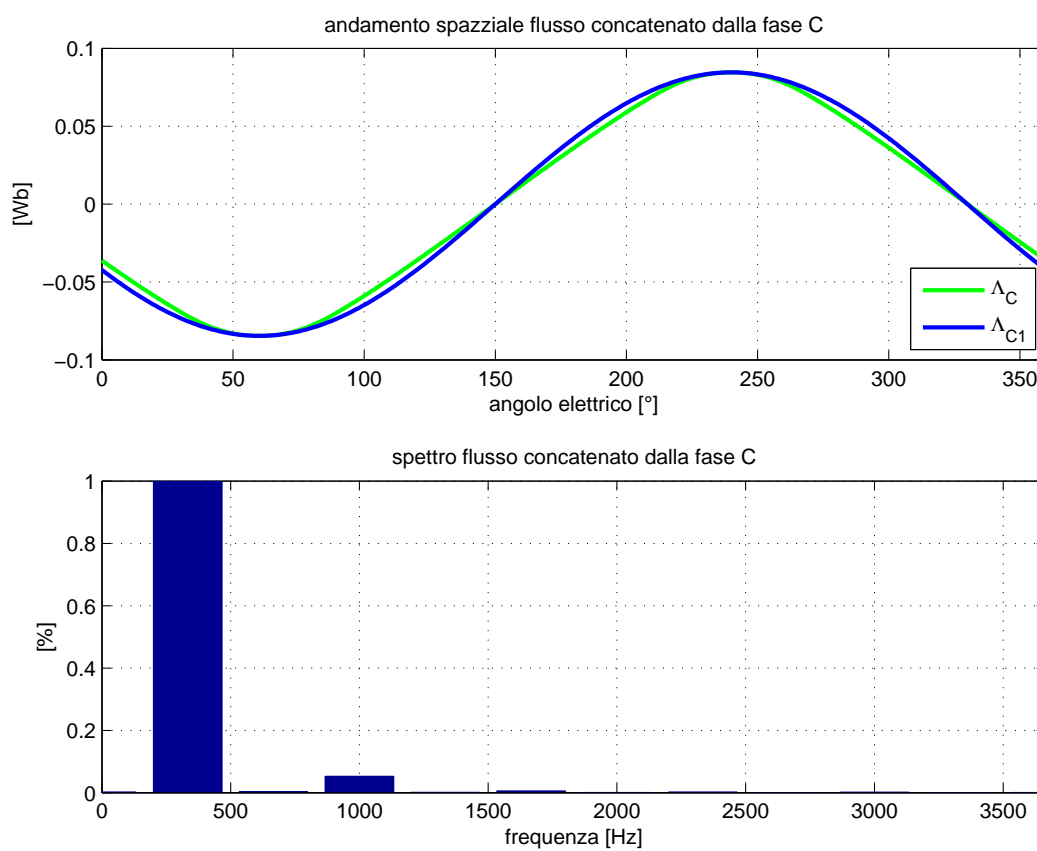


Figura 3.8: Flusso concatenato e relativo spettro della Fase C. Da questa figura si può notare l'andamento abbastanza sinusoidale del flusso concatenato di questa fase, ciò è confermato dal suo spettro che evidenzia la presenza preponderante della componente fondamentale e mette in luce che la leggera distorsione è dovuta a una lieve presenza di terza e quinta armonica.

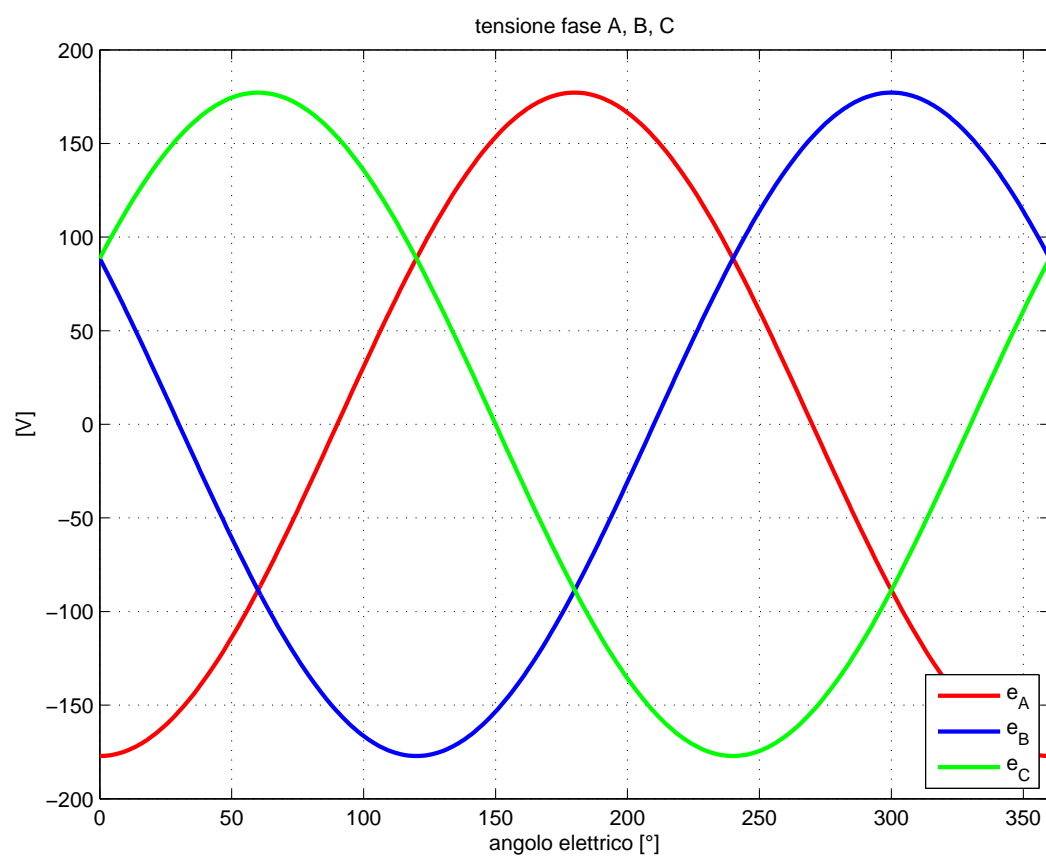


Figura 3.9: Componente fondamentale delle tensioni indotte sulla fase A, B, C; conseguenza diretta del flusso concatenato calcolato sopra.

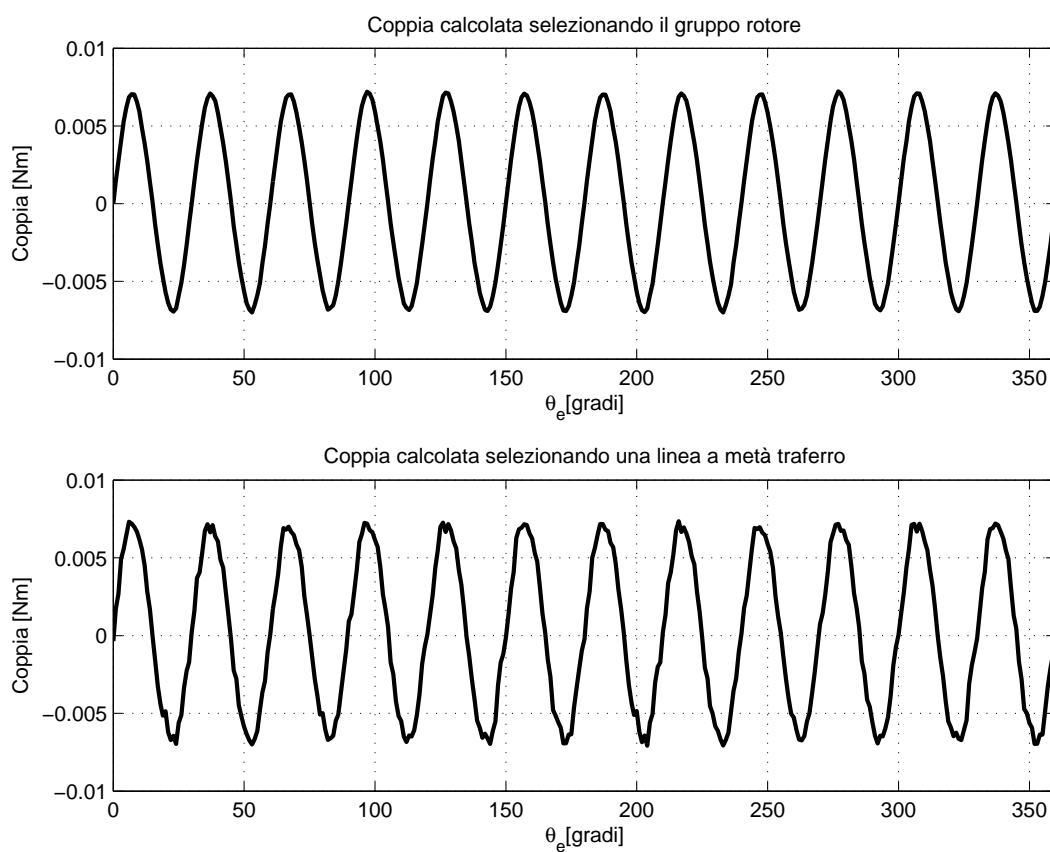


Figura 3.10: Coppia sviluppata nel funzionamento a vuoto del motore, teoricamente nulla, ma in conseguenza alle inevitabili irregolarità nella geometria di statore e rotore risulta diversa da zero. Prende il nome di coppia di impuntamento (cogging).

3.9 Calcoli analitici, carico

Innanzitutto é necessario stimare una certa densità di corrente nei conduttori, funzione della possibilità di smaltire il calore prodotto dalle perdite della macchina. Altro parametro di stima é il coefficiente di riempimento della cava, cioè in che percentuale la sezione di cava viene realmente riempita di conduttori attivi, quindi di rame.

La scelta é stata entro valori tipici, in particolare:

- $J=5 \text{ A/mm}^2$;
- $k_{fill}=0,4$.

Si potuto ricavare in conseguenza la corrente in cava:

$$I = S_{slot} \cdot k_{fill} \cdot J = 48,2 \cdot 0,4 \cdot 5 = 96,4 \text{ A} \quad (3.32)$$

Oltre alla corrente di avvolgimento:

$$I_{avv} = \frac{I}{ncs} = \frac{96,4}{137} = 0,704 \text{ A} \quad (3.33)$$

Sezione conduttore:

$$S_c = \frac{S_{slot} \cdot k_{fill}}{ncs} = \frac{48,2 \cdot 0,4}{137} = 0,140 \text{ mm}^2 \quad (3.34)$$

il cui diametro risulta:

$$dc = 0,423 \text{ mm} \quad (3.35)$$

Diametro commerciale:

$$dc = 0,450 \text{ mm} \quad (3.36)$$

Il carico elettrico generato dalla corrente calcolata sopra risulta:

$$\hat{K}_s = \frac{3 \cdot kw \cdot N_s \cdot \hat{I}}{\pi \cdot D} = \frac{3 \cdot 0,966 \cdot 1096 \cdot 0,995}{\pi \cdot 0,045} = 22355 \text{ A/m} \quad (3.37)$$

La coppia prodotta risulta infine:

$$T = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot Lz \cdot \hat{K}_s \cdot \hat{B}_g = \frac{\pi}{4} \cdot 0,045^2 \cdot 0,020 \cdot 22355 \cdot 0,304 = 0,22 \text{ N}\cdot\text{m} \quad (3.38)$$

3.10 Simulazioni FEMM, carico

Il funzionamento a carico é stato simulato inviando nello statore della macchina le tre correnti di fase nominali, fasate in modo da far risultare il carico elettrico \hat{K}_s in fase con l'induzione a vuoto \hat{B}_g , affinché la macchina si trovasse a lavorare in coppia massima; come ipotizzato nei calcoli analitici.

Anche in questo caso sono stati calcolati i flussi concatenati e le tensioni ai morsetti della macchina, oltre che la coppia sviluppata.

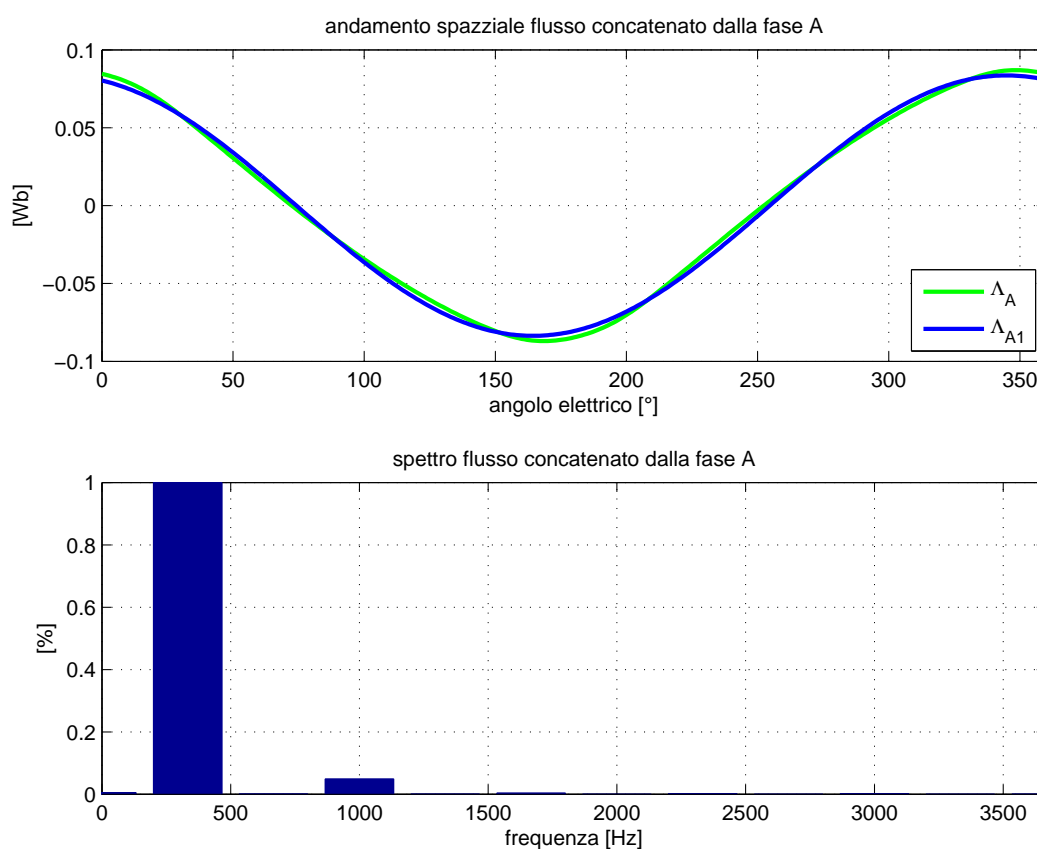


Figura 3.11: Flusso concatenato e relativo spettro della Fase A. Da questa figura si può notare l'andamento abbastanza sinusoidale del flusso concatenato di questa fase a carico, ciò é confermato dal suo spettro che evidenzia la presenza preponderante della componente fondamentale e mette in luce che la leggera distorsione é dovuta a una lieve presenza di terza e quinta armonica.

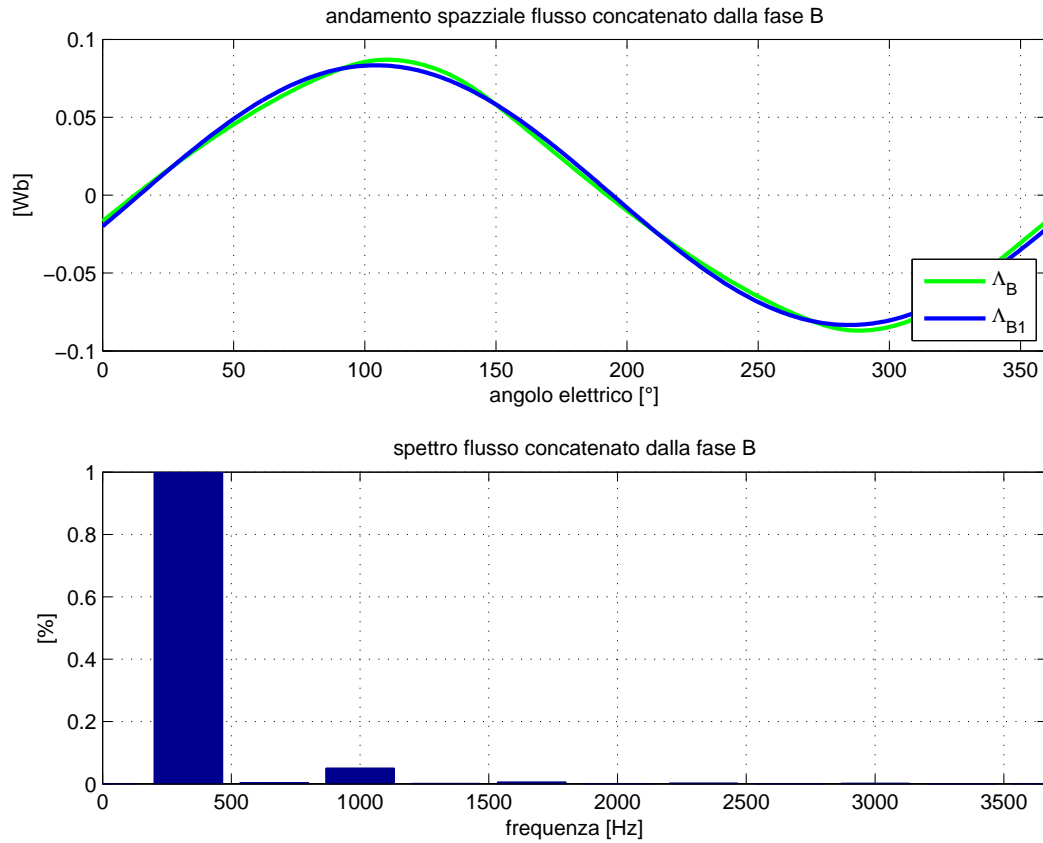


Figura 3.12: Flusso concatenato e relativo spettro della Fase B. Da questa figura si può notare l'andamento abbastanza sinusoidale del flusso concatenato di questa fase a carico, ciò è confermato dal suo spettro che evidenzia la presenza preponderante della componente fondamentale e mette in luce che la leggera distorsione è dovuta a una lieve presenza di terza e quinta armonica.

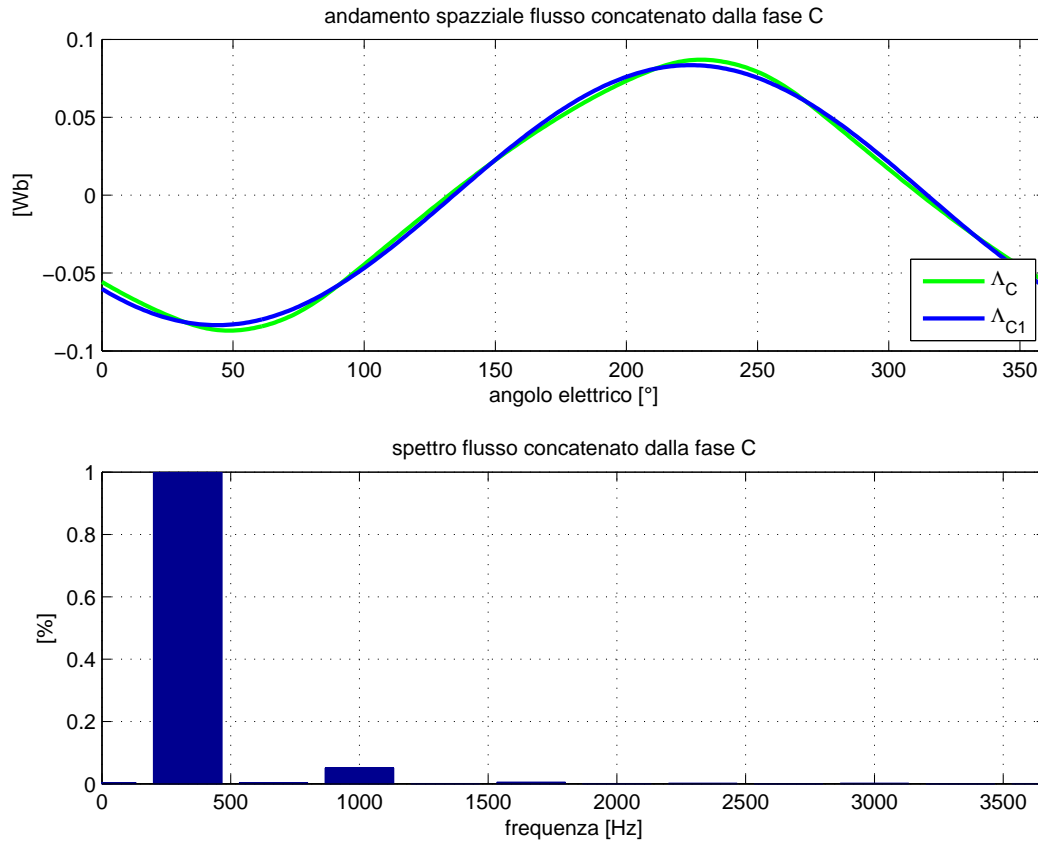


Figura 3.13: Flusso concatenato e relativo spettro della Fase C. Da questa figura si può notare l'andamento abbastanza sinusoidale del flusso concatenato di questa fase a carico, ciò è confermato dal suo spettro che evidenzia la presenza preponderante della componente fondamentale e mette in luce che la leggera distorsione è dovuta a una lieve presenza di terza e quinta armonica.

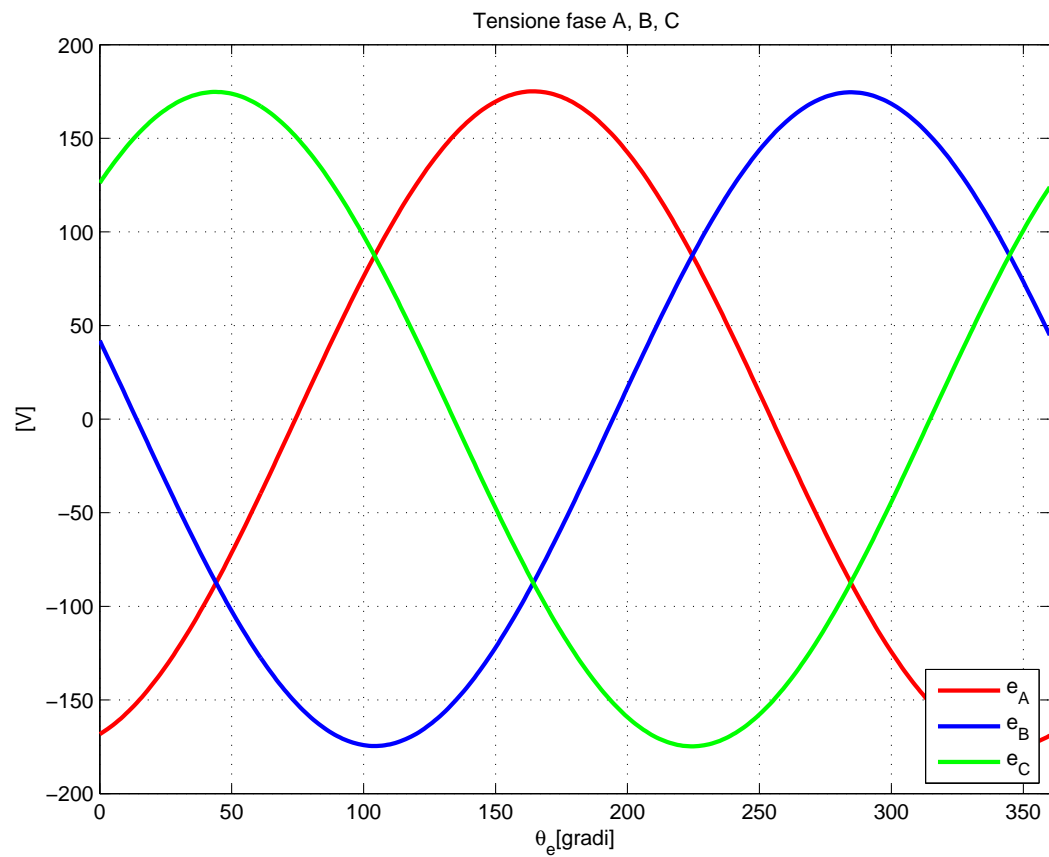


Figura 3.14: Componente fondamentale delle tensioni indotte sulla fase A, B, C a carico; conseguenza diretta del flusso concatenato calcolato sopra.

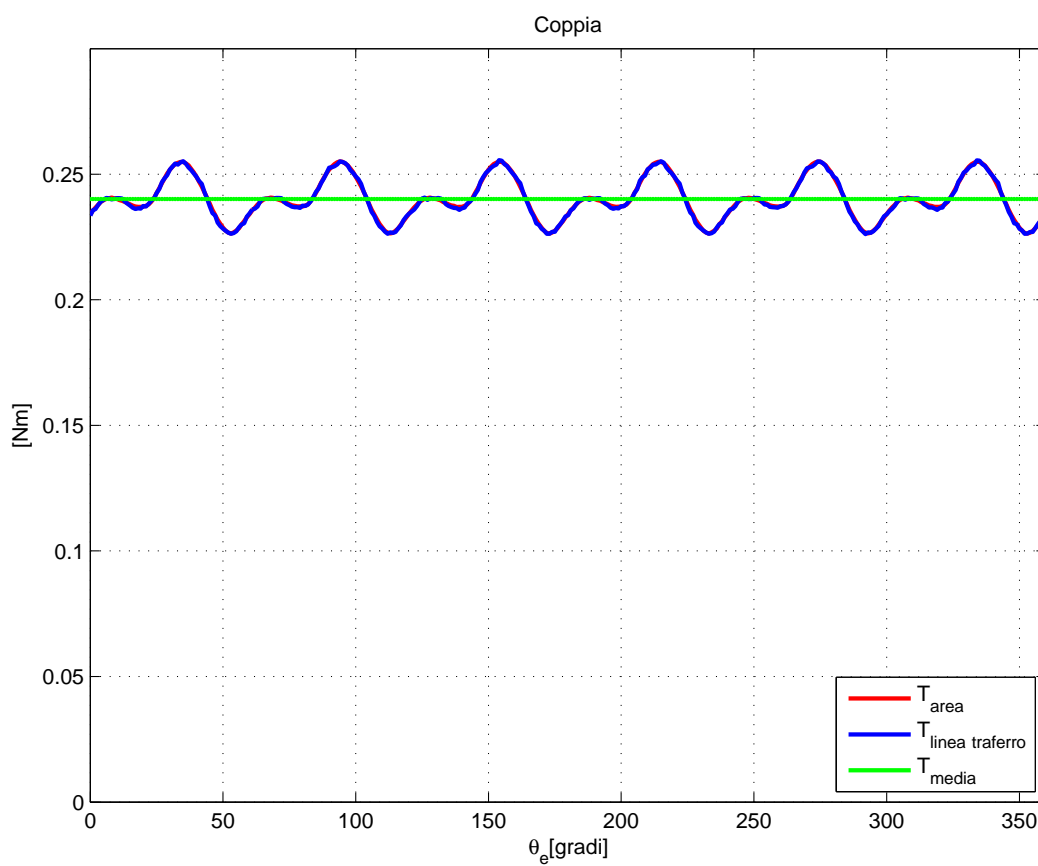


Figura 3.15: Coppia sviluppata dalla macchina a carico nominale. Oltre al suo valore medio si nota sovrapposta a esso una certa oscillazione, la stessa che si aveva nel funzionamento a vuoto dovuta all'impuntamento cioè alle irregolarità geometriche di statore e rotore.

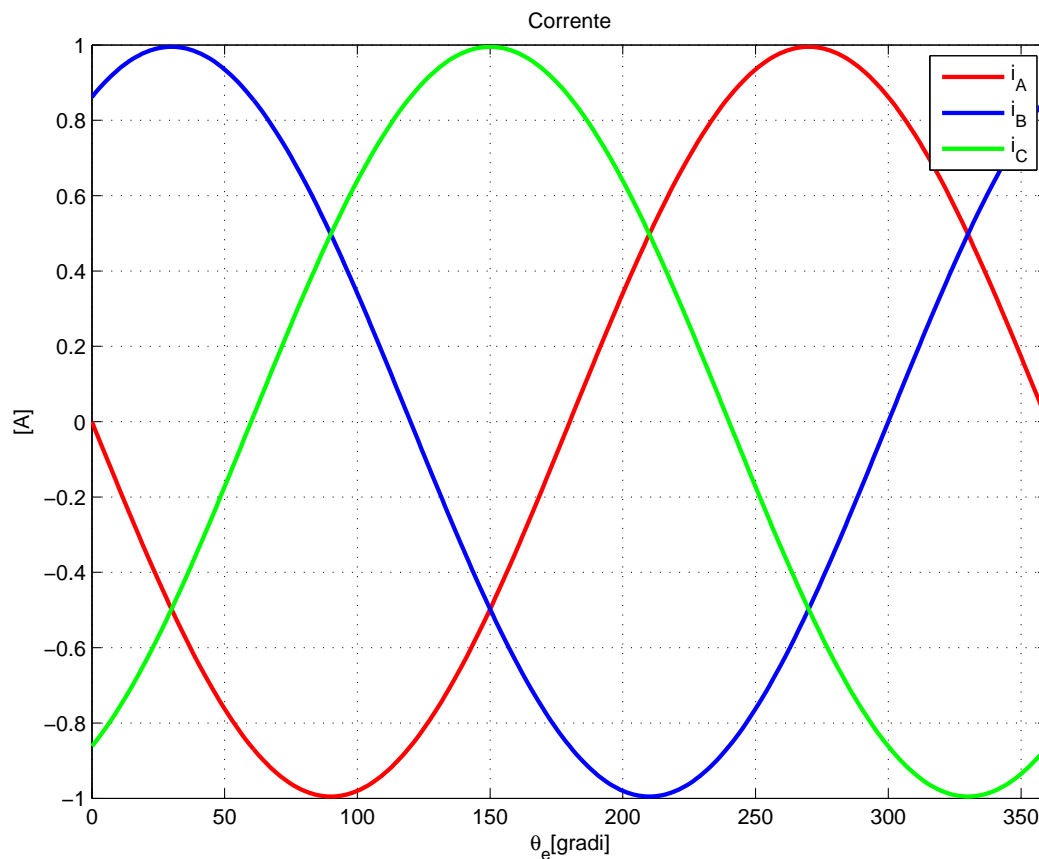


Figura 3.16: Correnti nominali assorbite dalla macchina e circolanti sulle fasi di statore.

3.11 Induzioni

Utilizzando il software di calcolo agli elementi finiti FEMM, si é potuta calcolare l'induzione al traferro della macchina e tracciarne l'andamento in funzione dell'angolo elettrico.

É stato possibile verificare la variazione nel passaggio da vuoto a carico, dovuta alla reazione di indotto, cioé all'opporsi delle correnti indotte alla causa che le ha generate secondo la legge di Lenz. In alcuni tratti si assiste a un abbassamento e in altri a un innalzamento della curva a vuoto.

Il medesimo procedimento é stato applicato anche per le induzioni del magnete permanente. Anche in questo caso la reazione di indotto consente l'innalzamento e l'abbassamento dell'induzione residua del magnete. Si deve quindi prestare attenzione alla sua smagnetizzazione non caricando la macchina a tal punto da far abbassare l'induzione residua del magnete al di sotto del ginocchio del suo ciclo di isteresi.

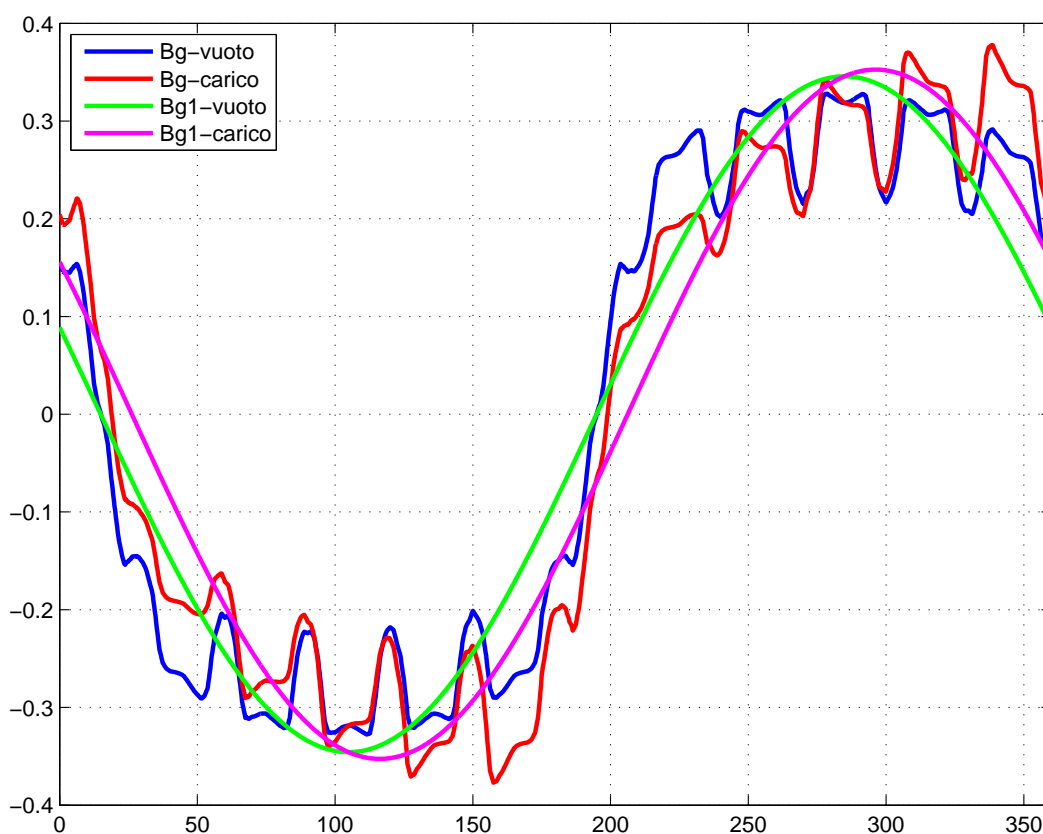


Figura 3.17: Andamento delle forme d'onda dell'induzione al traferro sotto un polo, quindi in 360 gradi elettrici. Nella forma d'onda a vuoto si notano i buchi dovuti alle aperture di cava, cioè l'abbassamento del valore di induzione nei punti in cui non vi è ferro affacciato al magnete ma aria. Nella forma d'onda a carico si nota invece l'effetto della reazione di indotto che in alcuni punti fa abbassare il valore di induzione al traferro e in altri invece lo esalta dando luogo a un picco subito dopo l'abbassamento dovuto all'apertura di cava.

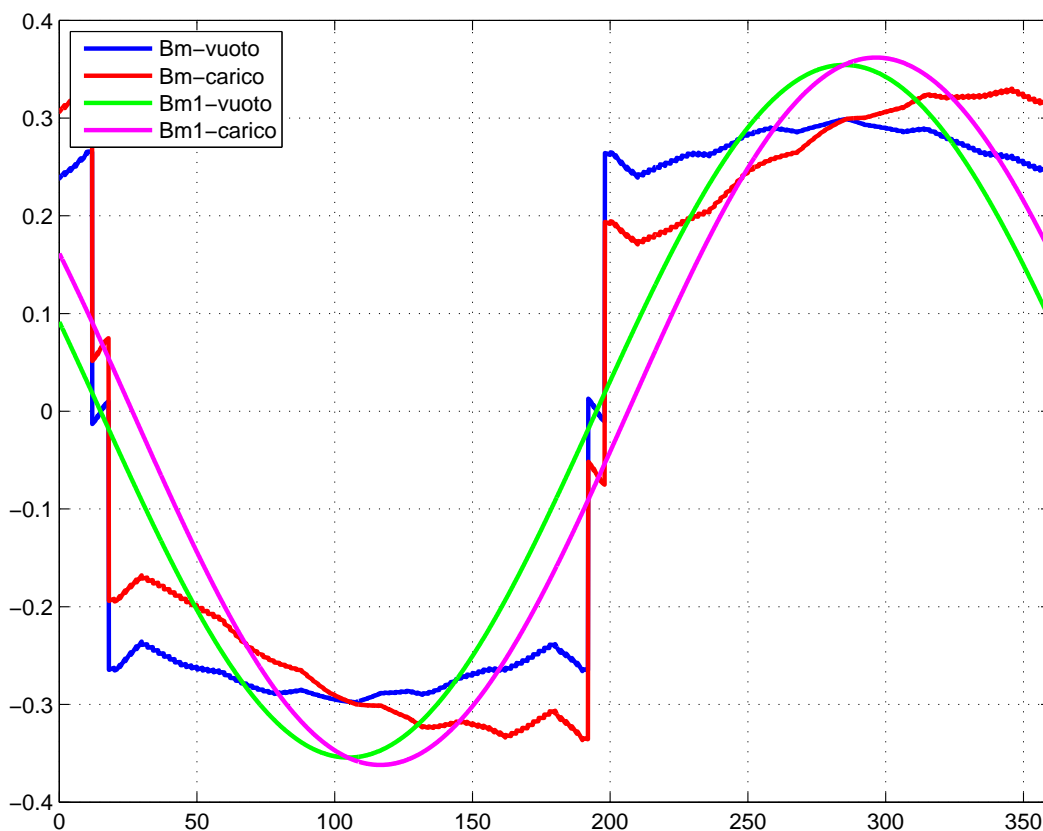


Figura 3.18: Andamento delle forme d'onda dell'induzione a metà dello spessore del magnete sotto un polo, quindi in 360 gradi elettrici. Nella forma d'onda a vuoto si notano le oscillazioni dovute alle aperture di cava, cioè l'abbassamento del valore di induzione nei punti in cui non ho ferro affacciato al magnete, ma aria. Nella forma d'onda a carico si nota invece l'effetto della reazione di indotto che in alcuni punti fa abbassare il valore di induzione all'interno del magnete ed in altri invece lo esalta dando luogo ad un picco subito dopo l'abbassamento dovuto all'apertura di cava. Si deve prestare attenzione agli abbassamenti del valore di induzione perché se vengono a superare il ginocchio della curva di B/H del magnete stesso si va incontro alla sua smagnetizzazione irreversibile.

3.12 Potenza e perdite

Un dato di partenza della macchina in esame é la velocità di rotazione in sincronismo, ovvero:

$$n_0 = \frac{60 \cdot f}{p} = 10000 \text{ rpm} \quad (3.39)$$

$$\Omega_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_0}{60} = 1047,2 \text{ rad/s} \quad (3.40)$$

ne deriva quindi la necessità di alimentare con frequenza:

$$f = \frac{n_0 \cdot p}{60} = \frac{10000 \cdot 2}{60} = 333,34 \text{ Hz} \quad (3.41)$$

Avendo in precedenza calcolato la coppia sviluppata, si può risalire alla potenza meccanica:

$$P_m = T \cdot \Omega_m = 0,22 \cdot 1047,2 = 230,4 \text{ W} \quad (3.42)$$

Dal programma di calcolo FEMM é stato possibile ricavare l'induzione massima nel dente e l'induzione massima nella corona:

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{B}_t = 0,680 \text{ T} \\ \hat{B}_{bi} = 0,646 \text{ T} \end{array} \right\}$$

1. Perdite Joule di Statore

Lunghezza rame di testata:

$$l_{ew} = 2,5 \cdot \frac{D}{p} = 2,5 \cdot \frac{0,045}{2} = 0,0562 \text{ m} \quad (3.43)$$

Sezione commerciale conduttore in rame: $S_c = 0,159 \text{ mm}^2$

Resistenza di fase statorica:

$$\begin{aligned} R_{fase,s} &= \rho_{cu,75} \cdot \frac{N_s \cdot (L_z + l_{ew})}{S_c} \\ &= 0,022 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1096 \cdot (0,020 + 0,0562)}{0,159 \cdot 10^{-6}} \\ &= 11,5 \Omega \end{aligned} \quad (3.44)$$

$$P_{J,s} = 3 \cdot R_{fase,s} \cdot I^2 = 3 \cdot 11,563 \cdot 0,704^2 = 17,2 \text{ W} \quad (3.45)$$

2. Perdite nel Ferro dei Denti

Per quanto riguarda i lamierini utilizzati, si assumono delle perdite specifiche $ps=10$ [W/kg], considerando induzione di valore $1,5$ [T] e frequenza 50 [Hz]; devono essere riportate al valore massimo di induzione calcolata nel dente e al valore di frequenza di alimentazione.

$$\begin{aligned}
 ps &= k_{ist} \cdot \left(\frac{f}{50}\right) \cdot \left(\frac{B}{1,5}\right)^2 + k_{cp} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^2 \cdot \left(\frac{B}{1,5}\right)^2 \\
 &= 10 \cdot 0,7 \cdot \left(\frac{333,34}{50}\right) \cdot \left(\frac{0,68}{1,5}\right)^2 + 10 \cdot 0,3 \cdot \left(\frac{333,34}{50}\right)^2 \cdot \left(\frac{0,68}{1,5}\right)^2 \\
 &= 37 \text{ W/kg}
 \end{aligned}
 \tag{3.46}$$

Volume denti di statore:

$$\begin{aligned}
 V_t &= Q_s \cdot (Area_t \cdot Lz) \\
 &= 24 \cdot (35 \cdot 10^{-6} \cdot 0,020) \\
 &= 16,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3
 \end{aligned}
 \tag{3.47}$$

Peso dei denti di statore:

$$G_t = V_t \cdot \gamma_{fe} = 16,8 \cdot 10^{-6} \cdot 7800 = 0,131 \text{ kg} \tag{3.48}$$

$$P_{fe,t} = G_t \cdot ps \cdot k_{magg} = 0,131 \cdot 37 \cdot 1,7 = 8,24 \text{ W} \tag{3.49}$$

3. Perdite nel Ferro della Corona

Per quanto riguarda i lamierini utilizzati, si assumono delle perdite specifiche $ps=10$ [W/kg], considerando induzione di valore $1,5$ [T] e frequenza 50 [Hz]; devono essere riportate al valore massimo di induzione calcolata nel dente e al valore di frequenza di alimentazione.

$$\begin{aligned}
 ps &= k_{ist} \cdot \left(\frac{f}{50}\right) \cdot \left(\frac{B}{1,5}\right)^2 + k_{cp} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^2 \cdot \left(\frac{B}{1,5}\right)^2 \\
 &= 10 \cdot 0,7 \cdot \left(\frac{333,34}{50}\right) \cdot \left(\frac{0,646}{1,5}\right)^2 + 10 \cdot 0,3 \cdot \left(\frac{333,34}{50}\right)^2 \cdot \left(\frac{0,646}{1,5}\right)^2 \\
 &= 33,4 \text{ W/kg}
 \end{aligned}
 \tag{3.50}$$

Volume denti di statore:

$$V_{bi} = \left[\frac{\pi \cdot D_e^2}{4} - \frac{(D + 2 \cdot ht)^2 \cdot \pi}{4} \right] = 0,0000302 \text{ m}^3 \quad (3.51)$$

Peso dei denti di statore:

$$G_{bi} = V_{bi} \cdot \gamma_{fe} = 0,0000302 \cdot 7800 = 0,235 \text{ kg} \quad (3.52)$$

$$P_{fe,bi} = G_{bi} \cdot ps \cdot k_{magg} = 0,2355 \cdot 33,4 \cdot 1,5 = 11,79 \text{ W} \quad (3.53)$$

4. Potenza Assorbita e Rendimento

La potenza elettrica assorbita dalla macchina é la somma della potenza meccanica fornita all'asse e delle perdite nel ferro e nel rame della macchina stessa.

Le perdite totali calcolate sono:

$$P_{J,s} + P_{fe,t} + P_{fe,bi} = 17,2 + 8,24 + 11,79 = 37,23 \text{ W} \quad (3.54)$$

Si deve tenere conto anche di un'ulteriore voce di perdita dovuta ad altri fenomeni dissipativi minori all'interno della macchina; prende il nome di perdite addizionali e viene empiricamente calcolata come:

$$P_{add} = 5\%(perdite\ totali) = 1,86 \text{ W} \quad (3.55)$$

Risulta infine una potenza complessivamente assorbita, elettrica:

$$\begin{aligned} P_e &= P_m + \text{perdite totali} + P_{add} \\ &= 230,4 + 37,23 + 1,86 \\ &= 270 \text{ W} \end{aligned} \quad (3.56)$$

Quindi un rendimento:

$$\eta = \frac{P_m}{P_e} = \frac{230,4}{270} = 0,853 \quad (3.57)$$

Capitolo 4

Analisi del quarto motore (config.12/4)

4.1 Premessa

Questa quarta macchina é costituita da una lamiera statorica standard per motori asincroni a dodici cave con diametro esterno 80 millimetri e diametro interno 40 millimetri; su cui viene montato un avvolgimento a quattro poli raccorciato di due cave, alternato, singolo strato; quindi si viene ad avere delle matasse avvolte attorno ad un solo dente.

In questo modo la lunghezza delle testate risulterà minimizzata, riducendo il volume di rame impiegato per la realizzazione degli avvolgimenti stessi.

Il coefficiente di avvolgimento risultante é pari a 0,5.

Si ha un rapporto cave-poli pari a $6/2$; lunghezza pacco statorico pari a 20 millimetri.

Il rotore (diametro esterno 38 millimetri e foro per inserimento dell'albero 15 millimetri) monta quattro magneti permanenti superficiali in ferrite di spessore 3,5 millimetri.

Questi magneti occupano praticamente tutti i 90 gradi a disposizione, lasciando solo un piccolo gioco per il loro inserimento.

4.2 Dati geometrici

Grandezza	Unitá di misura	Valore	Simbolo
Diametro esterno	mm	80	De
Diametro interno	mm	40	D
Numero cave		12	Qs
Sezione cava	mm ²	85	Sslot
Altezza cava	mm	10,25	hs
Apertura cava di statore	mm	3,3	wso
Altezza corona	mm	9,75	hbi
Larghezza dente	mm	4,4	wt
Traferro	mm	1	g
Diametro rotore	mm	38	Dr
Diametro foro rotore	mm	15	
Numero fasi		3	m
Numero poli		4	2p
Lunghezza pacco	mm	20	Lz
Frequenza	Hz	333,34	f
Velocita sincrona	rpm	10000	Ω

4.3 Dati magnete permanente

Grandezza	Unitá di misura	Valore	Simbolo
Tipo		Ferrite	
Forza coercitiva	A/m	289373	Hc
Permeabilitá relativa differenziale		1,1	μ_r
Induzione residua	T	0,4	Brem
Spessore magnete	mm	3,5	tm
Lunghezza magnete	mm	20	
Angolo coperto dal magnete	gradi	90	
Angolo realmente coperto dal magnete	gradi	87	α_m

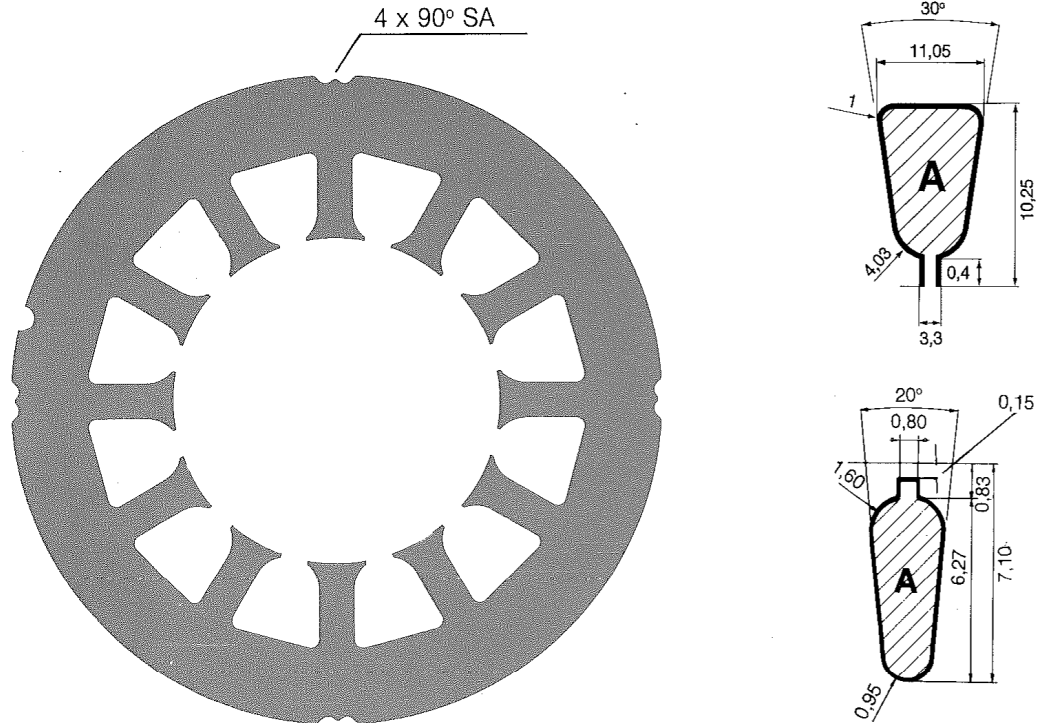


Figura 4.1: Geometria di statore.

4.4 Dati avvolgimento

Grandezza	Unità di misura	Valore	Simbolo
Numero strati in cava		1	nss
Numero spire serie per fase		3092	Ns
Conduttori in cava		773	ncs
Percorsi in parallelo		1	np
Conduttori per matassa		773	Nt
Numero matasse		2	nm
Sezione conduttore (filo) teorica	mm^2	0,044	S'c
Sezione conduttore (filo)	mm^2	0,049	Sc
Diametro conduttore (filo) teorico	mm	0,236	d'c
Diametro conduttore (filo)	mm	0,250	dc
Fattore di avvolgimento		0,5	kw

4.5 Matrice di cava

La matrice di cava indica la disposizione dell'avvolgimento nelle cave statoriche.

Per ciascuna fase (a, b, c) viene indicato il verso della corrente in cava (segno positivo o negativo) e la presenza di una o pi fasi nella cava (rispettivamente indicati con 1 o 0,5).

$$\begin{aligned} ka &= \{ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \} \\ kb &= \{ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \} \\ kc &= \{ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \} \end{aligned}$$

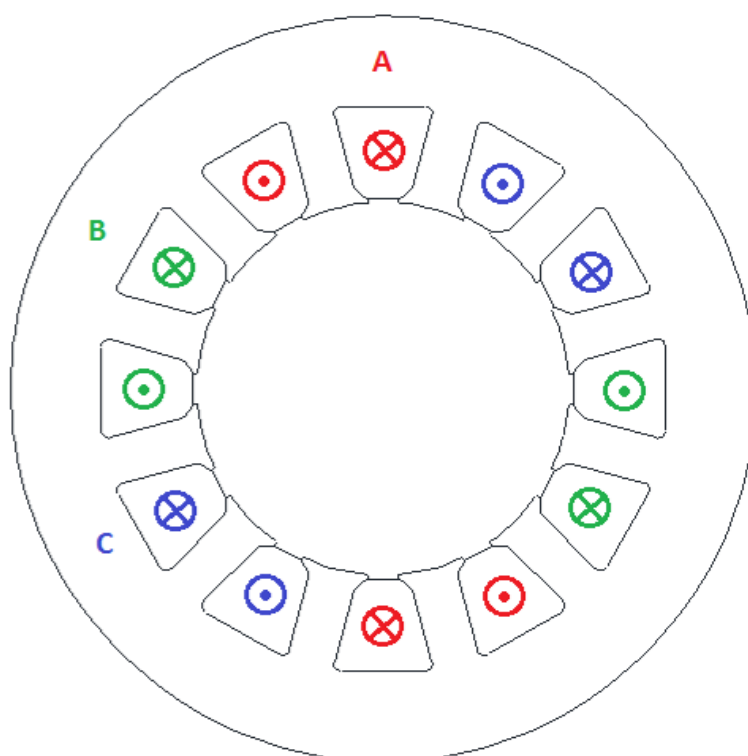


Figura 4.2: Collegamenti avvolgimento statorico: fase A, fase B, fase C.

4.6 Stella di cava

Realizzabilità dell'avvolgimento frazionario in questione:

$$t = M.C.D\{Q_s, p\} = 2 \quad (4.1)$$

$$\frac{Q_s}{m \cdot t} = \frac{12}{3 \cdot 2} = 2 \quad (4.2)$$

In questo caso l'avvolgimento può essere realizzato in quanto è risultato un numero intero.

$$\alpha_s = \frac{360}{Q_s} = \frac{360}{12} = 30 \quad (4.3)$$

$$\alpha_{se} = p \cdot \alpha_s = 60 \quad (4.4)$$

esprime la periodicit  della stella di cava.

$$\frac{Q_s}{t} = 6 \quad (4.5)$$

$$t = 2 \quad (4.6)$$

Risulta una stella di cava composta da sei raggi, ciascuno con due vettori.

Lunghezza matassa:

$$y_q = 1 \quad (4.7)$$

Si ottiene una bobina di dente, vengono ridotte al minimo le testate, ne consegue un risparmio di rame.

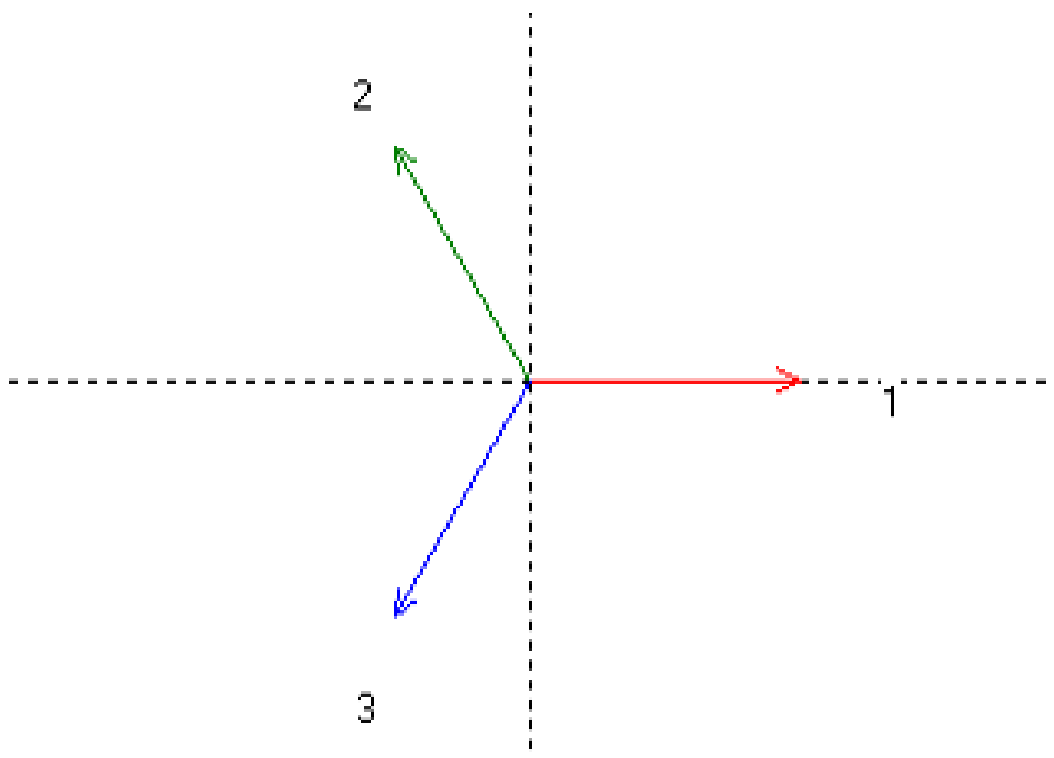


Figura 4.3: Stella di cava.

4.7 Calcoli analitici, vuoto

Data la geometria della macchina e le caratteristiche dei magneti montati a bordo del rotore, si possono ricavare alcune grandezze caratteristiche del funzionamento a vuoto. Ipotizzata la tensione in uscita ai morsetti che si vuole ottenere, si determina anche il numero di conduttori costituenti l'avvolgimento di ciascuna fase.

Nell'idealit del funzionamento della macchina si possono fare alcuni calcoli relativi alle grandezze in gioco, senza considerare lo spanciamento del flusso e altri fenomeni indesiderati per presenti al suo interno. Induzione al traferro:

$$\hat{B}_g = \frac{B_{rem}}{1 + \frac{g \cdot \mu_r}{tm}} = \frac{0,4}{1 + \frac{1 \cdot 1,1}{3,5}} = 0,304 \text{ T} \quad (4.8)$$

il cui valore medio:

$$B_{avg} = \frac{87}{90} \cdot \hat{B}_g = \frac{87}{90} \cdot 0,304 = 0,294 \text{ T} \quad (4.9)$$

Induzione media nel dente:

$$B_t = \frac{ps}{wt} \cdot B_{avg} = \frac{10,5}{4,4} \cdot 0,294 = 0,701 \text{ T} \quad (4.10)$$

dove:

$$ps = \frac{\pi \cdot D}{Q_s} = \frac{\pi \cdot 0,040}{12} \simeq 10,5 \text{ mm} \quad (4.11)$$

Flusso nel dente, flusso concatenato da una spira:

$$\Phi_t = \hat{\Lambda}_{1sp} = 1 \cdot B_t \cdot wt \cdot Lz = 1 \cdot 0,701 \cdot 0,0044 \cdot 0,020 = 0,0000617 \text{ Wb} \quad (4.12)$$

Moltiplico per 1 inquanto la spira abbraccia un solo dente di statore.

Questo valore di flusso non però quello reale, devo introdurre delle correzioni per tenere conto del suo spanciamento al traferro e dell'effetto delle cave.

Vengono introdotti due coefficienti correttivi $k\sigma$ e k_{carter} :

$$k\sigma = \frac{Sm}{Sg} = \frac{\tau_m}{\tau_m \cdot 2g} = \frac{30,35}{32,35} = 0,94 \quad (4.13)$$

dove:

$$\tau_m = \frac{\pi \cdot D}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,040}{4} = 30,35 \text{ mm} \quad (4.14)$$

$$k_{carter} = \frac{ps}{ps + g - \frac{3}{4} \cdot wso} = \frac{0,0105}{0,0105 + 0,001 - \frac{3}{4} \cdot 0,0033} = 1,16 \quad (4.15)$$

Il traferro viene maggiorato:

$$g' = g \cdot k_{carter} = 0,001163 \text{ m} \quad (4.16)$$

Quindi ora l'induzione al traferro:

$$\hat{B}_g = \frac{B_{rem} \cdot k\sigma}{1 + \frac{g' \cdot \mu_r \cdot k\sigma}{tm}} = \frac{0,4 \cdot 0,94}{1 + \frac{1,163 \cdot 1,1 \cdot 0,94}{3,5}} = 0,279 \text{ T} \quad (4.17)$$

il cui valore medio:

$$B_{avg} = \frac{87}{90} \cdot \hat{B}_g = \frac{87}{90} \cdot 0,279 = 0,270 \text{ T} \quad (4.18)$$

Induzione media nel dente:

$$B_t = \frac{ps}{wt} \cdot B_{avg} = \frac{10,5}{4,4} \cdot 0,270 = 0,645 \text{ T} \quad (4.19)$$

Flusso nel dente, flusso concatenato da una spira:

$$\Phi_t = \hat{\Lambda}_{1sp} = 1 \cdot B_t \cdot wt \cdot Lz = 1 \cdot 0,645 \cdot 0,0044 \cdot 0,020 = 0,0000568 \text{ Wb} \quad (4.20)$$

Chiedendo di avere una tensione ai morsetti del generatore di 130 V, con collegamento esterno delle fasi a triangolo, viene ad essere determinato un numero di conduttori per matassa:

$$\hat{E}_{avv} = \omega \cdot \Phi_t \cdot 2 \cdot Nt = 184 \text{ V di picco} \quad (4.21)$$

$$Nt = \frac{\hat{E}_{avv}}{\omega \cdot \Phi_t \cdot 2} = \frac{184}{2 \cdot \pi \cdot 333.34 \cdot 0,0000568 \cdot 2} \simeq 773 \quad (4.22)$$

Conduttori in cava:

$$ncs = Nt = 773 \text{ perché singolo strato} \quad (4.23)$$

Conduttori totali equivalenti serie:

$$N_s = \frac{ncs \cdot Q_s}{m} = \frac{773 \cdot 12}{3} = 3092 \quad (4.24)$$

Flusso concatenato da una fase:

$$\hat{\Lambda} = \Phi_t \cdot 2 \cdot Nt = 0,0000568 \cdot 2 \cdot 773 = 0,0878 \text{ V}\cdot\text{s} \quad (4.25)$$

4.8 Simulazioni FEMM, vuoto

Le simulazioni fatte utilizzando il software di calcolo agli elementi finiti FEMM, hanno avuto come scopo la verifica dai calcoli analitici precedentemente eseguiti e l'accertamento della bontà delle scelte fino ad ora eseguite. Questo software calcola il vettore potenziale magnetico \vec{A} , per ogni elemento della mesh, sul piano trasversale rispetto alla lunghezza della macchina; per questo motivo il flusso concatenato con le varie fasi pu essere calcolato mediante le equazioni:

$$\hat{\Lambda}_A = ncs \cdot Lz \cdot \sum ka(i) \cdot \frac{1}{Sslot} \cdot \int A_z \cdot ds \quad (4.26)$$

$$\hat{\Lambda}_B = ncs \cdot Lz \cdot \sum kb(i) \cdot \frac{1}{Sslot} \cdot \int A_z \cdot ds \quad (4.27)$$

$$\hat{\Lambda}_C = ncs \cdot Lz \cdot \sum kc(i) \cdot \frac{1}{Sslot} \cdot \int A_z \cdot ds \quad (4.28)$$

Mentre le tensioni:

$$\hat{E}_A = \omega \cdot \hat{\Lambda}_A \quad (4.29)$$

$$\hat{E}_B = \omega \cdot \hat{\Lambda}_B \quad (4.30)$$

$$\hat{E}_C = \omega \cdot \hat{\Lambda}_C \quad (4.31)$$

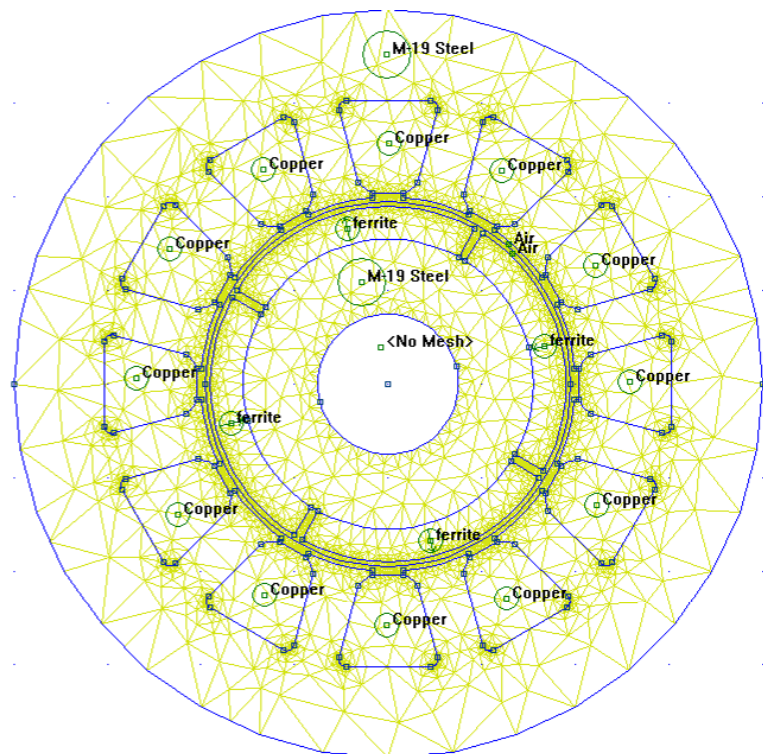


Figura 4.4: Mesh creata dal programma FEMM che va a discretizzare il dominio del problema, successivamente attraverso un'analisi agli elementi finiti, il programma estrapola i valori delle grandezze elettriche e magnetiche di nostro interesse.

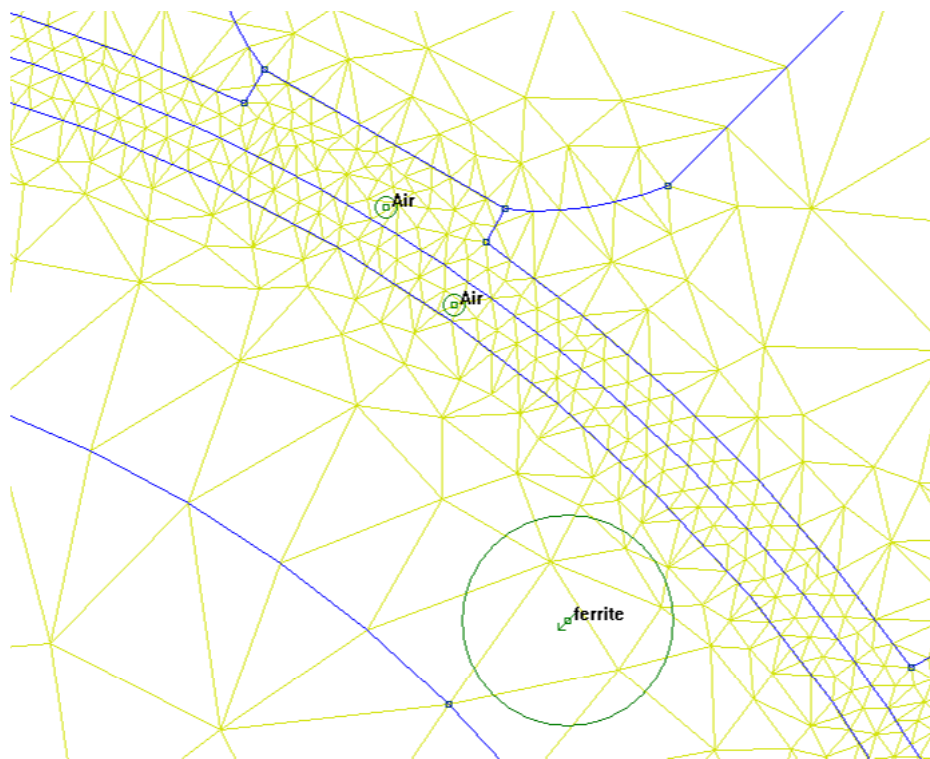


Figura 4.5: Il processo di discretizzazione del dominio deve essere fatto con cura al fine di ottenere una buona precisione nei risultati e per questo la mesh deve essere piú fitta possibile nel traferro, dove si concentra l'energia magnetica.

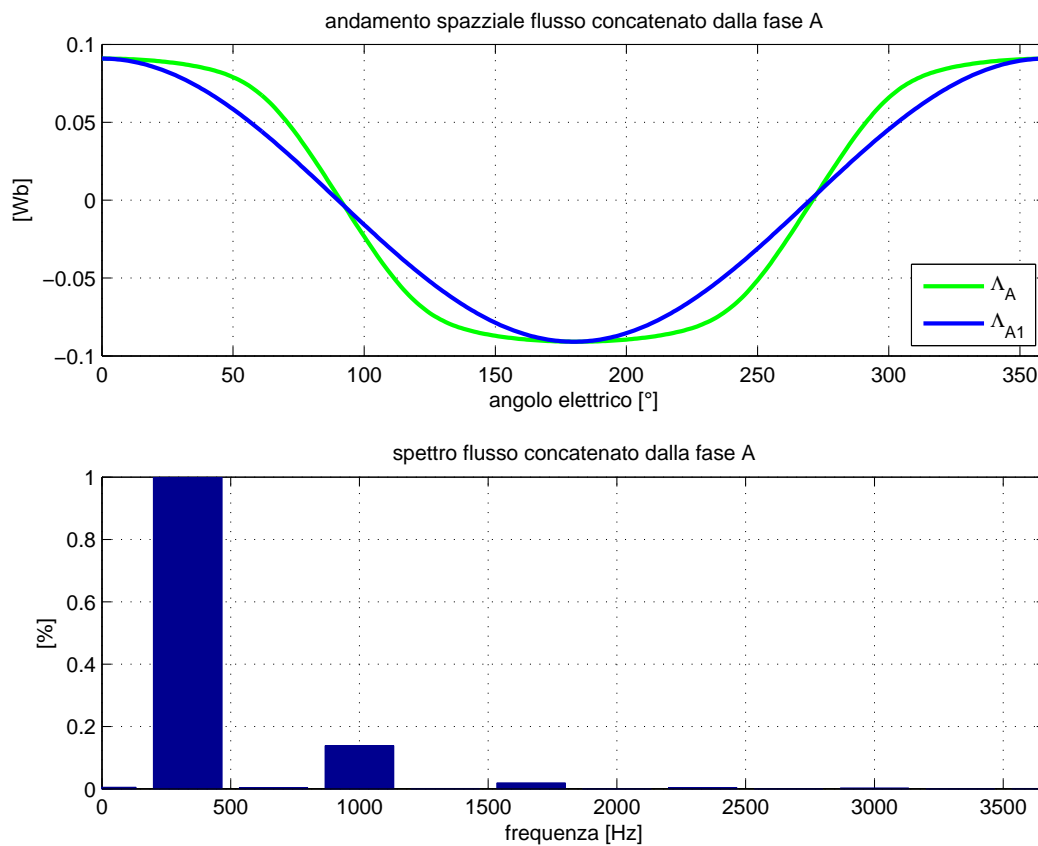


Figura 4.6: Flusso concatenato e relativo spettro della Fase A. Da questa figura si può notare l'andamento distorto del flusso concatenato di questa fase, che si discosta abbastanza da un andamento sinusoidale; ciò è confermato dal suo spettro che evidenzia la presenza preponderante della componente fondamentale e mette in luce che la distorsione è dovuta alla presenza di una terza armonica e di una quinta.

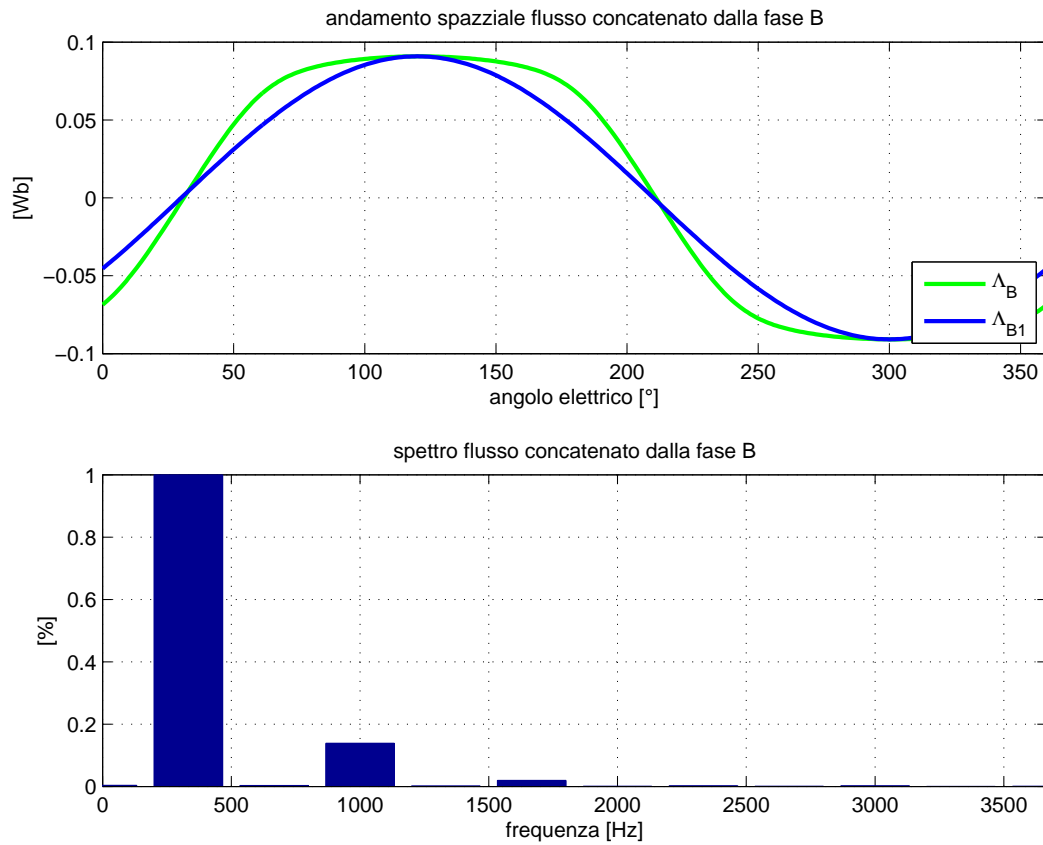


Figura 4.7: Flusso concatenato e relativo spettro della Fase B. Da questa figura si può notare l'andamento distorto del flusso concatenato di questa fase, che si discosta abbastanza da un andamento sinusoidale; ciò è confermato dal suo spettro che evidenzia la presenza preponderante della componente fondamentale e mette in luce che la distorsione è dovuta alla presenza di una terza armonica e di una quinta.

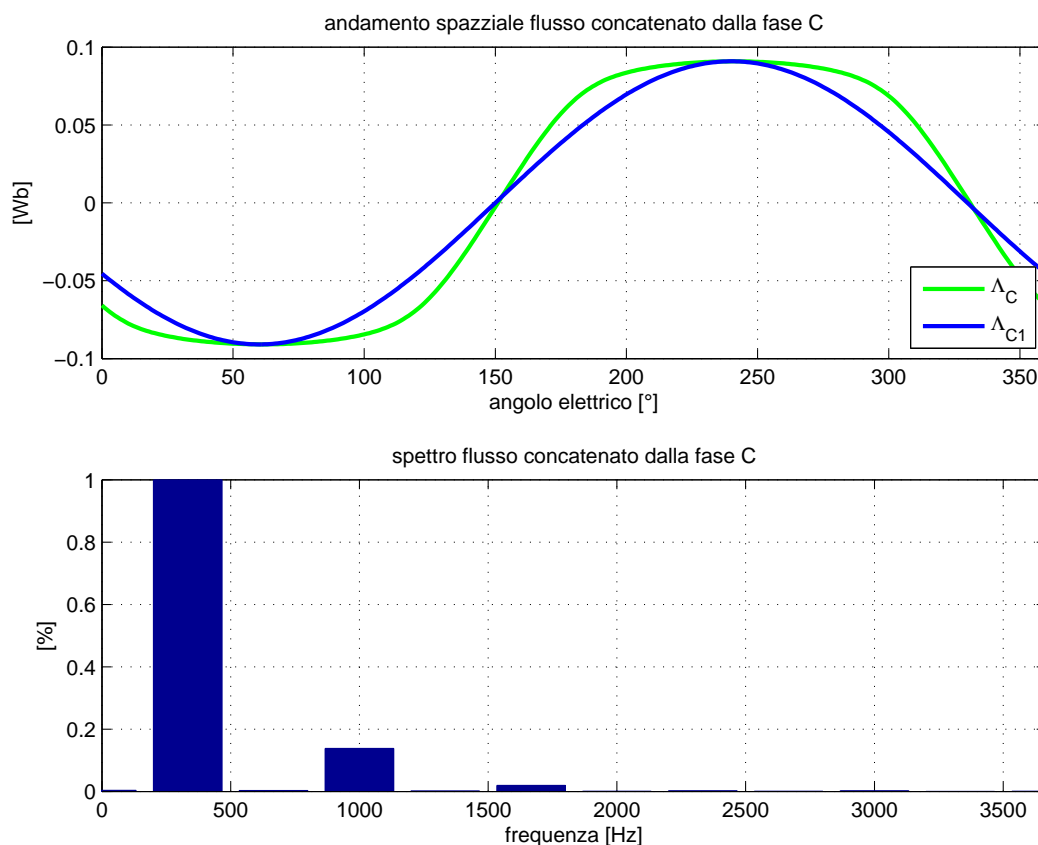


Figura 4.8: Flusso concatenato e relativo spettro della Fase C. Da questa figura si può notare l'andamento distorto del flusso concatenato di questa fase, che si discosta abbastanza da un andamento sinusoidale; ciò è confermato dal suo spettro che evidenzia la presenza preponderante della componente fondamentale e mette in luce che la distorsione è dovuta alla presenza di una terza armonica e di una quinta.

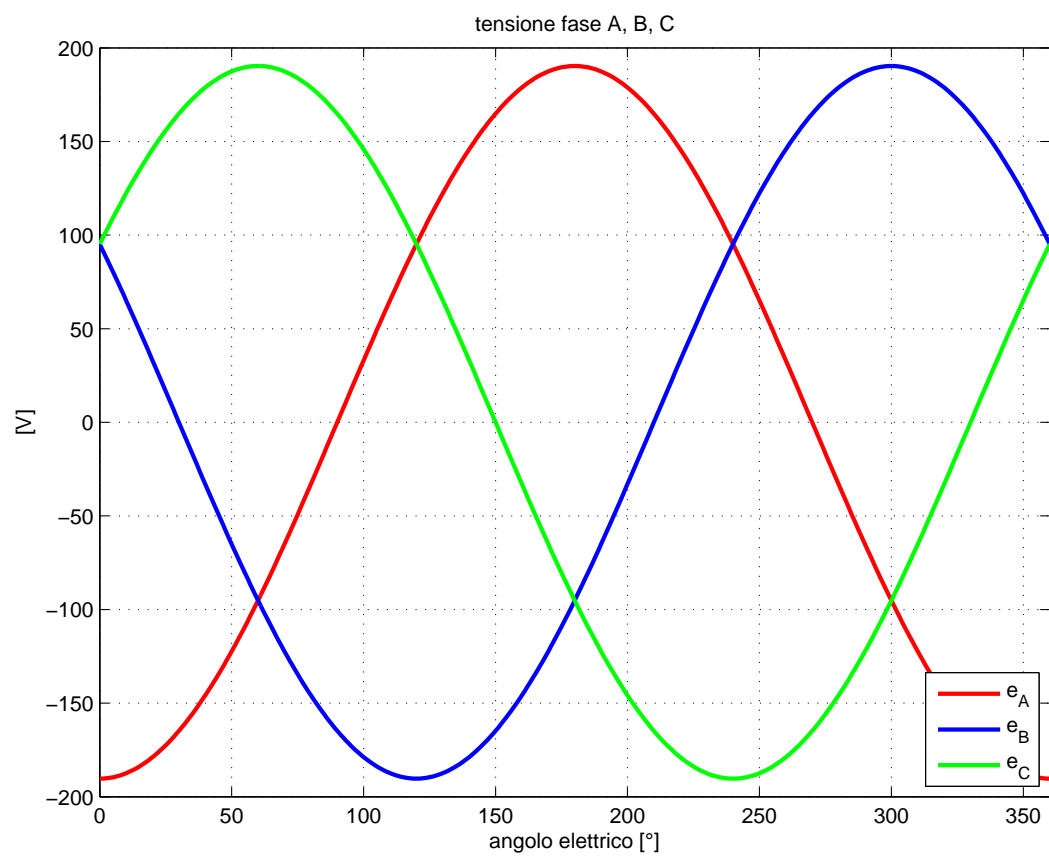


Figura 4.9: Componente fondamentale delle tensioni indotte sulla fase A, B, C; conseguenza diretta del flusso concatenato calcolato sopra.

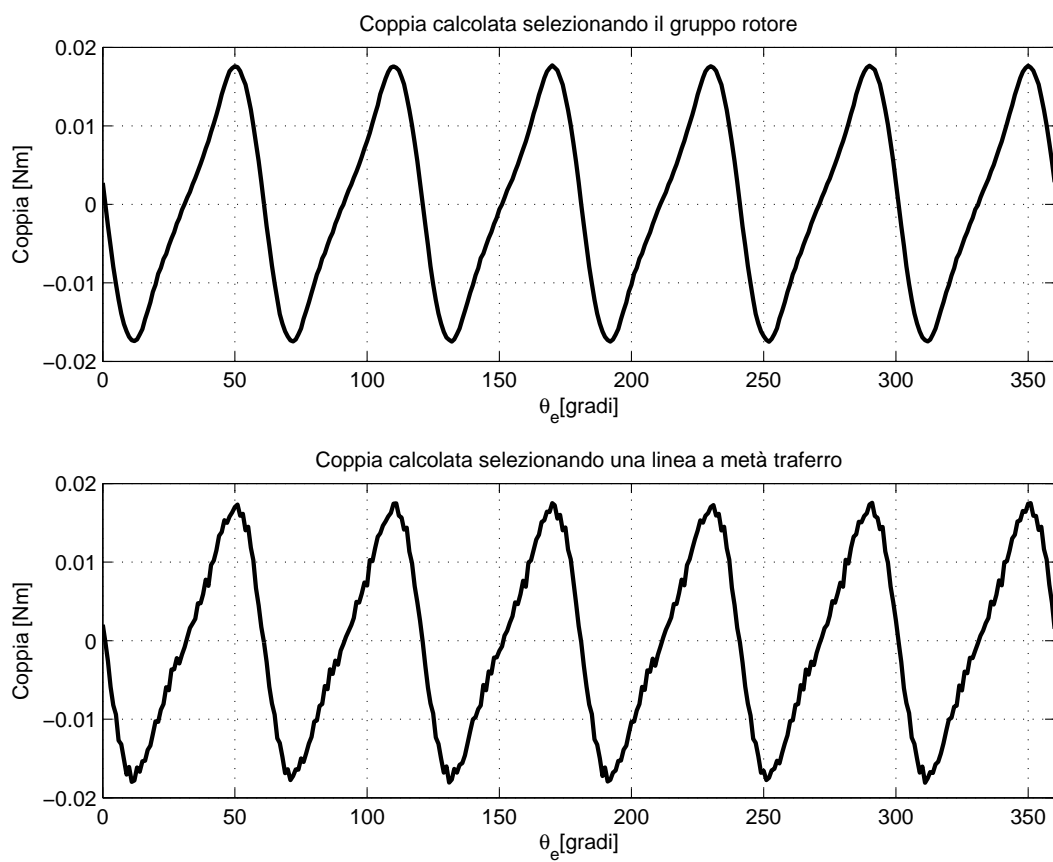


Figura 4.10: Coppia sviluppata nel funzionamento a vuoto del motore, teoricamente nulla, ma in conseguenza alle inevitabili irregolarità nella geometria di statore e rotore risulta diversa da zero. Prende il nome di coppia di impuntamento (cogging).

4.9 Calcoli analitici, carico

Innanzitutto é necessario stimare una certa densità di corrente nei conduttori, funzione della possibilità di smaltire il calore prodotto dalle perdite della macchina. Altro parametro di stima é il coefficiente di riempimento della cava, cioè in che percentuale la sezione di cava viene realmente riempita di conduttori attivi, quindi di rame.

La scelta é stata entro valori tipici, in particolare:

- $J=5 \text{ A/mm}^2$;
- $k_{fill}=0,4$.

Si potuto ricavare in conseguenza la corrente in cava:

$$I = S_{slot} \cdot k_{fill} \cdot J = 85 \cdot 0,4 \cdot 5 = 170 \text{ A} \quad (4.32)$$

Oltre alla corrente di avvolgimento:

$$I_{avv} = \frac{I}{ncs} = \frac{170}{773} = 0,22 \text{ A} \quad (4.33)$$

Sezione conduttore:

$$S_c = \frac{S_{slot} \cdot k_{fill}}{ncs} = \frac{85 \cdot 0,4}{773} = 0,044 \text{ mm}^2 \quad (4.34)$$

il cui diametro risulta:

$$dc = 0,236 \text{ mm} \quad (4.35)$$

Diametro commerciale:

$$dc = 0,250 \text{ mm} \quad (4.36)$$

Il carico elettrico generato dalla corrente calcolata sopra risulta:

$$\hat{K}_s = \frac{3 \cdot kw \cdot N_s \cdot \hat{I}}{\pi \cdot D} = \frac{3 \cdot 0,5 \cdot 3092 \cdot 0,311}{\pi \cdot 0,040} = 11478 \text{ A/m} \quad (4.37)$$

La coppia prodotta risulta infine:

$$T = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot L_z \cdot \hat{K}_s \cdot \hat{B}_g = \frac{\pi}{4} \cdot 0,040^2 \cdot 0,020 \cdot 11478 \cdot 4 \cdot 0,304 = 0,0877 \text{ N}\cdot\text{m} \quad (4.38)$$

4.10 Simulazioni FEMM, carico

Il funzionamento a carico é stato simulato inviando nello statore della macchina le tre correnti di fase nominali, fasate in modo da far risultare il carico elettrico \hat{K}_s in fase con l'induzione a vuoto \hat{B}_g , affinché la macchina si trovasse a lavorare in coppia massima; come ipotizzato nei calcoli analitici.

Anche in questo caso sono stati calcolati i flussi concatenati e le tensioni ai morsetti della macchina, oltre che la coppia sviluppata.

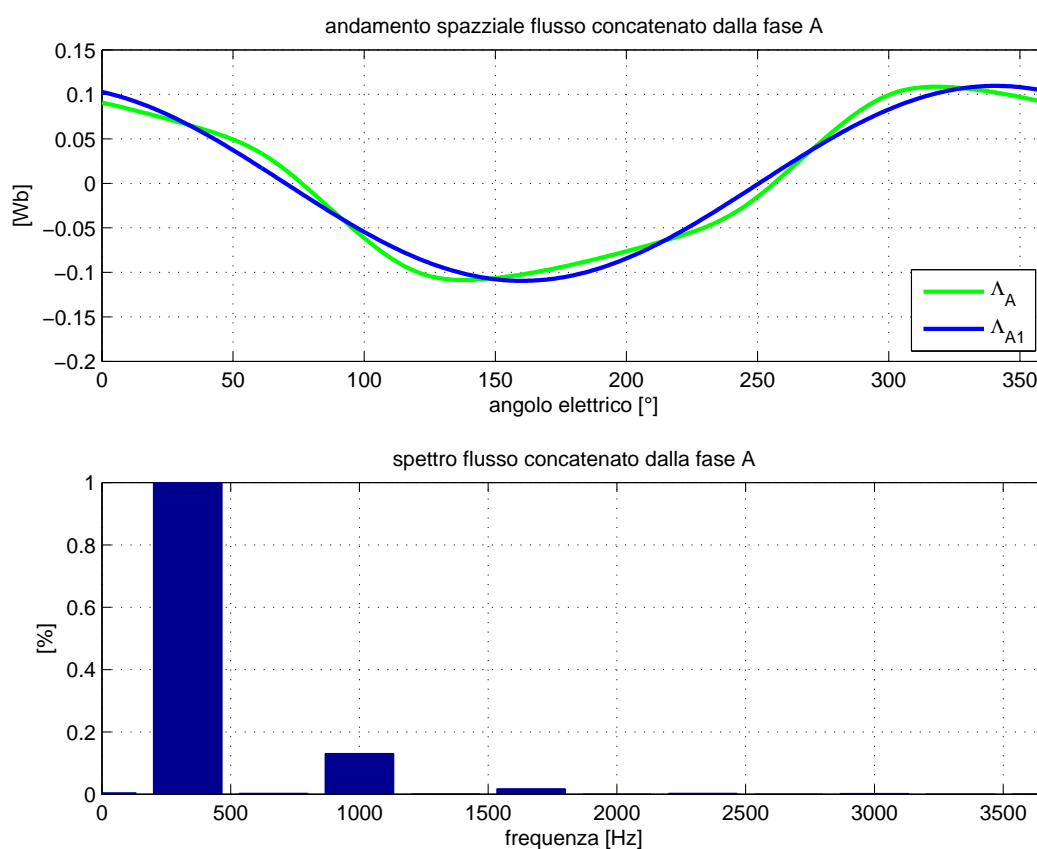


Figura 4.11: Flusso concatenato e relativo spettro della Fase A. Da questa figura si può notare l'andamento distorto del flusso concatenato di questa fase a carico, che si discosta abbastanza da un andamento sinusoidale; ciò é confermato dal suo spettro che evidenzia la presenza preponderante della componente fondamentale e mette in luce che la distorsione é dovuta alla presenza di una terza armonica e di una quinta.

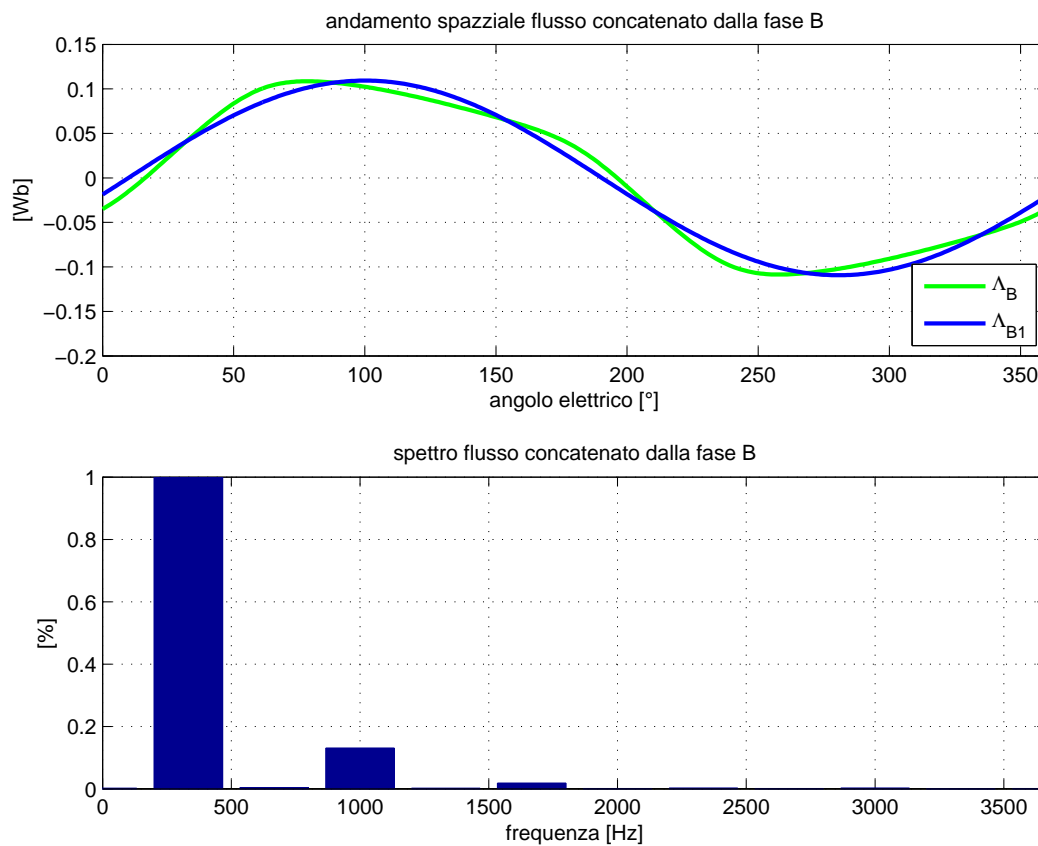


Figura 4.12: Flusso concatenato e relativo spettro della Fase B. Da questa figura si può notare l'andamento distorto del flusso concatenato di questa fase a carico, che si discosta abbastanza da un andamento sinusoidale; ciò è confermato dal suo spettro che evidenzia la presenza preponderante della componente fondamentale e mette in luce che la distorsione è dovuta alla presenza di una terza armonica e di una quinta.

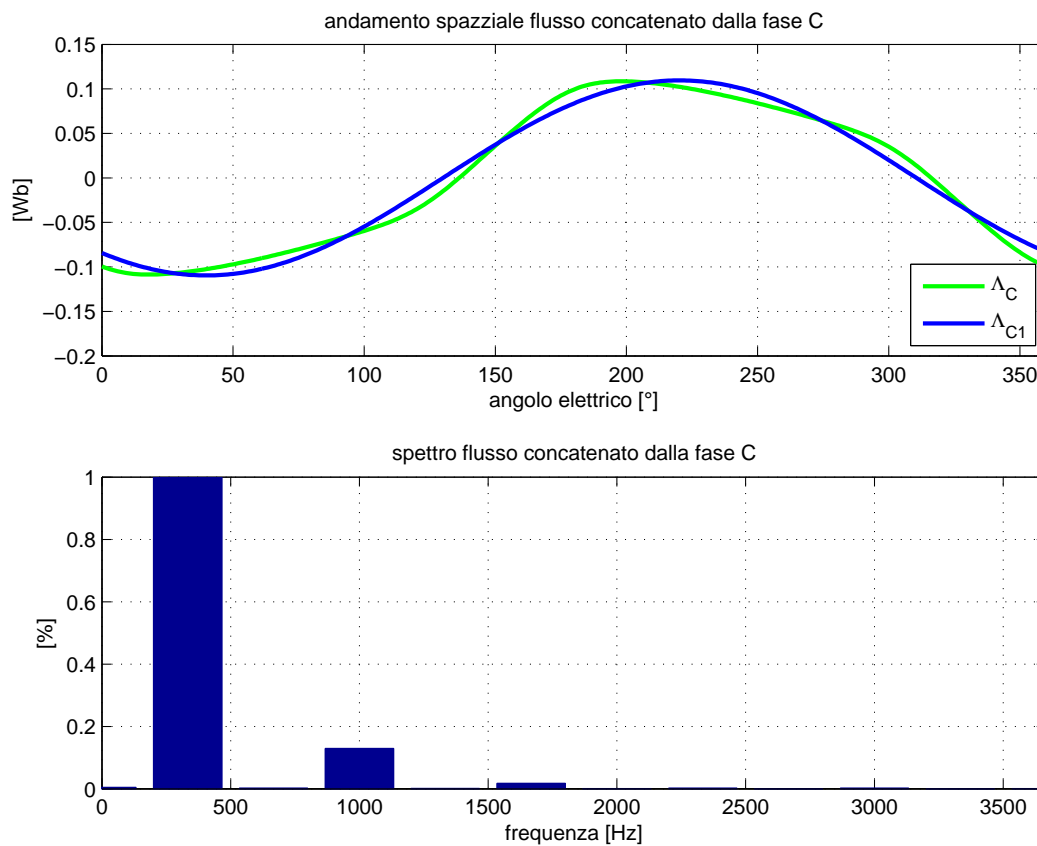


Figura 4.13: Flusso concatenato e relativo spettro della Fase C. Da questa figura si può notare l'andamento distorto del flusso concatenato di questa fase a carico, che si discosta abbastanza da un andamento sinusoidale; ciò è confermato dal suo spettro che evidenzia la presenza preponderante della componente fondamentale e mette in luce che la distorsione è dovuta alla presenza di una terza armonica e di una quinta.

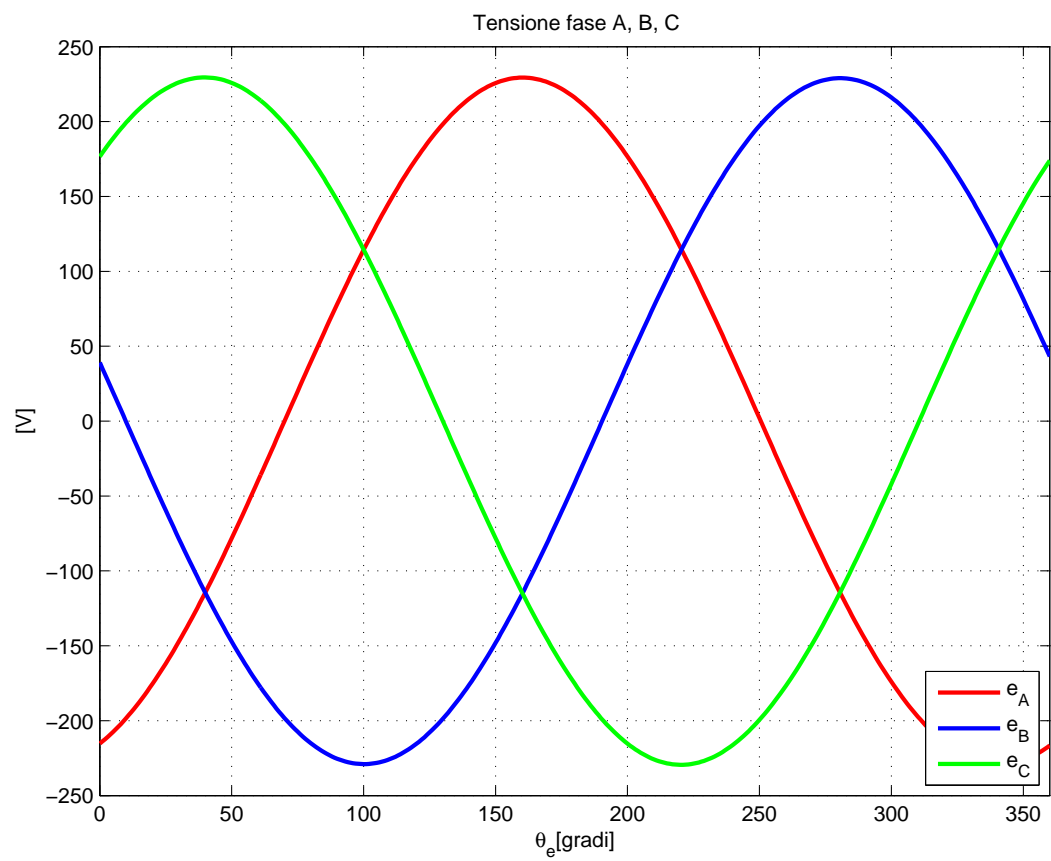


Figura 4.14: Componente fondamentale delle tensioni indotte sulla fase A, B, C a carico; conseguenza diretta del flusso concatenato calcolato sopra.

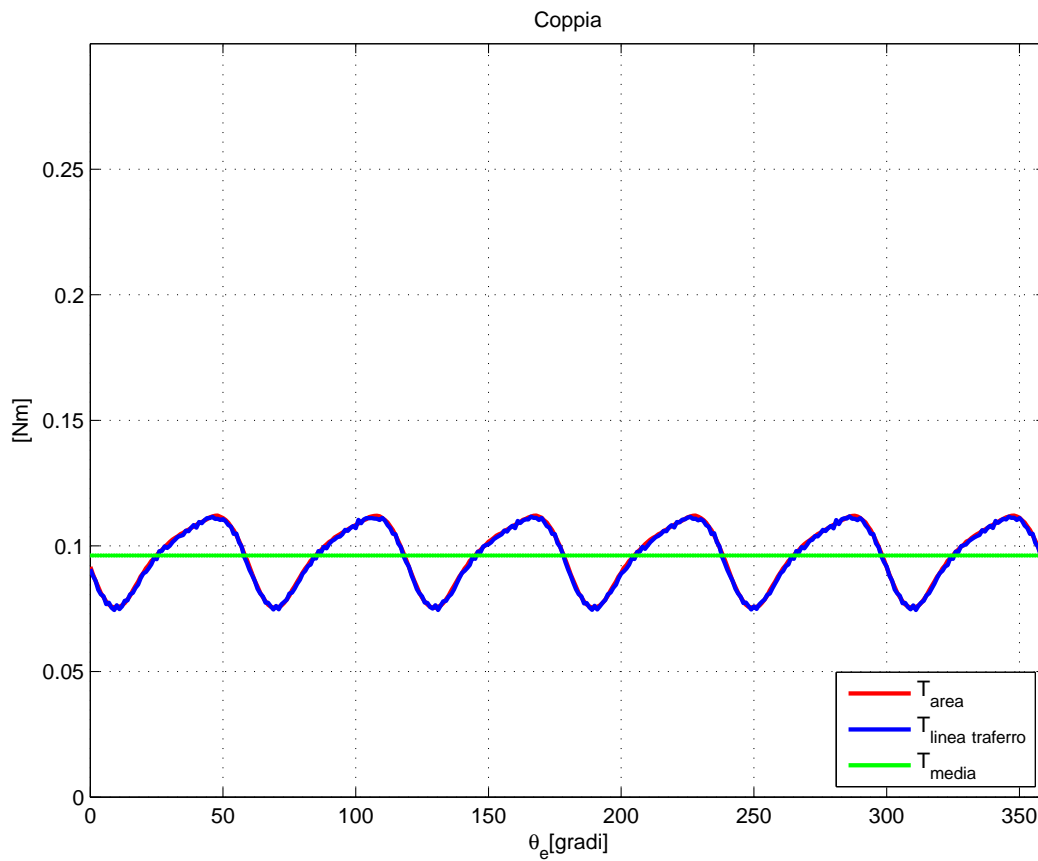


Figura 4.15: Coppia sviluppata dalla macchina a carico nominale. Oltre al suo valore medio si nota sovrapposta a esso una certa oscillazione, la stessa che si aveva nel funzionamento a vuoto dovuta all'impuntamento cioè alle irregolarità geometriche di statore e rotore.

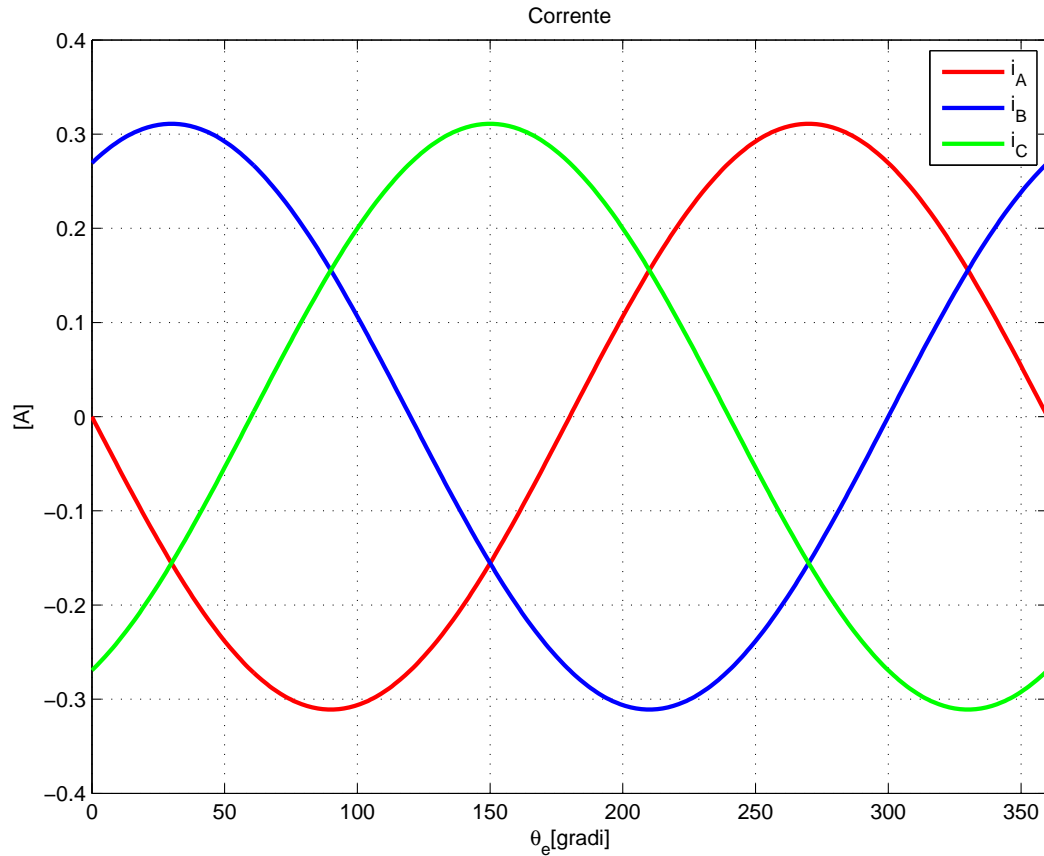


Figura 4.16: Correnti nominali assorbite dalla macchina e circolanti sulle fasi di statore.

4.11 Induzioni

Utilizzando il software di calcolo agli elementi finiti FEMM, si é potuta calcolare l'induzione al traferro della macchina e tracciarne l'andamento in funzione dell'angolo elettrico.

É stato possibile verificare la variazione nel passaggio da vuoto a carico, dovuta alla reazione di indotto, cioé all'opporci delle correnti indotte alla causa che le ha generate secondo la legge di Lenz. In alcuni tratti si assiste a un abbassamento e in altri a un innalzamento della curva a vuoto.

Il medesimo procedimento é stato applicato anche per le induzioni del magnete permanente. Anche in questo caso la reazione di indotto consente l'innalzamento e l'abbassamento dell'induzione residua del magnete. Si deve quindi prestare attenzione alla sua smagnetizzazione non caricando la macchina a tal punto da far abbassare l'induzione residua del magnete al di sotto del ginocchio del suo ciclo di isteresi.

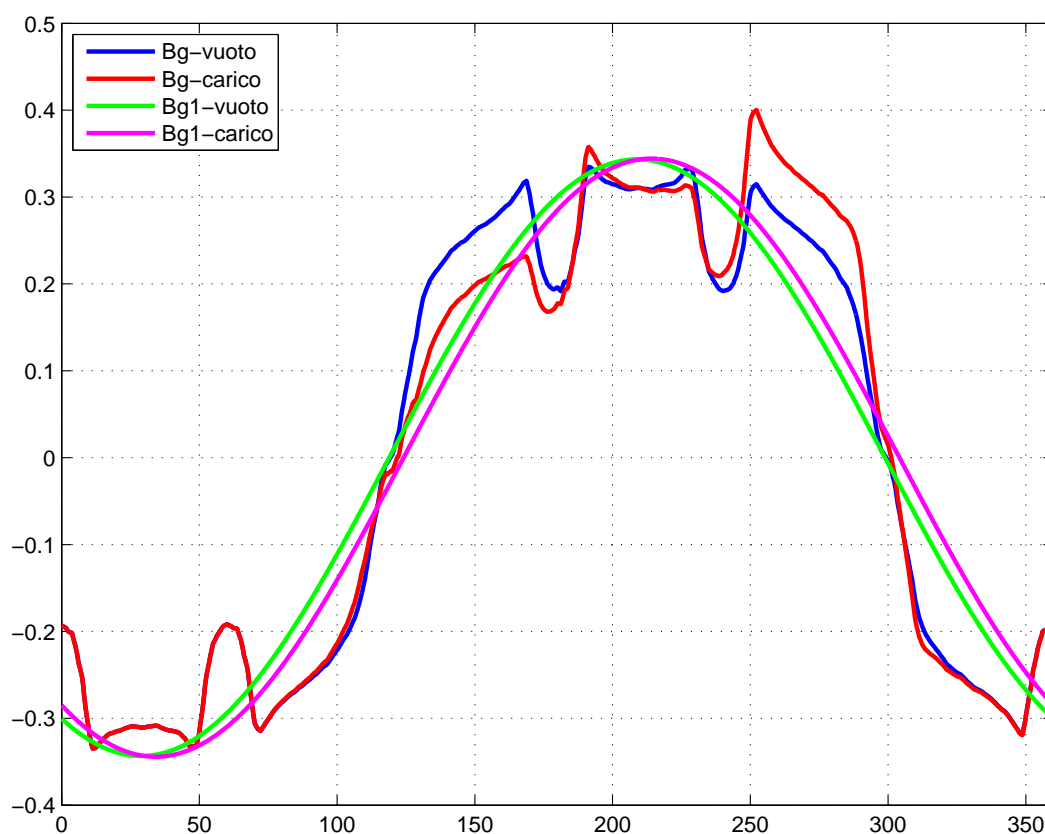


Figura 4.17: Andamento delle forme d'onda dell'induzione al traferro sotto un polo, quindi in 360 gradi elettrici. Nella forma d'onda a vuoto si notano i buchi dovuti alle aperture di cava, cioè l'abbassamento del valore di induzione nei punti in cui non vi è ferro affacciato al magnete ma aria. Nella forma d'onda a carico si nota invece l'effetto della reazione di indotto che in alcuni punti fa abbassare il valore di induzione al traferro e in altri invece lo esalta dando luogo a un picco subito dopo l'abbassamento dovuto all'apertura di cava.

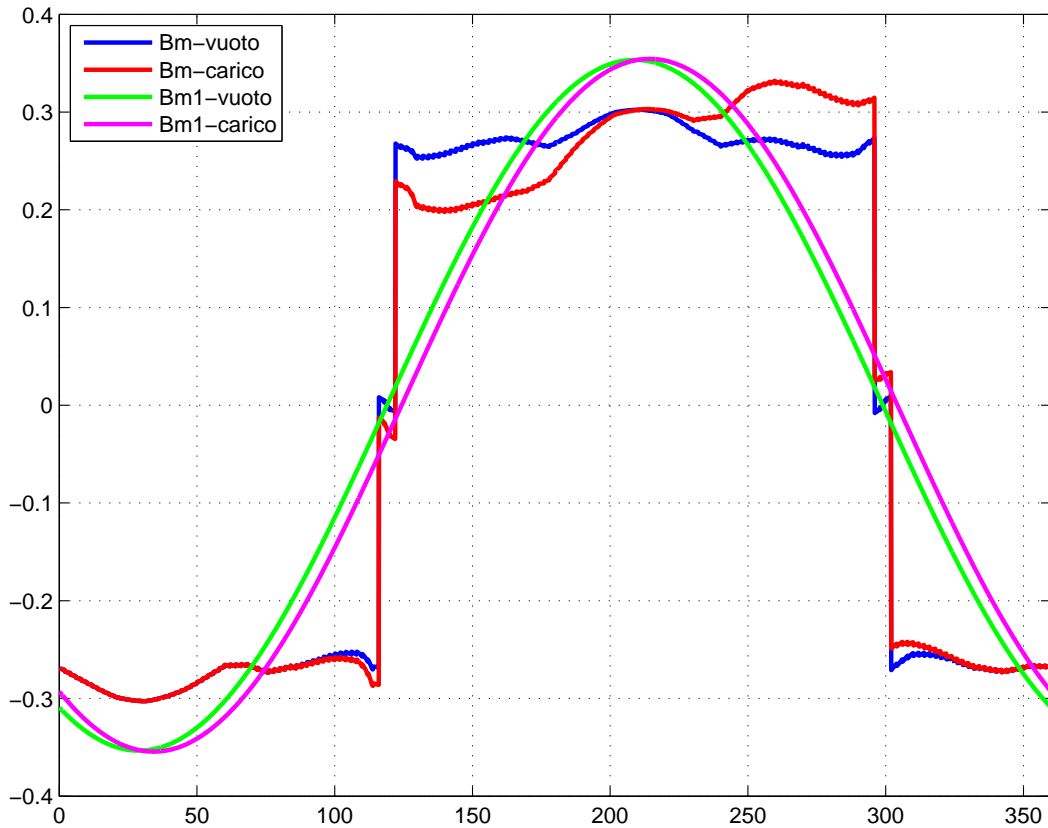


Figura 4.18: Andamento delle forme d'onda dell'induzione a metà dello spessore del magnete sotto un polo, quindi in 360 gradi elettrici. Nella forma d'onda a vuoto si notano le oscillazioni dovute alle aperture di cava, cioè l'abbassamento del valore di induzione nei punti in cui non ho ferro affacciato al magnete, ma aria. Nella forma d'onda a carico si nota invece l'effetto della reazione di indotto che in alcuni punti fa abbassare il valore di induzione all'interno del magnete ed in altri invece lo esalta dando luogo ad un picco subito dopo l'abbassamento dovuto all'apertura di cava. Si deve prestare attenzione agli abbassamenti del valore di induzione perché se vengono a superare il ginocchio della curva di B/H del magnete stesso si va incontro alla sua smagnetizzazione irreversibile.

4.12 Potenza e perdite

Un dato di partenza della macchina in esame é la velocità di rotazione in sincronismo, ovvero:

$$n_0 = \frac{60 \cdot f}{p} = 10000 \text{ rpm} \quad (4.39)$$

$$\Omega_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_0}{60} = 1047,2 \text{ rad/s} \quad (4.40)$$

ne deriva quindi la necessità di alimentare con frequenza:

$$f = \frac{n_0 \cdot p}{60} = \frac{10000 \cdot 2}{60} = 333,34 \text{ Hz} \quad (4.41)$$

Avendo in precedenza calcolato la coppia sviluppata, si può risalire alla potenza meccanica:

$$P_m = T \cdot \Omega_m = 0,0877 \cdot 1047,2 = 91,84 \text{ W} \quad (4.42)$$

Dal programma di calcolo FEMM é stato possibile ricavare l'induzione massima nel dente e l'induzione massima nella corona:

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{B}_t = 0,645 \text{ T} \\ \hat{B}_{bi} = 0,472 \text{ T} \end{array} \right\}$$

1. Perdite Joule di Statore

Raggio medio testata:

$$r_{ew} = \frac{ps}{2} = \frac{0,0105}{2} = 0,00525 \text{ m} \quad (4.43)$$

Lunghezza media rame di testata:

$$l_{ew} = \pi \cdot r_{ew} = \pi \cdot 0,00525 = 0,0165 \text{ m} \quad (4.44)$$

Sezione commerciale conduttore in rame: $Sc=0,049 \text{ mm}^2$

Resistenza di fase statorica:

$$\begin{aligned} R_{fase,s} &= \rho_{cu,75} \cdot \frac{Ns \cdot (Lz + l_{ew})}{Sc} \\ &= 0,022 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{3092 \cdot (0,020 + 0,0165)}{0,049 \cdot 10^{-6}} \\ &= 50,7 \Omega \end{aligned} \quad (4.45)$$

$$P_{J,s} = 3 \cdot R_{fase,s} \cdot I^2 = 3 \cdot 50,7 \cdot 0,22^2 = 7,36 \text{ W} \quad (4.46)$$

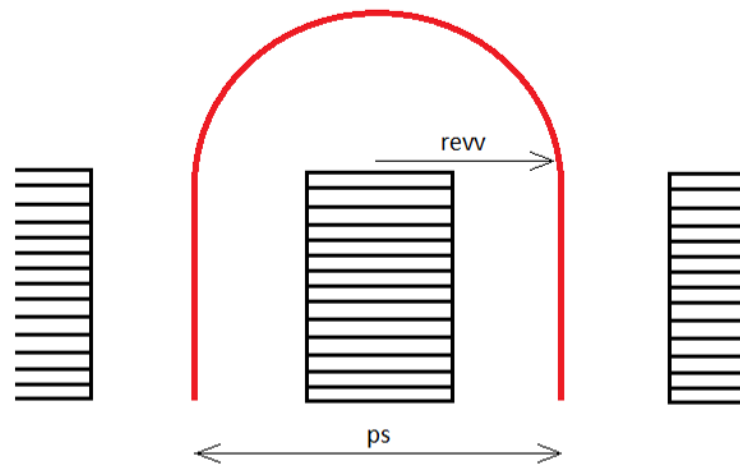


Figura 4.19: Lunghezza media rame di testata per il calcolo della resistenza degli avvolgimenti, in questo caso si ha la bobina avvolta attorno ad un solo dente e per un calcolo preciso é bene valutare il raggio di curvatura medio del conduttore.

2. Perdite nel Ferro dei Denti

Per quanto riguarda i lamierini utilizzati, si assumono delle perdite specifiche $p_s=10$ [W/kg], considerando induzione di valore 1,5 [T] e frequenza 50 [Hz]; devono essere riportate al valore massimo di induzione calcolata nel dente e al valore di frequenza di alimentazione.

$$\begin{aligned}
 p_s &= k_{ist} \cdot \left(\frac{f}{50}\right) \cdot \left(\frac{B}{1,5}\right)^2 + k_{cp} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^2 \cdot \left(\frac{B}{1,5}\right)^2 \\
 &= 10 \cdot 0,7 \cdot \left(\frac{333,34}{50}\right) \cdot \left(\frac{0,6456}{1,5}\right)^2 + 10 \cdot 0,3 \cdot \left(\frac{333,34}{50}\right)^2 \cdot \left(\frac{0,6456}{1,5}\right)^2 \\
 &= 33,34 \text{ W/kg}
 \end{aligned} \tag{4.47}$$

Volume denti di statore:

$$\begin{aligned}
 V_t &= Q_s \cdot (Area_t \cdot Lz) \\
 &= 12 \cdot (65 \cdot 10^{-6} \cdot 0,020) \\
 &= 15,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3
 \end{aligned} \tag{4.48}$$

Peso dei denti di statore:

$$G_t = V_t \cdot \gamma_{fe} = 15,6 \cdot 10^{-6} \cdot 7800 = 0,122 \text{ kg} \tag{4.49}$$

$$P_{fe,t} = G_t \cdot p_s \cdot k_{magg} = 0,122 \cdot 33,34 \cdot 1,7 = 6,9 \text{ W} \tag{4.50}$$

3. Perdite nel Ferro della Corona

Per quanto riguarda i lamierini utilizzati, si assumono delle perdite specifiche $p_s=10$ [W/kg], considerando induzione di valore 1,5 [T] e frequenza 50 [Hz]; devono essere riportate al valore massimo di induzione calcolata nel dente e al valore di frequenza di alimentazione.

$$\begin{aligned}
 p_s &= k_{ist} \cdot \left(\frac{f}{50}\right) \cdot \left(\frac{B}{1,5}\right)^2 + k_{cp} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^2 \cdot \left(\frac{B}{1,5}\right)^2 \\
 &= 10 \cdot 0,7 \cdot \left(\frac{333,34}{50}\right) \cdot \left(\frac{0,4722}{1,5}\right)^2 + 10 \cdot 0,3 \cdot \left(\frac{333,34}{50}\right)^2 \cdot \left(\frac{0,4722}{1,5}\right)^2 \\
 &= 17,83 \text{ W/kg}
 \end{aligned} \tag{4.51}$$

Volume denti di statore:

$$V_{bi} = \left[\frac{\pi \cdot D_e^2}{4} - \frac{(D + 2 \cdot ht)^2 \cdot \pi}{4} \right] = 0,0000432 \text{ m}^3 \quad (4.52)$$

Peso dei denti di statore:

$$G_{bi} = V_{bi} \cdot \gamma_{fe} = 0,0000432 \cdot 7800 = 0,337 \text{ kg} \quad (4.53)$$

$$P_{fe,bi} = G_{bi} \cdot ps \cdot k_{magg} = 0,337 \cdot 17,83 \cdot 1,5 = 9 \text{ W} \quad (4.54)$$

4. Potenza Assorbita e Rendimento

La potenza elettrica assorbita dalla macchina é la somma della potenza meccanica fornita all'asse e delle perdite nel ferro e nel rame della macchina stessa.

Le perdite totali calcolate sono:

$$P_{J,s} + P_{fe,t} + P_{fe,bi} = 14,7 + 6,9 + 9 = 23,26 \text{ W} \quad (4.55)$$

Si deve tenere conto anche di un'ulteriore voce di perdita dovuta ad altri fenomeni dissipativi minori all'interno della macchina; prende il nome di perdite addizionali e viene empiricamente calcolata come:

$$P_{add} = 5\%(perdite\ totali) = 1,16 \text{ W} \quad (4.56)$$

Risulta infine una potenza complessivamente assorbita, elettrica:

$$\begin{aligned} P_e &= P_m + perdite\ totali + P_{add} \\ &= 91,84 + 23,26 + 1,163 \\ &= 116,3 \text{ W} \end{aligned} \quad (4.57)$$

Quindi un rendimento:

$$\eta = \frac{P_m}{P_e} = \frac{91,84}{116,26} = 0,790 \quad (4.58)$$

Capitolo 5

Ottimizzazione del primo motore (config.6/4)

5.1 Premessa

Il lavoro svolto in questa sezione ha come fine quello di ottenere un miglioramento delle prestazioni della macchina in questione a partire dalla sua configurazione iniziale.

Per raggiungere questo scopo si é suddiviso il lavoro in step; cioé si é andato a variare un parametro alla volta tenendo fissi tutti gli altri, ogni volta partendo con la variazione del successivo parametro dal punto di ottimo ottenuto dalla variazione precedente.

Uno degli obiettivi di questa fase é il raggiungimento di un rendimento di conversione della macchina il piú alto possibile, valutato tramite un accurato modello analitico. In oltre si vuole tenere contenuti i costi di costruzione della macchina stessa, cercando di minimizzare la quantitá di rame presente al suo interno, riducendo il piú possibile le testate e cercando anche di minimizzare la quantitá di lamierino magnetico impiegato per la sua fabbricazione.

I vincoli invece da rispettare riguardano il raggiungimento di una coppia meccanica all'albero di almeno $0,2N \cdot m$ ad una velocitá di rotazione di 10000 rpm, oltre a dovere restare entro un ingombro massimo, espresso dal diametro esterno non superiore a 80 mm.

Inizialmente si é andati a ridurre la larghezza del dente di statore per diminuire il peso del ferro impiegato. Questo ha determinato un aumento della sezione di cava quindi della corrente in cava a paritá di densitá di corrente impostata ($5 A/mm^2$). Di conseguenza si ottiene un aumento della coppia meccanica sviluppata, quindi della potenza meccanica e del rendimento essendo che le perdite totali aumentano, ma non in maniera significativa.

Successivamente si é andati a ridurre l'altezza della corona, che risultava comunque, dalle simulazioni FEMM, poco sfruttata. Si é ottenuta una diminu-

zione del peso del ferro totale e un leggero aumento del rendimento, dovuto alla diminuzione delle perdite nel ferro della corona.

Infine é stato variato il diametro interno di statore, per riportarsi ad un valore di ingombro di 80 mm. Quest'ultima modifica ha determinato un aumento sensibile della coppia meccanica all'albero, della potenza meccanica e del rendimento facendo però aumentare anche i pesi di rame e ferro, quindi il costo finale della macchina.

5.2 Modifica denti di statore

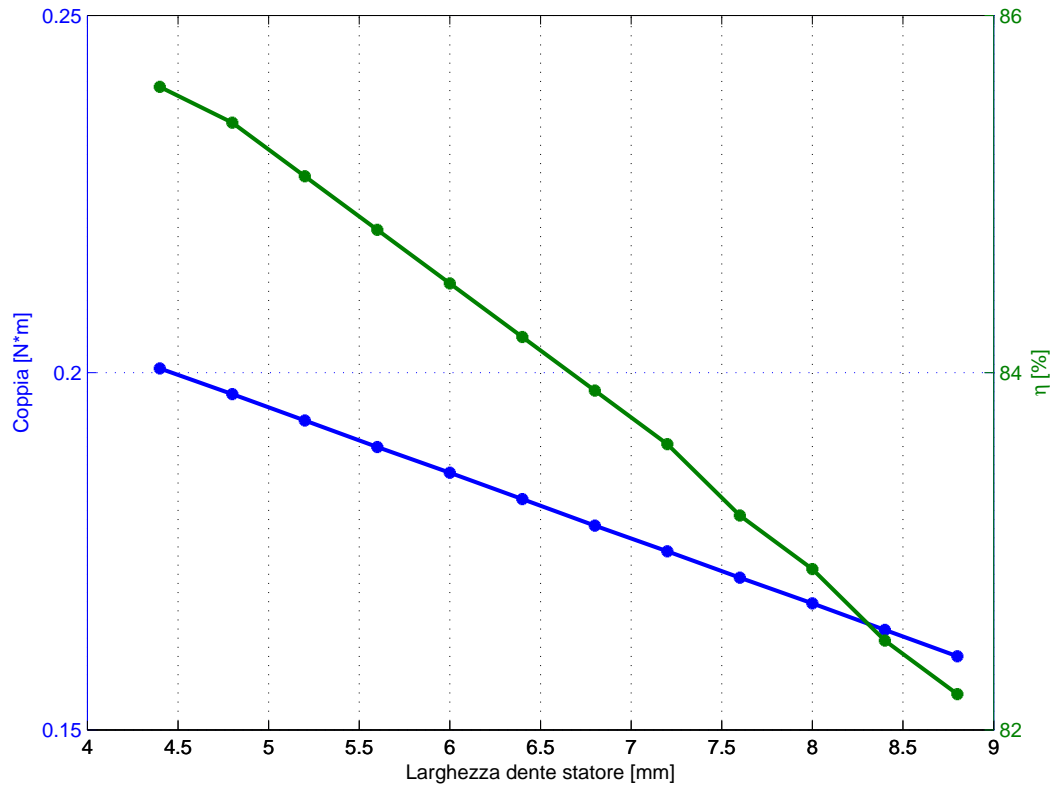


Figura 5.1: Riducendo la larghezza dei denti di statore si viene ad avere un aumento della sezione di cava, che a parità di densità di corrente scelta, determina un aumento della corrente nella cava stessa. Ciò si traduce in un aumento del carico elettrico quindi di coppia meccanica sviluppata.

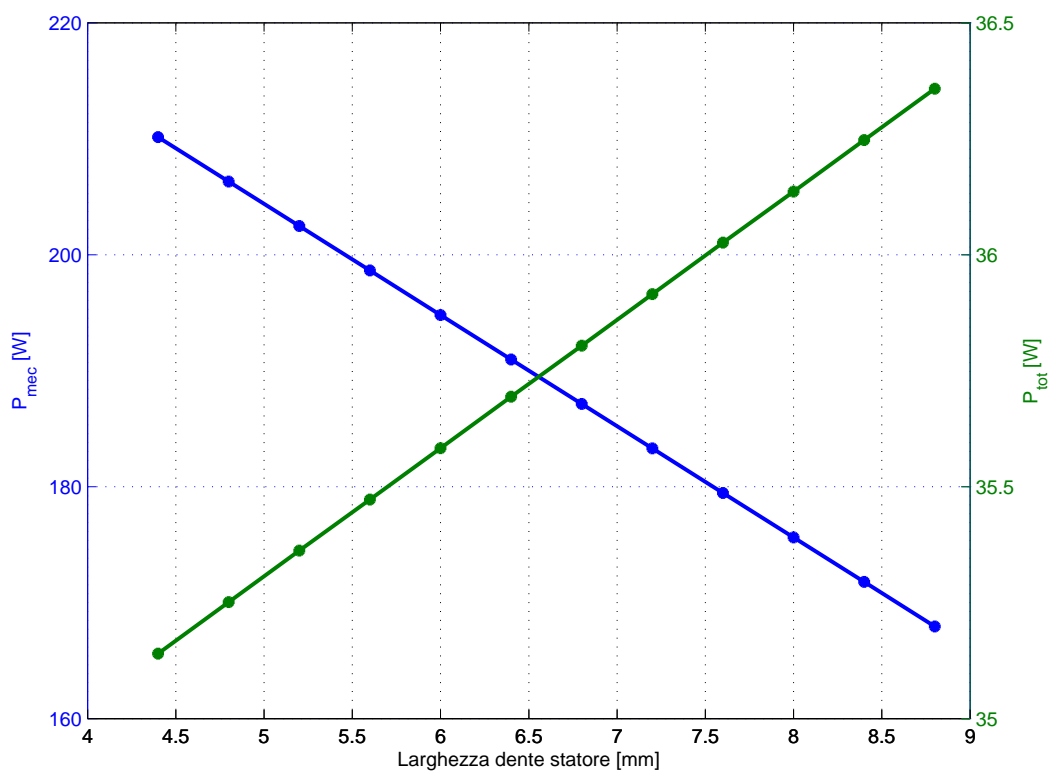


Figura 5.2: All'aumentare della coppia meccanica sviluppata, proporzionalmente aumenta anche la potenza meccanica messa in gioco dalla macchina ($\Omega \cdot T$). L'aumento delle perdite Joule, derivante dalla maggiore corrente che circola negli avvolgimenti, viene equilibrato dalla diminuzione delle perdite nel ferro dei denti (diminuisce il peso del ferro); quindi le perdite totali restano circa invariate e il rendimento aumenta seguendo l'aumento della potenza meccanica.

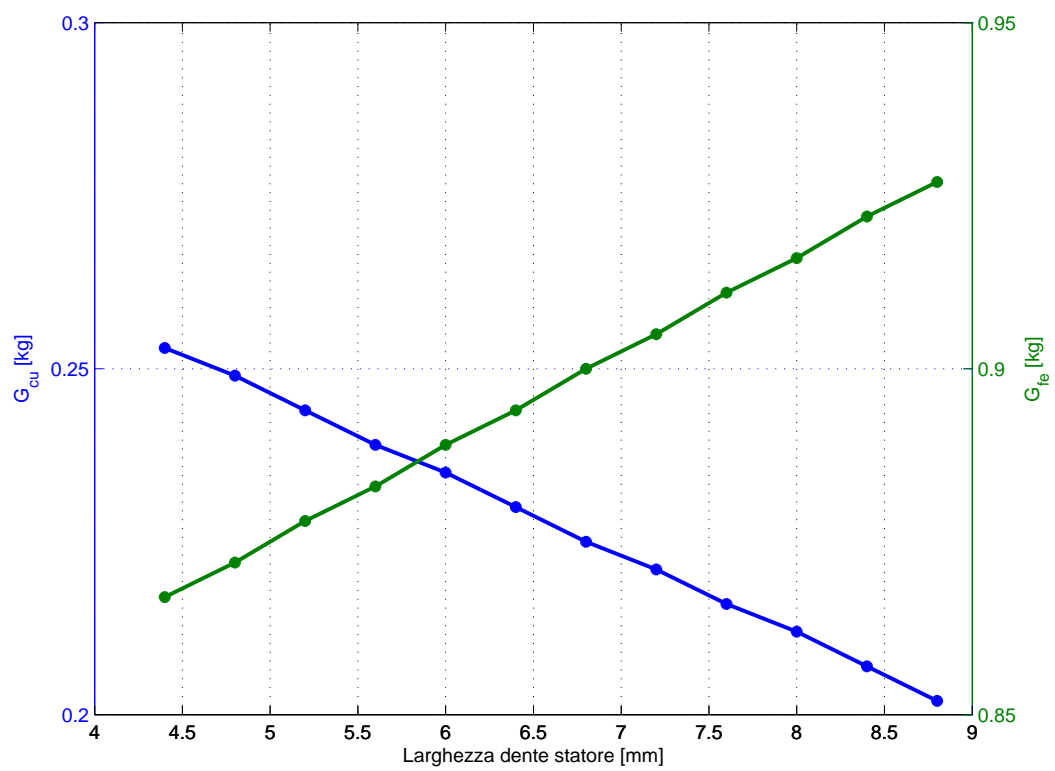


Figura 5.3: Con la modifica della larghezza dei denti di statore vengono modificati anche i pesi complessivi: del ferro che diminuisce e del rame, costituente gli avvolgimenti, che aumenta.

5.3 Modifica altezza corona

Come punto di partenza per questa ulteriore modifica si é scelto l'ultimo valore di larghezza del dente statorico, ovvero 4,4 mm, in quanto risulta la configurazione con le migliori prestazioni.

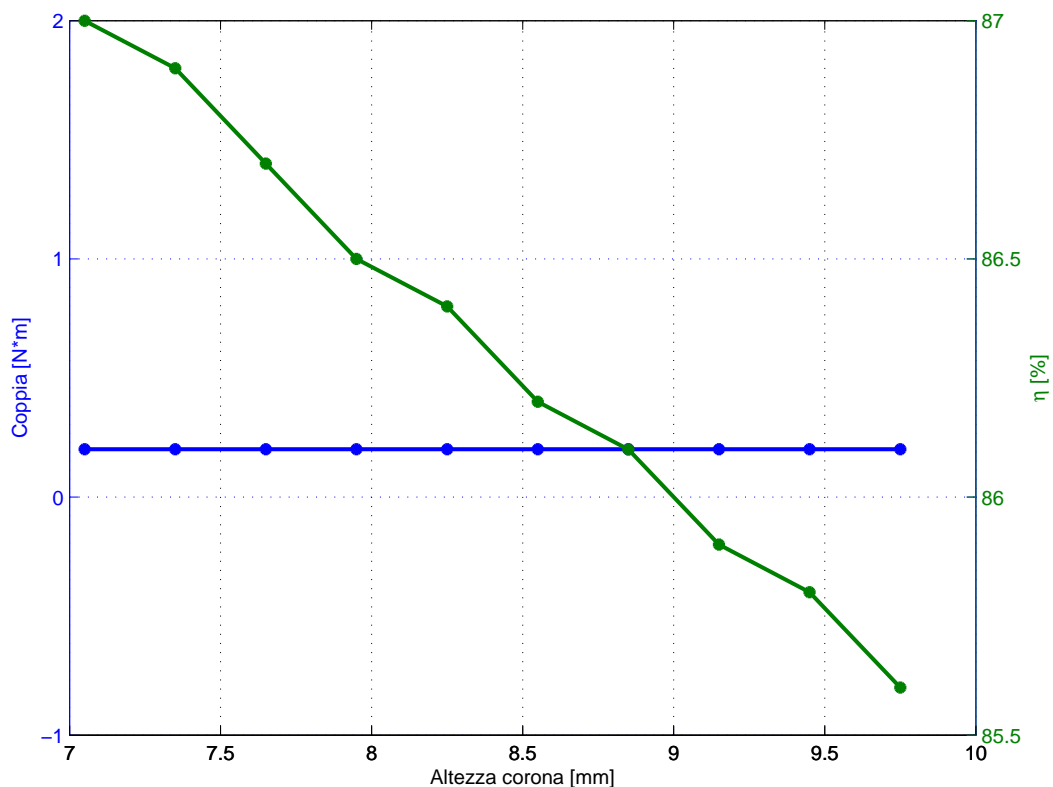


Figura 5.4: Riducendo l'altezza della corona vengono ridotte le perdite nel ferro della corona stessa (ne diminuisce il volume) quindi a parità di altre perdite si ha un aumento del rendimento di conversione.

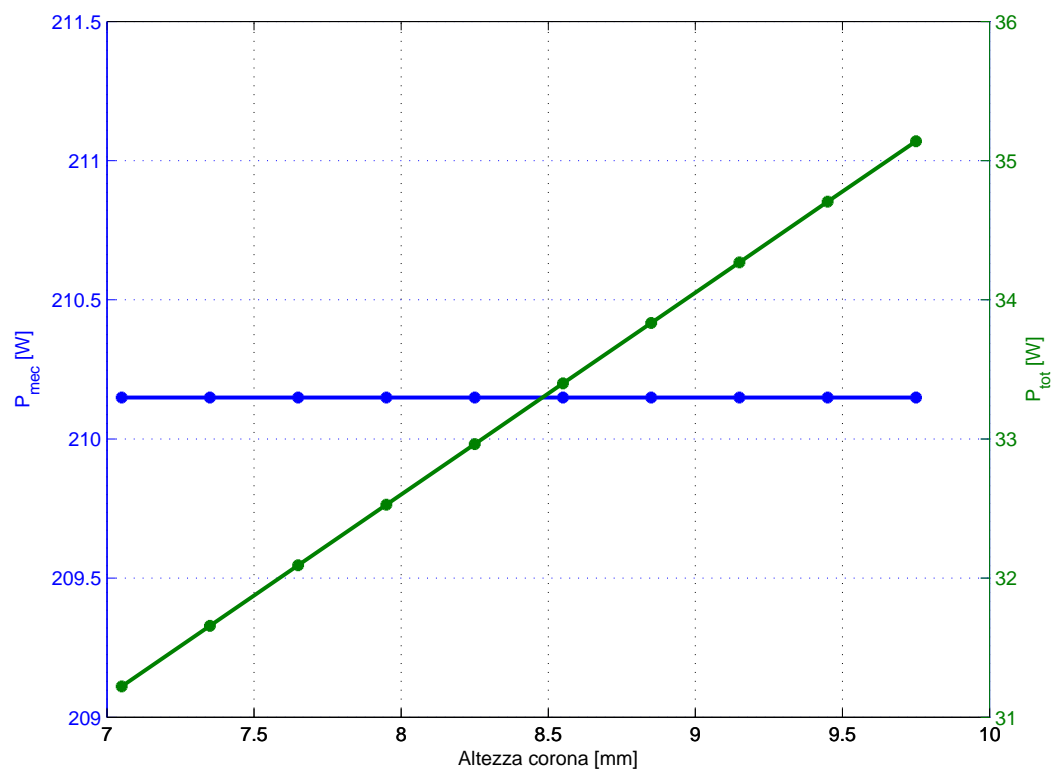


Figura 5.5: Riducendo l'altezza della corona vengono ridotte le perdite nel ferro della corona stessa (ne diminuisce il volume), quindi le perdite totali. La potenza meccanica resta invariata non essendo legata a tale dimensione geometrica.

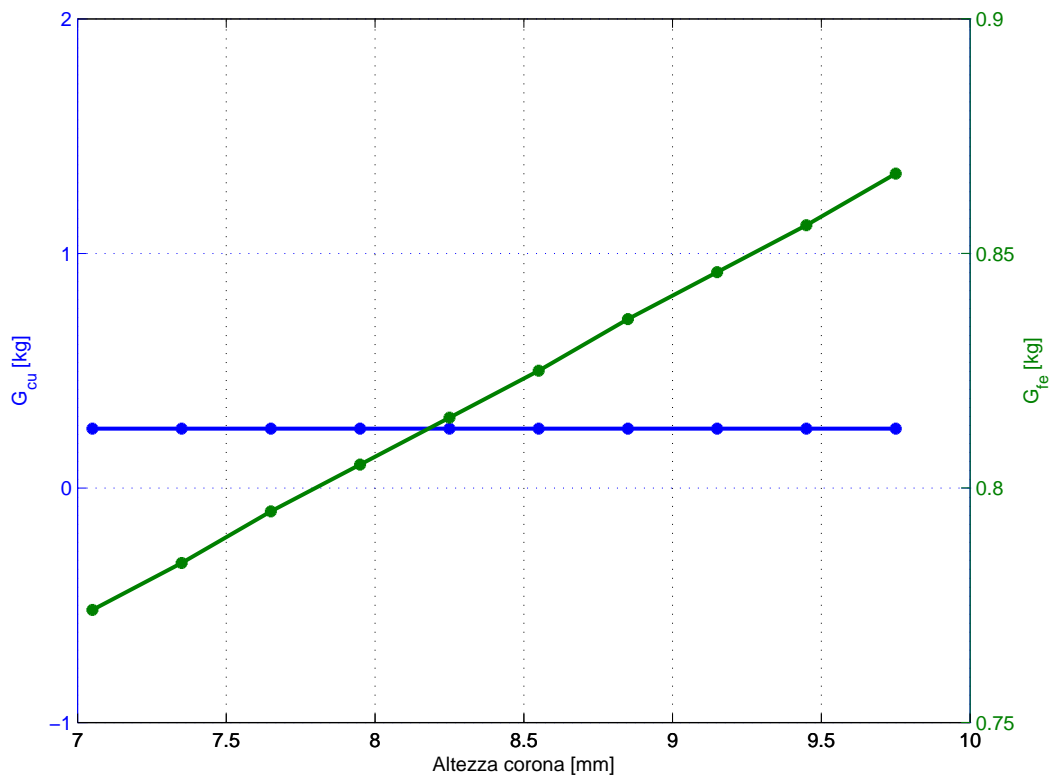


Figura 5.6: Riducendo l'altezza della corona diminuisce il volume complessivo di ferro impiegato, mentre resta invariato il peso complessivo del rame.

5.4 Modifica diametro interno di statore

Come punto di partenza per questa ulteriore modifica si è scelto l'ultimo valore di altezza della corona, ovvero 7,05 mm, in quanto risulta la configurazione con le migliori prestazioni.

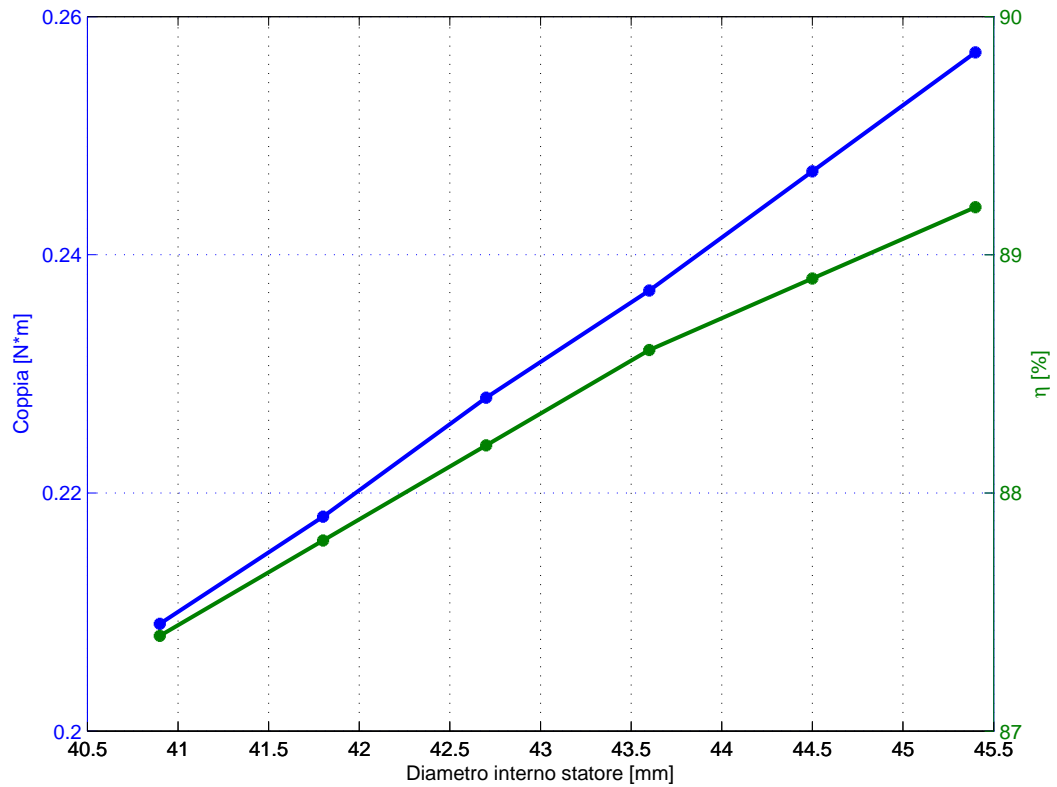


Figura 5.7: Aumentando il valore del diametro interno di statore viene ad essere modificata gran parte della geometria, comprese le cave di statore e l'avvolgimento. In conseguenza a questa modifica, la coppia meccanica aumenta molto essendo proporzionale a D^2 .

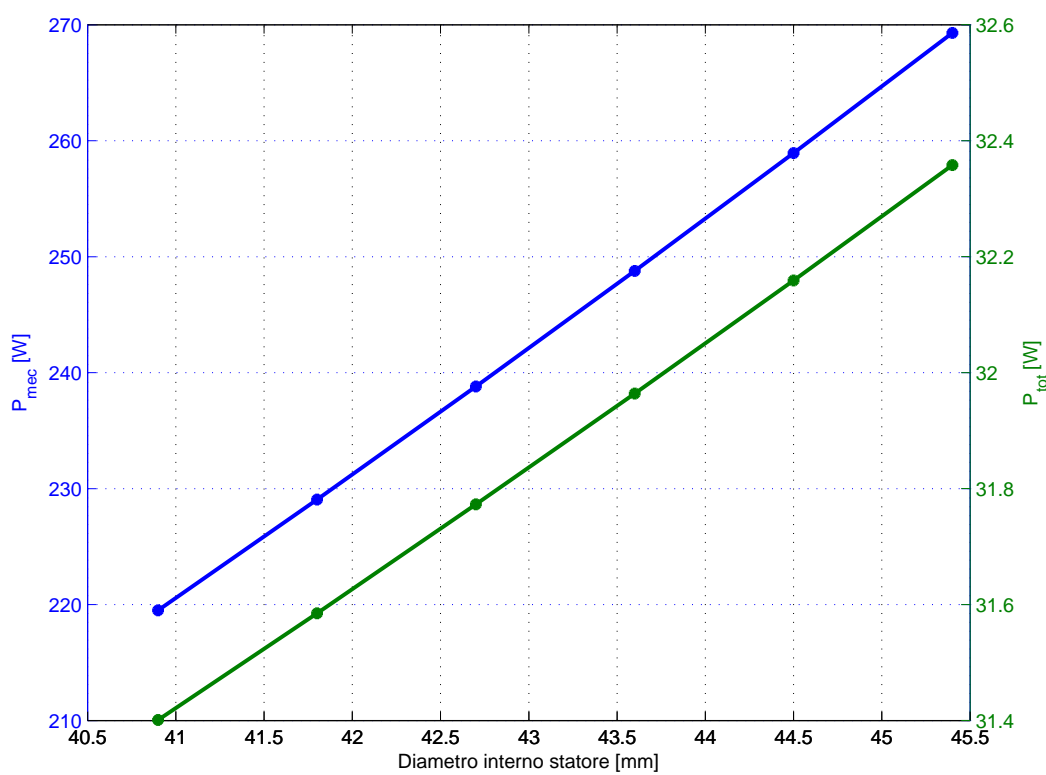


Figura 5.8: Aumentando la coppia aumenta in maniera proporzionale la potenza meccanica. Non essendo della stessa entità anche l'aumento delle perdite in genere della macchina, si nota un leggero miglioramento di rendimento.

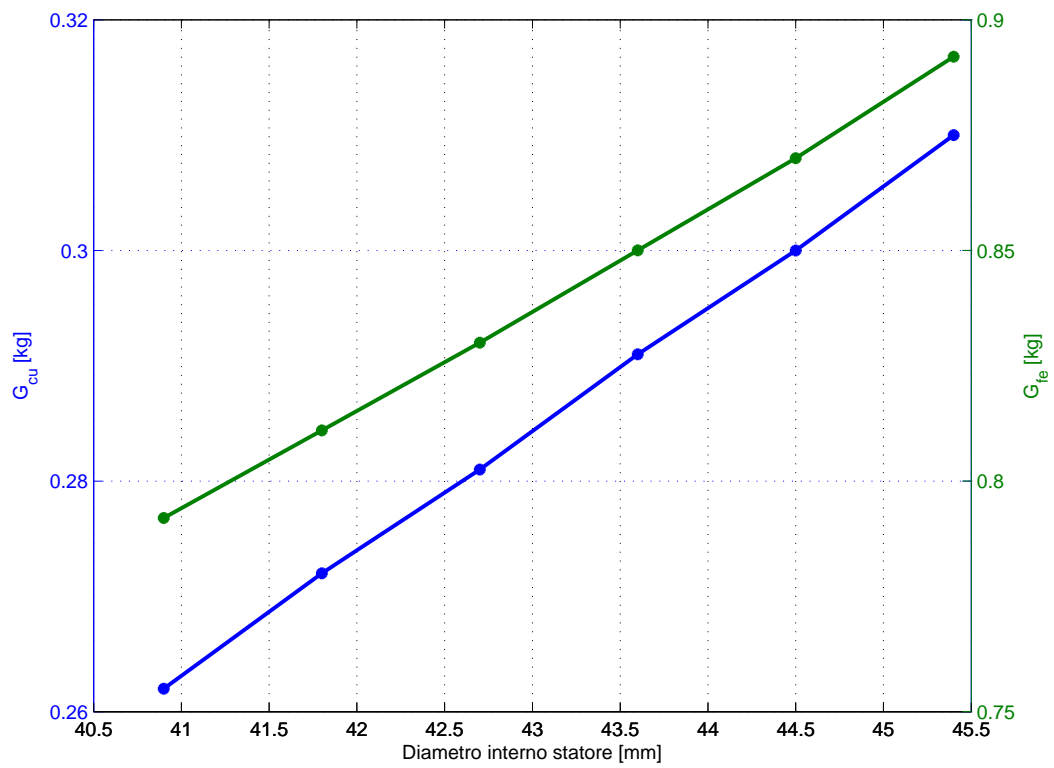


Figura 5.9: Conseguenza diretta dell'aumento del diametro interno di statore, e quindi di un pó tutte le dimensioni della macchina, é l'aumento dei volumi di materiale utilizzato nonché dei loro pesi. Conseguo un aumento dei costi.

5.5 Configurazione ottima raggiunta

5.5.1 Geometria

Grandezza	Unitá di misura	Valore	Simbolo
Diametro esterno	mm	80	De
Diametro interno	mm	45,4	D
Numero cave		6	Qs
Sezione cava	mm^2	250	Sslot
Altezza cava	mm	10,25	hs
Apertura cava di statore	mm	3,3	wso
Altezza corona	mm	7,05	hbi
Larghezza dente	mm	4,4	wt
Traferro	mm	1	g
Diametro rotore	mm	43,4	Dr
Diametro foro rotore	mm	15	
Numero fasi		3	m
Numero poli		4	2p
Lunghezza pacco	mm	20	Lz

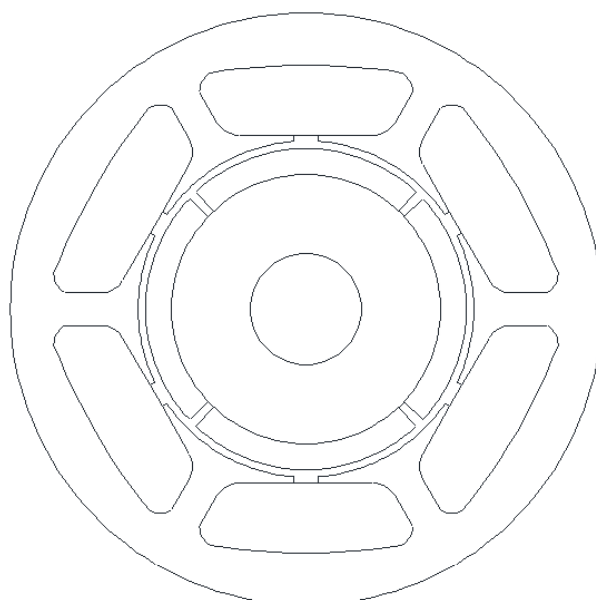


Figura 5.10: Nuova geometria di statore e rotore.

5.5.2 Prestazioni offerte dal motore ottimizzato

Grandezza	Unitá di misura	Valore	Simbolo
Valore medio di coppia	$N \cdot m$	0,257	T_{avg}
Potenza meccanica	W	269,3	Pm
Perdite totali	W	53,8	Ptot
Rendimento		0,833	η

5.6 Verifica con software FEMM

In seguito alle modifiche apportate alla geometria della macchina, sono stati verificati con software FEMM i calcoli effettuati con il metodo analitico.

Si é andati ad analizzare il nuovo andamento della coppia, inteso come valore medio e ripple, l'induzione al traferro, l'induzione massima nei denti e nella corona.

Grandezza	Unitá di misura	Valore	Simbolo
Valore medio di coppia	$N \cdot m$	0,270	T_{avg}
Ripple di coppia	$N \cdot m$	$\pm 0,040$	
Induzione al traferro	T	0,287	Bg
Induzione massima nel dente	T	1,497	Bt_{max}
Induzione massima nella corona	T	0,903	Bbi_{max}

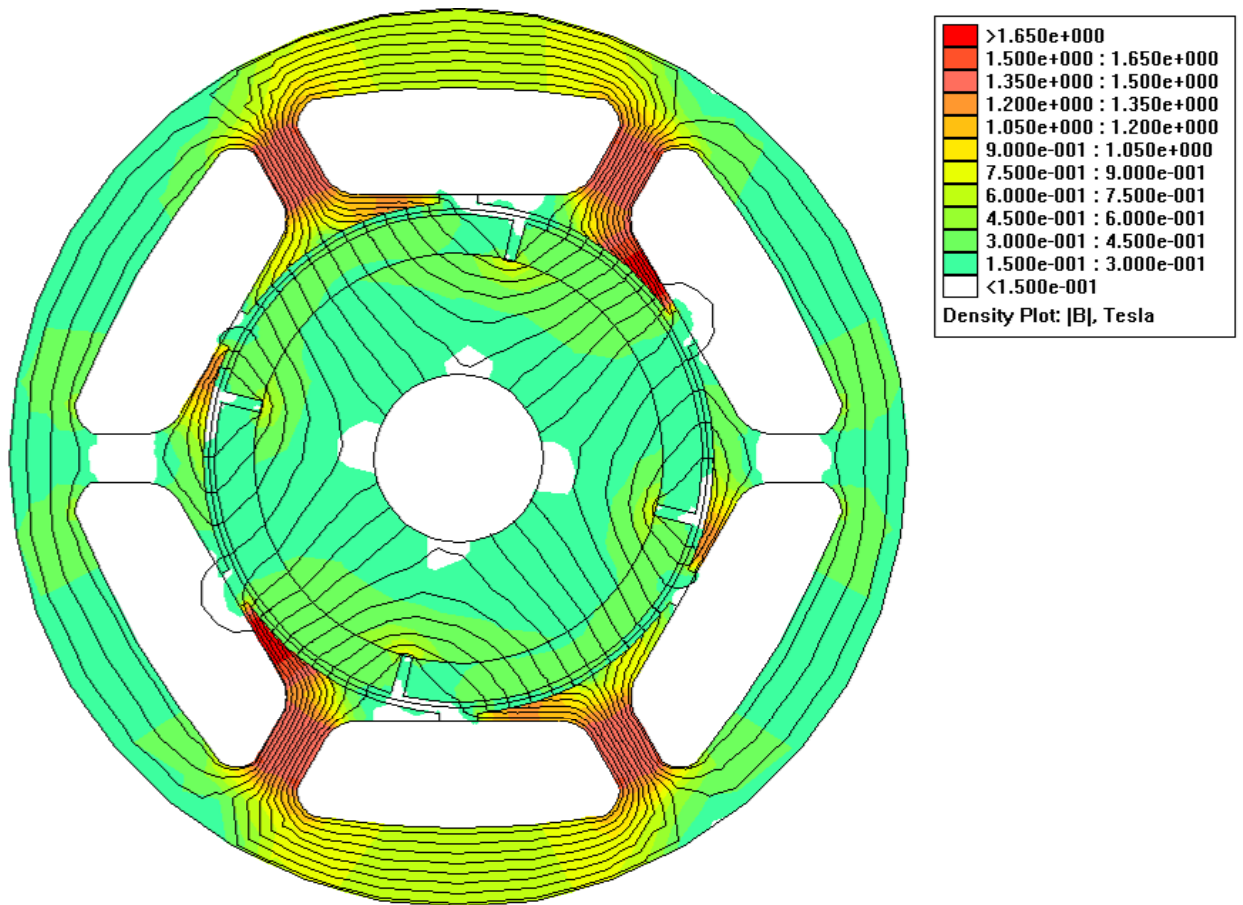


Figura 5.11: Mappa di campo.

Capitolo 6

Ottimizzazione del secondo motore (config.12/4)

6.1 Premessa

Il lavoro svolto in questa sezione ha come fine quello di ottenere un miglioramento delle prestazioni della macchina in questione a partire dalla sua configurazione iniziale.

Per raggiungere questo scopo si é suddiviso il lavoro in step; cioé si é andato a variare un parametro alla volta tenendo fissi tutti gli altri, ogni volta partendo con la variazione del successivo parametro dal punto di ottimo ottenuto dalla variazione precedente.

Uno degli obiettivi di questa fase é il raggiungimento di un rendimento di conversione della macchina il piú alto possibile, valutato tramite un accurato modello analitico. In oltre si vuole tenere contenuti i costi di costruzione della macchina stessa, cercando di minimizzare la quantità di rame presente al suo interno, riducendo il piú possibile le testate e cercando anche di minimizzare la quantità di lamierino magnetico impiegato per la sua fabbricazione.

I vincoli invece da rispettare riguardano il raggiungimento di una coppia meccanica all'albero di almeno $0,2N \cdot m$ ad una velocità di rotazione di 10000 rpm, oltre a dovere restare entro un ingombro massimo, espresso dal diametro esterno non superiore a 80 mm.

Inizialmente si é andati a ridurre l'altezza della corona, che risultava comunque, dalle simulazioni FEMM, poco sfruttata. Si é ottenuta una diminuzione del peso del ferro totale e un leggero aumento del rendimento, dovuto alla diminuzione delle perdite nel ferro della corona.

Successivamente é stato variato il diametro interno di statore, per riportarsi ad un valore di ingombro di 80 mm. Quest'ulteriore modifica ha determinato un aumento sensibile della coppia meccanica all'albero, della potenza meccanica e del rendimento; facendo però aumentare anche i pesi di rame e ferro, quindi

il costo finale della macchina.

Infine é stata ridotta la larghezza del dente di statore che ha portato ad un ulteriore aumento di coppia, potenza meccanica, rendimento e ad un aumento del peso del rame, mentre invece é diminuito il peso complessivo del ferro.

6.2 Modifica altezza corona

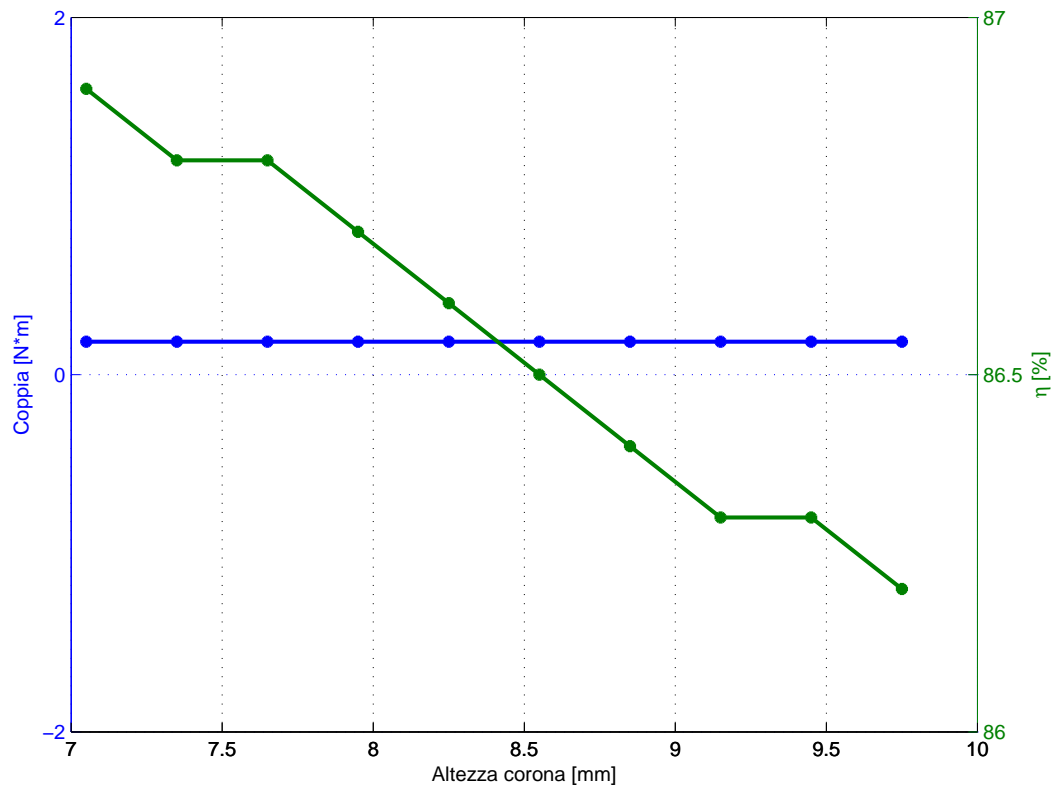


Figura 6.1: Riducendo l'altezza della corona vengono ridotte le perdite nel ferro della corona stessa (ne diminuisce il volume) quindi a parità di altre perdite si ha un aumento del rendimento di conversione.

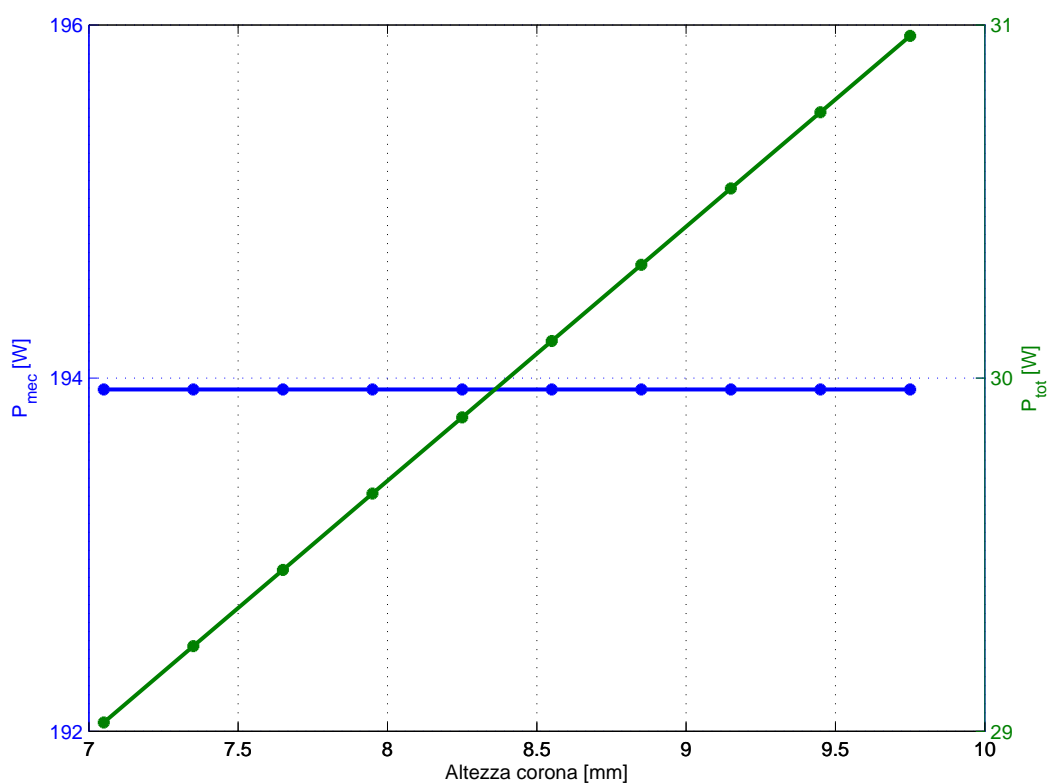


Figura 6.2: Riducendo l'altezza della corona vengono ridotte le perdite nel ferro della corona stessa (ne diminuisce il volume), quindi le perdite totali. La potenza meccanica resta invariata non essendo legata a tale dimensione geometrica.

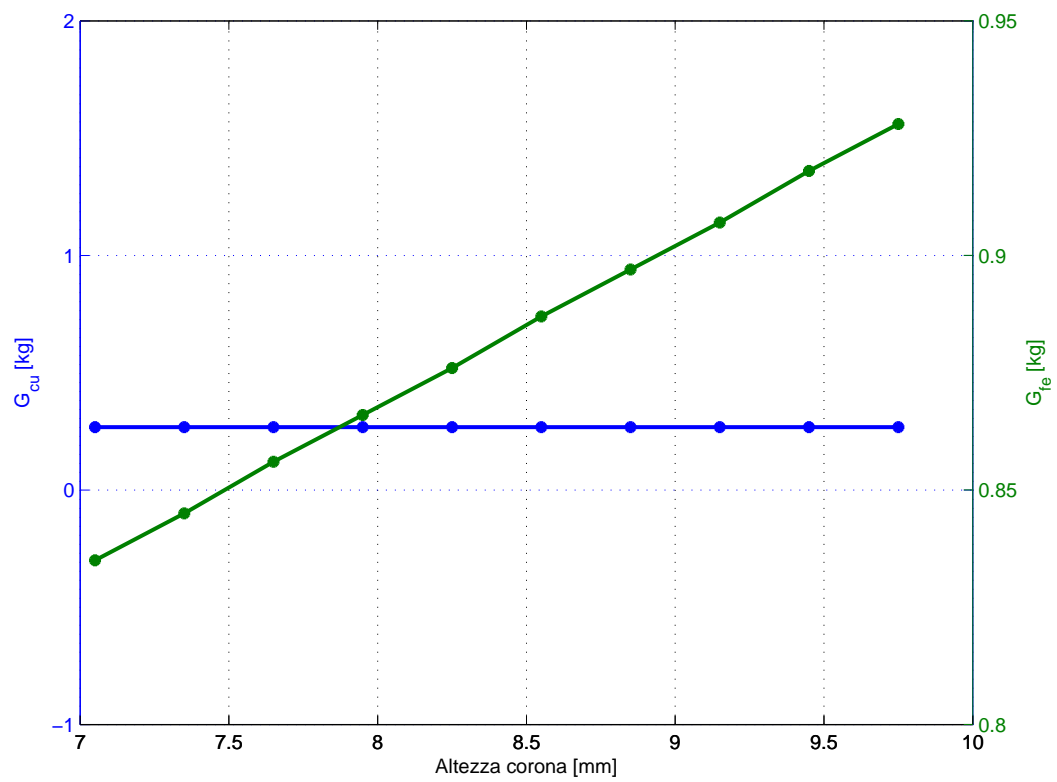


Figura 6.3: Riducendo l'altezza della corona diminuisce il volume complessivo di ferro impiegato, mentre resta invariato il peso complessivo del rame.

6.3 Modifica diametro interno di statore

Come punto di partenza per questa ulteriore modifica si é scelto l'ultimo valore di altezza della corona, ovvero 7,05 mm, in quanto risulta la configurazione con le migliori prestazioni.

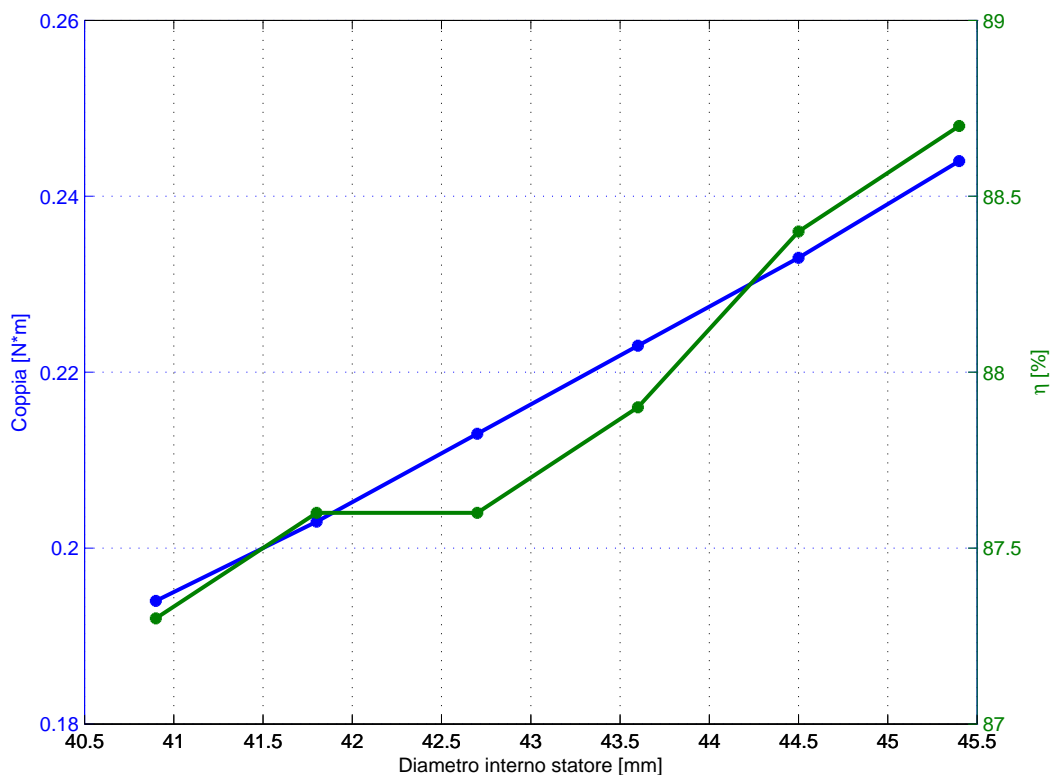


Figura 6.4: Aumentando il valore del diametro interno di statore viene ad essere modificata gran parte della geometria, comprese le cave di statore e l'avvolgimento. In conseguenza a questa modifica, la coppia meccanica aumenta molto essendo proporzionale a D^2 .

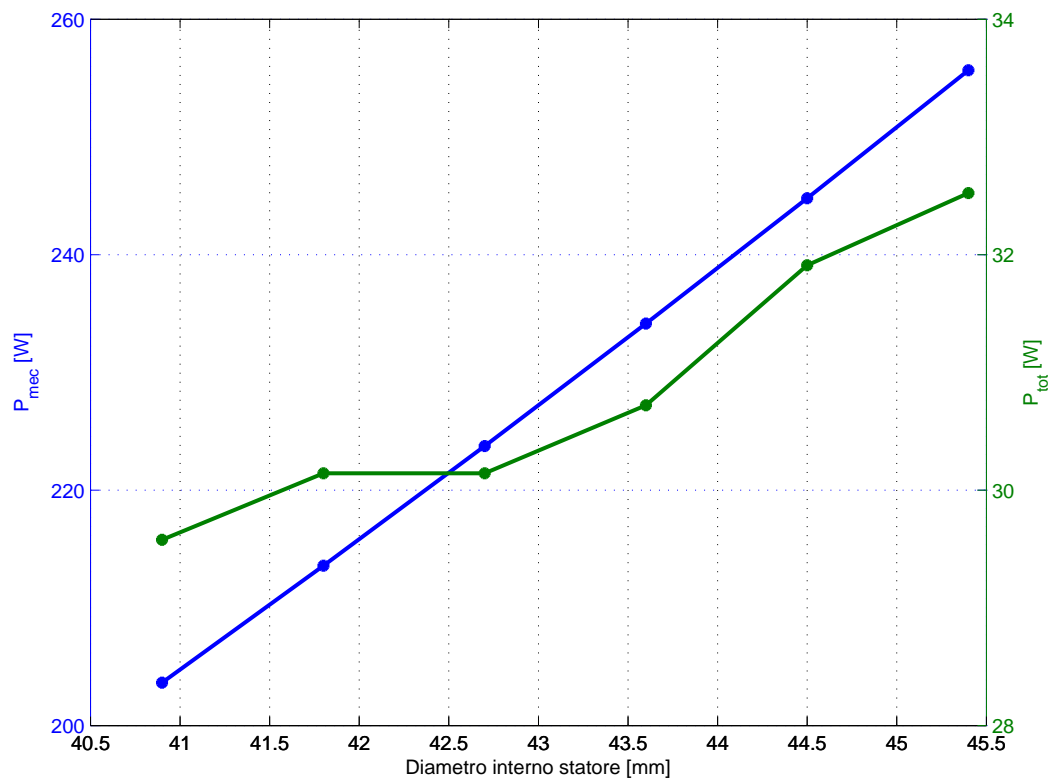


Figura 6.5: Aumentando la coppia aumenta in maniera proporzionale la potenza meccanica. Non essendo della stessa entità anche l'aumento delle perdite in genere della macchina, si nota un leggero miglioramento di rendimento

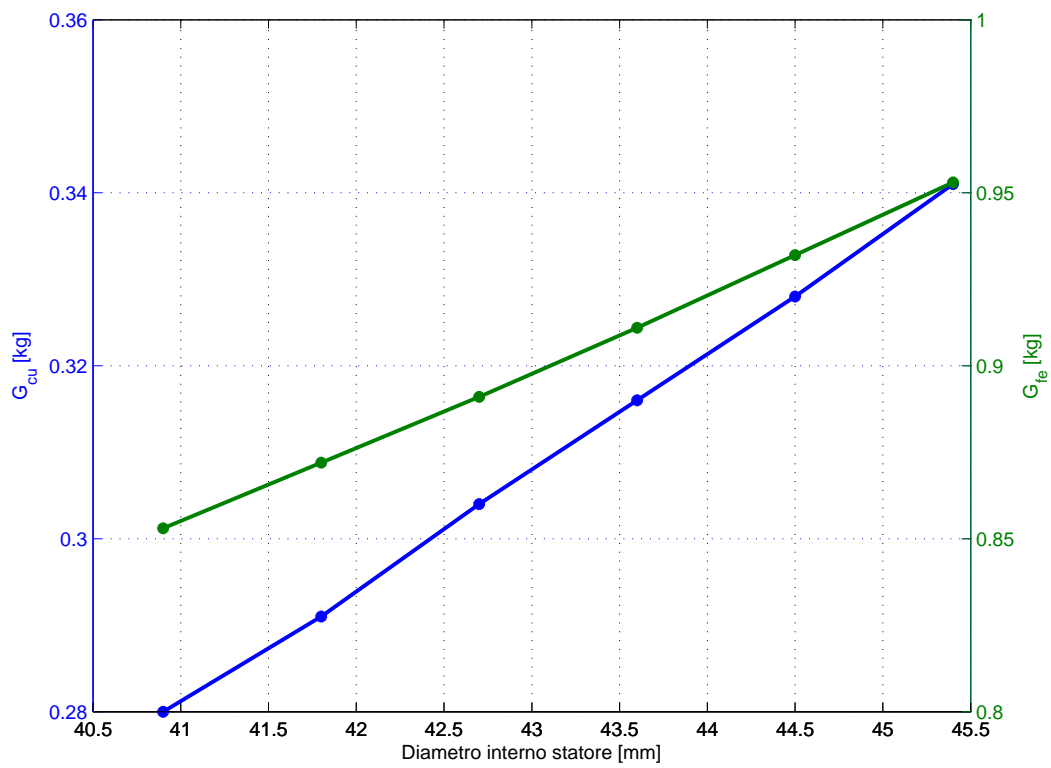


Figura 6.6: Conseguenza diretta dell'aumento del diametro interno di statore, e quindi di un pó tutte le dimensioni della macchina, é l'aumento dei volumi di materiale utilizzato nonché dei loro pesi. Conseguo un aumento dei costi.

6.4 Modifica denti di statore

Come punto di partenza per questa ulteriore modifica si é scelto l'ultimo valore di diametro interno di statore, ovvero 45,4 mm, in quanto risulta la configurazione con le migliori prestazioni.

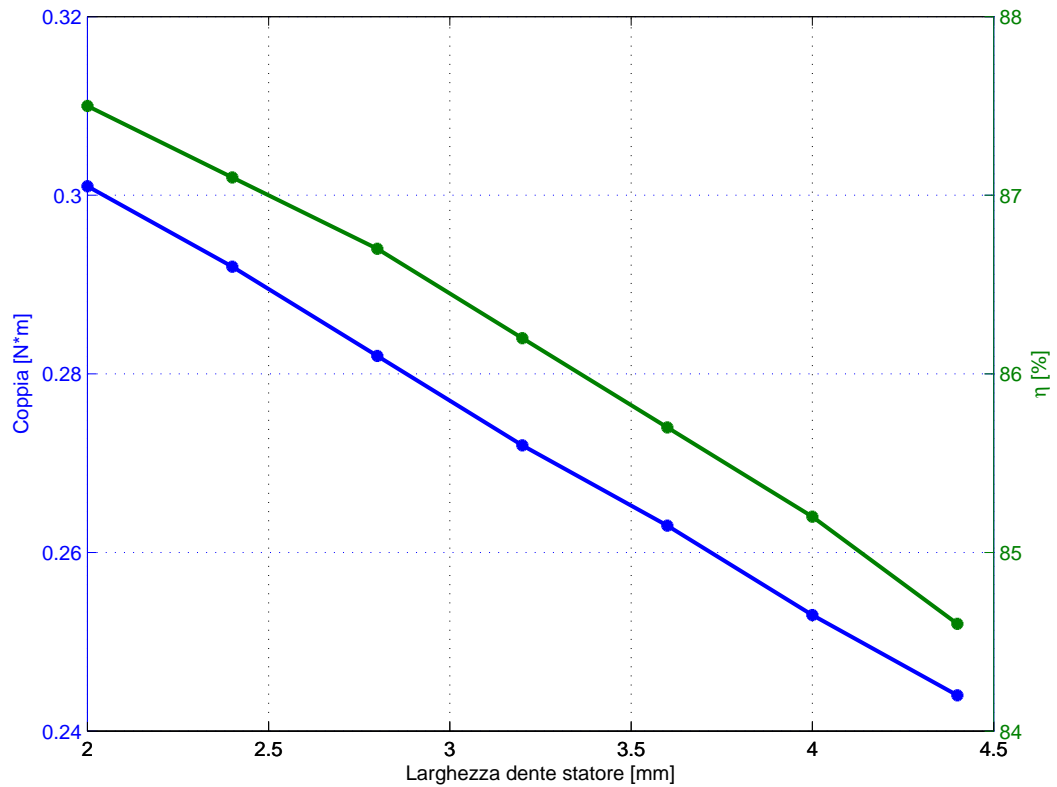


Figura 6.7: Riducendo la larghezza dei denti di statore si viene ad avere un aumento della sezione di cava, che a parità di densità di corrente scelta, determina un aumento della corrente nella cava stessa. Ciò si traduce in un aumento del carico elettrico quindi di coppia meccanica sviluppata.

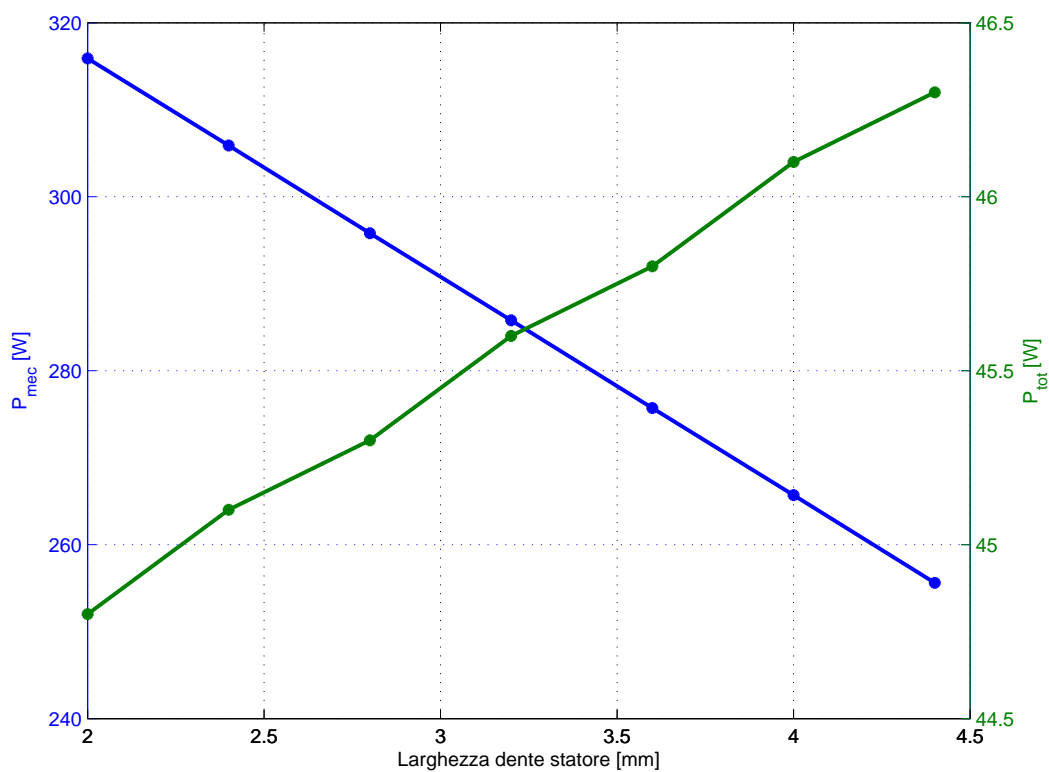


Figura 6.8: All'aumentare della coppia meccanica sviluppata, proporzionalmente aumenta anche la potenza meccanica messa in gioco dalla macchina ($\Omega \cdot T$). L'aumento delle perdite Joule, derivante dalla maggiore corrente che circola negli avvolgimenti, viene equilibrato dalla diminuzione delle perdite nel ferro dei denti (diminuisce il peso del ferro); quindi le perdite totali restano circa invariate e il rendimento aumenta seguendo l'aumento della potenza meccanica.

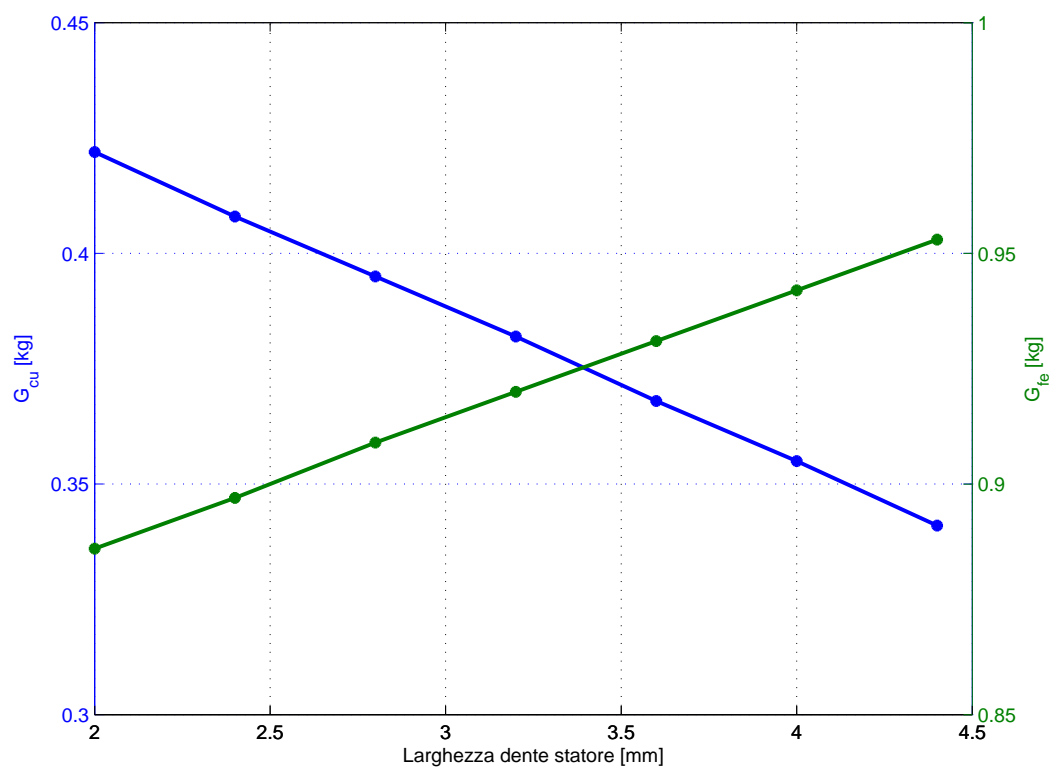


Figura 6.9: Con la modifica della larghezza dei denti di statore vengono modificati anche i pesi complessivi: del ferro che diminuisce e del rame, costituente gli avvolgimenti, che aumenta.

6.5 Configurazione ottima raggiunta

6.5.1 Geometria

Grandezza	Unitá di misura	Valore	Simbolo
Diametro esterno	mm	80	De
Diametro interno	mm	45,4	D
Numero cave		12	Qs
Sezione cava	mm^2	128,8	Sslot
Altezza cava	mm	10,25	hs
Apertura cava di statore	mm	3,3	wso
Altezza corona	mm	7,05	hbi
Larghezza dente	mm	2	wt
Traferro	mm	1	g
Diametro rotore	mm	43,4	Dr
Diametro foro rotore	mm	15	
Numero fasi		3	m
Numero poli		4	2p
Lunghezza pacco	mm	20	Lz

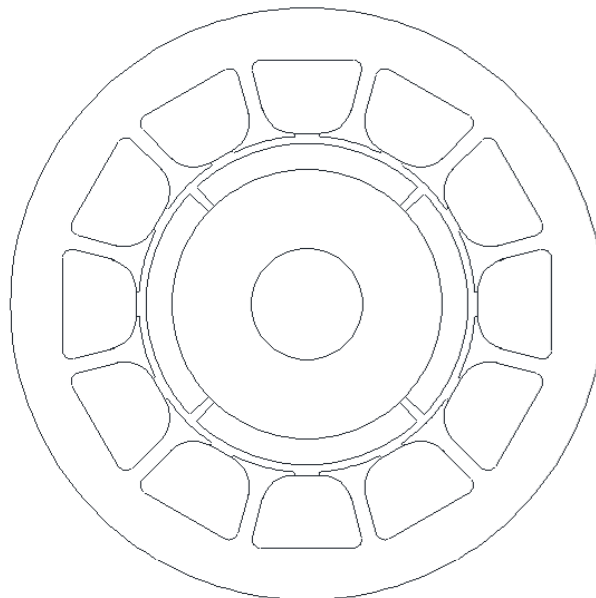


Figura 6.10: Nuova geometria di statore e rotore.

6.5.2 Prestazioni offerte dal motore ottimizzato

Grandezza	Unitá di misura	Valore	Simbolo
Valore medio di coppia	$N \cdot m$	0,301	T_{avg}
Potenza meccanica	W	315,9	Pm
Perdite totali	W	61,5	Ptot
Rendimento		0,837	η

6.6 Verifica con software FEMM

In seguito alle modifiche apportate alla geometria della macchina, sono stati verificati con software FEMM i calcoli effettuati con il metodo analitico.

Si é andati ad analizzare il nuovo andamento della coppia, inteso come valore medio e ripple, l'induzione al traferro, l'induzione massima nei denti e nella corona.

Grandezza	Unitá di misura	Valore	Simbolo
Valore medio di coppia	$N \cdot m$	0,320	T_{avg}
Ripple di coppia	$N \cdot m$	$\pm 0,080$	
Induzione al traferro	T	0,282	Bg
Induzione massima nel dente	T	1,741	Bt_{max}
Induzione massima nella corona	T	0,644	Bbi_{max}

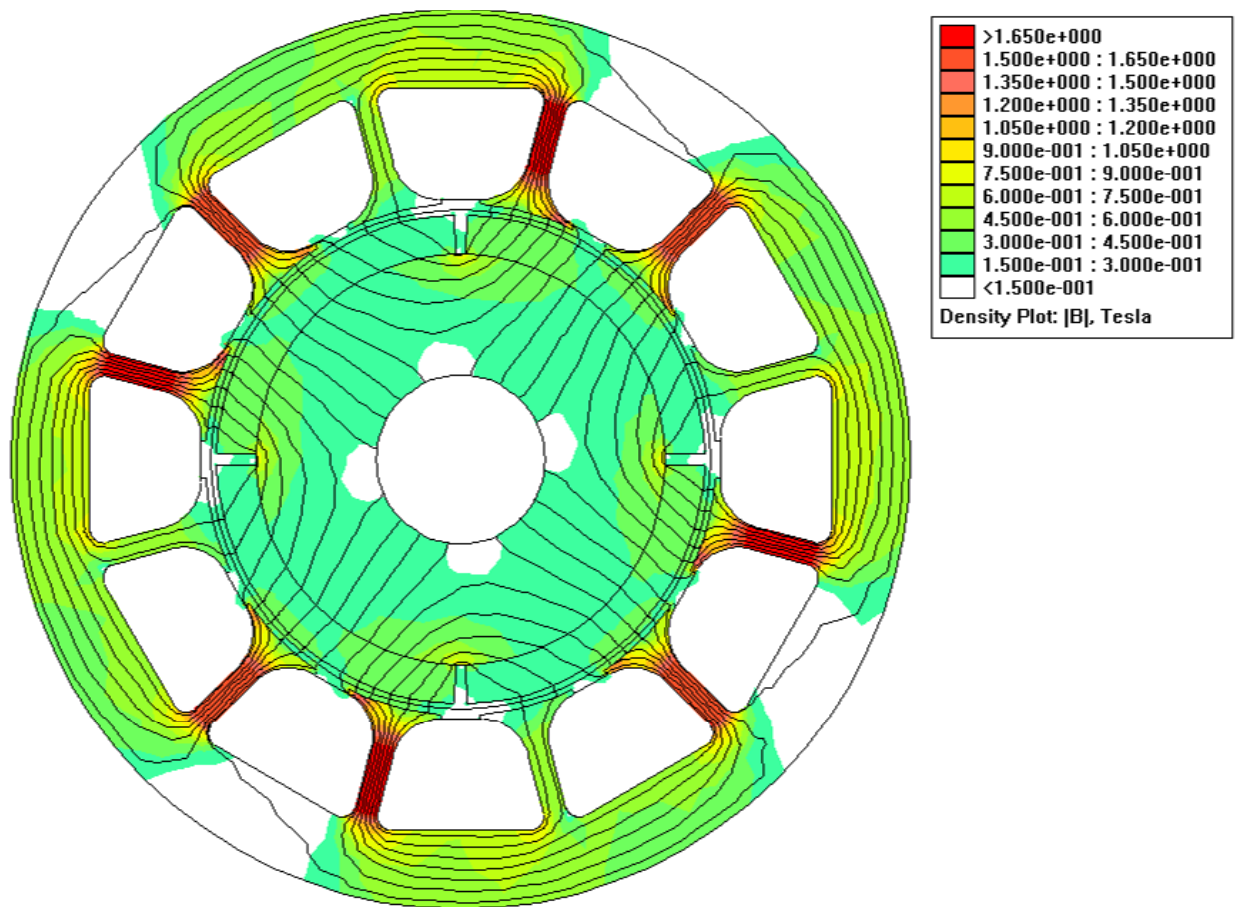


Figura 6.11: Mappa di campo.

Capitolo 7

Ottimizzazione del terzo motore (config.24/4)

7.1 Premessa

Il lavoro svolto in questa sezione ha come fine quello di ottenere un miglioramento delle prestazioni della macchina in questione a partire dalla sua configurazione iniziale.

Per raggiungere questo scopo si é suddiviso il lavoro in step; cioé si é andato a variare un parametro alla volta tenendo fissi tutti gli altri, ogni volta partendo con la variazione del successivo parametro dal punto di ottimo ottenuto dalla variazione precedente.

Uno degli obiettivi di questa fase é il raggiungimento di un rendimento di conversione della macchina il piú alto possibile, valutato tramite un accurato modello analitico. In oltre si vuole tenere contenuti i costi di costruzione della macchina stessa, cercando di minimizzare la quantitá di rame presente al suo interno, riducendo il piú possibile le testate e cercando anche di minimizzare la quantitá di lamierino magnetico impiegato per la sua fabbricazione.

I vincoli invece da rispettare riguardano il raggiungimento di una coppia meccanica all'albero di almeno $0,2N \cdot m$ ad una velocitá di rotazione di 10000 rpm, oltre a dovere restare entro un ingombro massimo, espresso dal diametro esterno non superiore a 80 mm.

Inizialmente si é andati a ridurre la larghezza del dente di statore per diminuire il peso del ferro impiegato. Questo ha determinato un aumento della sezione di cava quindi della corrente in cava a paritá di densitá di corrente impostata ($5 A/mm^2$). Di conseguenza si ottiene un aumento della coppia meccanica sviluppata, quindi della potenza meccanica e del rendimento essendo che le perdite totali aumentano, ma non in maniera significativa.

La seconda modifica eseguita su questa terza macchina in esame riguarda il magnete permanente superficiale sul rotore. Si é pensato di diminuirne lo spes-

sore in quanto questo motore, già nella sua configurazione iniziale, soddisfa a pieno i vincoli di coppia meccanica e ingombro. È possibile quindi pensare di diminuirne il costo complessivo.

In conseguenza si è ottenuta una diminuzione della coppia meccanica all'albero e della potenza meccanica, una leggera diminuzione di rendimento ed un leggero aumento del peso complessivo del ferro.

7.2 Modifica denti di statore

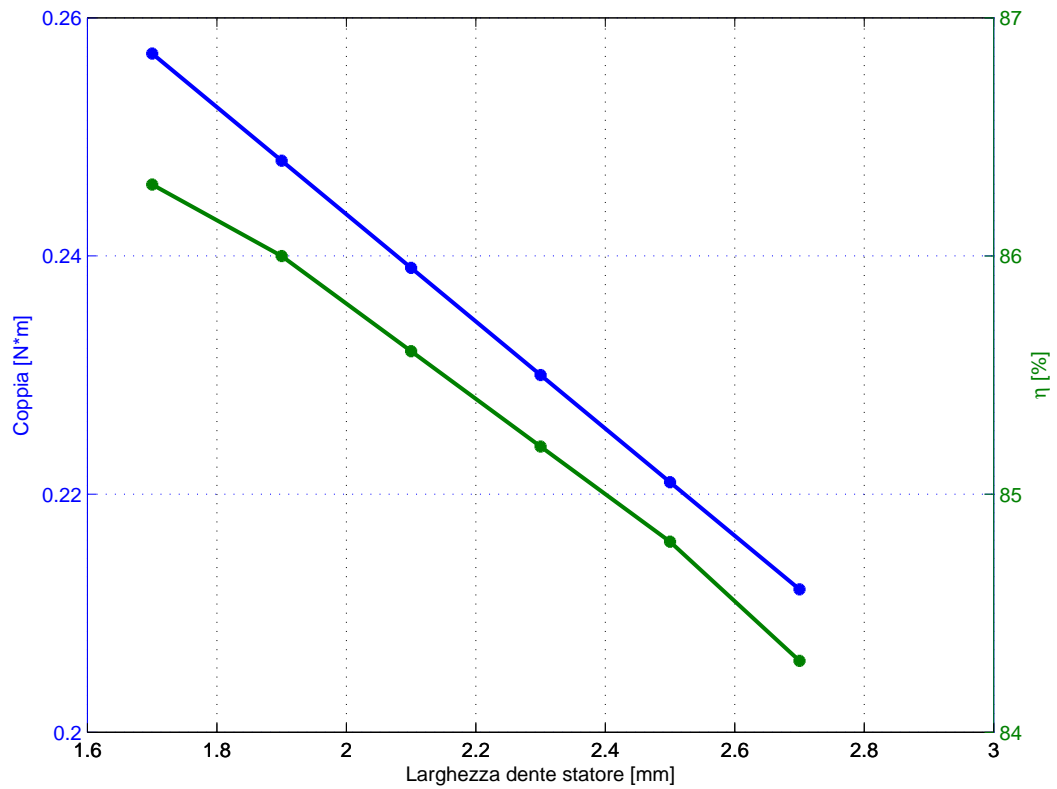


Figura 7.1: Riducendo la larghezza dei denti di statore si viene ad avere un aumento della sezione di cava, che a parità di densità di corrente scelta, determina un aumento della corrente nella cava stessa. Ciò si traduce in un aumento del carico elettrico quindi di coppia meccanica sviluppata.

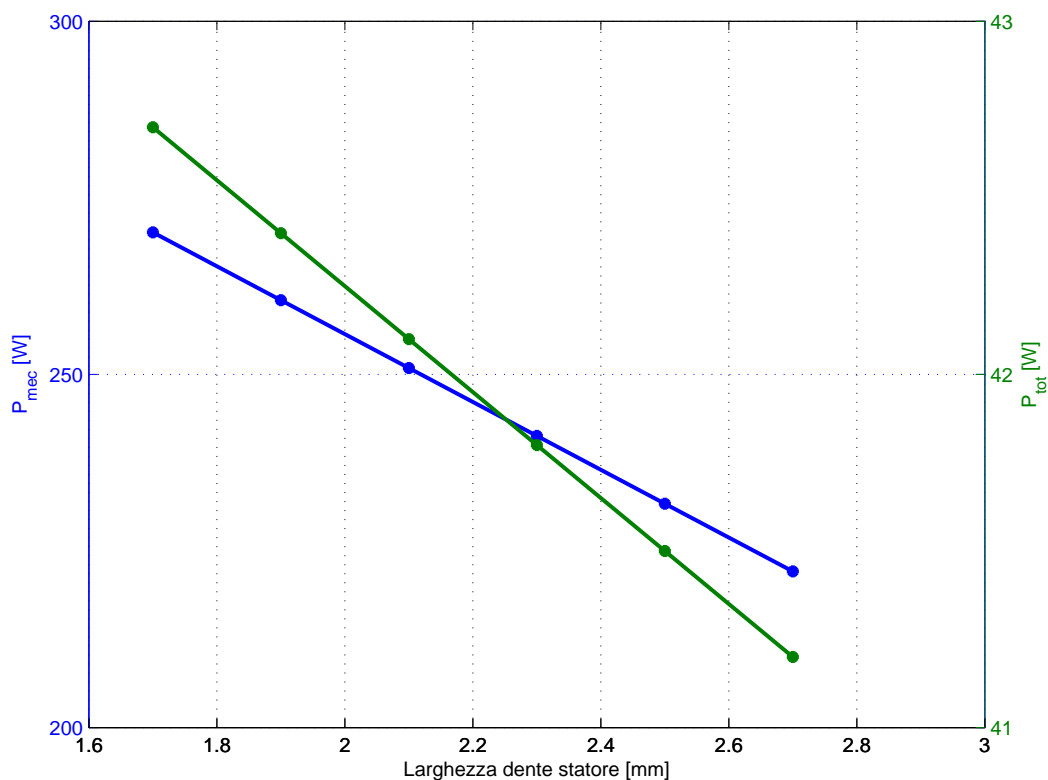


Figura 7.2: All'aumentare della coppia meccanica sviluppata, proporzionalmente aumenta anche la potenza meccanica messa in gioco dalla macchina ($\Omega \cdot T$). L'aumento delle perdite Joule, derivante dalla maggiore corrente che circola negli avvolgimenti, viene equilibrato dalla diminuzione delle perdite nel ferro dei denti (diminuisce il peso del ferro); quindi le perdite totali restano circa invariate e il rendimento aumenta seguendo l'aumento della potenza meccanica.

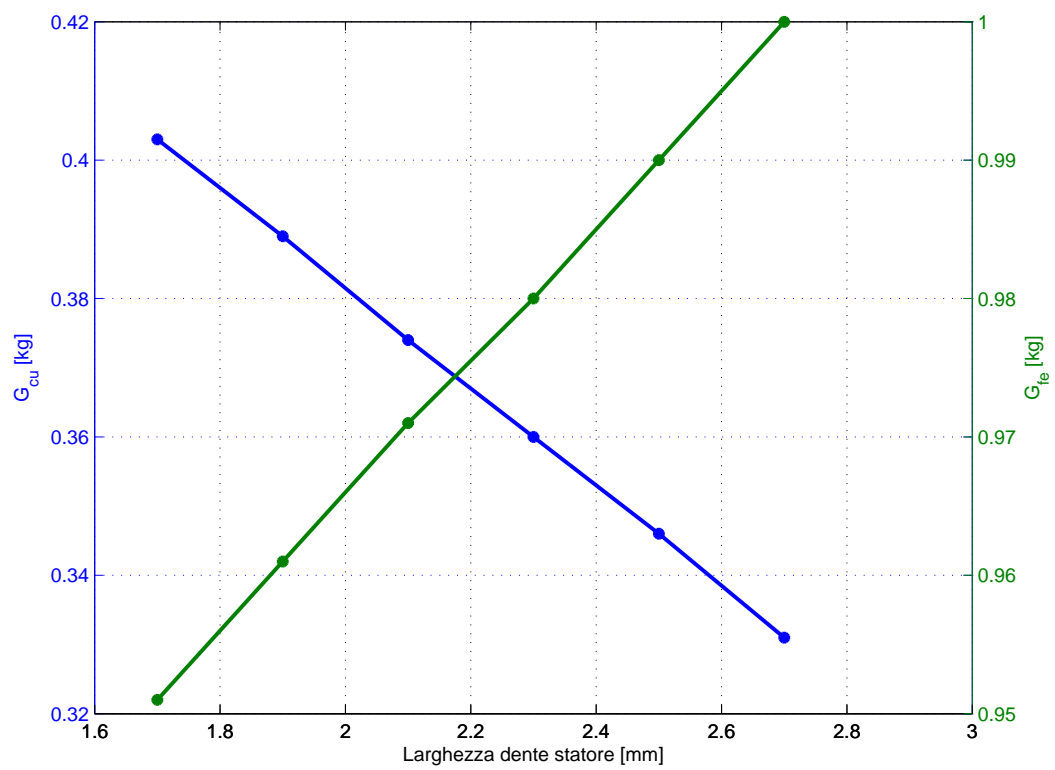


Figura 7.3: Con la modifica della larghezza dei denti di statore vengono modificati anche i pesi complessivi: del ferro che diminuisce e del rame, costituente gli avvolgimenti, che aumenta.

7.3 Modifica spessore magnete permanente

Come punto di partenza per questa ulteriore modifica si é scelto l'ultimo valore di larghezza del dente statorico, ovvero 1,7 mm, in quanto risulta la configurazione con le migliori prestazioni.

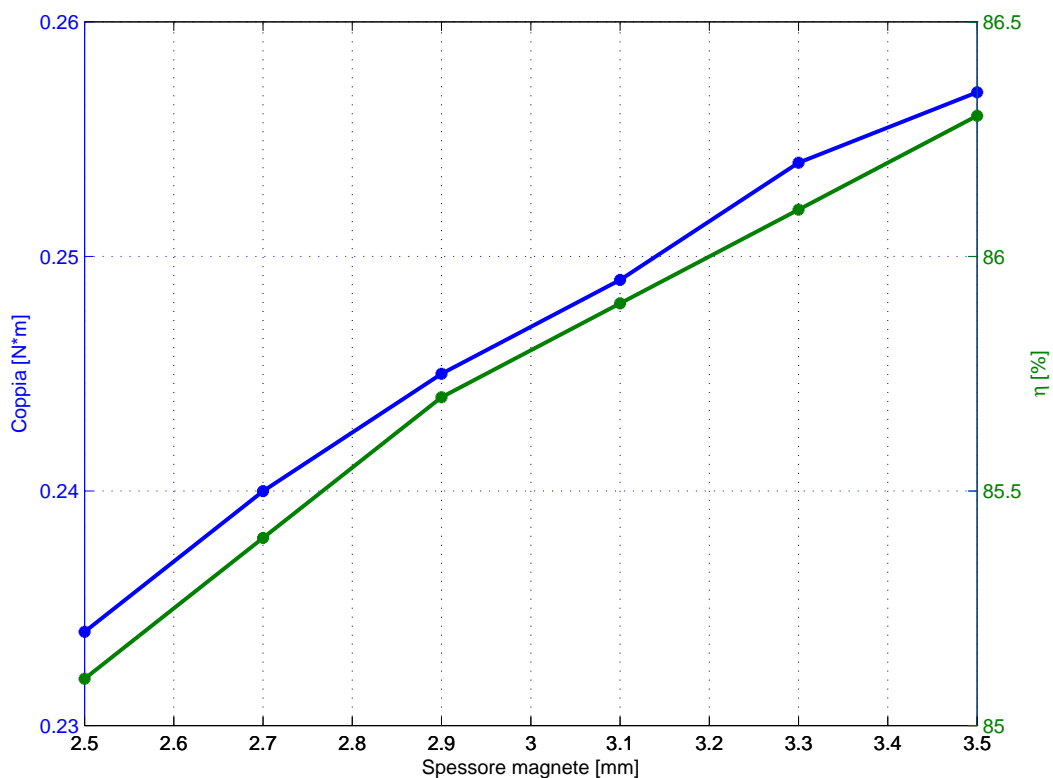


Figura 7.4: Diminuendo lo spessore del magnete permanente superficiale a bordo del rotore si nota la leggera diminuzione della coppia meccanica mentre il rendimento resta invariato.

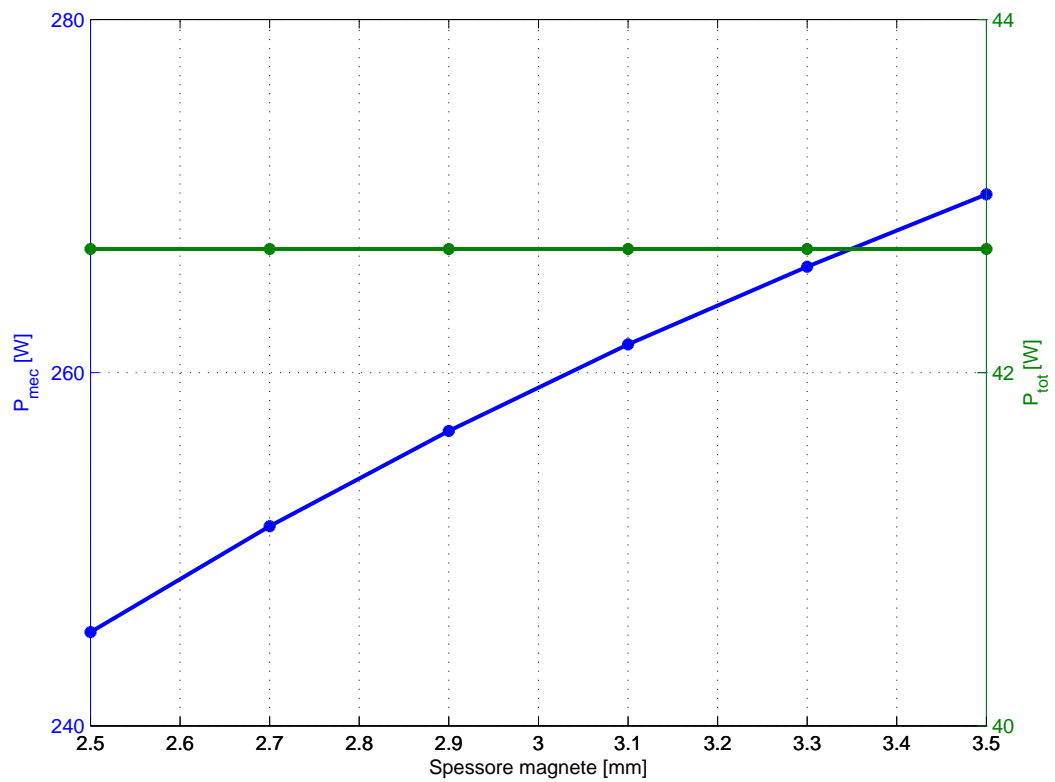


Figura 7.5: Diminuendo la coppia sviluppata diminuisce anche la potenza meccanica, mentre le perdite totali restano invariate.

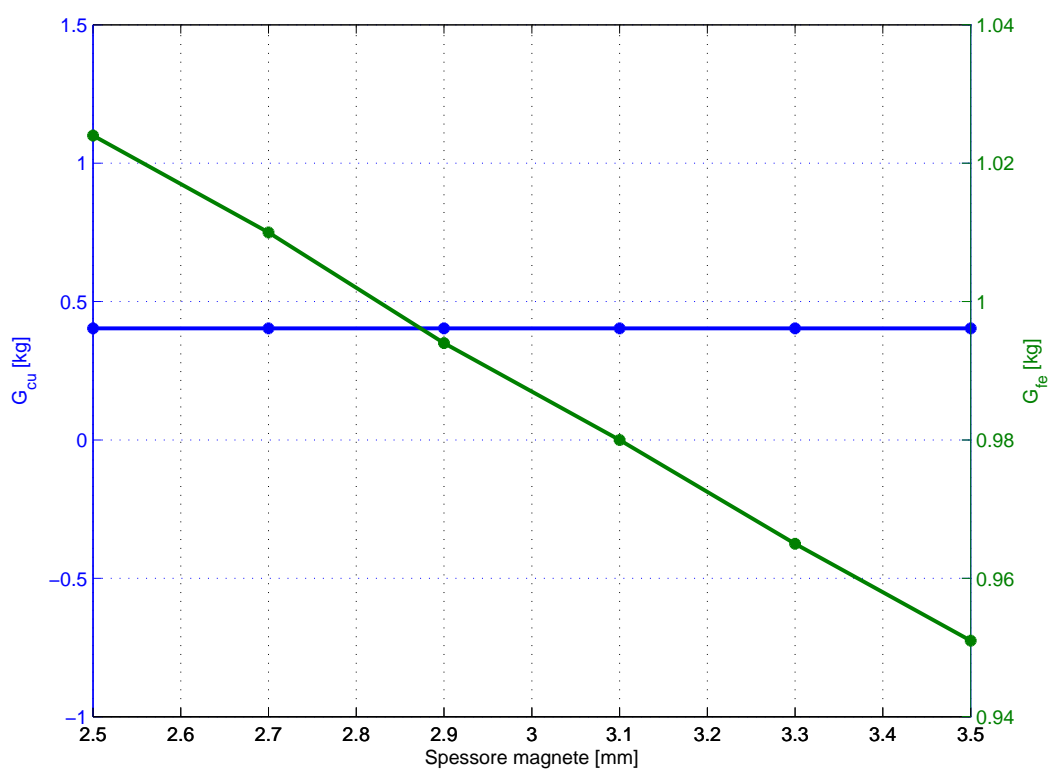


Figura 7.6: Diminuendo lo spessore del magnete rotorico aumenterà il ferro che costituisce il rotore stesso. Si nota infatti un aumento del peso del ferro complessivo mentre il peso complessivo del rame resta lo stesso.

7.4 Configurazione ottima raggiunta

7.4.1 Geometria

Grandezza	Unità di misura	Valore	Simbolo
Diametro esterno	mm	80	De
Diametro interno	mm	45	D
Numero cave		24	Qs
Sezione cava	mm^2	62	Sslot
Altezza cava	mm	11	hs
Apertura cava di statore	mm	2,3	wso
Altezza corona	mm	6,5	hbi
Larghezza dente	mm	1,7	wt
Traferro	mm	1	g
Diametro rotore	mm	43	Dr
Diametro foro rotore	mm	15	
Numero fasi		3	m
Numero poli		4	2p
Lunghezza pacco	mm	20	Lz
Spessore magnete	mm	2,9	tm

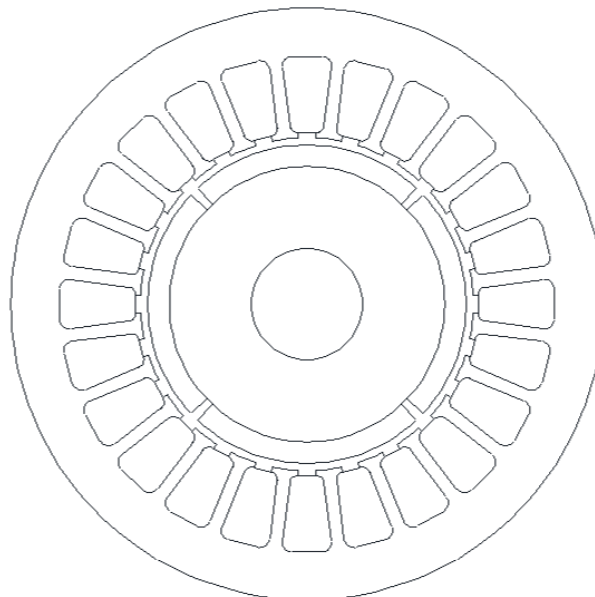


Figura 7.7: Nuova geometria di statore e rotore.

7.4.2 Prestazioni offerte dal motore ottimizzato

Grandezza	Unitá di misura	Valore	Simbolo
Valore medio di coppia	$N \cdot m$	0,234	T_{avg}
Potenza meccanica	W	245,3	Pm
Perdite totali	W	56,42	Ptot
Rendimento		0,0,813	η

7.5 Verifica con software FEMM

In seguito alle modifiche apportate alla geometria della macchina, sono stati verificati con software FEMM i calcoli effettuati con il metodo analitico.

Si é andati ad analizzare il nuovo andamento della coppia, inteso come valore medio e ripple, l'induzione al traferro, l'induzione massima nei denti e nella corona.

Grandezza	Unitá di misura	Valore	Simbolo
Valore medio di coppia	$N \cdot m$	0,260	T_{avg}
Ripple di coppia	$N \cdot m$	$\pm 0,040$	
Induzione al traferro	T	0,256	Bg
Induzione massima nel dente	T	0,9	Bt_{max}
Induzione massima nella corona	T	0,7	Bbi_{max}

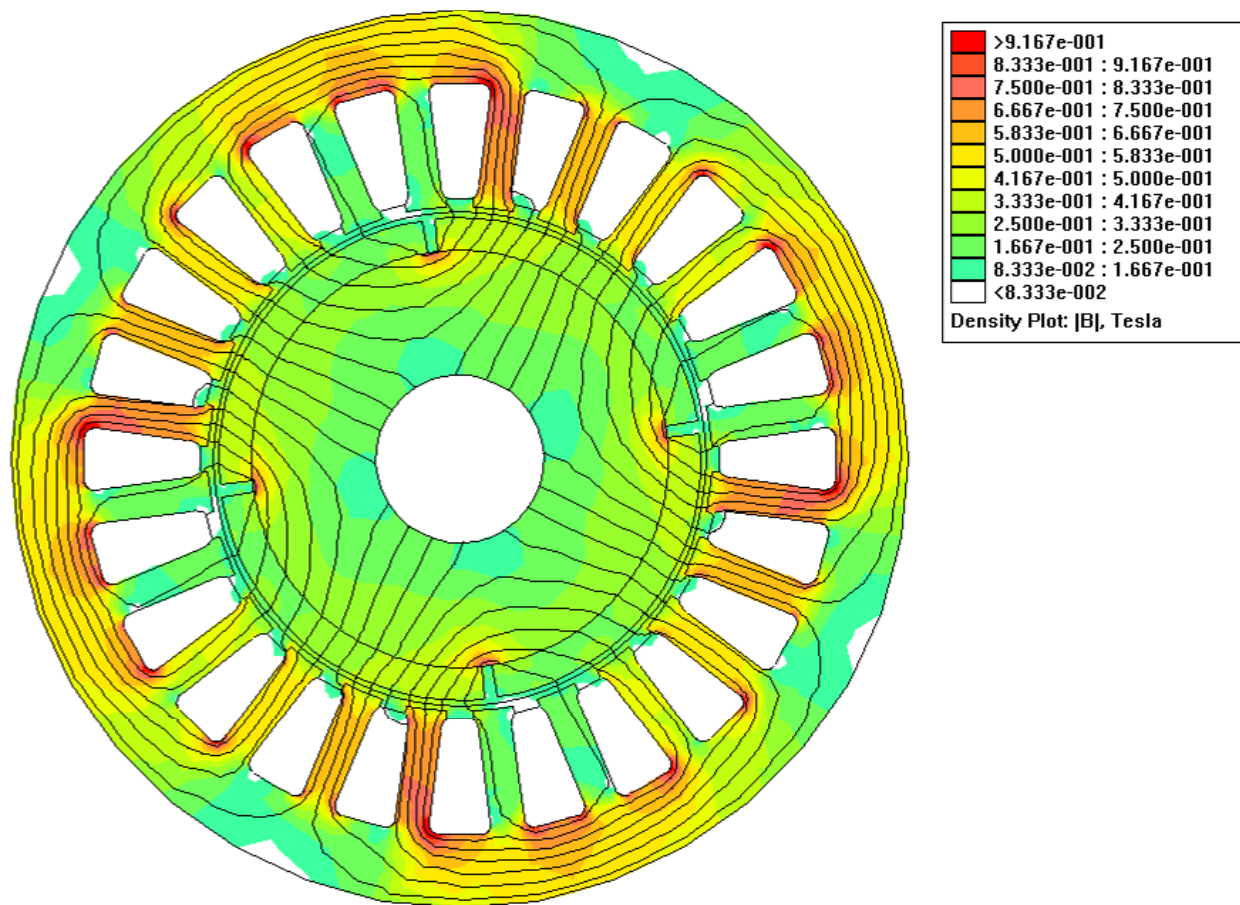


Figura 7.8: Mappa di campo.

Capitolo 8

Ottimizzazione del quarto motore (config.12/4)

8.1 Premessa

Il lavoro svolto in questa sezione ha come fine quello di ottenere un miglioramento delle prestazioni della macchina in questione a partire dalla sua configurazione iniziale.

Per raggiungere questo scopo si é suddiviso il lavoro in step; cioé si é andato a variare un parametro alla volta tenendo fissi tutti gli altri, ogni volta partendo con la variazione del successivo parametro dal punto di ottimo ottenuto dalla variazione precedente.

Uno degli obiettivi di questa fase é il raggiungimento di un rendimento di conversione della macchina il piú alto possibile, valutato tramite un accurato modello analitico. In oltre si vuole tenere contenuti i costi di costruzione della macchina stessa, cercando di minimizzare la quantità di rame presente al suo interno, riducendo il piú possibile le testate e cercando anche di minimizzare la quantità di lamierino magnetico impiegato per la sua fabbricazione.

I vincoli invece da rispettare riguardano il raggiungimento di una coppia meccanica all'albero di almeno $0,2N \cdot m$ ad una velocità di rotazione di 10000 rpm, oltre a dovere restare entro un ingombro massimo, espresso dal diametro esterno non superiore a 80 mm.

Inizialmente si é andati a ridurre l'altezza della corona, che risultava comunque, dalle simulazioni FEMM, poco sfruttata. Si é ottenuta una diminuzione del peso del ferro totale e un leggero aumento del rendimento, dovuto alla diminuzione delle perdite nel ferro della corona.

Successivamente é stato variato il diametro interno di statore per riportarsi ad un valore di ingombro di 80 mm. Questa modifica ha determinato un aumento sensibile della coppia meccanica all'albero, della potenza meccanica e del rendimento facendo però aumentare anche i pesi di rame e ferro, quindi il costo

finale della macchina.

Infine si é andati ad aumentare lo spessore del magnete permanente superficiale montato sul rotore. Ne é conseguito un leggero aumento della coppia meccanica all'albero, che però non ha raggiunto il vincolo imposto dalle specifiche. Un leggero aumento anche della potenza meccanica e del rendimento, mentre invece ha determinato una riduzione del peso complessivo del ferro. Sebbene però sia diminuito il peso del ferro é aumentato il peso complessivo del magnete impiegato, che é caratterizzato da un costo ben superiore a quello del lamierino ferromagnetico.

Si avrà quindi un aumento del costo complessivo della macchina derivante da quest'ultima modifica.

8.2 Modifica altezza corona

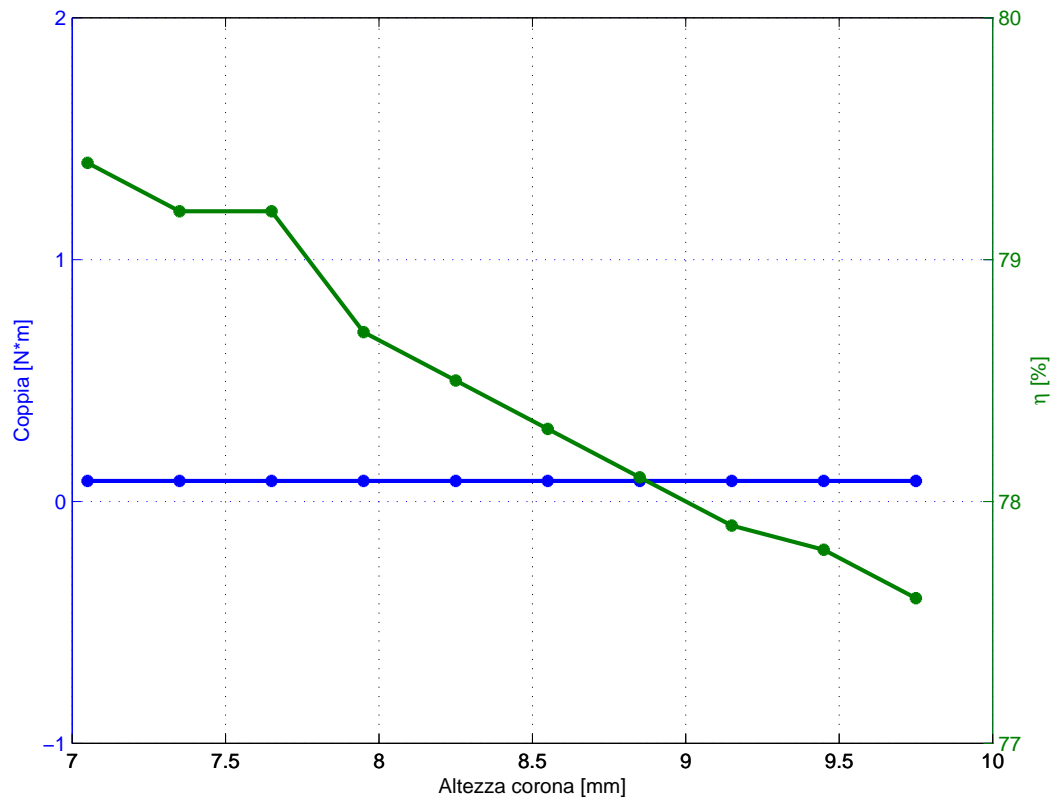


Figura 8.1: Riducendo l'altezza della corona vengono ridotte le perdite nel ferro della corona stessa (ne diminuisce il volume) quindi a parità di altre perdite si ha un aumento del rendimento di conversione.

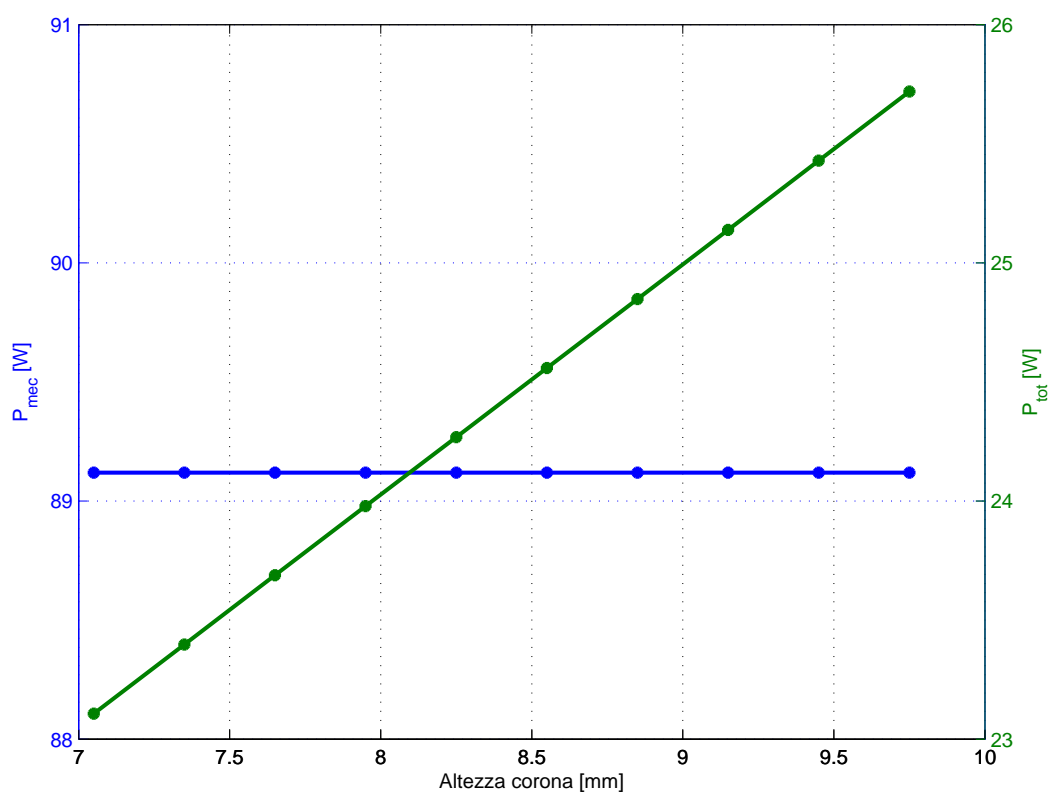


Figura 8.2: Riducendo l'altezza della corona vengono ridotte le perdite nel ferro della corona stessa (ne diminuisce il volume), quindi le perdite totali. La potenza meccanica resta invariata non essendo legata a tale dimensione geometrica.

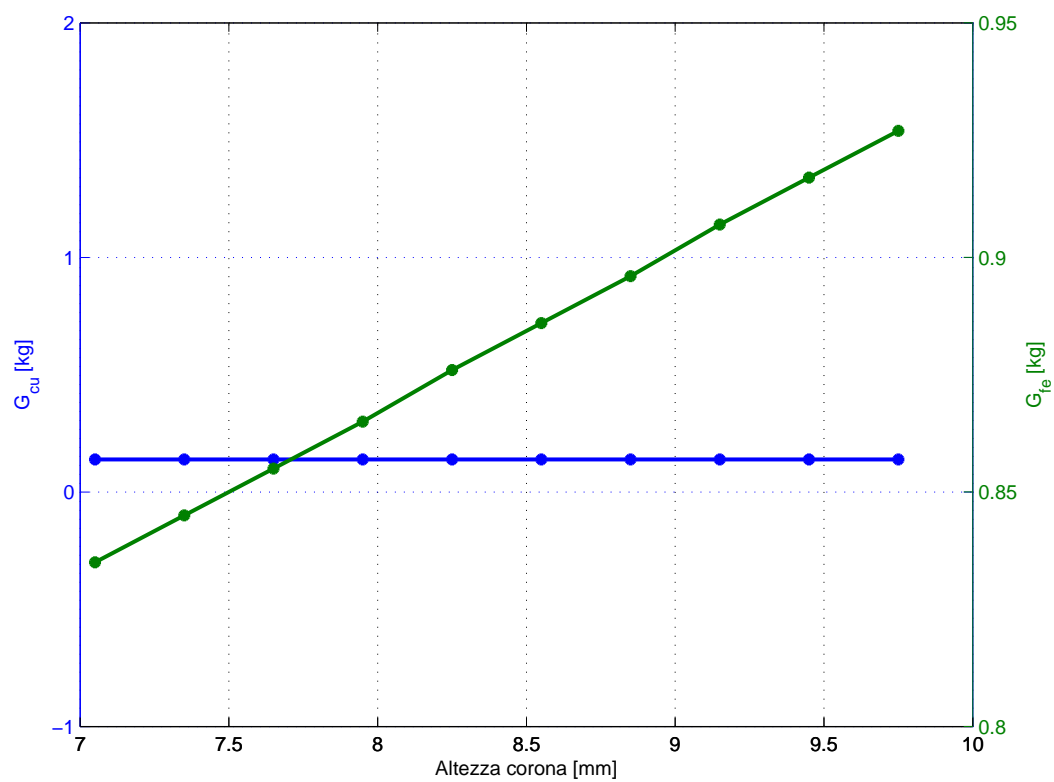


Figura 8.3: Riducendo l'altezza della corona diminuisce il volume complessivo di ferro impiegato, mentre resta invariato il peso complessivo del rame.

8.3 Modifica diametro interno di statore

Come punto di partenza per questa ulteriore modifica si é scelto l'ultimo valore di altezza della corona, ovvero 7,05 mm, in quanto risulta la configurazione con le migliori prestazioni.

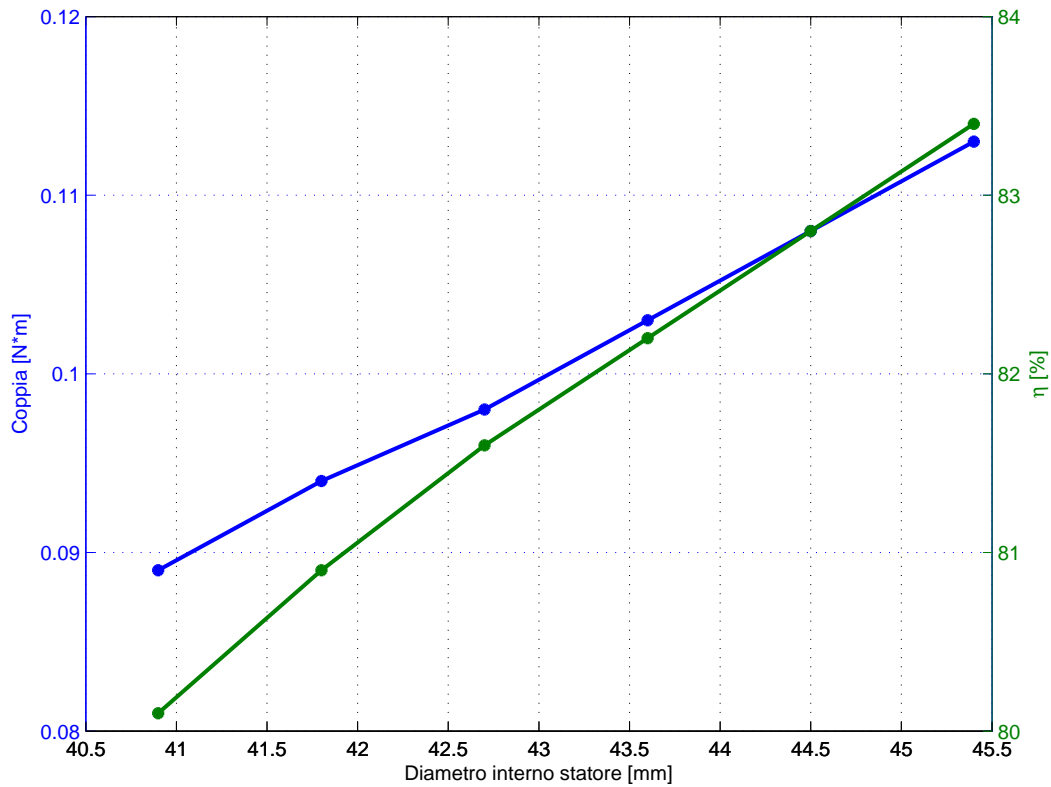


Figura 8.4: Aumentando il valore del diametro interno di statore viene ad essere modificata gran parte della geometria, comprese le cave di statore e l'avvolgimento. Si vede che la coppia meccanica aumenta molto in conseguenza a questa modifica, essendo proporzionale a D^2 .

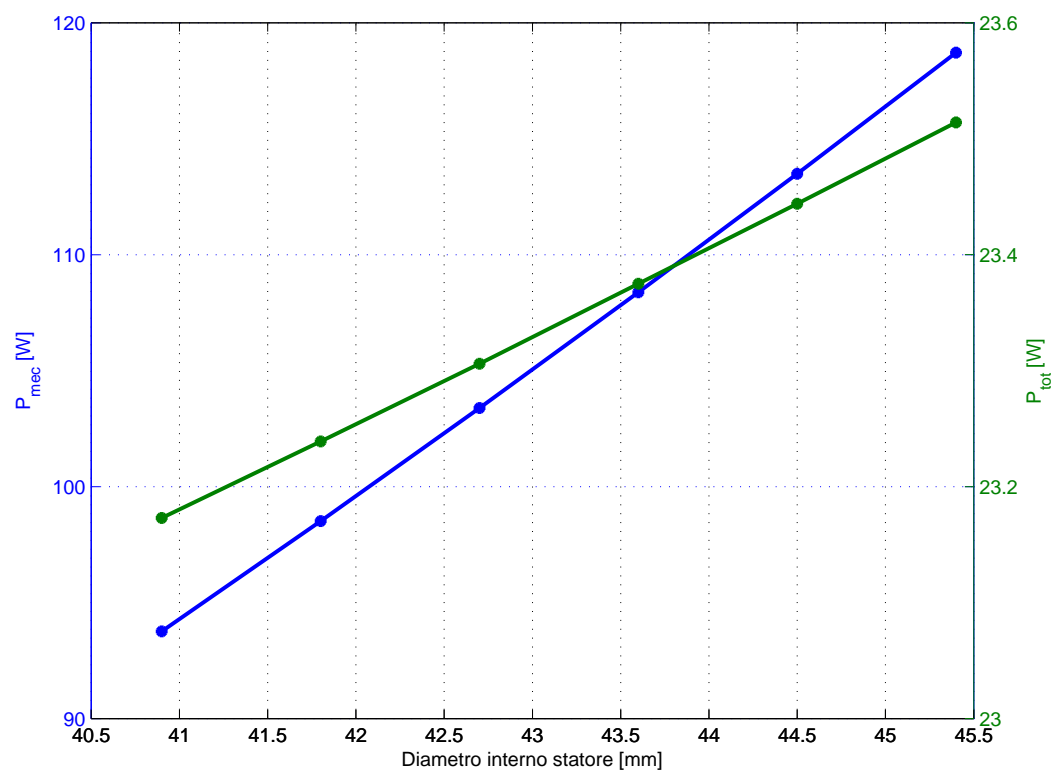


Figura 8.5: Aumentando la coppia aumenta in maniera proporzionale la potenza meccanica. Non essendo della stessa entità anche l'aumento delle perdite in genere della macchina, si nota un leggero miglioramento di rendimento

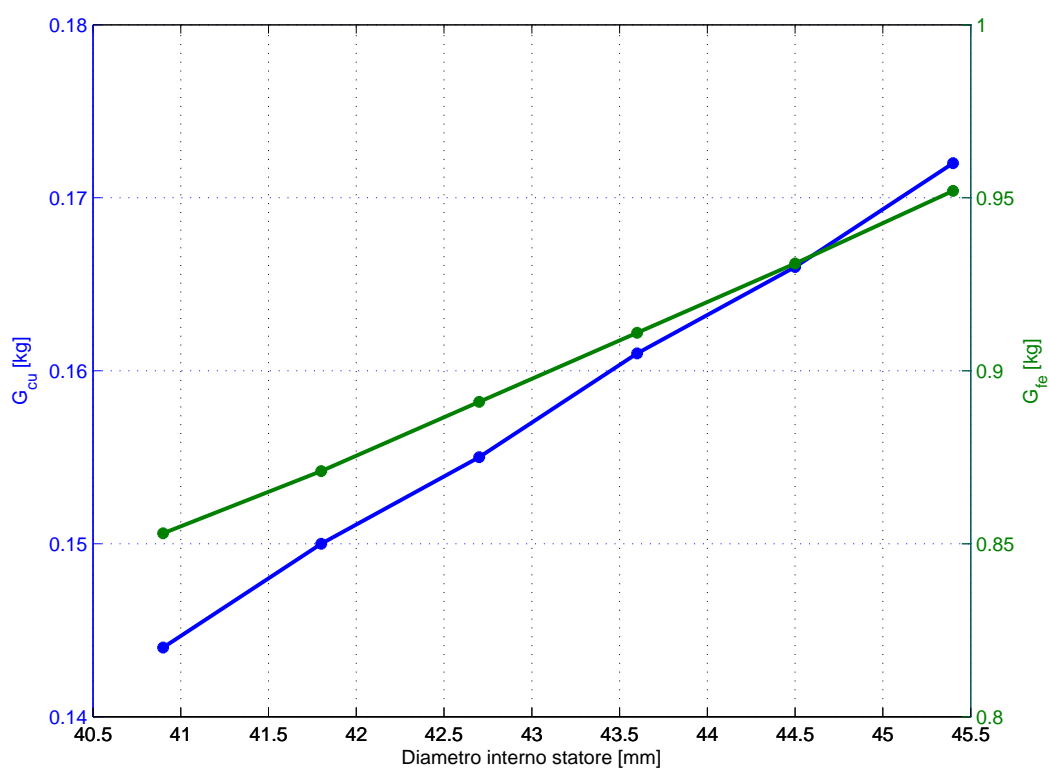


Figura 8.6: Conseguenza diretta dell'aumento del diametro interno di statore, e quindi di un pó tutte le dimensioni della macchina, é l'aumento dei volumi di materiale utilizzato nonché dei loro pesi. Conseguo un aumento dei costi.

8.4 Modifica denti di statore

Come punto di partenza per questa ulteriore modifica si é scelto l'ultimo valore di diametro interno di statore, ovvero 45,4 mm, in quanto risulta la configurazione con le migliori prestazioni.

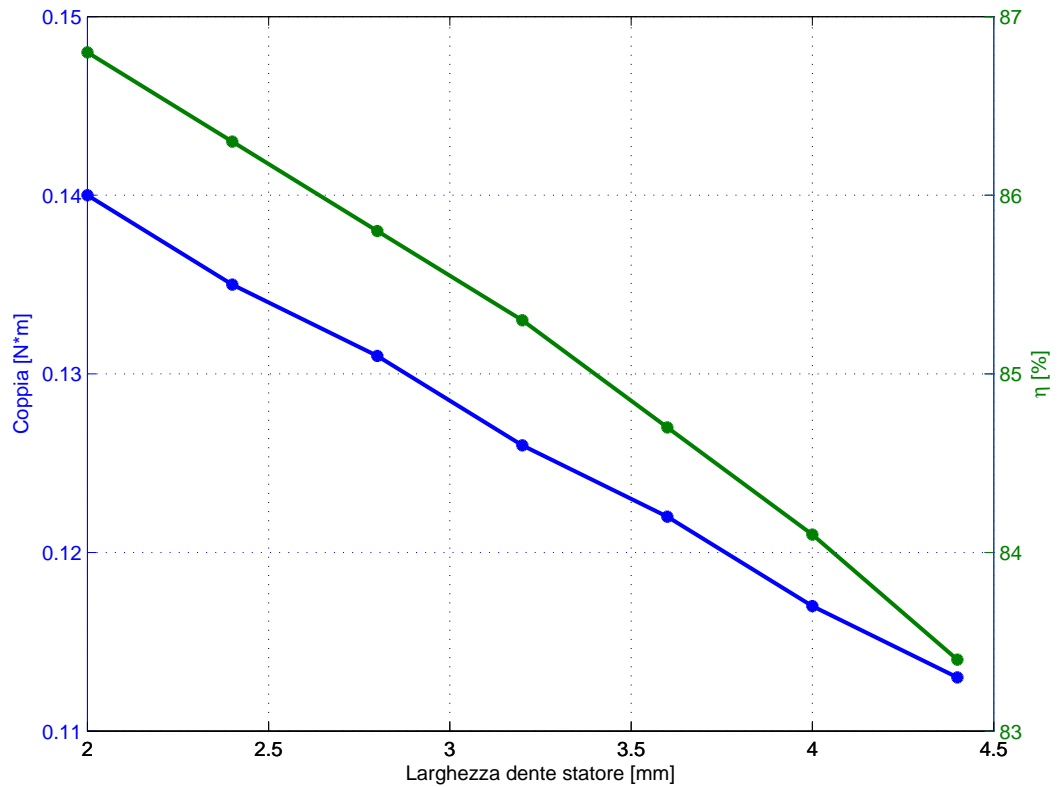


Figura 8.7: Riducendo la larghezza dei denti di statore si viene ad avere un aumento della sezione di cava, che a parità di densità di corrente scelta, determina un aumento della corrente nella cava stessa. Ciò si traduce in un aumento del carico elettrico quindi di coppia meccanica sviluppata.

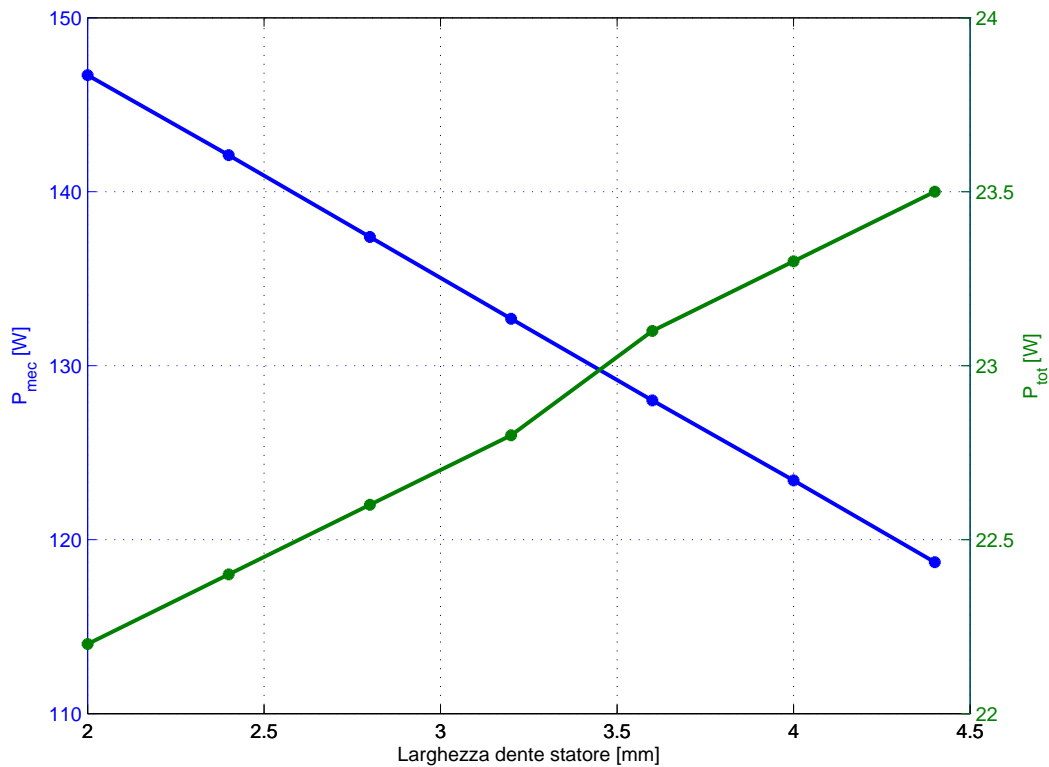


Figura 8.8: All'aumentare della coppia meccanica sviluppata, proporzionalmente aumenta anche la potenza meccanica messa in gioco dalla macchina ($\Omega \cdot T$). L'aumento delle perdite Joule, derivante dalla maggiore corrente che circola negli avvolgimenti, viene equilibrato dalla diminuzione delle perdite nel ferro dei denti (diminuisce il peso del ferro); quindi le perdite totali restano circa invariate e il rendimento aumenta seguendo l'aumento della potenza meccanica.

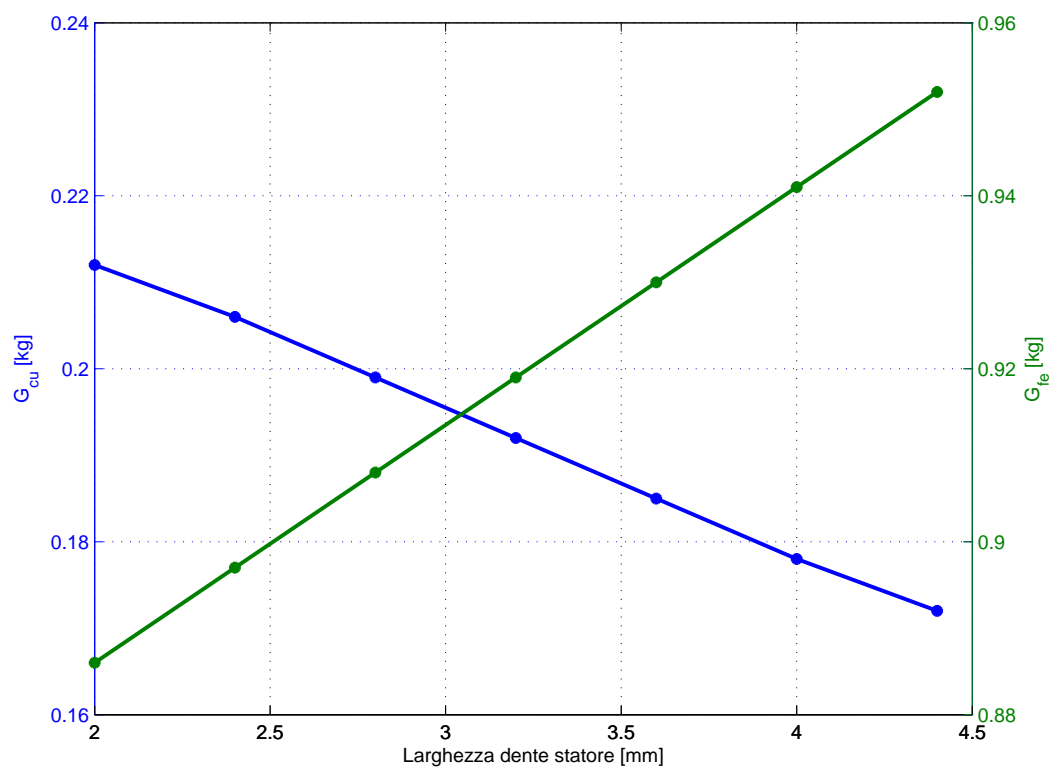


Figura 8.9: Con la modifica della larghezza dei denti di statore vengono modificati anche i pesi complessivi: del ferro che diminuisce e del rame, costituente gli avvolgimenti, che aumenta.

8.5 Modifica spessore magnete permanente

Come punto di partenza per questa ulteriore modifica si é scelto l'ultimo valore di larghezza dei denti di statore, ovvero 2 mm, in quanto risulta la configurazione con le migliori prestazioni.

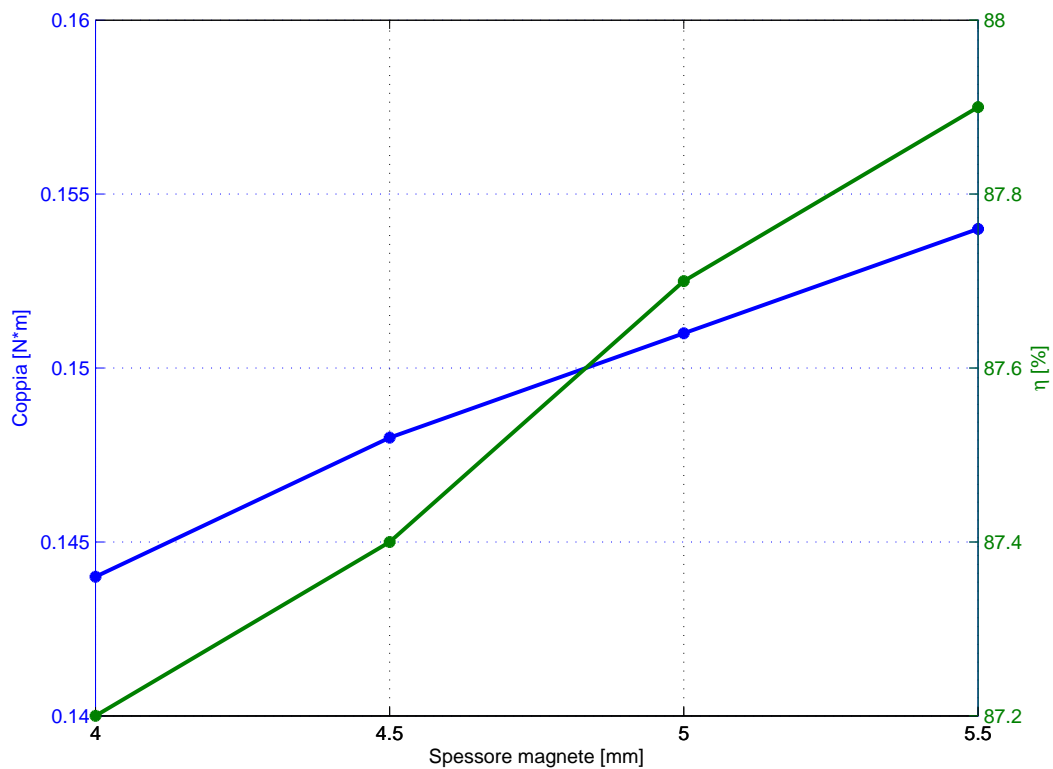


Figura 8.10: Aumentando lo spessore del magnete permanente superficiale a bordo del rotore si ha un leggero aumento della coppia meccanica mentre il rendimento resta invariato.

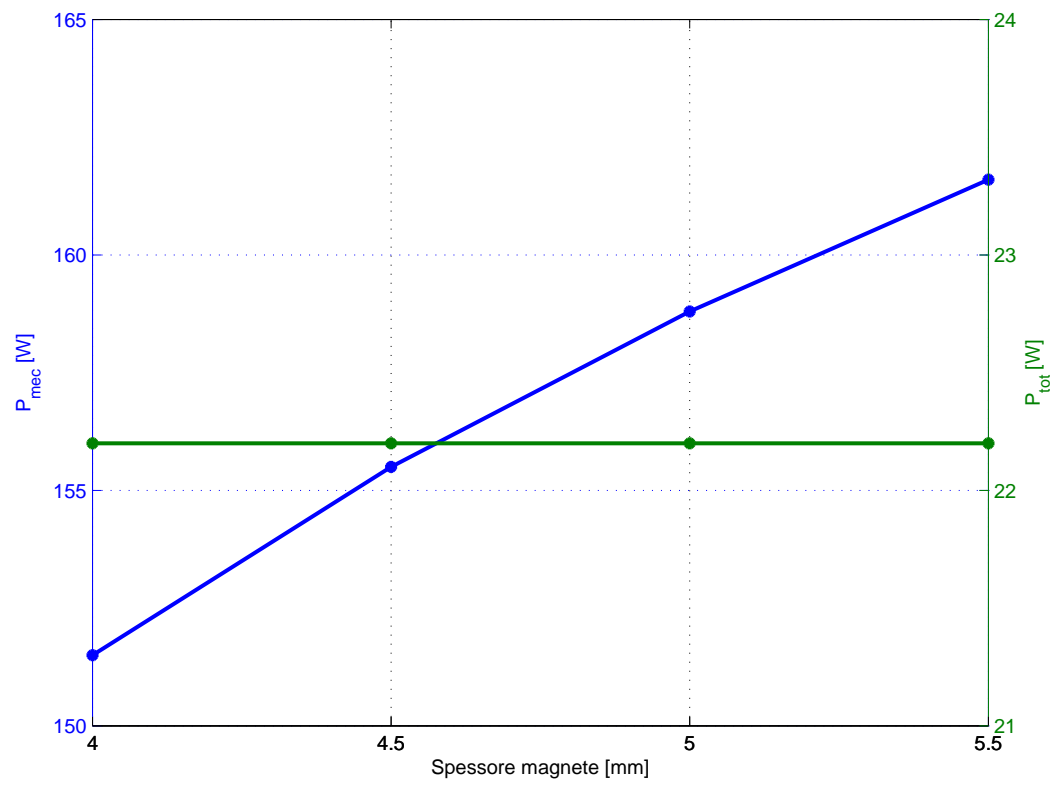


Figura 8.11: Aumentando la coppia sviluppata aumenta anche la potenza meccanica, mentre le perdite totali restano invariate.

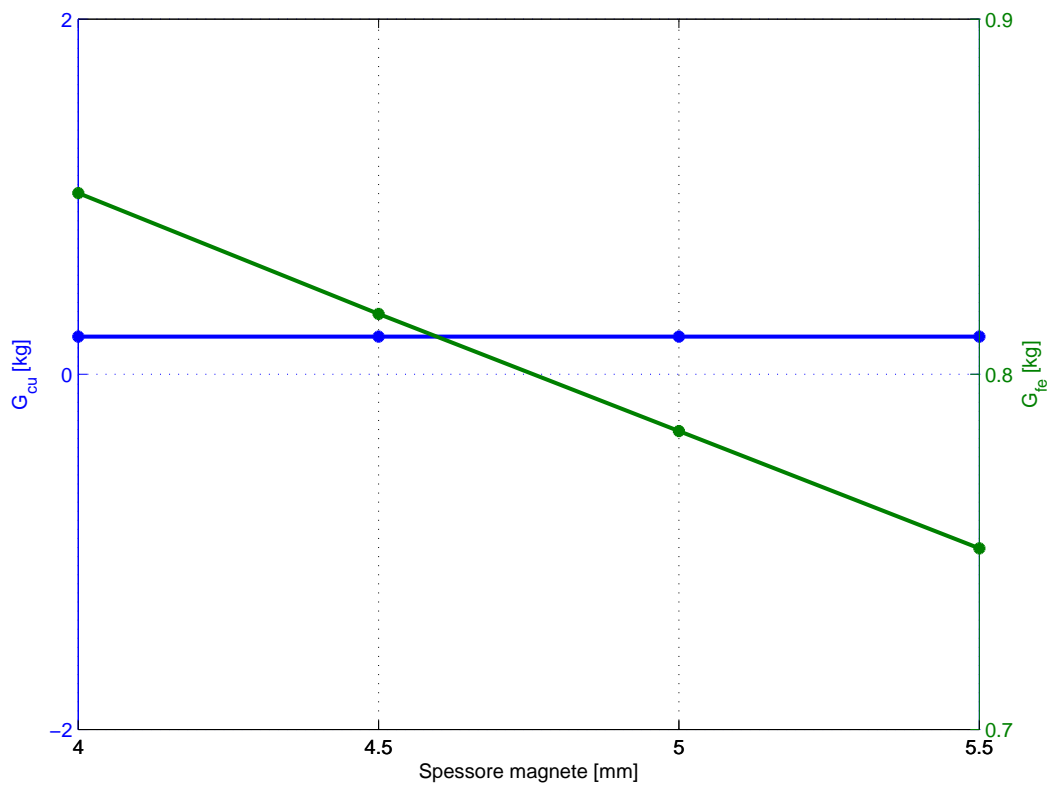


Figura 8.12: Aumentando lo spessore del magnete rotorico diminuirá il ferro che costituisce il rotore stesso, si nota infatti una diminuzione del peso del ferro complessivo, mentre il peso complessivo del rame resta lo stesso.

8.6 Configurazione ottima raggiunta

8.6.1 Geometria

Grandezza	Unità di misura	Valore	Simbolo
Diametro esterno	mm	80	De
Diametro interno	mm	45,4	D
Numero cave		12	Qs
Sezione cava	mm^2	128,8	Sslot
Altezza cava	mm	10,25	hs
Apertura cava di statore	mm	3,3	wso
Altezza corona	mm	7,05	hbi
Larghezza dente	mm	2	wt
Traferro	mm	1	g
Diametro rotore	mm	43,4	Dr
Diametro foro rotore	mm	15	
Numero fasi		3	m
Numero poli		4	2p
Lunghezza pacco	mm	20	Lz
Spessore magnete	mm	5,5	tm

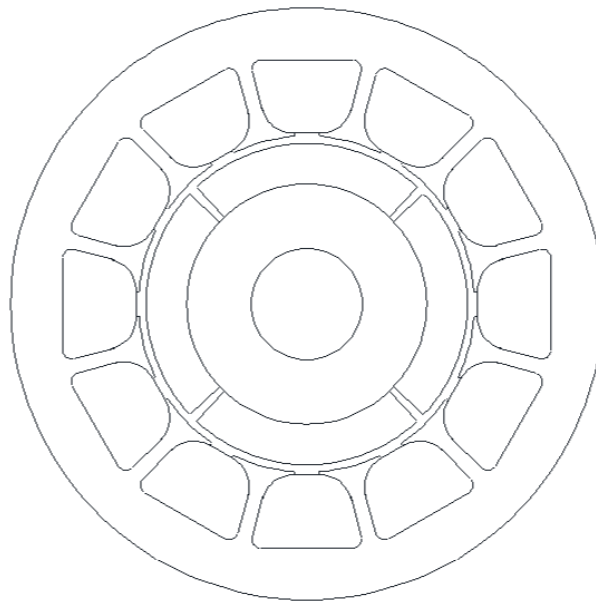


Figura 8.13: Nuova geometria di statore e rotore.

8.6.2 Prestazioni offerte dal motore ottimizzato

Grandezza	Unitá di misura	Valore	Simbolo
Valore medio di coppia	$N \cdot m$	0,154	T_{avg}
Potenza meccanica	W	161,6	Pm
Perdite totali	W	53,9	Ptot
Rendimento		0,749	η

8.7 Verifica con software FEMM

In seguito alle modifiche apportate alla geometria della macchina, sono stati verificati con software FEMM i calcoli effettuati con il metodo analitico.

Si é andati ad analizzare il nuovo andamento della coppia, inteso come valore medio e ripple, l'induzione al traferro, l'induzione massima nei denti e nella corona.

Grandezza	Unitá di misura	Valore	Simbolo
Valore medio di coppia	$N \cdot m$	0,170	T_{avg}
Ripple di coppia	$N \cdot m$	$\pm 0,060$	
Induzione al traferro	T	0,310	Bg
Induzione massima nel dente	T	1,82	Bt_{max}
Induzione massima nella corona	T	0,779	Bbi_{max}

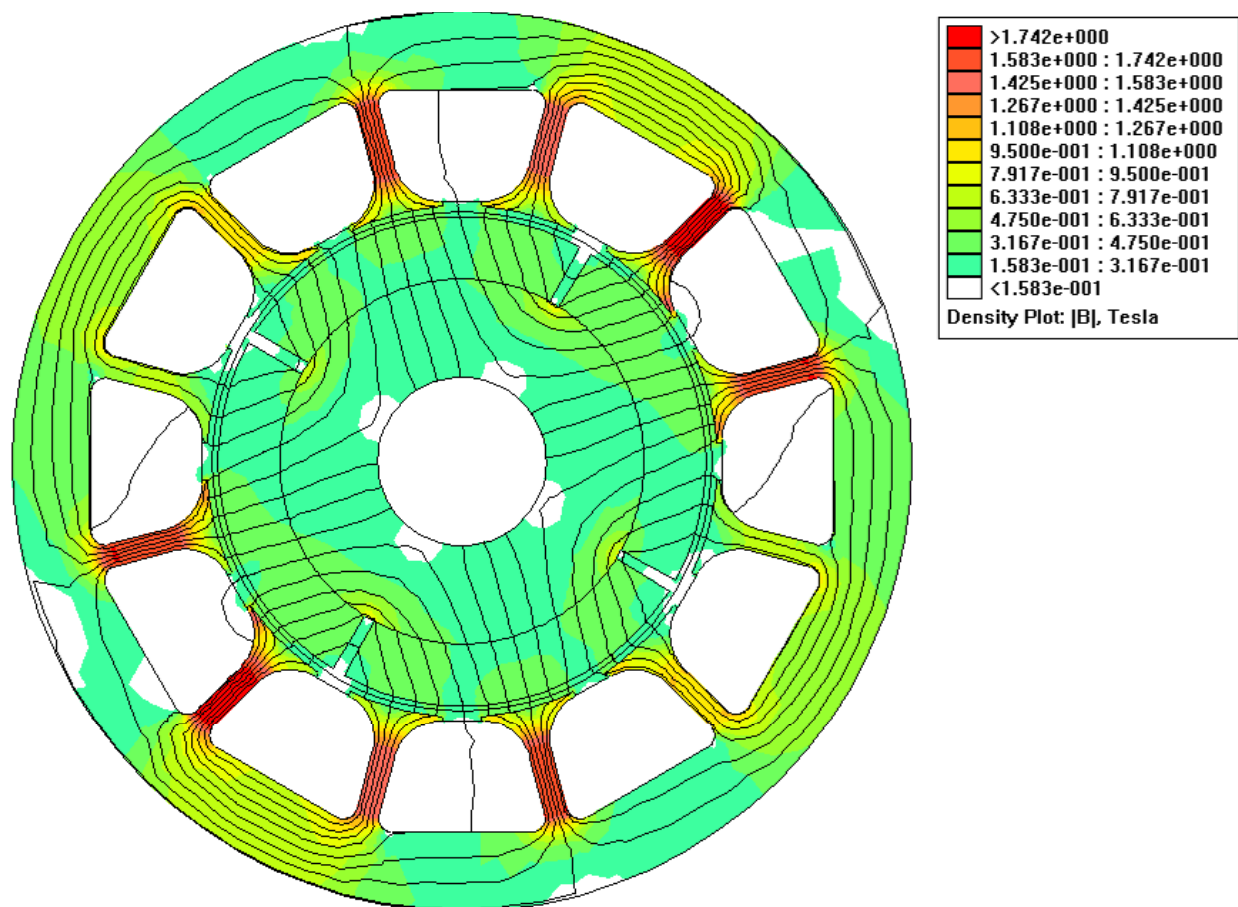


Figura 8.14: Mappa di campo.

Capitolo 9

Confronto finale tra le diverse configurazioni di motori, ottimizzate

In questo capitolo é stato curato il confronto tra i motori, cioé tra le diverse configurazioni ottenute a seguito della procedura di ottimizzazione.

Lo scopo di questo studio é quello di analizzare le macchine nella loro configurazione di partenza, per poi andare a svolgere una ulteriore analisi parametrica, cioé verificarne le prestazioni al variare di alcuni parametri geometrici.

Gli obiettivi da raggiungere sono il rendimento, da valutare con precisione e il costo complessivo della macchina da minimizzare, tenendo sempre sotto controllo i vincoli dati dalle specifiche di progetto.

Tali vincoli concernono: l'ingombro massimo rappresentato dal diametro esterno che non deve superare gli 80 millimetri; la coppia meccanica all'albero che deve rimanere attorno agli $0,2 N \cdot m$ e la velocità di rotazione in sincronismo che deve essere di 10^4 giri al minuto.

A questo punto le voci su cui si basa il confronto delle diverse macchine ottimizzate riguarderanno le prestazioni offerte, con vincoli ed obiettivi sopra descritti, ovvero: i pesi dei materiali utilizzati per la costruzione del motore, che ne determineranno il costo di fabbricazione; le perdite messe in gioco durante il loro funzionamento a carico nominale; il rendimento ottenuto a seguito dell'ottimizzazione e la coppia meccanica sviluppata all'albero.

Quest'ultima prestazione é la piú interessante dal punto di vista delle specifiche, pertanto il confronto é stato curato a parità di coppia ed al variare della densità di corrente in cava necessaria per il raggiungimento di tale valore di coppia richiesta ($0,2 N \cdot m$).

Il passo successivo a questa fase sarà infine la scelta di una di queste quattro configurazioni ottimizzate, la quale risulterà la piú conveniente dal punto di vista delle prestazioni offerte, ma anche dal punto di vista economico quindi

dei costi di fabbricazione.

	I motore conf. 6/4	II motore conf. 12/4	III motore conf. 24/4	IV motore conf. 12/4
Densità di corrente [A/mm ²]	4	3,5	4,5	7
Induzione nel dente [T]	1,49	1,74	1,26	1,82
Induzione nella corona [T]	0,903	0,644	0,623	0,779
Pesi [kg]				
Lamierino ferromagnetico	0,892	0,886	1,024	0,751
Rame	0,243	0,422	0,403	0,212
Magnete permanente	0,487	0,487	0,411	0,729
Perdite [W]				
Ferro	36,2	32,4	28,8	38,2
Rame	9,61	12,79	20,2	25,7
Totali	48,2	47,5	51,45	67,2
Rendimento	0,817	0,823	0,811	0,771
Coppia [N · m]	0,205	0,211	0,210	0,216
Ripple di coppia [N · m]	0,040	0,080	0,040	0,060

Riferendosi al primo motore si può notare che il processo di ottimizzazione svolto ha portato ad una sensibile riduzione del peso del lamierino ferromagnetico, avendo ridotto in maniera drastica le dimensioni dei denti statorici e della corona, portando le rispettive induzioni ad aumentare sensibilmente. La macchina risulta in questo modo più sfruttata permettendo un risparmio sul materiale utilizzato.

Al contrario, sia riducendo le dimensioni dei denti sia incrementando il valore di diametro interno di statore, si ottiene un aumento del peso complessivo di rame che però non compromette la convenienza di questo tipo di avvolgimento caratterizzato da testate corte e bobine di dente.

Non si può dire lo stesso per i magneti che subiscono un incremento di peso a seguito dell'ottimizzazione.

Un ulteriore miglioramento lo si ha sul rendimento di conversione: le maggiori perdite dovute ad un intenso sfruttamento della macchina sono sovrastate dall'importante accrescimento della coppia ed in conseguenza della potenza meccanica all'albero.

Approssimativamente le stesse considerazioni si possono fare anche sul secondo motore. In questo caso si può notare una densità di corrente minore per raggiungere l'obiettivo di coppia ($0,2 N \cdot m$), oltre a valori di induzione differenti. Nei denti si supera lo sfruttamento che si aveva nel motore precedente a causa di una larghezza del dente stesso circa metà. Nella corona invece si ha un'inversione di tendenza: la reazione di indotto fa sì che le correnti negli avvolgimenti si oppongano alla causa che le ha generate, secondo la legge di Lenz, abbassando in questo modo il valore massimo di induzione oltre a determinare una distribuzione dei flussi diversa rispetto al funzionamento a vuoto. I pesi sono simili al caso precedente, fatta eccezione per il rame che è presente in maggiore quantità perché non si hanno più bobine di dente, ma avvolgimenti a passo intero che determinano in oltre perdite Joule maggiori. Questa seconda configurazione, tra le quattro analizzate, offre le migliori prestazioni di coppia e rendimento.

Il terzo motore è caratterizzato da una densità di corrente più elevata rispetto ai casi precedenti.

Si può osservare che l'induzione nel dente non raggiunge valori elevati, questo perché la modifica sulla sua larghezza non ha potuto spingersi oltre gli 1,7 mm: un'ulteriore riduzione di tale dimensione geometrica avrebbe compromesso la solidità meccanica della struttura. Nella corona invece si arriva a valori di induzione simili al caso precedente.

Lo scarso restringimento del dente statorico e la diminuzione dello spessore del magnete permanente fanno sì che aumenti il peso del lamierino ferromagnetico, ma dato il limitato valore di induzione le perdite nel ferro rimangono comunque contenute. Al contrario diminuisce la quantità di magnete impiegato. Le perdite Joule sono più considerevoli rispetto ai casi precedenti, sia per la maggiore quantità di rame presente, sia per l'elevata densità di corrente. Si ottiene una coppia che soddisfa le specifiche ed un rendimento simile, ma minore, rispetto alla prima ed alla seconda macchina.

A seguito dell'analisi e della successiva ottimizzazione è emerso che il quarto motore non arriva a soddisfare il vincolo sulla coppia meccanica, che resta inferiore a $0,2 N \cdot m$.

Si è provato quindi ad aumentare la densità di corrente al fine di raggiungere tale condizione, portandola da $5 A/mm^2$ fino a $7 A/mm^2$. Ne consegue un aumento di coppia, di potenza meccanica, ma anche di perdite nel rame, re-

stando circa invariato il rendimento.

Riducendo l'altezza della corona e la larghezza dei denti statorici si é riusciti a far calare il peso del lamierino ferromagnetico utilizzato. Tale quantità é stata ulteriormente diminuita aumentando lo spessore del magnete permanente allo scopo di ottenere una maggiore coppia all'albero. Ne risulta però una cospicua quantità di magnete, peraltro ben piú costoso della lamiera.

Questa quarta macchina, come la prima, ha avvolgimenti raccorciati con bobina di dente quindi testate ridotte al minimo, infatti il peso del rame é il minore dei quattro. Ciò nonostante le perdite Joule sono elevate avendo densità di corrente $7 A/mm^2$.

Anche le perdite nel ferro sono elevate rispetto ai casi precedenti: meno peso di materiale, ma maggiore sfruttamento con induzione massima prossima al ginocchio nei denti.

Infine la coppia arriva ad accontentare le specifiche, tuttavia il rendimento risulta il piú basso.

Conclusioni

Il presente lavoro di tesi ha avuto come obiettivo l'ottimizzazione ed il confronto di quattro configurazioni di motori sincroni a magneti permanenti superficiali di piccola potenza.

In prima battuta si é resa necessaria una analisi dei motori, delle loro caratteristiche e prestazioni di partenza, attraverso un accurato modello analitico i cui risultati sono stati in larga parte confermati dalle simulazioni effettuate con software agli elementi finiti FEMM. Le simulazioni hanno permesso di verificare piú in dettaglio rispetto al modello analitico gli andamenti dei flussi concatenati con le varie fasi di ogni macchina, le conseguenti tensioni ai morsetti e la coppia di impuntamento dovuta alle irregolaritá geometriche della macchina stessa; questo per quanto riguarda il funzionamento a vuoto.

Per quanto riguarda il funzionamento a carico dei motori si é andati a valutare sempre: flussi concatenati con le varie fasi di ogni macchina, le conseguenti tensioni ai morsetti, valore medio della coppia meccanica all'albero, fluttuazioni di coppia sovrapposte a tale valore medio e correnti inviate sulle varie fasi di statore.

In entrambe le condizioni di funzionamento sono stati calcolati, per ogni macchina, gli andamenti delle induzioni: al traferro, evidenziando l'armonica fondamentale e residua a metá magneti, evidenziando l'armonica fondamentale ma anche l'effetto della reazione di indotto che tende a smagnetizzare il magnete stesso.

Al termine dell'analisi preliminare delle varie configurazioni si é passati ad una ulteriore analisi parametrica, cioé verificarne le prestazioni al variare di alcuni parametri geometrici. Si é andati a variare parametri diversi in ogni macchina, comunque tra questi: la larghezza dei denti statorici, l'altezza della corona, il diametro interno di statore, lo spessore dei magneti permanenti sul rotore; prendendo sempre come punto di partenza della successiva modifica la precedente configurazione con le migliori prestazioni.

Cosí facendo si é arrivati a definire, per ogni motore, una configurazione ottima, ovvero che offre le prestazioni migliori dal punto di vista della coppia e del rendimento, pur mantenendo il piú contenuti possibile i costi, quindi la quantitá di materiale impiegato per la loro fabbricazione. Come verifica delle suddette performance raggiunte sono state nuovamente simulate le quattro

macchine con le nuove geometrie, ottenendo un buon riscontro con i risultati derivanti dal modello analitico.

Infine nell'ultima fase di confronto si é cercato di vedere quale delle quattro configurazioni ottimizzate fosse la piú conveniente, dal punto di vista della produzione in larga scala. La scelta verterà sulla macchina dalle migliori prestazioni di coppia e rendimento, senza dimenticare l'aspetto economico. Uno degli obiettivi dell'analisi parametrica ai fini dell'ottimizzazione era proprio quello di minimizzare le quantità dei materiali impiegati, quindi i costi da sostenere per la fabbricazione.

Si vuole sconsigliare pertanto l'adozione del quarto motore. Quest'ultima macchina presenta, a parità di coppia, il rendimento di conversione peggiore e la maggiore quantità di magnete. Necessita in oltre di una densità di corrente molto superiore rispetto alle altre tre macchine, ne derivano perdite Joule superiori.

Si vuole dissuadere anche dalla scelta del secondo motore dato il basso rendimento, concentrandosi invece sulle prime due macchine.

Il primo ed il secondo motore presentano, a parità di coppia, rendimenti simili derivanti da perdite nel rame e nel ferro non molto diverse le une dalle altre. Anche i pesi di ferro e magnete sono i medesimi, si differenziano solamente per quanto riguarda il peso del rame costituente gli avvolgimenti.

Nel primo motore tale peso é circa metà rispetto al secondo motore, quindi in questo caso si otterrebbe un'ulteriore risparmio di materiale.

Bibliografia

- [1] Nicola Bianchi e Silverio Bolognani, *Metodologie di Progettazione delle Macchine Elettriche*;
- [2] Nicola Bianchi, *Calcolo delle Macchine Elettriche col Metodo degli Elementi Finiti*.

Ringraziamenti

Al termine di questo mio percorso di studi giungono da se alcuni ringraziamenti.

"Grazie a mia madre per avermi messo al mondo,
a mio padre semplice e profondo,
grazie agli amici per la loro comprensione,
ai giorni felici della mia generazione,
grazie alle ragazze, a tutte le ragazze.

Grazie alla neve bianca ed abbondante,
a quella nebbia densa ed avvolgente,
grazie al tuono, piogge e temporali,
al sole caldo che guarisce tutti mali,
grazie alle stagioni, a tutte le stagioni.

Grazie alle mani che mi hanno aiutato,
a queste gambe che mi hanno portato,
grazie alla voce che canta i miei pensieri,
al cuore capace di nuovi desideri,
grazie all'emozioni, a tutte le emozioni."

(Ma che film la vita - Nomadi)