

*Dedicato ai miei genitori  
che con la loro tenacia ed  
il loro aiuto mi hanno  
permesso di arrivare  
a questo traguardo*



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA  
Facoltà di Ingegneria  
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica

TESI DI LAUREA

**PROGETTO E OTTIMIZZAZIONE  
DI UN MOTORE A MAGNETI  
PERMANENTI A PRESA DIRETTA**

Relatore: Prof. NICOLA BIANCHI

Laureando: EDOARDO MENAZZI

Anno Accademico 2011/2012



---

# Indice

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>DATI GEOMETRICI DELLA MACCHINA</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>DIMENSIONAMENTO DELL'AVVOLGIMENTO</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>MATERIALI E MESH</b>	<b>11</b>
<b>5</b>	<b>COMUNICAZIONE TRA PROGRAMMI</b>	<b>13</b>
5.1	ESEGUIRE FEMME DA MATLAB/OCTAVE . . . . .	14
5.2	LETTURA DEI RISULTATI DEL FEMME A MATLAB/OCTAVE	16
<b>6</b>	<b>TEORIA</b>	<b>17</b>
6.1	TENSIONE A VUOTO . . . . .	18
6.2	COGGING E SKEWING . . . . .	22
6.3	FLUSSI CONCATENATI E RELATIVE INDUTTANZE . . . . .	26
6.4	DEFLUSSAGGIO . . . . .	28
6.5	OTTIMIZZAZIONE . . . . .	38
6.6	CORRENTE MINIMA DI SMAGNETIZZAZIONE . . . . .	43
<b>7</b>	<b>ANALISI IPM</b>	<b>47</b>
7.1	MESH . . . . .	49
7.2	PROVA A VUOTO . . . . .	51
7.3	COGGING E SKEWING . . . . .	54
7.4	FLUSSI ED INDUTTANZE . . . . .	56
7.5	VARIAZIONE DELLA VELOCITÀ . . . . .	59
7.6	CORRENTE MINIMA DI SMAGNETIZZAZIONE . . . . .	64
7.7	INDUZIONE A VUOTO . . . . .	65

---

<b>8</b>	<b>OTTIMIZZAZIONE E ANALISI IPM</b>	<b>67</b>
8.1	OTTIMIZZAZIONE . . . . .	68
8.2	MESH . . . . .	71
8.3	PROVA A VUOTO . . . . .	73
8.4	COGGING E SKEWING . . . . .	76
8.5	FLUSSI ED INDUTTANZE . . . . .	78
8.6	VARIAZIONE DELLA VELOCITÁ . . . . .	81
8.7	CORRENTE MINIMA DI SMAGNETIZZAZIONE . . . . .	86
8.8	INDUZIONE A VUOTO . . . . .	87
<b>9</b>	<b>ANALISI SPM</b>	<b>89</b>
9.1	MESH . . . . .	91
9.2	PROVA A VUOTO . . . . .	93
9.3	COGGING E SKEWING . . . . .	96
9.4	FLUSSI ED INDUTTANZE . . . . .	98
9.5	VARIAZIONE DELLA VELOCITÁ . . . . .	100
9.6	CORRENTE MINIMA DI SMAGNETIZZAZIONE . . . . .	105
9.7	INDUZIONE A VUOTO . . . . .	106
<b>10</b>	<b>ANALISI IPM MODIFICATO 1</b>	<b>109</b>
10.1	MESH . . . . .	111
10.2	PROVA A VUOTO . . . . .	113
10.3	COGGING E SKEWING . . . . .	116
10.4	FLUSSI ED INDUTTANZE . . . . .	118
10.5	VARIAZIONE DELLA VELOCITÁ . . . . .	120
10.6	INDUZIONE A VUOTO . . . . .	125
<b>11</b>	<b>ANALISI IPM MODIFICATO 2</b>	<b>127</b>
11.1	MESH . . . . .	130
11.2	PROVA A VUOTO . . . . .	132
11.3	COGGING E SKEWING . . . . .	135
11.4	FLUSSI ED INDUTTANZE . . . . .	137
11.5	VARIAZIONE DELLA VELOCITÁ . . . . .	139
11.6	INDUZIONE A VUOTO . . . . .	144

---

<b>12 CONCLUSIONI</b>	<b>147</b>
12.1 FEM A VUOTO . . . . .	149
12.2 COGGING E SKEWING . . . . .	150
12.3 EFFETTI SULLA COPPIA . . . . .	152
12.4 EFFETTI SUL RENDIMENTO . . . . .	154
12.5 CORRENTE MINIMA DI SMAGNETIZZAZIONE . . . . .	155
12.6 CONFRONTO TRA SPM E IPM OTTIMIZZATO . . . . .	156
12.7 CONFRONTO IPM DI PARTENZA CON ALCUNE VARIAZIONI	157
<b>13 BIBLIOGRAFIA</b>	<b>159</b>





---

# CAPITOLO 1

---

## INTRODUZIONE

La presente tesi ha come obiettivo l'ottimizzazione del rotore e la successiva analisi delle grandezze caratteristiche di un motore a magneti permanenti (interni) a presa diretta. L'ottimizzazione si basa nel trovare la configurazione rotorica che sviluppi una determinata coppia alla velocità base con il minor prezzo.

Le caratteristiche principali per lo studio della macchina sono le seguenti:

- calcolo fem a vuoto
- calcolo delle coppie di cogging e la loro diminuzione introducendo uno skewing di rotore
- calcolo del flusso concatenato del magnete ed il flusso concatenato diretto ed in quadratura al variare della corrente
- calcolo dell'induttanza diretta ed in quadratura in funzione della corrente
- calcolo dei principali valori nella regolazione della velocità
- calcolo della corrente minima di smagnetizzazione

I software utilizzati:

1. Matlab (o Octave) per l'ottimizzazione e l'analisi dei risultati
2. Femm 3.3 per le simulazioni dei campi elettromagnetici (magneto-statica)



---

## CAPITOLO 2

---

# DATI GEOMETRICI DELLA MACCHINA

Dati principali della macchina:

- diametro esterno della macchina pari a 300 mm
- lunghezza del pacco (indicativa) pari a 150 mm
- rapporto tra numero di cave e poli pari a 60/16
- raffreddamento ad acqua
- una coppia massima pari a 300 Nm
- una velocità nominale di 200 rpm
- una velocità massima di 1000 rpm con coppia ridotta
- tensione (concatenata) di alimentazione 240 V
- lamierino : M330-35A
- magnete in nichel ferro boro SH38
- avvolgimento in rame

Dati della geometria dello statore (esterno):

- diametro esterno	:	De	=	300	mm
- diametro al traferro	:	Ds	=	220	mm
- altezza di cava	:	hs	=	30	mm
- larghezza del dente	:	wt	=	6,6	mm
- larghezza apertura di cava	:	wso	=	2,2	mm
- altezza apertura di cava	:	hso	=	1,7	mm
- altezza bietta	:	hwed	=	2,32	mm

Dati iniziali della geometria del rotore (interno):

- diametro esterno (al traferro)	:	Dre	=	218	mm
- diametro interno (albero)	:	Dri	=	100	mm
- spessore del magnete	:	tm	=	5,66	mm
- altezza del ponticello magnetico interno	:	hri	=	1,5	mm
- distanza barriera - traferro	:	dbi	=	46,78	mm
- altezza del ponticello magnetico esterno	:	hre	=	1,36	mm
- distanza barriera - esterno	:	dbe	=	1,2	mm
- diametro del centro dei cerchi d'aria	:	Dcer	=	160	mm
- diametro cerchi d'aria	:	dcer	=	24	mm

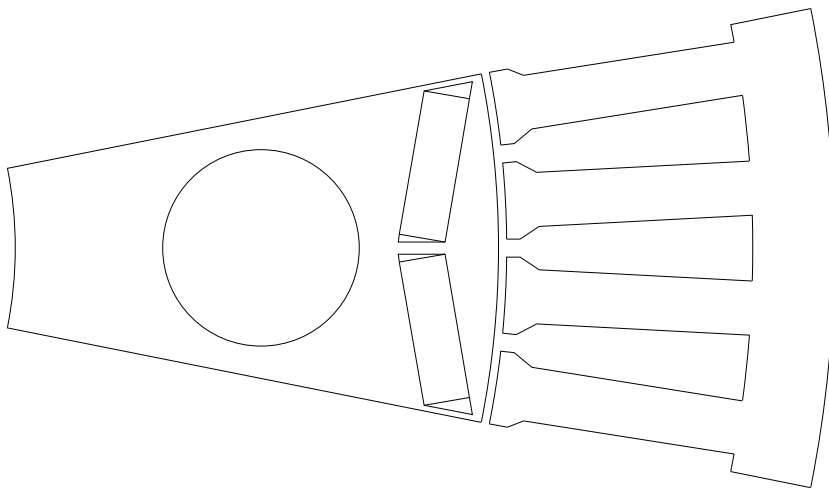


Figura 2.1: polo IPM

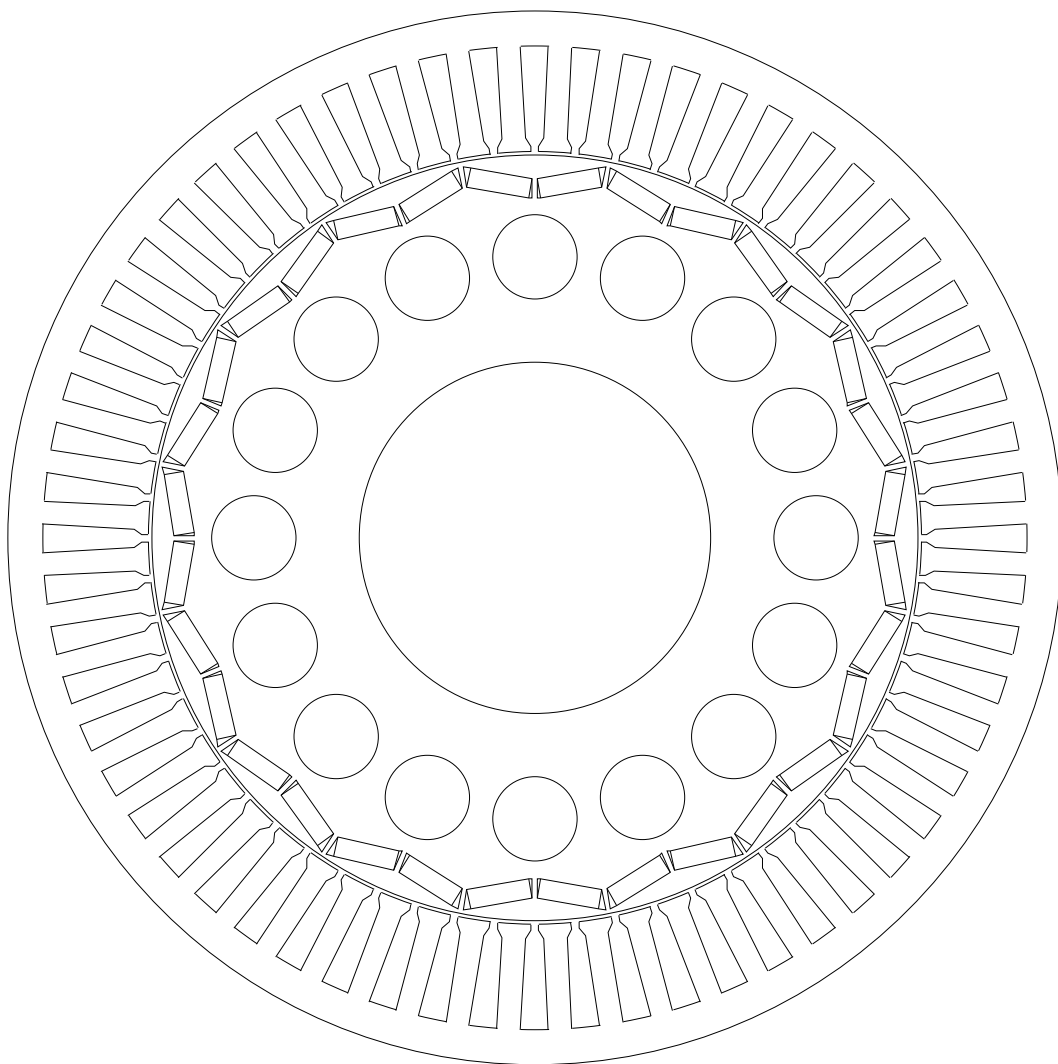


Figura 2.2: motore IPM



---

## CAPITOLO 3

---

# DIMENSIONAMENTO DELL'AVVOLGIMENTO

Dati preliminari per il calcolo dell'avvolgimento:

– tensione di alimentazione	:	$V$	=	240	$V$
– densità di corrente	:	$J$	=	10	$\frac{A}{mm^2}$
– cave di statore	:	$Q_s$	=	60	cave
– diametro interno di statore	:	$D_i$	=	220	mm
– lunghezza del pacco	:	$L_{stk}$	=	150	mm
– sezione di cava	:	$S_{slot}$	=	174,3	mm <sup>2</sup>
– fattore di riempimento	:	$K_{fill}$	=	40	%
– velocità base	:	$n_b$	=	200	rpm
– numero di coppie polari	:	$p$	=	8	coppie polari
– caduta di tensione sull'avvolgimento	:	$\Delta v$	=	5	%

da cui si ricavano:

–	<i>raffreddamento</i>		<i>acqua</i>	
–	<i>densità di corrente</i>	: $J = 10$		$\frac{A}{mm^2}$
–	<i>tensione di avvolgimento</i>	: $E_{avv} = 132$		$V$
–	<i>angolo di cava meccanico</i>	: $\alpha^m = 6$		$deg$
–	<i>angolo di cava elettrico</i>	: $\alpha^e = 6$		$deg$
–	<i>passo di matassa</i>	: $\tau = 43,2$		$mm$
–	<i>numero di cave per polo per fase</i>	: $q = 1,25$		<i>cave</i>
–	<i>coefficiente di distribuzione</i>	: $k_d = 0,9834$		
–	<i>angolo di accorciamento elettrico</i>	: $\beta_r^e = 36$		$deg$
–	<i>coefficiente di raccorciamento</i>	: $k_r = 0,9511$		
–	<i>angolo di skewing elettrico</i>	: $\alpha_{sk}^e = 6$		$deg$
–	<i>coefficiente di skewing</i>	: $k_{sk} = 0,971$		
–	<i>coefficiente di avvolgimento</i>	: $k_w = 0,9353$		
–	<i>flusso concatenato di picco</i>	: $\hat{\Lambda} = 3,3$		$mWb$
–	<i>frequenza</i>	: $F = 26,6$		$Hz$
–	<i>numero di spire</i>	: $N = 840$		<i>spire</i>
–	<i>numero di conduttori serie</i>	: $n_c = 42$		<i>conduttori</i>
–	<i>percorsi in parallelo</i>	: $p_p = 1$		<i>percorsi</i>
–	<i>induzione al traferro di picco</i>	: $\hat{B}_g = 0,78$		$T$
–	<i>corrente di cava</i>	: $I_{slot} = 696$		$A$
–	<i>corrente di linea</i>	: $I_{avv} = 16,6$		$A$
–	<i>carico elettrico</i>	: $\hat{K}_s = 86,2$		$kA/m$
–	<i>coppia</i>	: $T = 270$		$Nm$
–	<i>potenza (<math>PF = 0.8</math>)</i>	: $P = 5,5$		$kW$



Stella di cava:

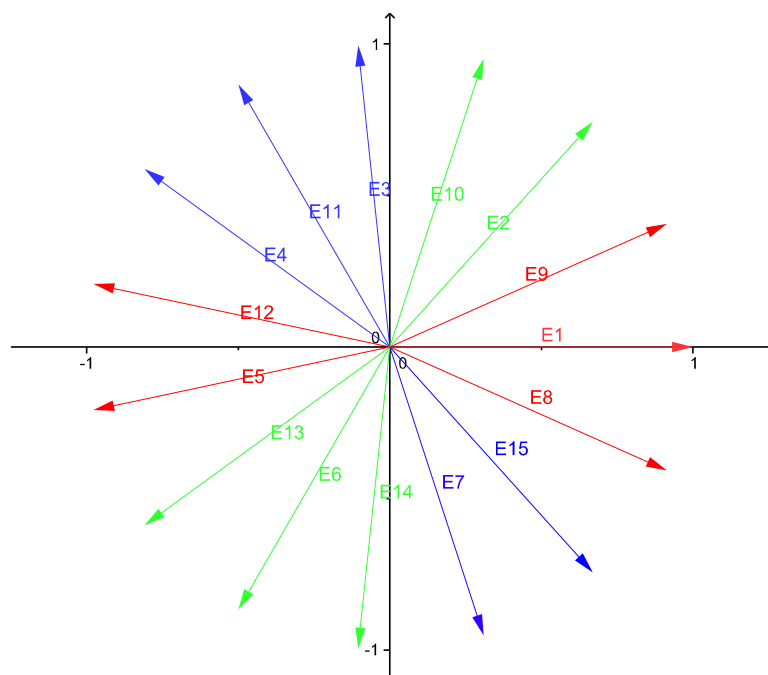


Figura 3.1: stella di cava

Disposizione delle connessioni (fase A):

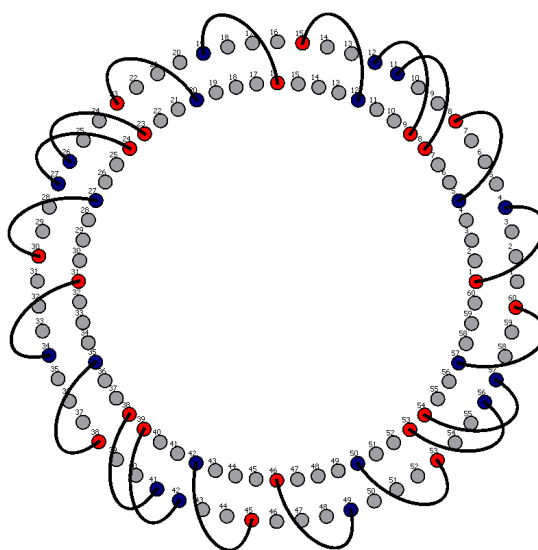


Figura 3.2: connessioni

Matrice di cava:

<i>cava</i>	<i>cava</i>	<i>cava</i>	<i>cava</i>	$k_a$	$k_b$	$k_c$
1	16	31	46	0,5	-0,5	0
2	17	32	47	0,5	0	-0,5
3	18	33	48	0	0,5	-0,5
4	19	34	49	0	1	0
5	20	35	50	-1	0	0
6	21	36	51	-0,5	0	0,5
7	22	37	52	0	-0,5	0,5
8	23	38	53	0,5	-0,5	0
9	24	39	54	1	0	0
10	25	40	55	0	0	-1
11	26	41	56	0	0,5	-0,5
12	27	42	57	-0,5	0,5	0
13	28	43	58	-0,5	0	0,5
14	29	44	59	0	0	1
15	30	45	60	0	-1	0

---

## CAPITOLO 4

---

# MATERIALI E MESH

Materiali per l'analisi della macchina:

- lamierino : M330-35A

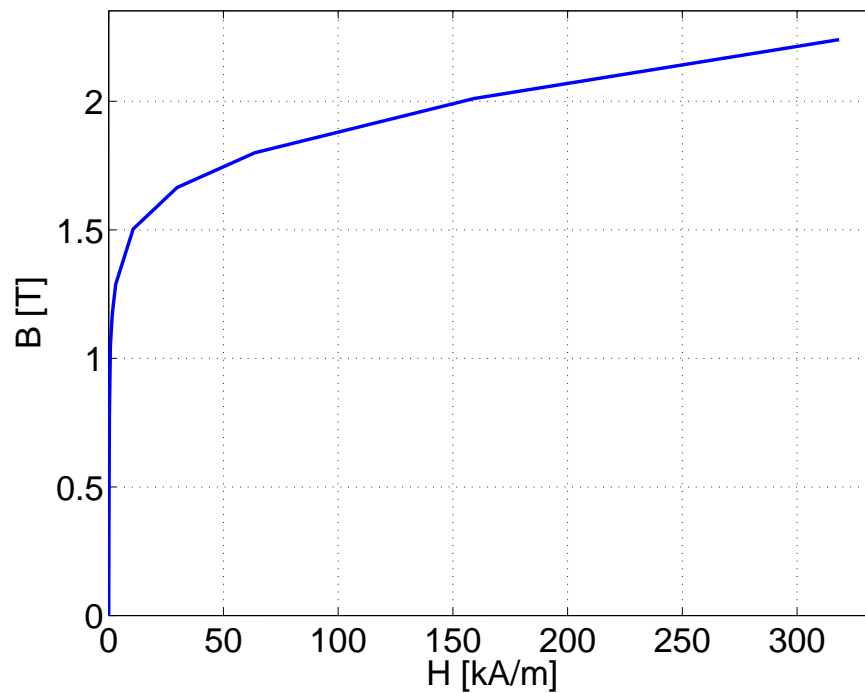


Figura 4.1: lamierino M330-35A

$$\mu_R = 1,052 \quad H_{cj} = 835,8 \frac{A}{m} \quad \sigma = 0.667 \frac{MS}{m}$$

- magnete : SH38

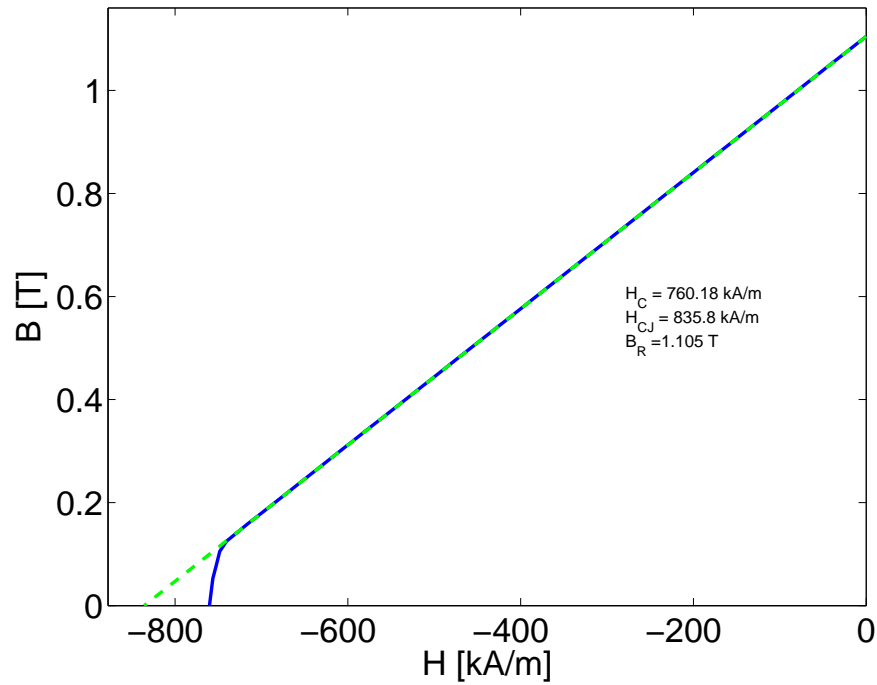


Figura 4.2: magnete SH38

- avvolgimento : Copper

$$\mu_R = 1 \quad \sigma = 58 \frac{MS}{m}$$

La dimensione della mesh viene eseguita con le seguenti proprietà:

- raggio massimo dell'elemento nell'aria 2 mm
- raggio massimo dell'elemento nella lamiera 5 mm
- raggio massimo dell'elemento nel magnete 3 mm

---

## CAPITOLO 5

---

# COMUNICAZIONE TRA PROGRAMMI

In questo capitolo si illustrano le procedure necessarie per mettere in comunicazione i vari software per l'ottimizzazione e l'analisi della macchina.

## 5.1. ESEGUIRE FEMME DA MATLAB/OCTAVE

Programmi usati:

- Femme (tramite il codice Lua) : il programma di simulazione per l'analisi ai campi (elettromagnetici)
- Matlab/Octave: il programma per il comando e successivamente per l'analisi dei risultati del programma femme

Il comando per eseguire un programma da Matlab/Octave é "Running External Programs" che consiste in un punto esclamativo ! seguito dal comando del sistema operativo.

Tale comando permette l'esecuzione di un programma esterno a Matlab/Octave senza uscirvi.

Esistono due varianti:

1. con "&" alla fine della riga di comando : esegue il comando e, appena aperto, esegue la riga di comando successiva
2. senza "&" alla fine della riga di comando : esegue il comando e, appena si chiude, esegue la riga di comando successiva

siccome i dati necessari all'analisi sono ricavati dal programma femme, si deve attendere che le simulazioni siano finite per procedere, pertanto si utilizza la seconda (senza "&").

Se si considera che il programma femme si trova in:

*C : \Programmi \ femm33Mar \ bin\*

il comando é il seguente:

```
!C:\Programmi\femm33Mar\bin\femme.exe
```

La procedura precedente non é completa perché, oltre ad eseguire il programma, occorre lanciare uno script Lua specifico per la simulazione:

```
!C:\Programmi\femm33Mar\bin\femme.exe -lua-script=_____ .lua
```

È necessario mettere alla fine dello script del pre-processing il comando:

```
exitpre()
```

per far chiudere automaticamente il programma femme alla fine delle varie simulazioni.

Se si devono passare dei valori da Matlab/Octave a Femme si deve creare un file di testo con i valori mediante i comandi "fopen", "fprintf" e "fclose" esempio:

```
fid = fopen('corrente.lua', 'w') ;
fprintf(fid, 'Id           =');
fprintf(fid, num2str(Id));
fprintf(fid, '  -- [A]  corrente diretta\n');
fprintf(fid, 'Iq           =');
fprintf(fid, num2str(Iq));
fprintf(fid, '  -- [A]  corrente in quadratura\n');
fclose(fid);
```

L'esempio della procedura crea (o se già esistente la sostituisce) un file "correnti.lua" con il seguente contenuto:

```
Id           =0  -- [A]  corrente diretta
Iq           =0  -- [A]  corrente in quadratura
```

## 5.2. LETTURA DEI RISULTATI DEL FEMME A MATLAB/OCTAVE

Per salvare i risultati delle simulazioni eseguite da Femme si utilizza la seguente procedura nel post-processing. Esempio:

```
...
...
-- Scrittura risultati
handle = fopen("risultati.txt", "a" )
write(handle,
       theta_e , " ",
       fluxA   , " ",
       fluxB   , " ",
       fluxC   , " ",
       "\n"    );
fclose(handle)
exitpost()
```

il file risultati.txt contiene:

- colonna 1 : l'angolo elettrico [grad]
- colonna 2 : il flusso concatenato della fase A [Vs]
- colonna 3 : il flusso concatenato della fase B [Vs]
- colonna 4 : il flusso concatenato della fase C [Vs]

Il comando che permette di leggere tali risultati a Matlab/Octave é il comando "load". Esempio (riferito al precedente):

```
dati=load('risultati.txt');
theta_e = dati(:,1) ;
fluxA   = dati(:,2) ;
fluxB   = dati(:,3) ;
fluxC   = dati(:,4) ;
```



---

## CAPITOLO 6

---

# TEORIA

In questo capitolo si illustrano le procedure per lo studio delle caratteristiche principali della macchina che si basano:

- sulla teoria elettromagnetica
- sulla teoria degli azionamenti
- sulla teoria di ricerca operativa

## 6.1. TENSIONE A VUOTO

Da simulazioni f.e.m.m., facendo ruotare il rotore di un passo polare e tenendo costante l'angolo di carico si sono calcolati i flussi concatenati di ogni fase in funzione della posizione angolare:

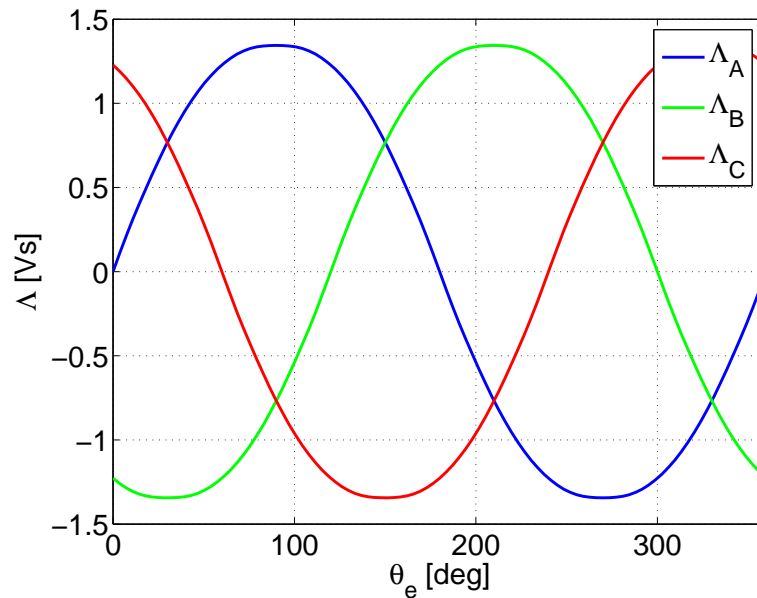


Figura 6.1: flussi concatenati in funzione dell'angolo

Sapendo che il flusso in una rotazione completa si ripete un numero di volte quante sono le coppie polari, si può dedurre che una ripetizione coincide con un passo temporale pari al periodo della frequenza (fondamentale) di alimentazione:

$$t_{(i)} = \frac{\theta_{e(i)}}{360 F} \quad (6.1)$$

pertanto applicando la precedente formula si ricavano i flussi concatenati in funzione del tempo:

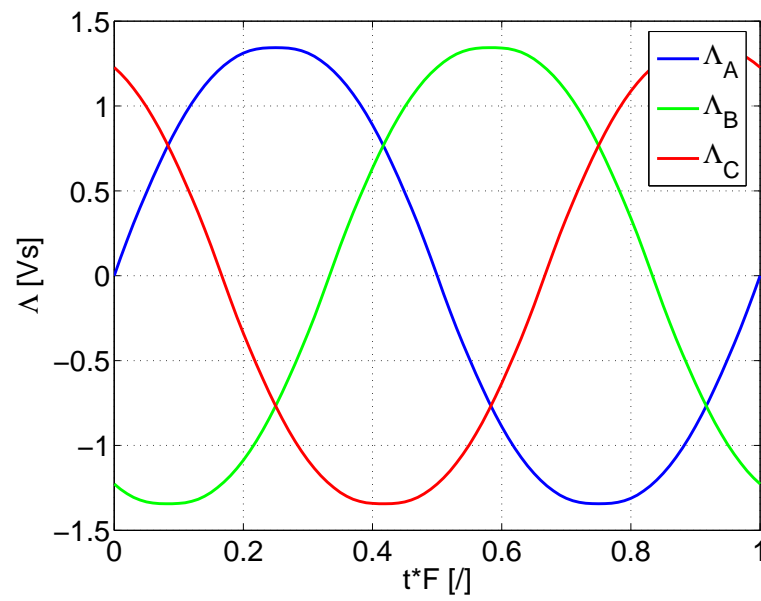


Figura 6.2: flussi concatenati in funzione del tempo

successivamente si é applicata la trasformata di Fourier (FFT), ricavando il flusso in funzione della fondamentale e delle armoniche:

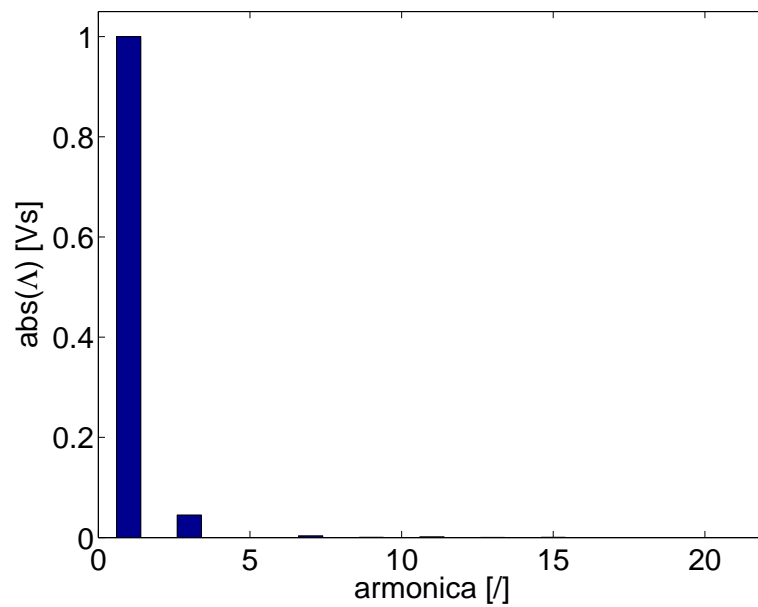


Figura 6.3: flusso concatenato in funzione della frequenza

Per passare dai flussi concatenati alle tensioni stellate si é utilizzata la legge di Faraday Newman Lentz :

$$e_{(t)} = -\frac{d \Lambda_{(t)}}{d t} \quad (6.2)$$

che espressa con Fourier:

$$e_{(t)} = -\frac{d}{d t} \sum_{i=n}^N \Lambda_{(n)} \sin(2 \pi F n t + \alpha_n) = \sum_{i=n}^N -2 \pi F n \Lambda_{(n)} \cos(2 \pi F n t + \alpha_n) \quad (6.3)$$

di conseguenza bisogna moltiplicare ogni componente per la sua pulsazione :

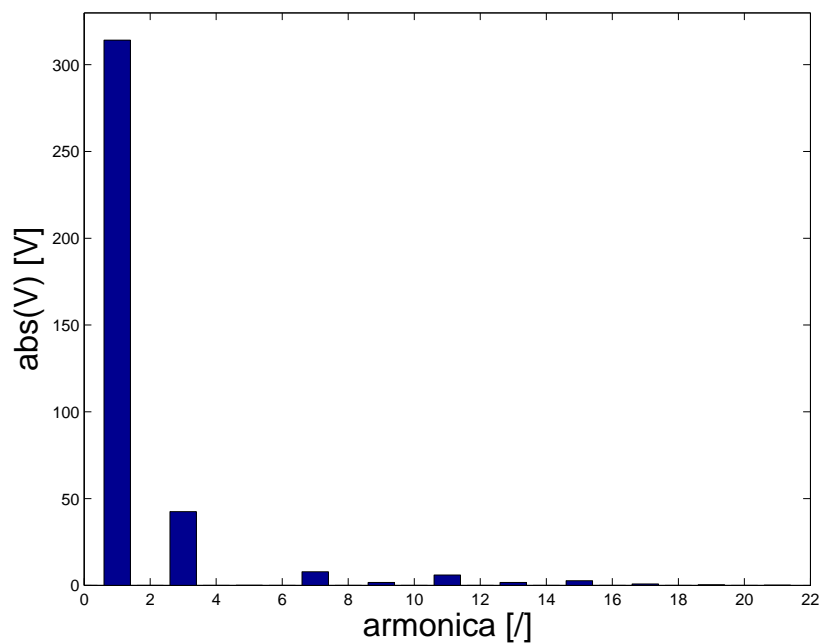


Figura 6.4: tensione stellata in funzione della frequenza

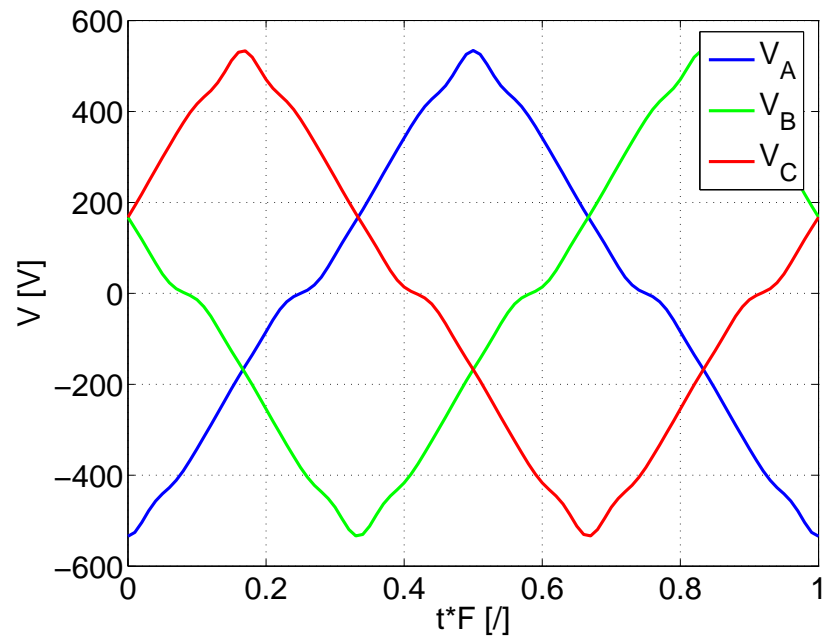


Figura 6.5: tensione stellata in funzione del tempo

successivamente, mediante calcolo punto per punto (istante per istante), si sono calcolate le tensioni concatenate :

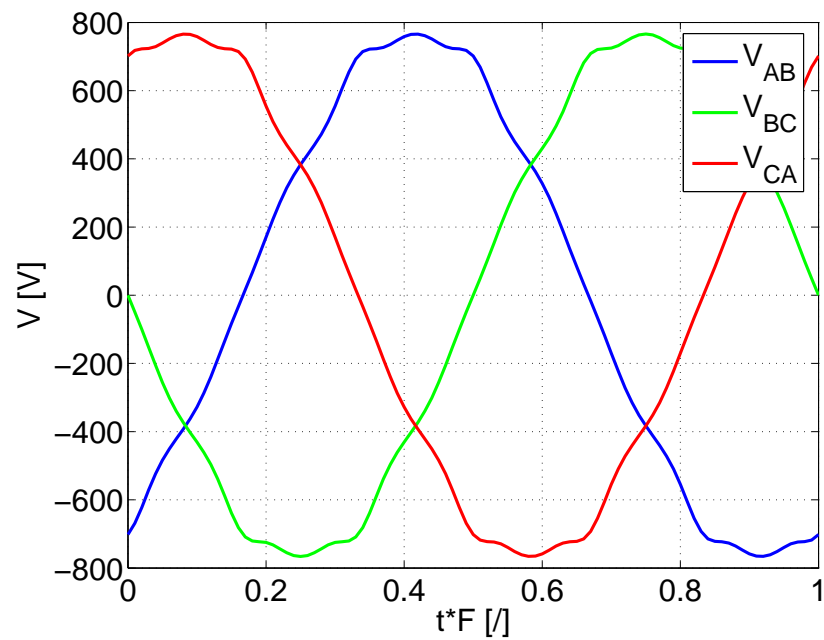


Figura 6.6: tensione concatenata in funzione del tempo

## 6.2. COGGING E SKEWING

La vibrazione della coppia é data dall'anisotropia del traferro ossia dalle cave di statore.

Per studiare in maniera efficace (con un minor costo computazionale) la vibrazione della coppia, si eseguono le simulazioni facendo ruotare il rotore di un passo di cava di statore e calcolando la coppia in funzione dell'angolo di rotazione:

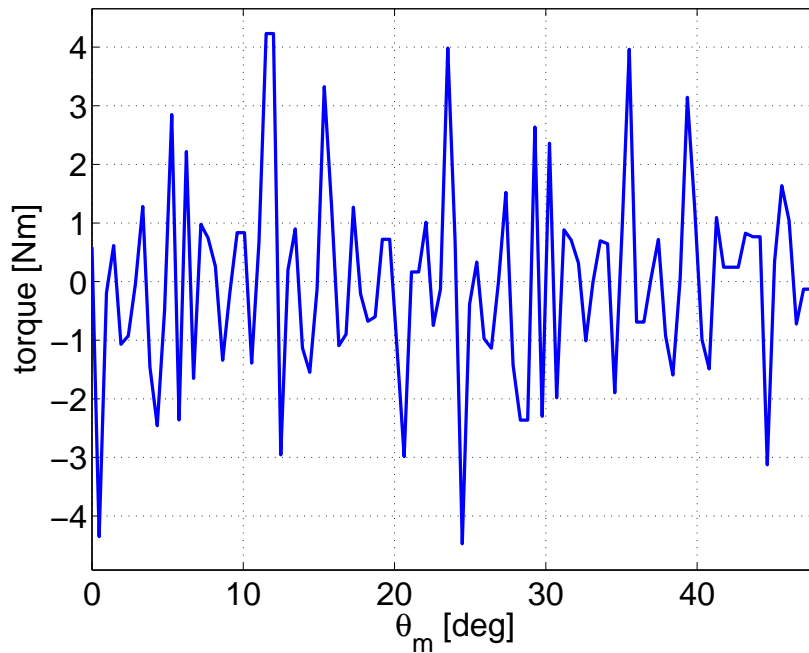


Figura 6.7: coppia di cogging

Tale coppia ha valore medio nullo (o quasi) essendo a vuoto. Per eliminare 'parzialmente' le coppie di cogging si esegue lo skewing. Essendo la macchina a magneti permanenti lo skewing non può essere continuo (troppo costoso da realizzare), ma discreto a causa dei magneti permanenti (essendo parallelepipedi rigidi). Per calcolare le coppie di cogging con eventuale skewing si eseguono le seguenti operazioni:

1. si determina l'angolo di skewing
2. la coppia di ogni suddivisione si calcola interpolando la coppia in funzione dell'angolo considerando la sua relativa inclinazione e dividendola per il numero di suddivisioni di rotore
3. si sommano tutti i contributi delle porzioni di rotore

Codice per calcolare lo skewing:

```

1 function [c_sk] = skewing (coppia,theta_m,theta_m_s,Qs,N)
2
3 % il sottoprogramma calcola la coppia con skewing di una cava di statore
4 % con il rotore suddiviso in N parti
5 % [c_sk] = skewing (coppia,theta_e,Qs,N)
6 % con : - coppia      : coppia
7 %       - theta_m     : angolo meccanico
8 %       - theta_m_s  : inclinazione del rotore
9 %       - N           : numero di suddivisione dei magneti
10 %      - Qs          : cave di statore
11 %      - rip         : ripetizioni
12 %
13 %      - c_sk        : coppia con lo skiuing
14
15
16 % calcolo coppia con skiuing
17 for i=1:length(coppia)
18     c_sk(i)=0;
19     for n=1:N
20         angolo=theta_m_s*(n-1)/(N-1)+theta_m(i);
21         if angolo > max(theta_m)
22             angolo=angolo-max(theta_m);
23         end
24         c_sk(i)=c_sk(i)+interp1(theta_m,coppia,angolo);
25     end
26     c_sk(i)=c_sk(i)/N;
27 end

```

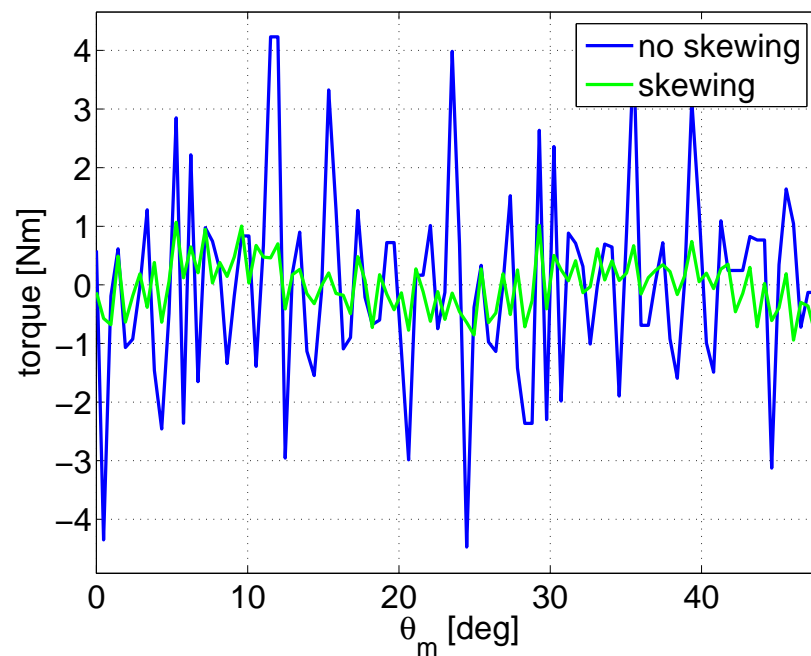


Figura 6.8: coppia con skewing

Per valutare in quante parti dividere il rotore si analizza l'energia legata alla vibrazione:

$$E = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} T_{(\vartheta)}^2 d\vartheta} \quad (6.4)$$

Successivamente si grafica l' energia legata alla vibrazione in funzione del numero di suddivisioni:

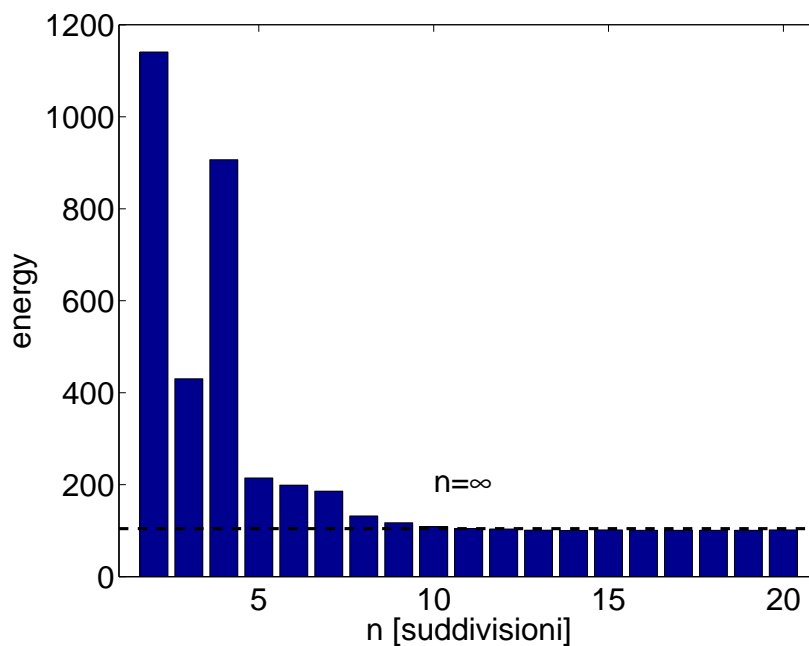


Figura 6.9: energia in funzione del numero di suddivisioni del rotore

Scelto il numero delle suddivisioni si calcola la coppia a vuoto:

- senza skewing
- con skewing discreto
- con skewing continuo (confronto limite teorico)



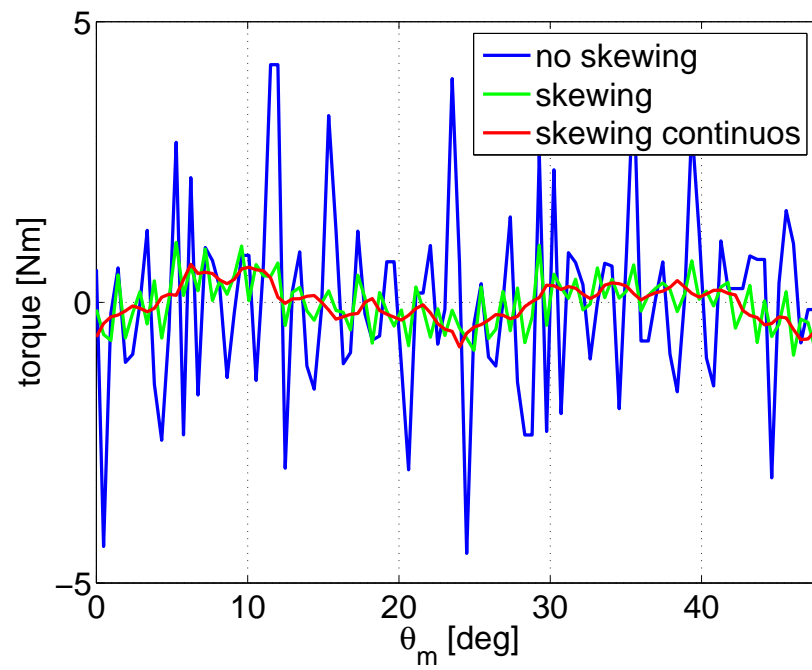


Figura 6.10: coppia di cogging con skewing

### 6.3. FLUSSI CONCATENATI E RELATIVE INDUTTANZE

Si eseguono simulazioni allineando l'asse diretto di statore e rotore, facendo variare la corrente diretta ed in quadratura creando un griglia di simulazioni sul piano  $(i_d, i_q)$ .

Per il calcolo dei flussi concatenati:

- il flusso concatenato del magnete si calcola interpolando il flusso diretto sul piano  $i_d, i_q$  imponendo entrambi le correnti nulle
- il flusso concatenato diretto si calcola interpolando il flusso diretto sul piano  $i_d, i_q$  imponendo  $i_q$  nulla e facendo variare  $i_d$  e sottraendo al flusso ottenuto quello del magnete
- il flusso concatenato in quadratura si calcola interpolando il flusso in quadratura sul piano  $i_d, i_q$  imponendo  $i_d$  nulla e facendo variare  $i_q$

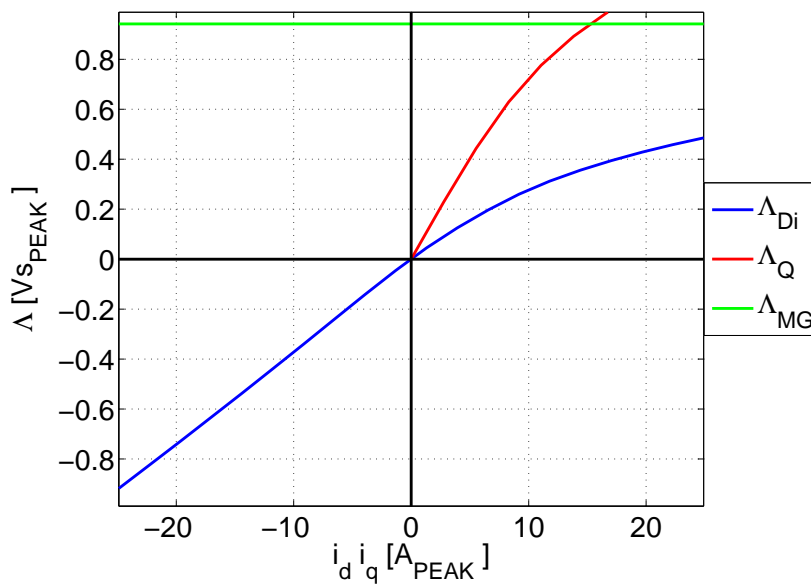


Figura 6.11: flussi

Per il calcolo dell'induttanza diretta ed in quadratura (apparente e differenziale) si applicano le seguenti formule:

- Induttanza apparente diretta ed in quadratura:

$$L_d = \frac{\hat{\Lambda}_d}{\hat{i}_d} \quad (6.5)$$

$$L_q = \frac{\hat{\Lambda}_q}{\hat{i}_q} \quad (6.6)$$

- Induttanza differenziale diretta ed in quadratura:

$$L_d = \frac{d \hat{\Lambda}_{di}}{d \hat{i}_d} \quad (6.7)$$

$$L_q = \frac{d \hat{\Lambda}_q}{d \hat{i}_q} \quad (6.8)$$

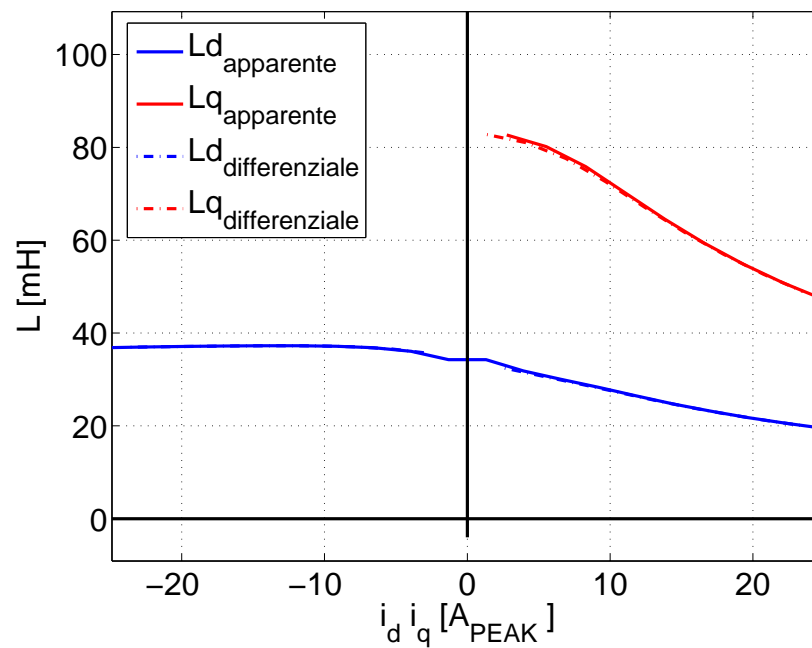


Figura 6.12: induttanze

## 6.4. DEFLUSSAGGIO

I dati preliminari per il calcolo del deflussaggio sono i seguenti:

- F.e.m. nominale
- fattore di riempimento della cava
- sezione di cava
- dati avvolgimento : numero di conduttori serie
- mappatura di : coppia, flusso concatenato diretto ed in quadratura, induzione nel dente e nella corona
- dati conduttore : resistività, coefficiente di temperatura, temperatura di lavoro
- dati lamierino : peso specifico, cifra di perdita

I calcoli preliminari utilizzati:

resistività alla temperatura di esercizio:

$$\rho_{T_{lav}} = \rho_{20} * (1 + \alpha_t * T_{lav}) \quad (6.9)$$

resistenza di cava:

$$R_{slot} = \rho_{T_{lav}} \frac{L_{STK}/1000}{S_{slot} 10^{-6} K_{fill}} \quad (6.10)$$

resistenza conduttore serie

$$R_S = 1,1 \frac{2 R_{slot} Q_S N_C^2}{3 p} \quad (6.11)$$

volume dei denti di statore:

$$VOL_{fet} = \frac{\pi [(D_S + h_S)^2 - D_S^2 - Q_S * S_{slot}]}{4} L_{STK} \quad (6.12)$$

peso dei denti di statore:

$$G_{fet} = \gamma_{FE} VOL_{fet} \quad (6.13)$$

volume della corona di statore:

$$VOL_{febi} = \frac{\pi [De^2 - (Ds + hs)^2]}{4} * L_{STK} \quad (6.14)$$

peso della corona di statore:

$$G_{febi} = \gamma_{FE} VOL_{febi}; \quad (6.15)$$

tensione di avvolgimento:

$$V_{avv} = Vn - R_S In \quad (6.16)$$

Per la determinazione del punto base:

Si varia la corrente diretta ed in quadratura facendo in modo che la loro somma (vettoriale) sia quella nominale della macchina; si cerca il punto base che é quello con la coppia maggiore. Si ricavano:

- 01) La corrente diretta e quella in quadratura
- 02) Il flusso concatenato diretto e quello in quadratura
- 03) Il flusso concatenato totale del punto base

$$\Lambda_b = \sqrt{\Lambda_d^2 + \Lambda_q^2} \quad (6.17)$$

- 04) La coppia (tramite i flussi)

$$T = \frac{3}{2} p (\Lambda_{mg} iq + \Lambda_{di} iq - \Lambda_q id) \quad (6.18)$$

- 05) La pulsazione elettrica base

$$\omega_b = \frac{\sqrt{2} V_{avv}}{\Lambda p} \quad (6.19)$$

- 06) L'angolo della corrente base

$$ang_b = \frac{180}{\pi} atan\left(\frac{I_q}{I_d}\right) \quad (6.20)$$

Per i punti successivi a quello base, si aumenta l'angolo della corrente ("ang") e si calcolano:

- 01) La corrente diretta

$$Id = In \cos\left(ang \frac{\pi}{180}\right) \quad (6.21)$$

- 02) La corrente in quadratura

$$Iq = In \sin\left(ang \frac{\pi}{180}\right) \quad (6.22)$$

03) Flusso concatenato diretto

$$\Lambda_d = \text{tramite interpolazione di } Id, Iq \quad (6.23)$$

04) Flusso concatenato in quadratura

$$\Lambda_q = \text{tramite interpolazione di } Id, Iq \quad (6.24)$$

05) Flusso concatenato

$$\Lambda = \sqrt{\Lambda_d^2 + \Lambda_q^2} \quad (6.25)$$

06) Coppia

$$Torq = \text{tramite interpolazione di } Id, Iq \quad (6.26)$$

07) Flusso del magnete

$$\Lambda_{mg} = \text{tramite interpolazione del flusso diretto cob } Id = 0, Iq = 0 \quad (6.27)$$

08) Induttanza diretta

$$Ld = \frac{\Lambda_d - \Lambda_{mg}}{Id} \quad (6.28)$$

09) Induttanza in quadratura

$$Lq = \frac{\Lambda_q}{Iq} \quad (6.29)$$

10) Coefficiente *csi*

$$csi = \frac{Lq}{Ld} \quad (6.30)$$

11) Coefficiente *a*

$$a = 2 \frac{1 - csi}{csi} \Lambda \quad (6.31)$$

12) Coefficiente *sent*

$$sent = \frac{-\Lambda mg + \sqrt{\Lambda mg^2 + 2 a^2}}{2 a} \quad (6.32)$$

13) Coefficiente *cost*

$$cost = \sqrt{1 - sent^2} \quad (6.33)$$

14) Corrente diretta del limite tra la zona MTPA e MTPV

$$Id_{tv} = \frac{\Lambda sent - \Lambda mg}{Ld} \quad (6.34)$$

15) Corrente in quadratura del limite tra la zona MTPA e MTPV

$$Iq_{tv} = \frac{\Lambda sent}{csi Ld} \quad (6.35)$$

16) Corrente del limite tra la zona MTPA e MTPV

$$I_{tv} = \sqrt{Id_{tv}^2 + Iq_{tv}^2} \quad (6.36)$$

Se si sta lavorando nella zona MTPA:

$$\begin{aligned}
 I_{tv} &\geq I_n & (6.37) \\
 I_d &= I_n \cos\left(\text{ang} \frac{\pi}{180}\right) \\
 I_q &= I_n \sin\left(\text{ang} \frac{\pi}{180}\right)
 \end{aligned}$$

Se si sta lavorando nella zona MTPV:

$$\begin{aligned}
 I_{tv} &\leq I_n & (6.38) \\
 I_d &= I_{d_{tv}} \\
 I_q &= I_{q_{tv}}
 \end{aligned}$$

Conoscendo questi dati si procede al calcolo dei seguenti valori:

01) Flusso concatenato diretto

$$\Lambda_d = \text{tramite interpolazione di } I_d, I_q \quad (6.39)$$

02) Flusso concatenato in quadratura

$$\Lambda_q = \text{tramite interpolazione di } I_d, I_q \quad (6.40)$$

03) Flusso concatenato

$$\Lambda = \sqrt{\Lambda_d^2 + \Lambda_q^2} \quad (6.41)$$

04) La pulsazione (elettrica)

$$\omega = \frac{\Lambda}{\Lambda_b} \omega_b \quad (6.42)$$

05) La velocità meccanica

$$n = \frac{60 \omega}{2 \pi p} \quad (6.43)$$

06) La coppia

$$Torq = \text{tramite interpolazione di } I_d, I_q \quad (6.44)$$

07) La corrente totale

$$I_{tot} = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \quad (6.45)$$

08) L'induzione nel dente

$$b_t = \text{tramite interpolazione di } I_d, I_q \quad (6.46)$$

09) L'induzione nella corona

$$b_{bi} = \text{tramite interpolazione di } I_d, I_q \quad (6.47)$$

10) Le perdite del ferro

$$\Delta P_{fe} = cp k_{mag} \left( \frac{\omega}{2 \pi 50} \right)^2 \frac{bt^2 G_{fet} + bbi^2 G_{febi}}{1.5^2} \quad (6.48)$$

11) la fem diretta

$$E_d = -\omega p \Lambda_q \quad (6.49)$$

12) La fem in quadratura

$$E_q = +\omega p \Lambda_d \quad (6.50)$$

13) La fem

$$E_{pk} = \sqrt{E_d^2 + E_q^2} \quad (6.51)$$

14) La corrente delle perdite del ferro

$$If = \frac{2}{3} \frac{\Delta P_{fe}}{E_{pk}} \quad (6.52)$$

15) La corrente diretta delle perdite del ferro

$$If_d = If \frac{E_d}{E_{pk}} \quad (6.53)$$

16) La corrente in quadratura delle perdite del ferro

$$If_q = If \frac{E_q}{E_{pk}} \quad (6.54)$$

17) La corrente diretta totale

$$I_{dtot} = Id + If_d \quad (6.55)$$

18) La corrente in quadratura totale

$$I_{qtot} = Iq + If_q \quad (6.56)$$

19) La corrente totale

$$I_{pktot} = \sqrt{I_{dtot}^2 + I_{qtot}^2} \quad (6.57)$$

20) La tensione ai morsetti diretta

$$Vd = Rs I_{pktot} - \omega p \Lambda_q \quad (6.58)$$

21) La tensione ai morsetti in quadratura

$$Vq = Rs I_{pktot} + \omega p \Lambda_d \quad (6.59)$$

22) La tensione ai morsetti

$$V_{pkt} = \sqrt{Vd^2 + Vq^2} \quad (6.60)$$



23) L'angolo della corrente

$$\alpha_{ietot} = \frac{180}{\pi} \operatorname{atan}\left(\frac{I_{1tot}}{I_{dtot}}\right) \quad (6.61)$$

24) L'angolo della tensione

$$\alpha_{ve} = \frac{180}{\pi} \operatorname{atan}\left(\frac{Vq}{Vd}\right) \quad (6.62)$$

25) Le perdite Joule sull'avvolgimento

$$\Delta P_{joule} = \frac{3}{2} R_s I_{pktot}^2 \quad (6.63)$$

26) La potenza meccanica all'asse

$$P_{mec} = \frac{Torq}{\omega} \quad (6.64)$$

27) La coppia cilindrica

$$T_{cil} = \frac{3}{2} p \Lambda_{mg} Iq \quad (6.65)$$

28) La coppia di riluttanza

$$T_{ril} = \frac{3}{2} p [(\Lambda_d - \Lambda_{mg}) Iq - \Lambda_q Id] \quad (6.66)$$

30) Le perdite per attrito e ventilazione

$$\Delta P_{att,ven} = 0.75 \frac{P_{mec}}{10^3} * \sqrt{n} \quad (6.67)$$

31) Le perdite totali

$$\Delta P = \Delta P_{att,ven} + \Delta P_{fe} + \Delta P_{joule} \quad (6.68)$$

32) Il rendimento

$$\eta(\%) = 100 \frac{P_{mec}}{P_{mec} + \Delta P} \quad (6.69)$$

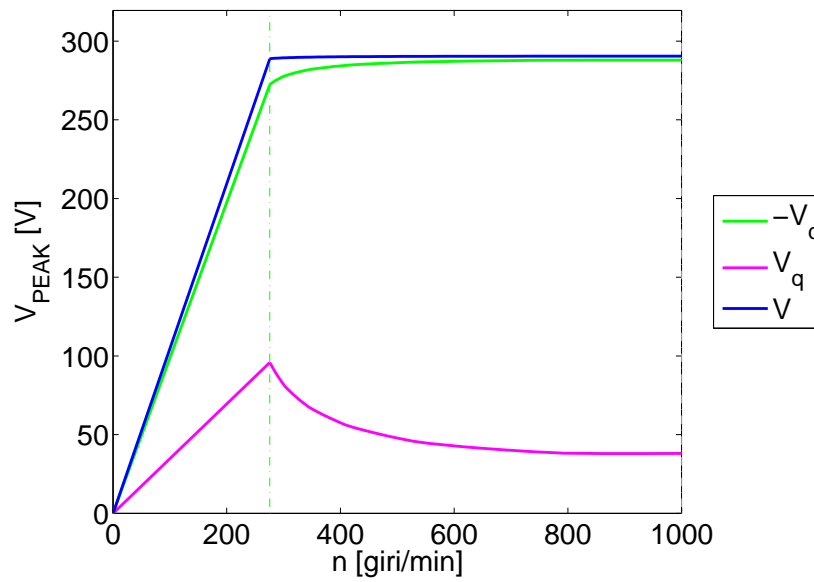


Figura 6.13: tensione in funzione della velocità

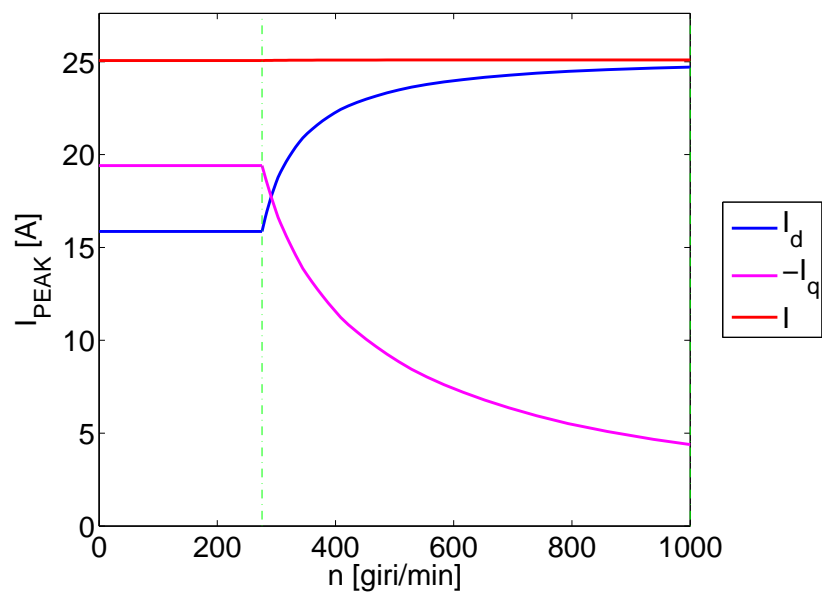


Figura 6.14: corrente in funzione della velocità

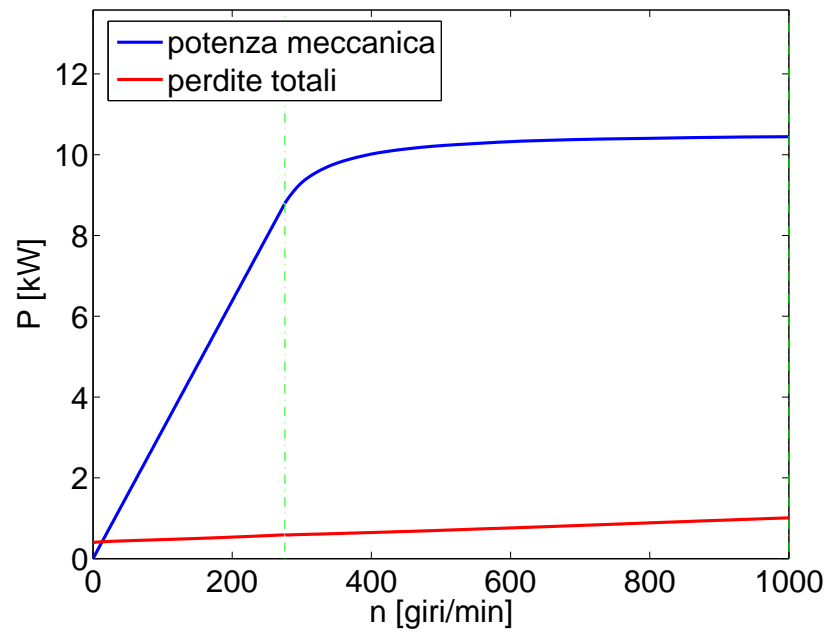


Figura 6.15: potenza in funzione della velocità

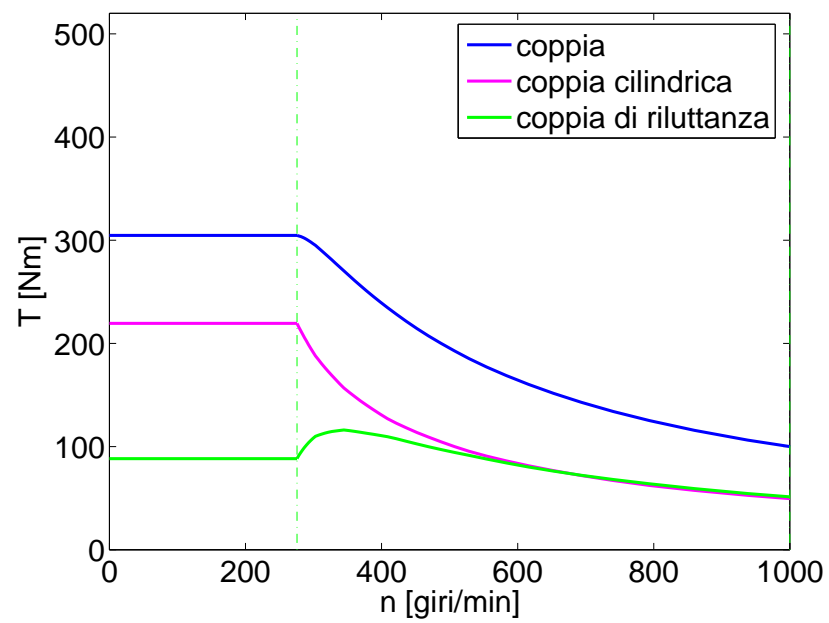


Figura 6.16: coppia in funzione della velocità

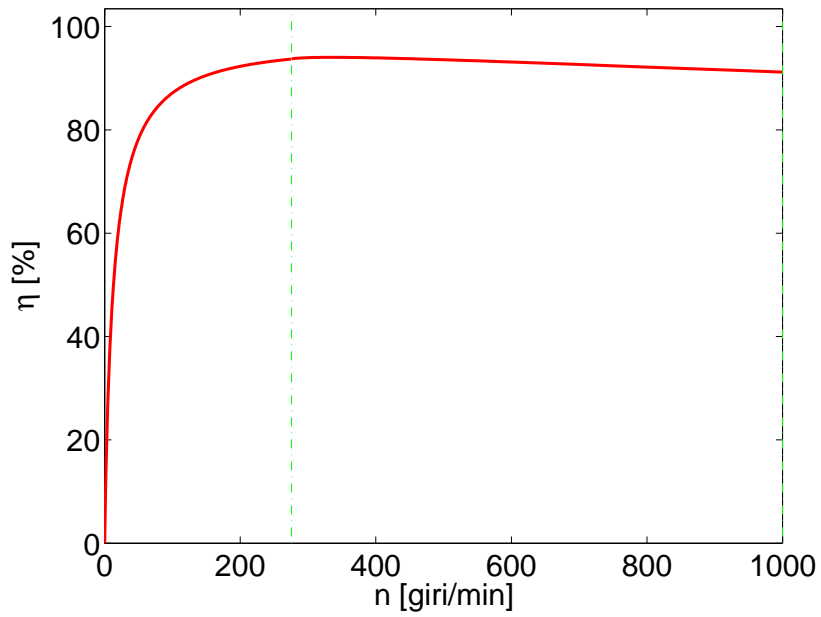


Figura 6.17: rendimento in funzione della velocità

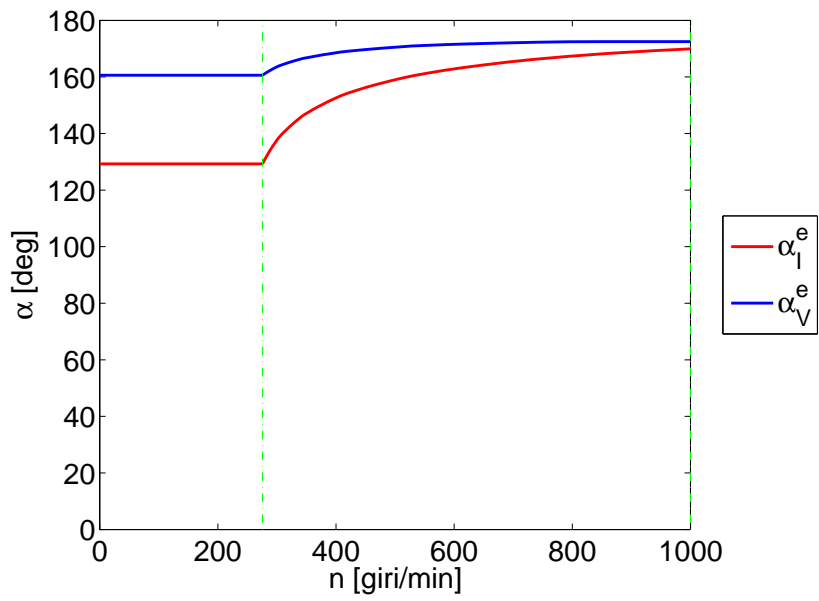


Figura 6.18: angoli in funzione della velocità

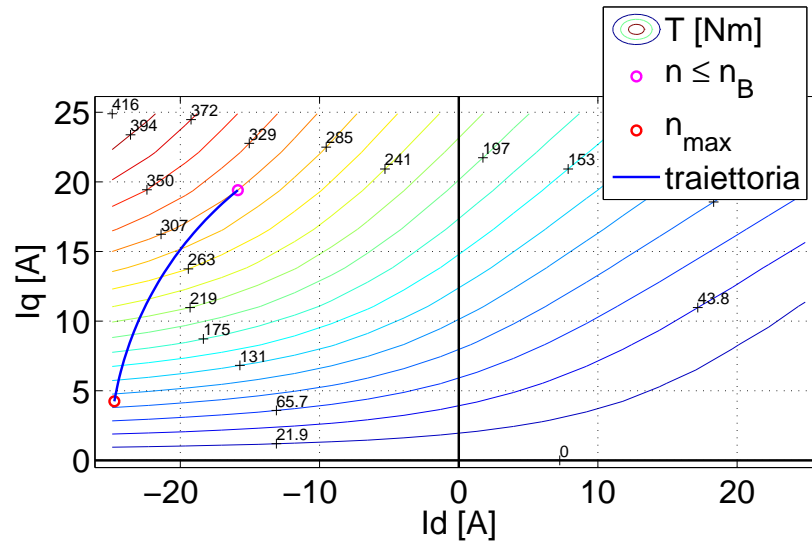


Figura 6.19: traiettoria nella coppia

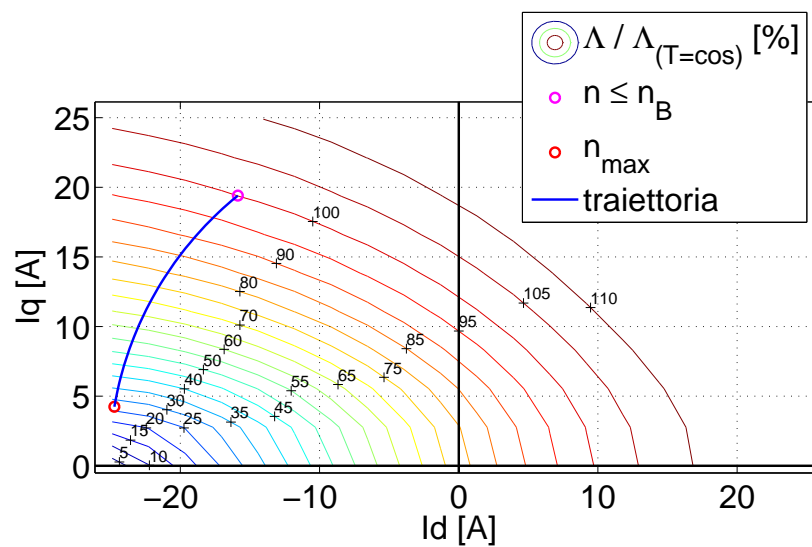


Figura 6.20: traiettoria nel flusso

## 6.5. OTTIMIZZAZIONE

L'ottimizzazione deve ricercare la migliore configurazione geometrica del rotore dell'IPM. Le grandezze in gioco sono le seguenti:

- altezza del ponticello magnetico interno
- altezza del ponticello magnetico esterno
- distanza barriera-esterno
- distanza barriera-traferro

L'obiettivo dell'ottimizzatore é quello di trovare la configurazione che, a parit  di coppia abbia il minor costo.

Vincoli fissati:

- dimensioni massime e minime dei vari parametri da modificare
- il valore della coppia desiderata
- i costi volumetrici (passando per il peso specifico) del conduttore, del lamierino e del magnete

Ogni singolo punto viene analizzato attraverso la seguente procedura:

1. trovare la coppia massima per unit  di lunghezza (Nm/cm) facendo variare la corrente diretta ed in quadratura in modo da ottenere la corrente nominale
2. dividere la coppia desiderata per la coppia per unit  di lunghezza e si calcola la lunghezza effettiva della macchina
3. calcolare il volume del conduttore, del lamierino (statore e rotore) e dei magneti
4. calcolare il costo della macchina

Il metodo da utilizzare per l'ottimizzazione della macchina deve tener conto:

- della fase di ricerca della massima coppia che richiede un certo numero di simulazioni, circa dieci
- che per ogni singola simulazione sono richiesti circa 2 minuti di simulazione (essendo 13000 nodi)

per i motivi precedentemente illustrati si   scelto un ottimizzatore semplice e veloce.

Il metodo utilizzato é basato sul analisi monodimensionali successive. Si é analizzata la macchina all'aumentare e al diminuire di un parametro di un passo di ricerca. Se una delle due situazioni risulterà piú economica la si porrà come nuova configurazione. Successivamente si eseguirá lo stesso procedimento con il parametro successivo, e così via, fino a quando si analizza l'ultimo parametro. Successivamente si ritornerà ad analizzare il primo parametro.

Per comodità, si considera un passo di ottimizzazione quando si sono analizzate una volta, tutte le dimensioni.

Per rendere piú veloce l'ottimizzatore si sono usati passi variabili. Se non si hanno variazioni in un passo di ottimizzazione si diminuisce il passo di ricerca, in tal modo non si deve usare un passo di ricerca costante troppo piccolo che richiederebbe troppe iterazioni.

La complessità di questo metodo é il seguente:

$$punti = i (2 n + 1) \quad (6.70)$$

$$simulazioni = i (2 n + 1) N \quad (6.71)$$

con:

- $n$  : numero delle dimensioni
- $i$  : passi di iterazione
- $N$  : numero di simulazioni per un passo

Nel caso in esame si ottengono:

- 4 dimensioni ( $n$ )
- 21 iterazioni circa ( $i$ )
- 10 simulazioni per la ricerca del massimo ( $N$ )

pertanto si ottengono 189 punti e 1890 simulazioni che coincidono con circa quattro giorni di simulazione: un tempo accettabile.

Il flow-chart del metodo utilizzato é il seguente:

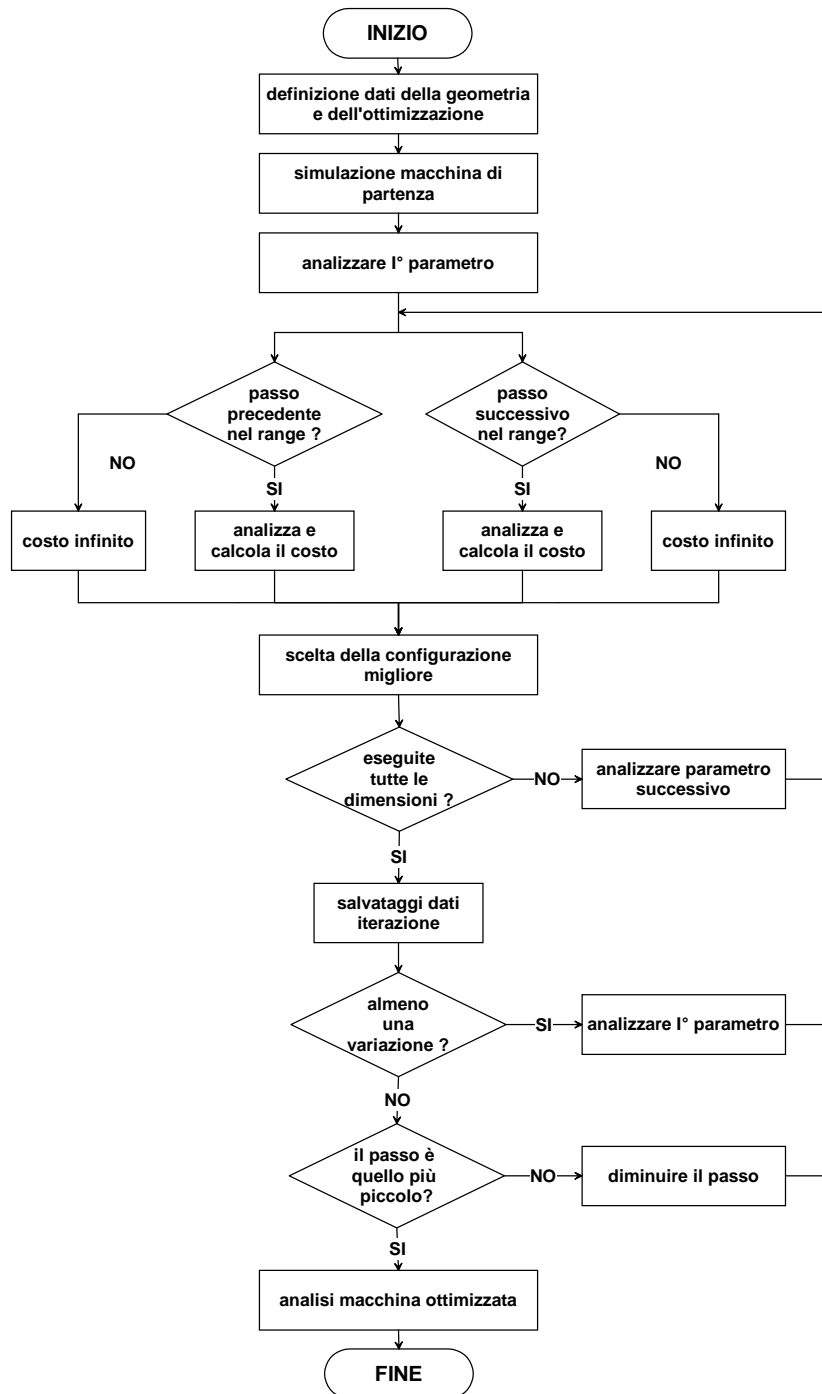


Figura 6.21: flow-chart nell' ottimizzazione



Ora si illustra in maniera sintetica il metodo utilizzato:

- DEFINIZIONE DATI DELLA GEOMETRIA E DELL'OTTIMIZZAZIONE  
in questo blocco si definiscono:
  - dati elettrici della macchina
  - dati geometrici della macchina
  - matrice di cava
  - l'angolo di allineamento dall'asse diretto di rotore e di statore
  - la lunghezza dei vari passi (in millimetri)
  - la coppia desiderata
  - costi e pesi specifici dei vari materialiSi definiscono inoltre dei vettori di supporto:
  - a) un vettore per salvare i valori dei vari parametri della macchina (utile per non perdere i dati iniziali)
  - b) un vettore per segnalare all'ottimizzatore quali parametri si vogliono far variare
  - c) due vettori per i limiti massimi e minimi
- SIMULAZIONE MACCHINA DI PARTENZA  
si simula la macchina senza nessuna modifica per avere i risultati di riferimento
- PASSO PRECEDENTE NEL RANGE ? + COSTO INFINITO + ANALIZZA E CALCOLA IL COSTO  
in questi blocchi prima si verifica se la diminuzione del parametro porta ad essere al di fuori dai vincoli preimpostati. In caso affermativo si analizza la macchina, in caso contrario si scarta il punto (lo si pone a costo infinito)
- PASSO SUCCESSIVO NEL RANGE ? + COSTO INFINITO + ANALIZZA E CALCOLA IL COSTO  
analogo al blocco precedente, ma si incrementa il parametro
- SCELTA DELLA CONFIGURAZIONE MIGLIORE  
si confrontano le tre simulazioni: punto centrale (quella fatta in precedenza), passo precedente e passo successivo. Se il passo precedente o quello successivo sono migliori si pongono come nuovo valore centrale. In caso contrario si annota che il parametro non é stato modificato
- ESEGUITE TUTTE LE DIMENSIONI ? + NO + ANALIZZARE PARAMETRO SUCCESSIVO  
se non si é arrivati ad analizzare l'ultimo parametro, si passa al parametro successivo
- ESEGUITE TUTTE LE DIMENSIONI ? + SI + SALVATAGGIO DATI ITERAZIONE  
se si sono analizzate tutte le dimensioni significa che si é compiuto un passo di iterazione. Si salvano i nuovi dati ed i risultati della macchina

- **ALMENO UNA VARIAZIONE ? + SI + ANALIZZARE I° PARAMETRO**  
Se almeno é avvenuta una variazione del parametro della macchina si procede con lo stesso passo di ricerca.
- **ALMENO UNA VARIAZIONE ? + NO**  
L'ottimizzazione con questo passo di ricerca é conclusa perché siamo in una valle, quindi, se si modifica qualunque parametro della macchina si trova una configurazione peggiore
- **IL PASSO É QUELLO PIÚ PICCOLO? + NO + DIMINUIRE IL PASSO**  
si diminuisce il passo di ricerca e si analizza la prima dimensione
- **IL PASSO É QUELLO PIÚ PICCOLO? + SI**  
il passo di ricerca é il piú piccolo dunque la macchina é ottimizzata
- **ANALISI MACCHINA OTTIMIZZATA**  
sulla macchina ottimizzata si eseguono le seguenti analisi:
  - induzione a vuoto
  - calcolo fem a vuoto
  - calcolo dei flussi e delle induttanze
  - calcolo delle grandezze in funzione della velocità
  - calcolo dello skewing

## 6.6. CORRENTE MINIMA DI SMAGNETIZZAZIONE

Per calcolare la corrente minima di smagnetizzazione si allinea l'asse diretto di statore e di rotore e per tentativi ci cerca il valore di corrente diretta (mentre quella inversa posta a zero) che faccia lavorare un qualunque punto del magnete con un flusso nullo.

Siccome il calcolo ( $B$  normale alla superficie) viene fatto su una linea, si prende la linea di un magnete (preso a piacere) piú prossima al traferro, perché ha le condizioni peggiori (maggior smagnetizzazione).

Per sviluppare il processo di ricerca della corrente minima di smagnetizzazione si deve utilizzare un metodo iterativo.

Il processo scelto:

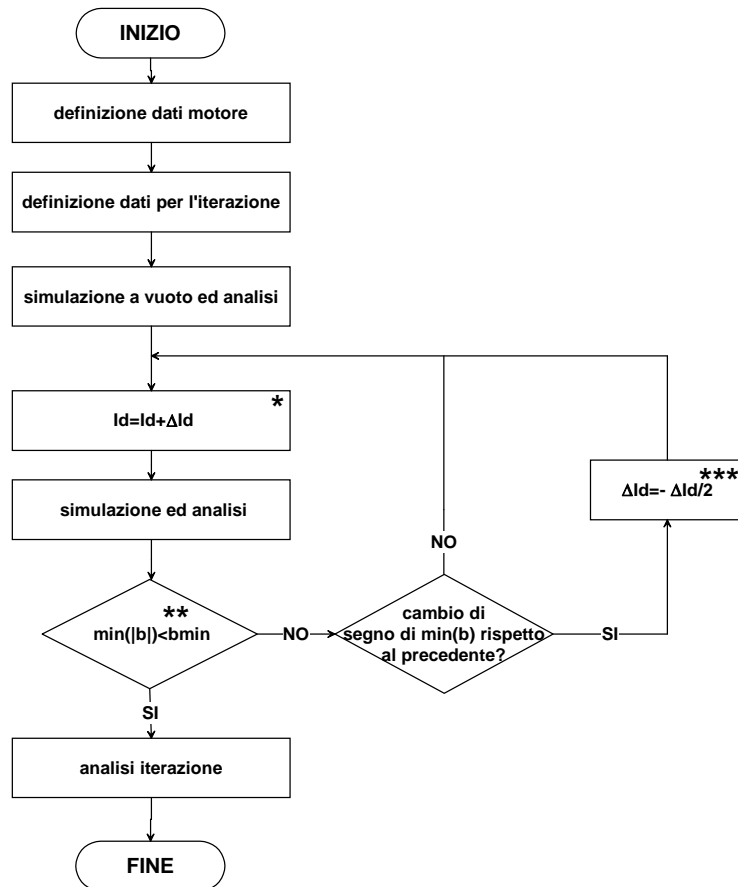


Figura 6.22: flow-chart corrente minima di smagnetizzazione

Ora si illustra in maniera sintetica il metodo utilizzato:

- DEFINIZIONE DATI MOTORE  
si definiscono:
  - dati geometrici
  - dati magnetici
  - dati elettrici
- DEFINIZIONE DATI PER L'ITERAZIONE  
si definisce il passo di ricerca (-In) ed il valore minimo del flusso
- SIMULAZIONE A VUOTO ED ANALISI  
si analizza la macchina a vuoto e si osserva il valore del flusso sul magnete che risulta tutto positivo o tutto negativo (dipende dal verso della normale alla superficie). Se positivo si definisce la variabile segno pari a 1, in caso contrario si pone pari a -1
- BLOCCO \*  
si pone la nuova corrente diretta come la somma di quella precedente e il valore del passo di ricerca
- SIMULAZIONE ED ANALISI  
si simula la nuova configurazione e si misura il valore minimo del flusso moltiplicato per la variabile segno
- BLOCCO \*\* + SI + ANALISI ITERAZIONE  
il flusso é praticamente nullo in un punto del magnete quindi la corrente ricavata é quella che smagnetizza il magnete
- BLOCCO \*\* + NO  
il magnete non é ancora smagnetizzato in un suo punto
- CAMBIO DI SEGNO DI  $\min(b)$  RISPETTO AL PRECEDENTE? + NO  
se il valore minimo del flusso non ha cambiato segno rispetto alla precedente iterazione, non si é ancora raggiunta la corrente di smagnetizzazione
- CAMBIO DI SEGNO DI  $\min(b)$  RISPETTO AL PRECEDENTE? + SI + BLOCCO \*\*\*  
se il valore minimo del flusso ha cambiato segno rispetto alla precedente iterazione, si é superata la corrente di smagnetizzazione, pertanto si torna indietro della metà del passo precedente

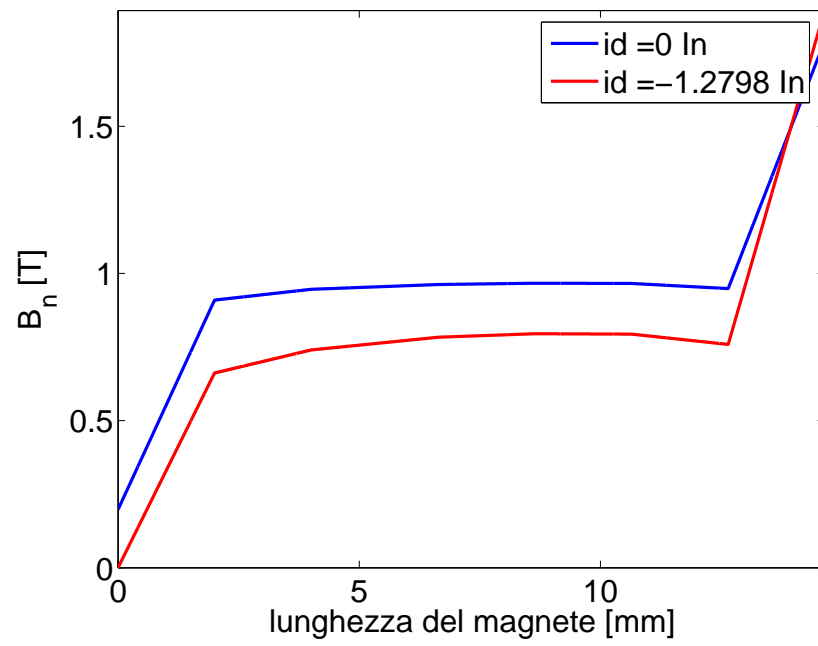


Figura 6.23: corrente minima di smagnetizzazione



---

## CAPITOLO 7

---

### ANALISI IPM

In questo capitolo si analizza la macchina IPM di partenza, data dal costruttore.  
Dati del rotore (interno) :

– diametro esterno (al traferro)	:	$D_{re}$	=	218	mm
– diametro interno (albero)	:	$D_{ri}$	=	100	mm
– spessore del magnete	:	$t_m$	=	5.66	mm
– altezza del ponticello magnetico interno	:	$h_{ri}$	=	1.5	mm
– distanza barriera – traferro	:	$d_{bi}$	=	46.78	mm
– altezza del ponticello magnetico esterno	:	$h_{re}$	=	1.36	mm
– distanza barriera – esterno	:	$d_{be}$	=	1.2	mm
– diametro del centro dei cerchi d'aria	:	$D_{cer}$	=	160	mm
– diametro cerchi d'aria	:	$d_{cer}$	=	24	mm

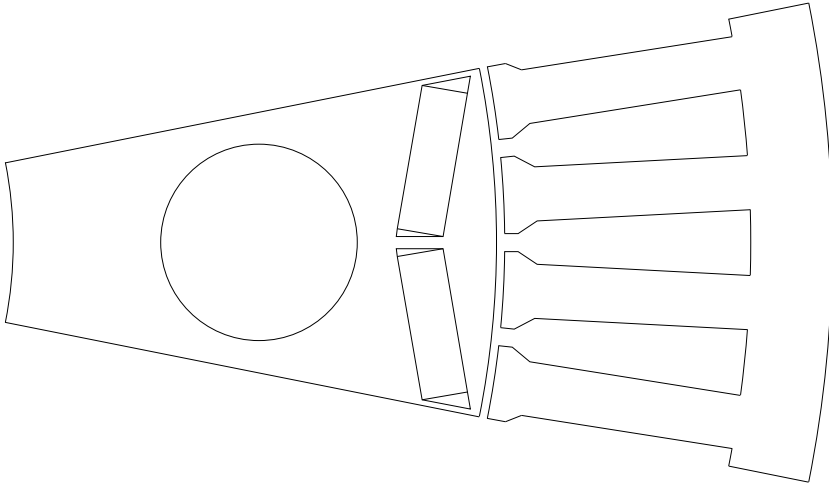


Figura 7.1: polo IPM di partenza

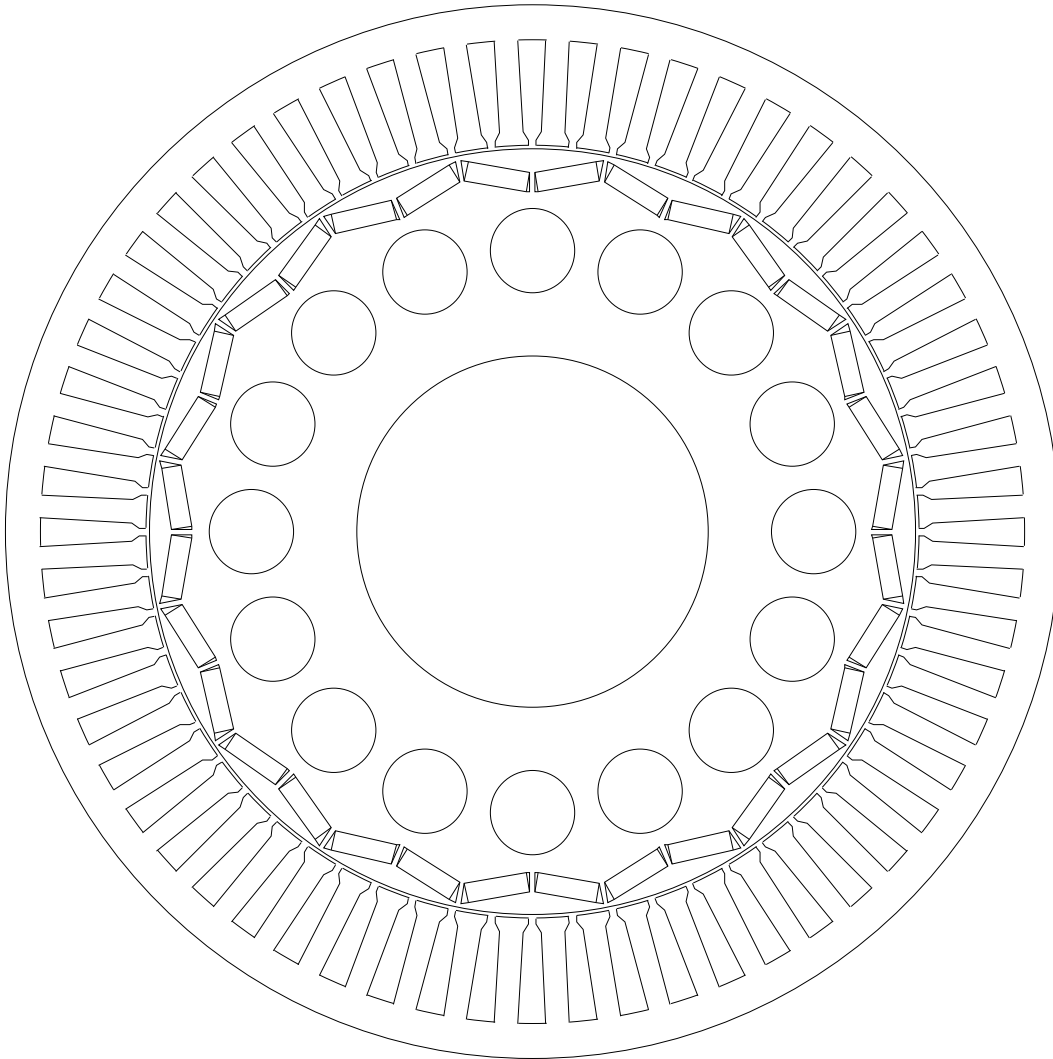


Figura 7.2: IPM di partenza



## 7.1. MESH

La mesh dell' IPM é la seguente:

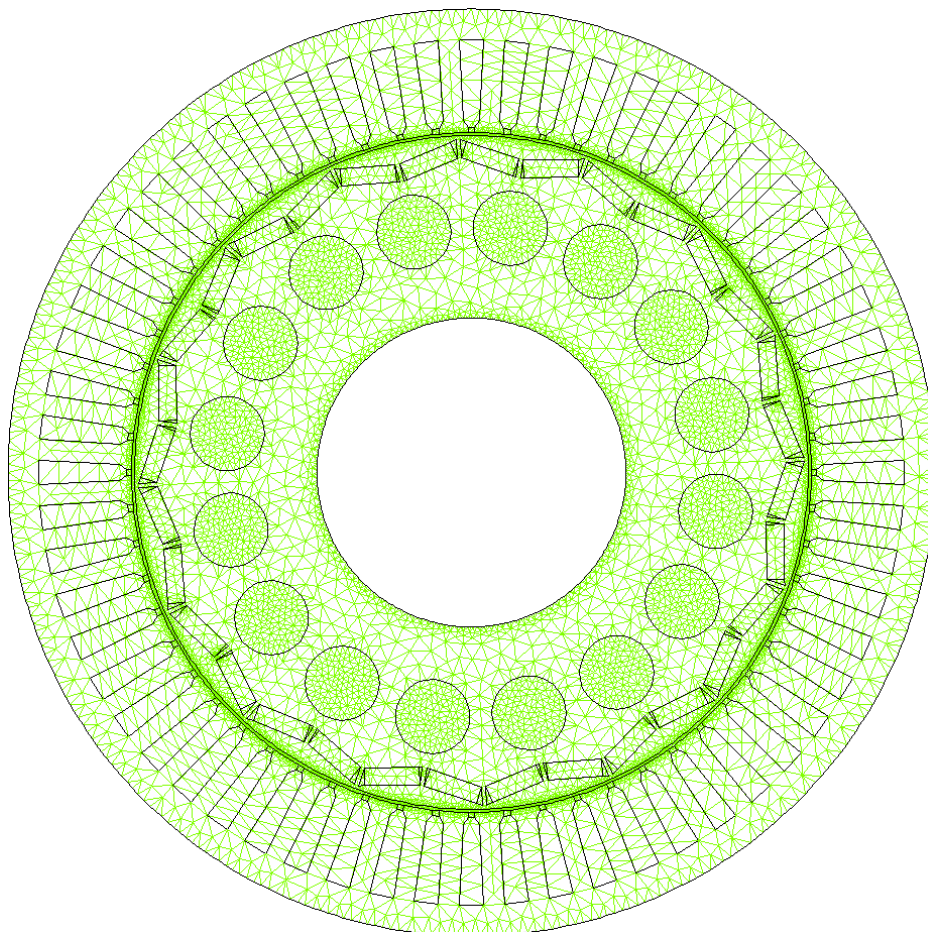
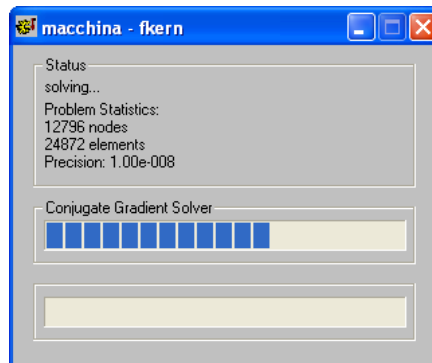


Figura 7.3: mesh IPM

Lo zoom della mesh un polo:

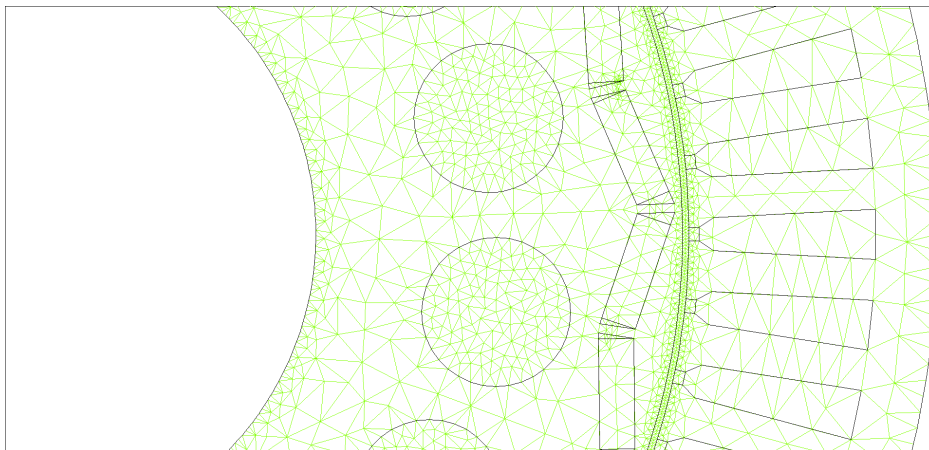


Figura 7.4: mesh polo IPM

Il tempo necessario per eseguire una simulazione é di circa un minuto e mezzo.

## 7.2. PROVA A VUOTO

Le simulazioni sono state eseguite con:

- passo di 2 gradi elettrici
- da 0 a 720 gradi elettrici

Per il calcolo della f.e.m a vuoto si fa riferimento a:

- velocità base (200 rpm)
- frequenza di 26.6 Hz

Dalle simulazioni si ottengono :

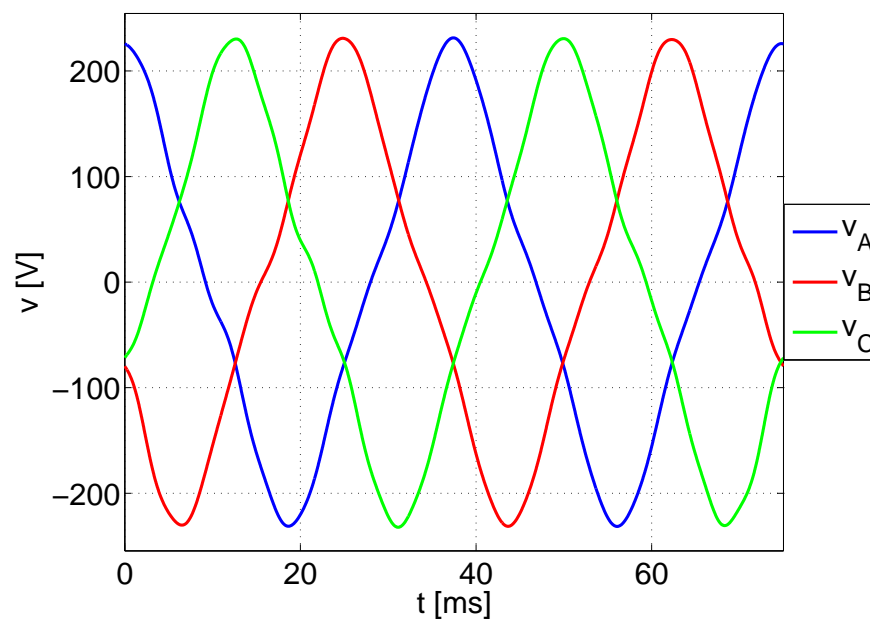


Figura 7.5: andamento temporale tensioni stellate

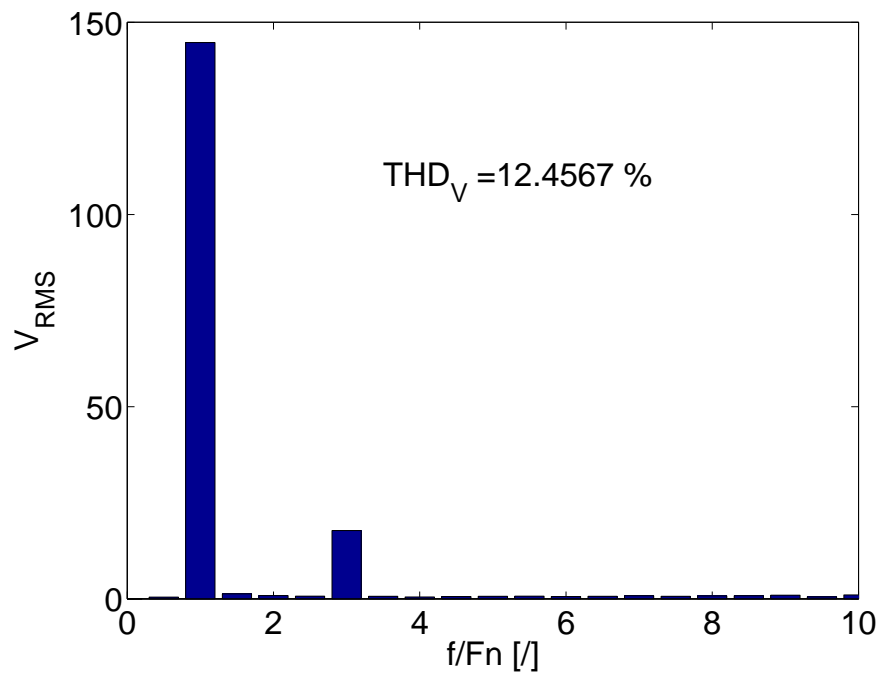


Figura 7.6: spettro medio tensioni stellate

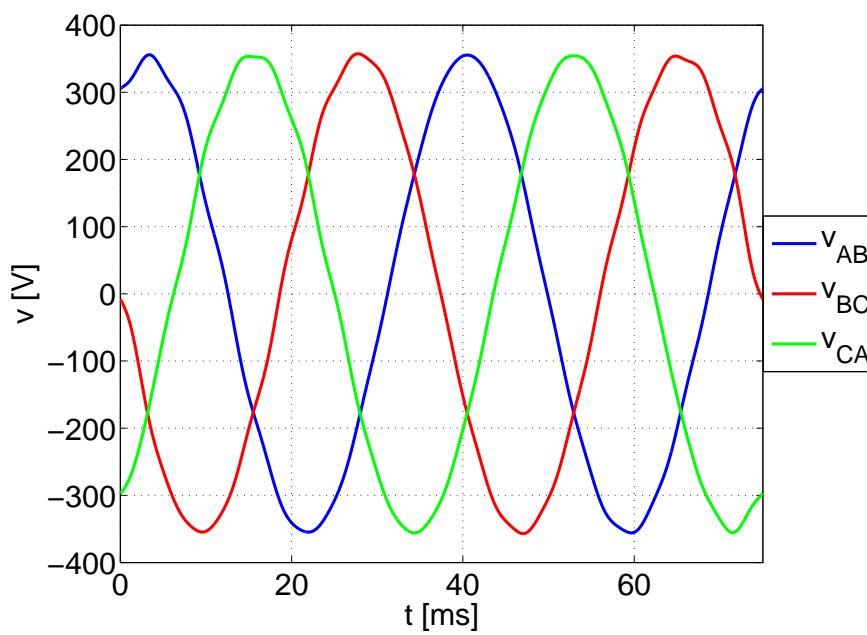


Figura 7.7: andamento temporale tensioni concatenate

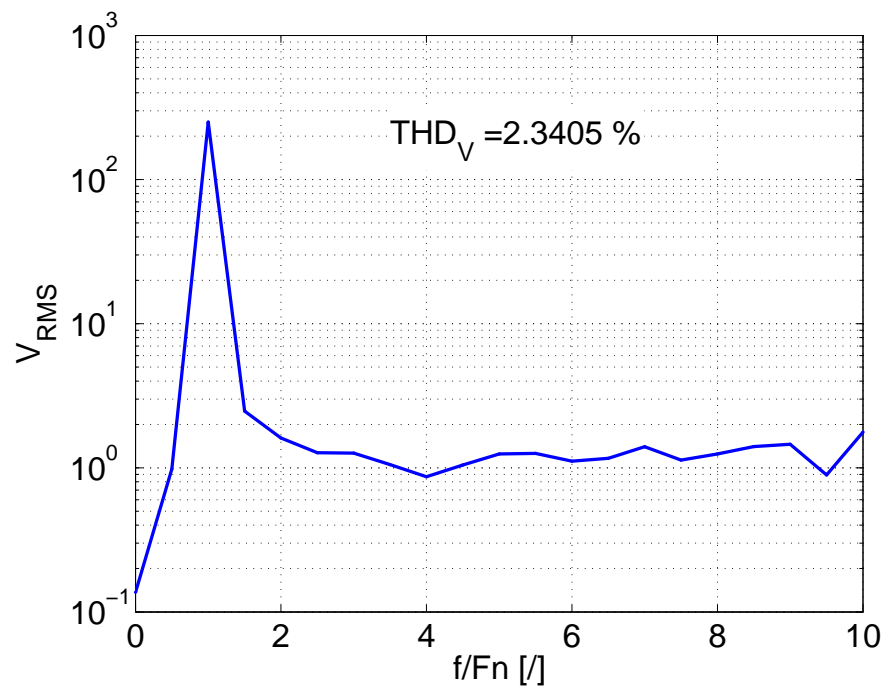


Figura 7.8: spettro medio tensioni concatenate

### 7.3. COGGING E SKEWING

Le simulazioni sono state eseguite:

- a vuoto
- passo di 0.06 gradi elettrici
- da 0 a 6 gradi elettrici (un passo di cava)

La coppia su un passo di cava (di statore) é la seguente:

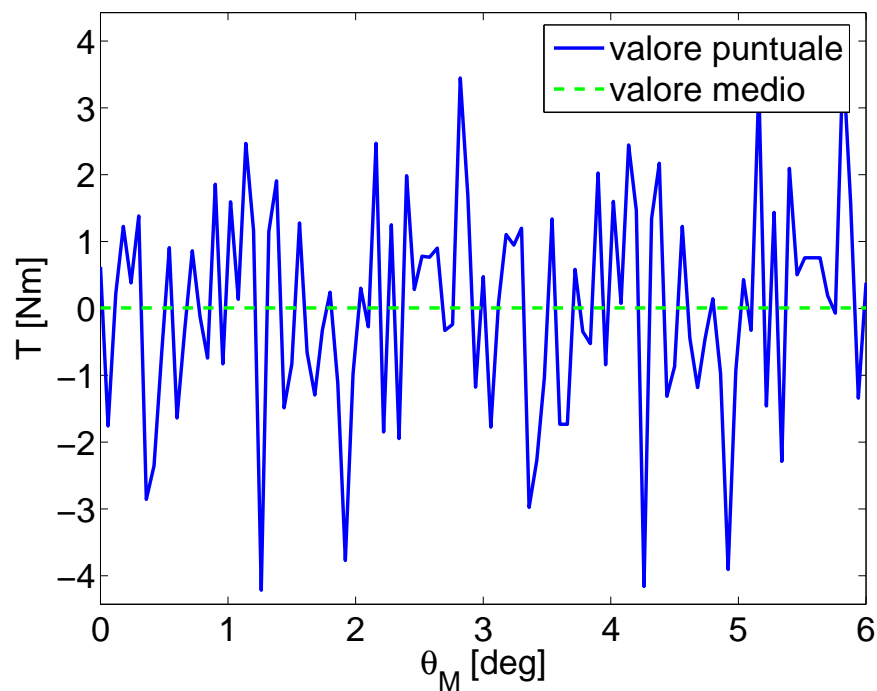


Figura 7.9: coppia su un passo di cava

Le condizioni dello skewing sono:

- angolo di skewing 1/4 del passo di cava(1,5 gradi elettrici)
- skewing discretizzato in cinque parti (magneti lunghi 30 mm)
- nel calcolo delle coppie di cogging non si é considerata l'eventuale componente continua

Per visualizzare meglio l'effetto dello skewing si graficano:

- la coppia senza skewing
- la coppia con skewing discreto
- la coppia con skewing continuo

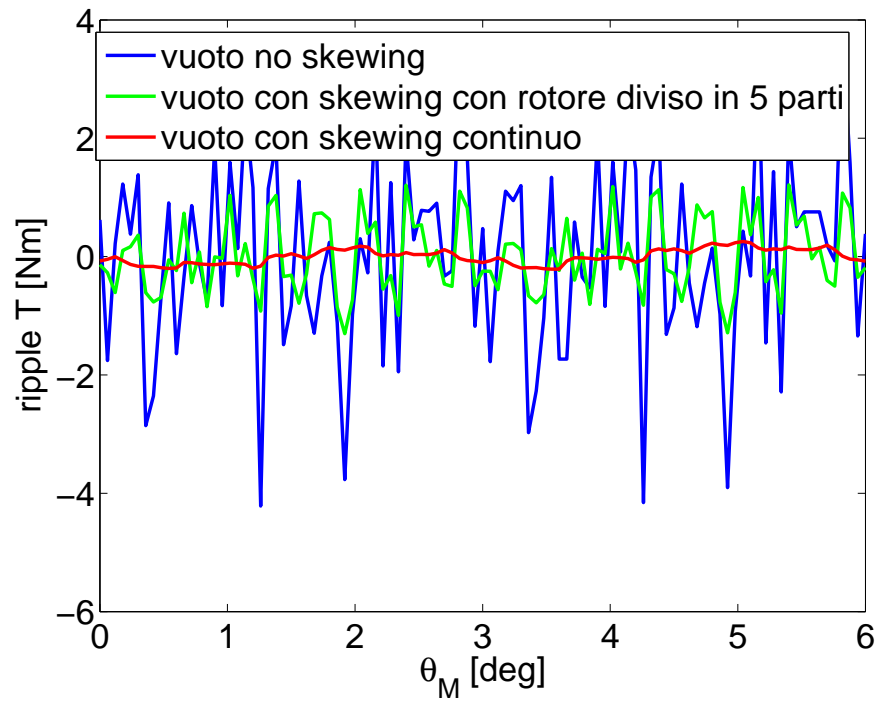


Figura 7.10: coppia

## 7.4. FLUSSI ED INDUTTANZE

Per non eseguire una simulazione specifica per il calcolo dei flussi concatenati (e delle relative induttanze) si utilizza la mappatura della coppia. Simulazioni eseguite:

- 20 simulazioni della corrente diretta da meno corrente nominale a più corrente nominale
- 10 simulazioni della corrente in quadratura a zero alla corrente nominale

Il valore dei flussi concatenati al variare della corrente diretta ed in quadratura:

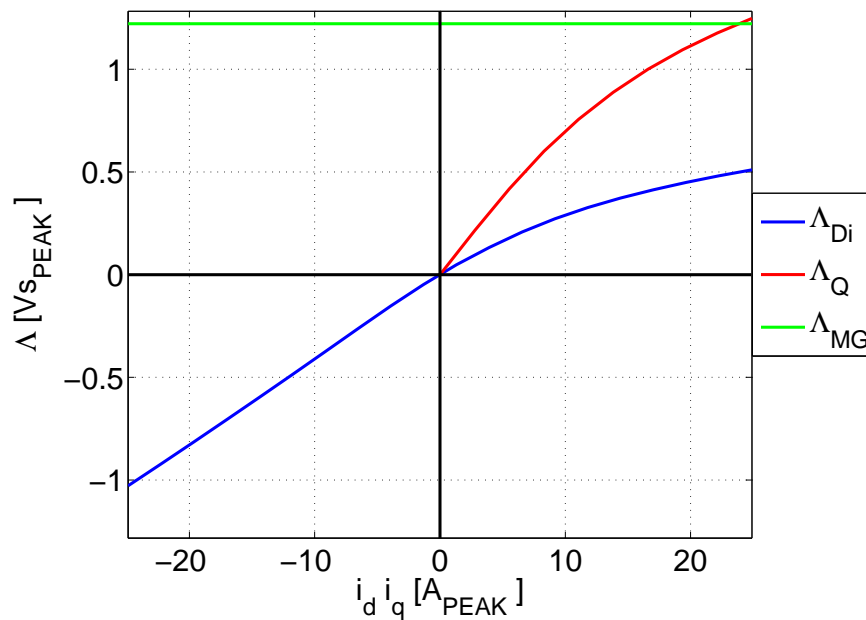


Figura 7.11: flussi

Dal flusso concatenato diretto ed in quadratura si ricava:

- l'induttanza diretta apparente e differenziale
- l'induttanza in quadratura apparente e differenziale



Valore delle induttanze al variare della corrente:

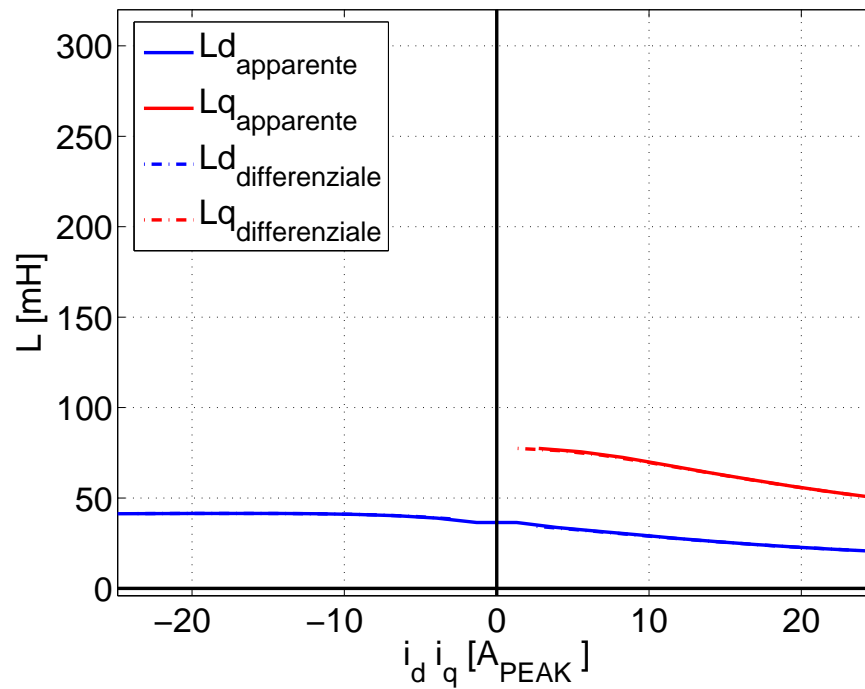


Figura 7.12: induttanze

per il calcolo delle induttanze apparenti si é usata la seguente formula:

$$I_{app_n} = \frac{I_n + I_{n+1}}{2} \quad (7.1)$$

$$L_{app_n} = \frac{\Lambda_n - \Lambda_{n+1}}{I_n - I_{n+1}} \quad (7.2)$$

cioé la derivata centrata nel valore medio della variazione della corrente rispetto la variazione del flusso concatenato.

La tabella esprime numericamente i valori dei grafici precedentemente illustrati :

<i>flussi concatenati</i>				<i>induttanze differenziali</i>			<i>induttanze apparenti</i>		
$i_D, i_Q$ [A]	$\Lambda_{MG}$ [Vs]	$\Lambda_D$ [Vs]	$\Lambda_Q$ [Vs]	$i_D, i_Q$ [A]	$L_D$ [mH]	$L_Q$ [mH]	$i_D, i_Q$ [A]	$L_D$ [mH]	$L_Q$ [mH]
-24,89	1,22	-1,028	-1,248	-24,89	41,31	50,13			
-22,27	1,22	-0,922	-1,177	-22,27	41,40	53,18	-23,58	41,35	51,56
-19,65	1,22	-0,815	-1,095	-19,65	41,47	56,57	-20,96	41,43	54,76
-17,03	1,22	-0,707	-1	-17,03	41,49	60,27	-18,34	41,48	58,28
-14,41	1,22	-0,597	-0,888	-14,41	41,45	64,23	-15,72	41,47	62,07
-11,79	1,22	-0,487	-0,756	-11,79	41,29	68,37	-13,10	41,38	66,07
-9,17	1,22	-0,376	-0,601	-9,17	40,95	72,44	-10,48	41,14	70,11
-6,55	1,22	-0,264	-0,418	-6,55	40,25	75,55	-7,86	40,66	73,68
-3,93	1,22	-0,153	-0,214	-3,93	38,89	77,46	-5,24	39,74	76,19
-1,31	1,22	-0,048	0,001	-1,31	36,45	$\infty$	-2,62	38,28	77,42
0	1,22	0	0	0	36,45	$\infty$	0	36,33	$\infty$
1,31	1,22	0,048	0,001	1,31	36,45	$\infty$	2,62	34,38	77,42
3,93	1,22	0,132	0,214	3,93	33,69	77,46	5,24	32,44	76,19
6,55	1,22	0,208	0,418	6,55	31,68	75,55	7,86	30,53	73,68
9,17	1,22	0,272	0,601	9,17	29,71	72,44	10,48	28,59	70,11
11,79	1,22	0,327	0,756	11,79	27,72	68,37	13,10	26,72	66,07
14,41	1,22	0,373	0,888	14,41	25,90	64,23	15,72	25,02	62,07
17,03	1,22	0,413	1	17,03	24,28	60,27	18,34	23,52	58,28
19,65	1,22	0,449	1,095	19,65	22,86	56,57	20,96	22,19	54,76
22,27	1,22	0,481	1,177	22,27	21,61	53,18	23,58	21,02	51,56
24,89	1,22	0,510	1,248	24,89	20,50	50,13			

## 7.5. VARIAZIONE DELLA VELOCITÀ

Dalle simulazioni F.E.M.M. eseguite si é ricavata la mappatura delle grandezze tipiche della macchina (coppia, flussi, induzioni, ...)in funzione della corrente diretta ed in quadratura.

Successivamente si sono rielaborati i risultati (dalla teoria sugli azionamenti) per determinare i seguenti parametri elettrici e meccanici tipici della regolazione della velocità.

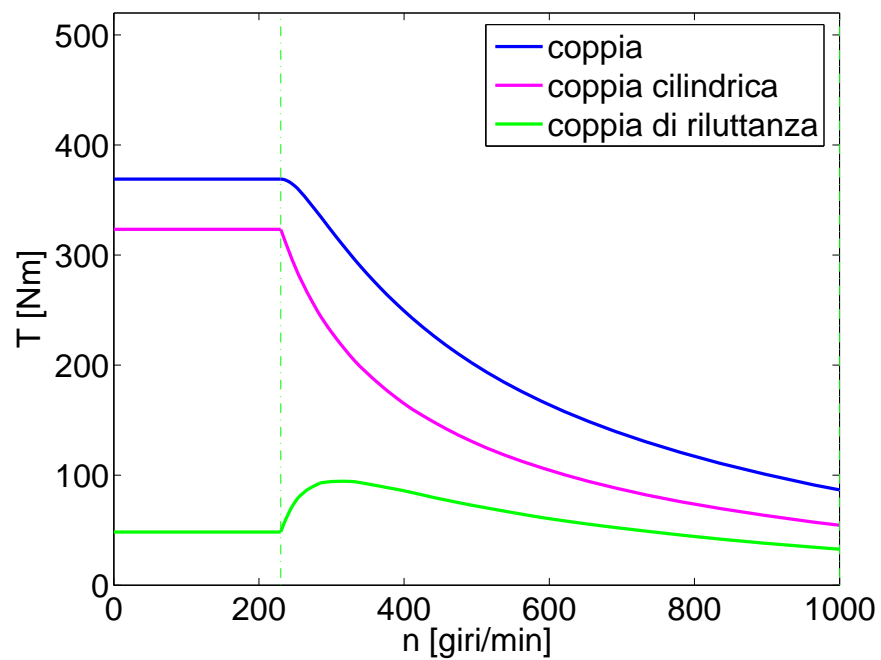


Figura 7.13: coppia in funzione della velocità

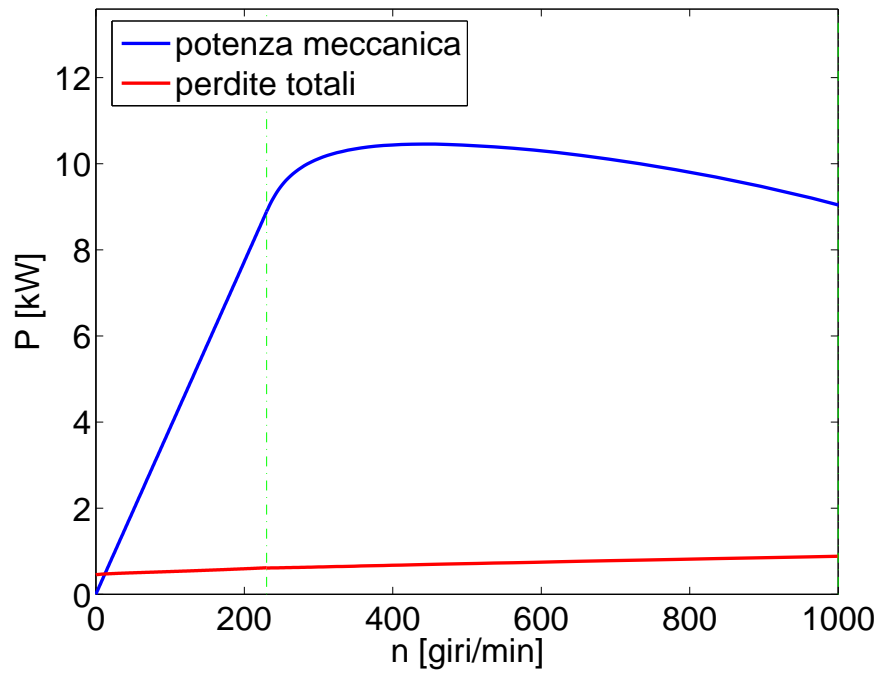


Figura 7.14: potenza in funzione della velocità

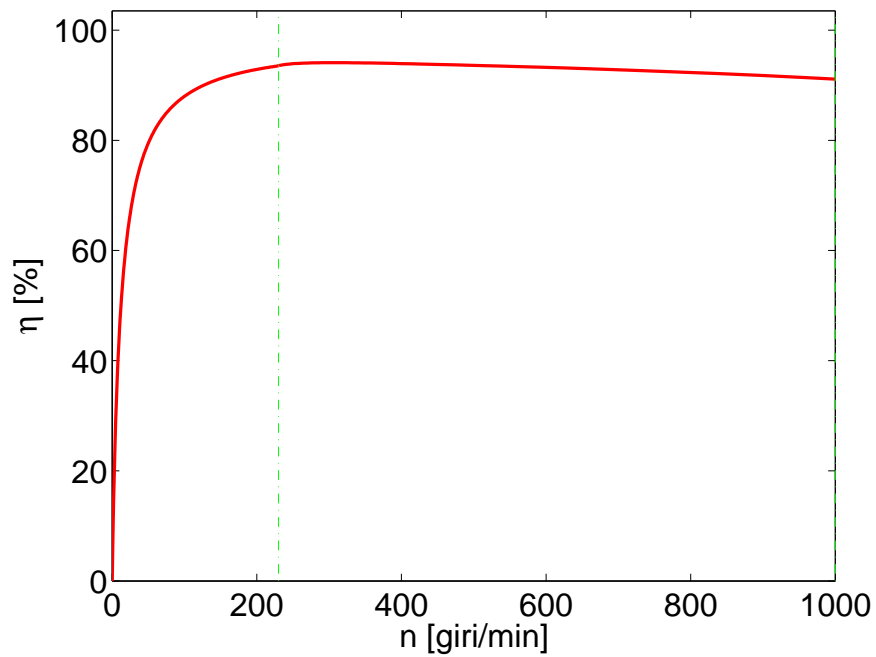


Figura 7.15: rendimento in funzione della velocità

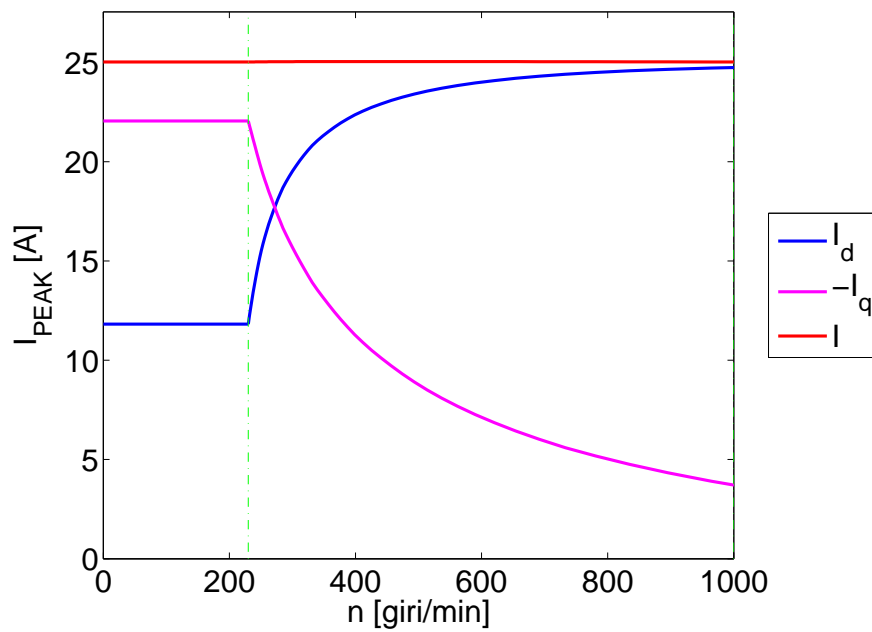


Figura 7.16: corrente in funzione della velocità

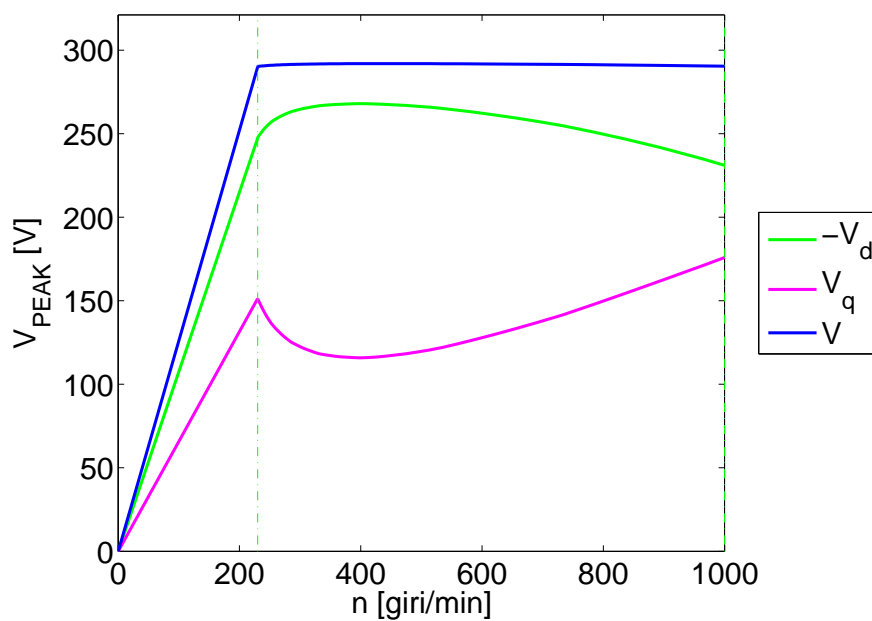


Figura 7.17: tensione in funzione della velocità

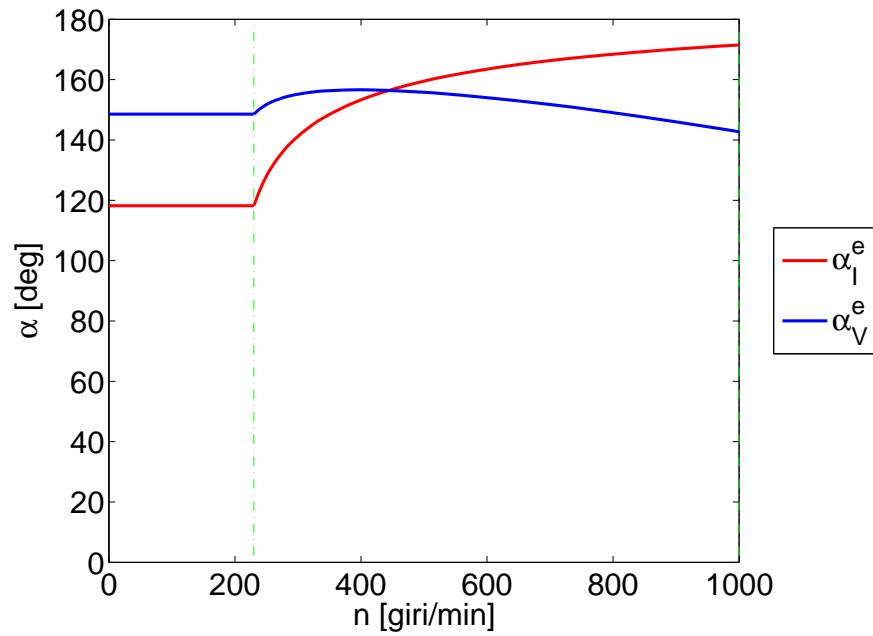


Figura 7.18: angoli in funzione della velocità

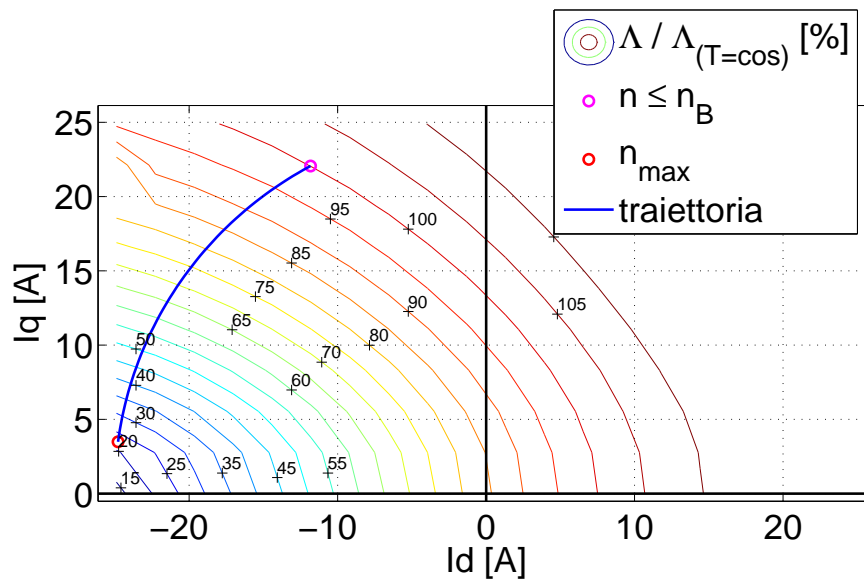


Figura 7.19: traiettoria nel flusso

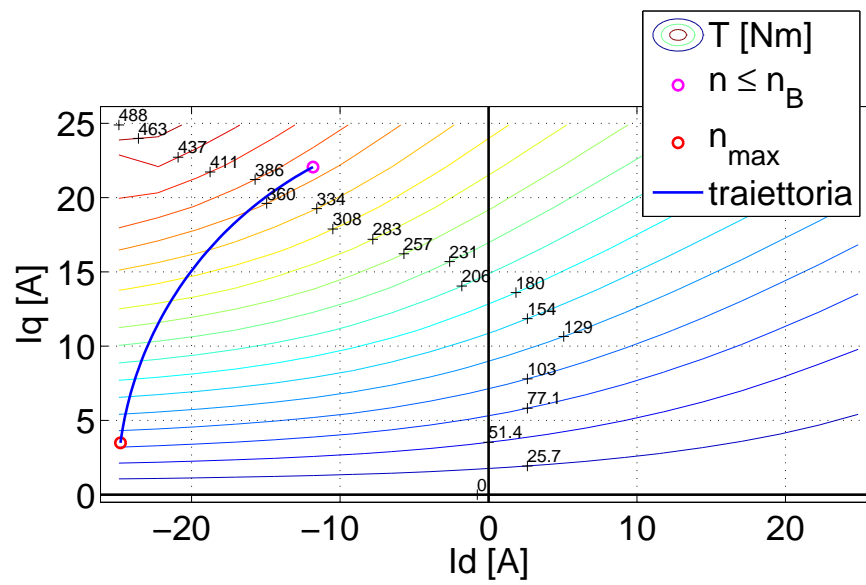


Figura 7.20: traiettoria nella coppia

## 7.6. CORRENTE MINIMA DI SMAGNETIZZAZIONE

Dal metodo iterativo si ricava:

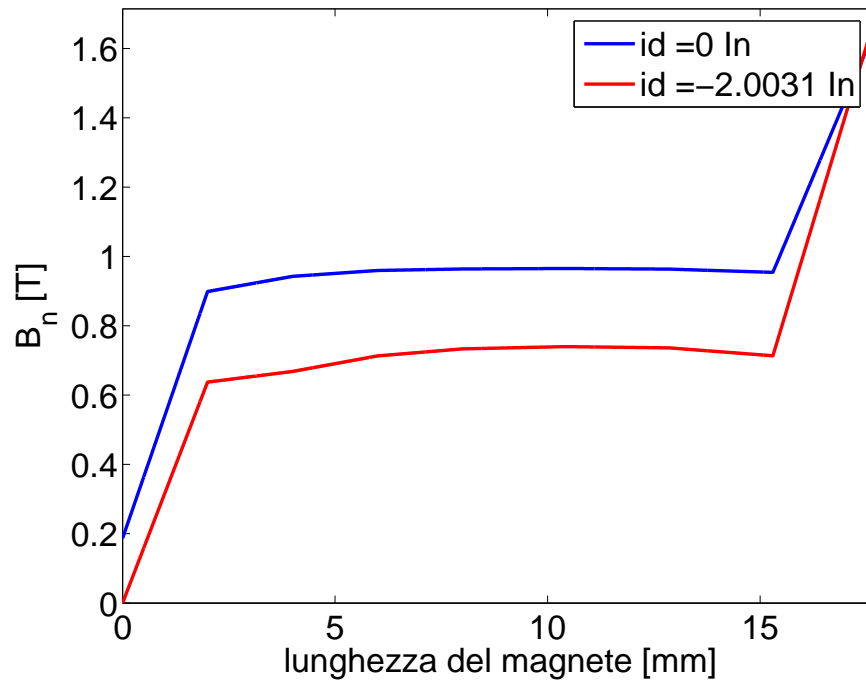


Figura 7.21: flusso sul magnete in funzione della corrente

Corrente minima di smagnetizzazione:

$$I_{d_{sma}} = -2 I_n = -35,2 \text{ A} \quad (7.3)$$



## 7.7. INDUZIONE A VUOTO

Le seguente immagine rappresenta l'induzione a vuoto con l'asse diretto ed in quadratura dello statore e del rotore allineati:

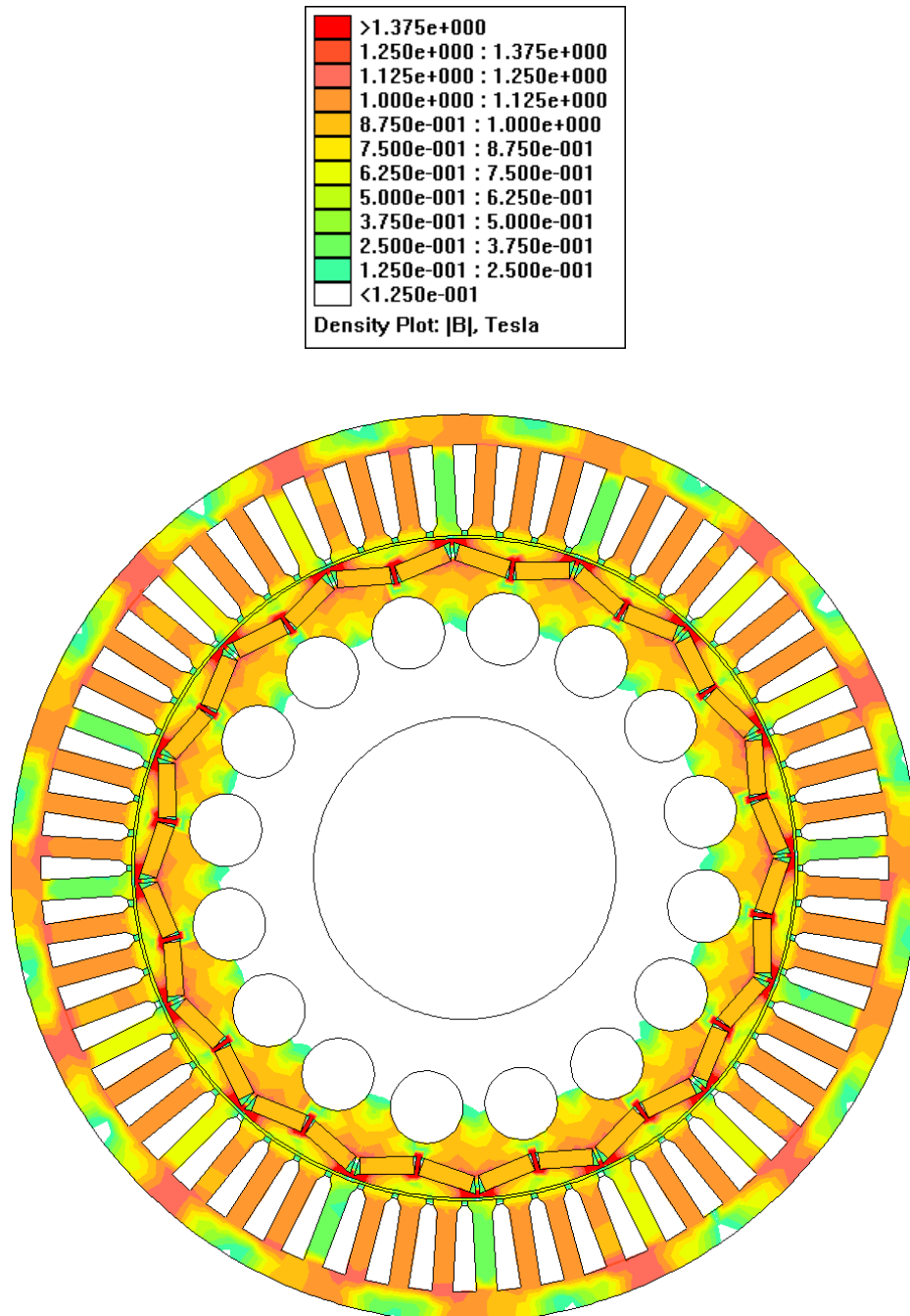


Figura 7.22: induzione IPM

Lo zoom dell'induzione un polo:

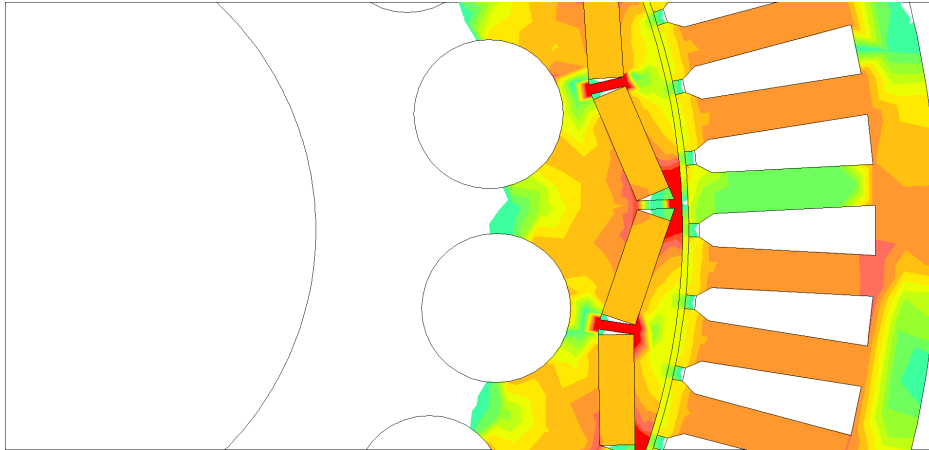


Figura 7.23: induzione polo IPM

---

---

## CAPITOLO 8

---

# OTTIMIZZAZIONE E ANALISI IPM

I parametri geometrici che si analizzano per l'ottimizzazione sono:

- altezza del ponticello magnetico interno
- distanza barriera - traferro
- altezza del ponticello magnetico esterno
- distanza barriera - esterno

Per determinare il costo complessivo della macchina si sono considerati i seguenti costi dei materiali :

<i>materiale</i>	<i>costo per unita' di peso</i> [€ / kg]	<i>peso specifico</i> [kg/m <sup>3</sup> ]	<i>costo per unita' di volume</i> [€/m <sup>3</sup> ]
<i>lamiera</i>	1	7,65 10 <sup>3</sup>	7,65 10 <sup>3</sup>
<i>magnete</i>	50	7,50 10 <sup>3</sup>	375 10 <sup>3</sup>
<i>rame</i>	7	8,91 10 <sup>3</sup>	62,4 10 <sup>3</sup>

## 8.1. OTTIMIZZAZIONE

L'ottimizzazione ha effettuato le seguenti iterazioni:

<i>iterazione</i>	<i>hri</i> [mm]	<i>dbi</i> [mm]	<i>hre</i> [mm]	<i>dbe</i> [mm]	<i>L<sub>SKT</sub></i> [mm]	$\Delta$ [mm]	<i>C</i> [€]	<i>c</i> [%]
0	1,5	46,8	1,3	1,2	122,0	2	220,7	100
1	1,5	46,8	3,3	1,2	123,5	2	214,9	97,34
2	1,5	46,8	5,3	1,2	126,5	2	211,1	95,65
3	1,5	48,8	7,3	1,2	127,0	2	206,2	93,41
4	1,5	48,8	7,3	1,2	127,0	2	206,2	93,41
5	1,5	47,8	7,3	1,2	128,1	1	206,1	93,37
6	1,5	47,8	7,3	1,2	128,1	1	206,1	93,37
7	1,5	47,8	7,8	1,2	129,0	0,5	205,3	93,01
8	1,5	48,3	7,8	1,2	128,1	0,5	204,7	92,74
9	1,5	48,3	7,8	1,2	128,1	0,5	204,7	92,74
10	1,3	48,1	8	1,2	127,1	0,2	202,7	91,82
11	1,3	48,3	8	1,2	126,7	0,2	202,5	91,74
12	1,3	48,3	8	1,2	126,7	0,2	202,5	91,74

- con :
- *hri* : altezza del ponticello magnetico interno
  - *dbi* : distanza barriera – traferro
  - *hre* : altezza del ponticello magnetico esterno
  - *dbe* : distanza barriera – esterno
  - *L<sub>stk</sub>* : lunghezza della macchina per avere 300 Nm
  - $\Delta$  : passo dell'iterazione
  - *C* : costo totale della macchina
  - *c* : costo totale rispetto a quello della configurazione iniziale

Il seguente grafico mostra la diminuzione del prezzo al variare delle iterazioni di ottimizzazione:

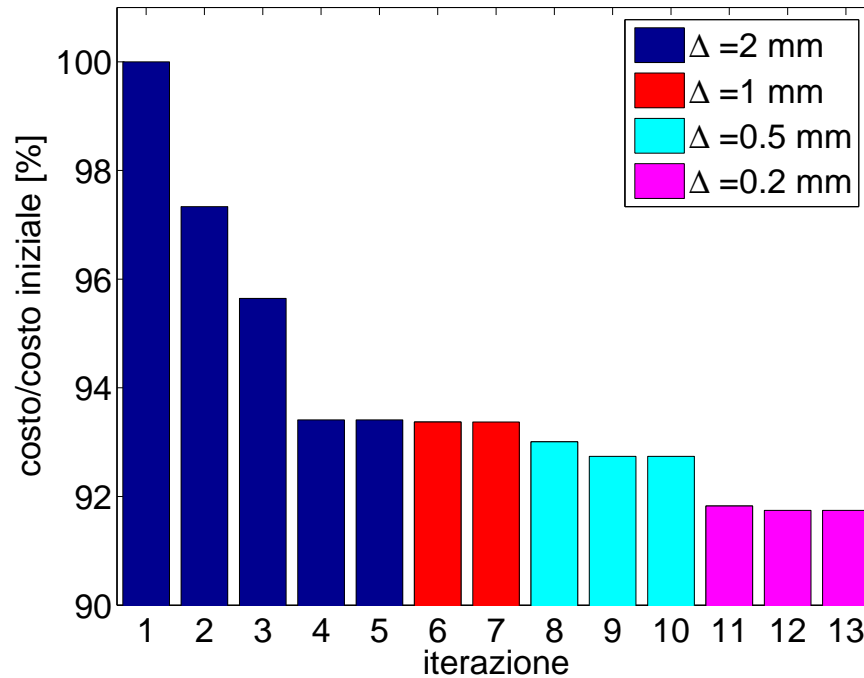


Figura 8.1: ottimizzazione

Geometria del rotore della macchina ottimizzata:

– diametro esterno (al traferro)	:	$D_{re}$	=	218	mm
– diametro interno (albero)	:	$D_{ri}$	=	100	mm
– spessore del magnete	:	$t_m$	=	5.7	mm
– altezza del ponticello magnetico interno	:	$h_{ri}$	=	1.3	mm
– distanza barriera – traferro	:	$d_{bi}$	=	46.8	mm
– altezza del ponticello magnetico esterno	:	$h_{re}$	=	8	mm
– distanza barriera – esterno	:	$d_{be}$	=	1.2	mm
– diametro del centro dei cerchi d'aria	:	$D_{cer}$	=	160	mm
– diametro cerchi d'aria	:	$d_{cer}$	=	24	mm
– lunghezza della macchina	:	$L_{STK}$	=	130	mm

Immagini della macchina:

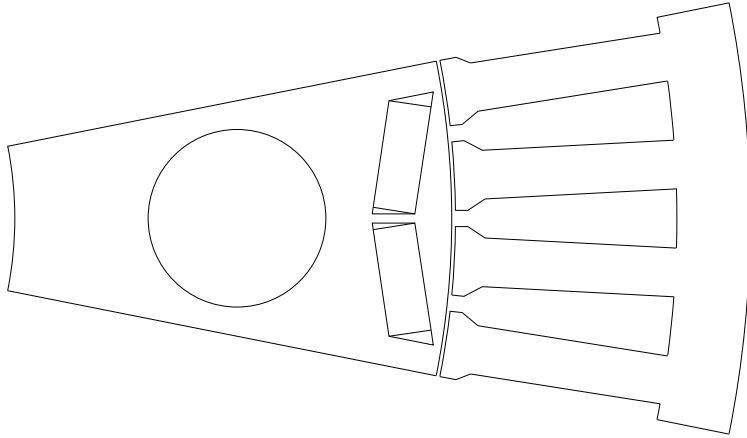


Figura 8.2: polo IPM ottimizzato

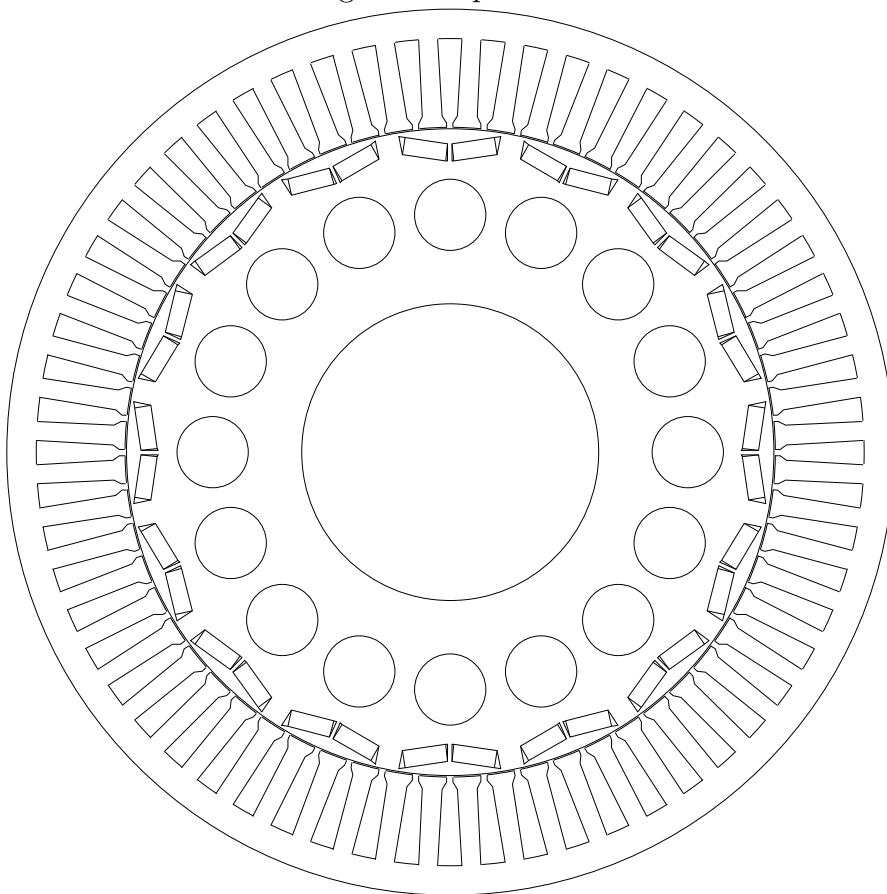


Figura 8.3: IPM ottimizzato

## 8.2. MESH

La mesh dell' IPM ottimizzato é la seguente:

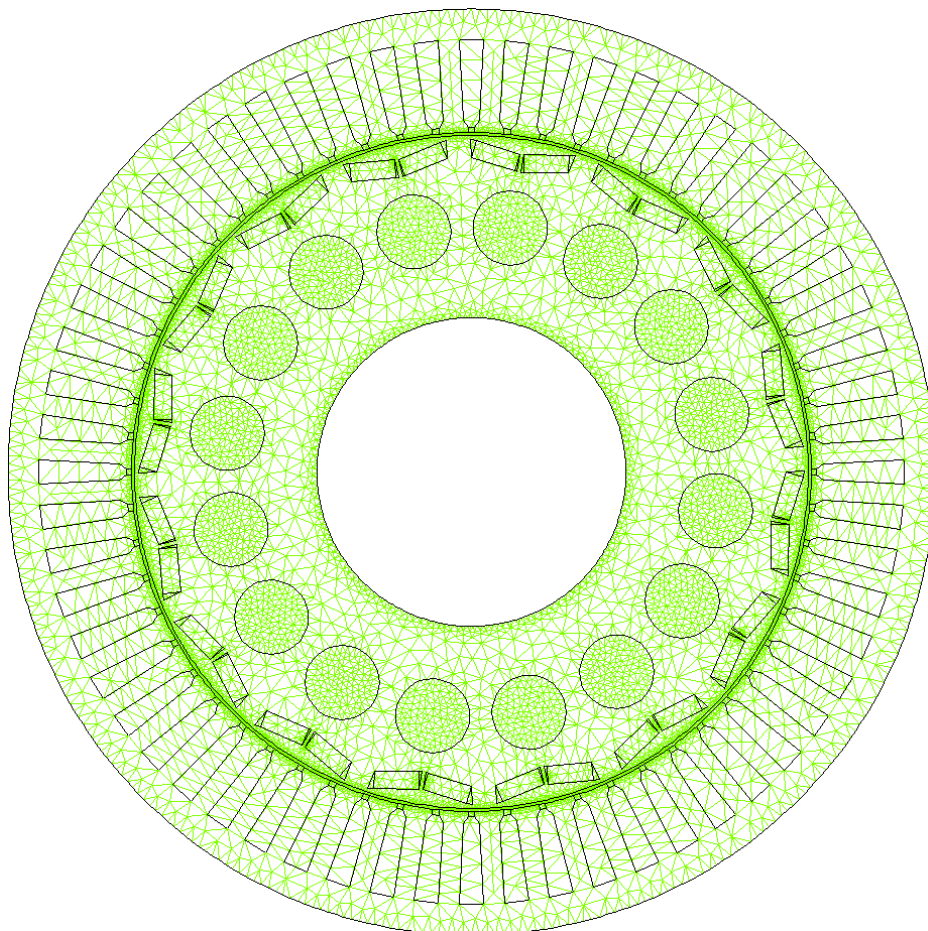
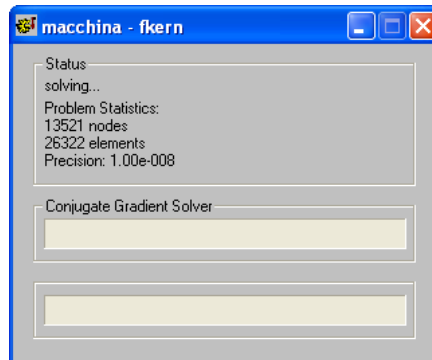


Figura 8.4: mesh IPM ottimizzato

Lo zoom della mesh un polo:

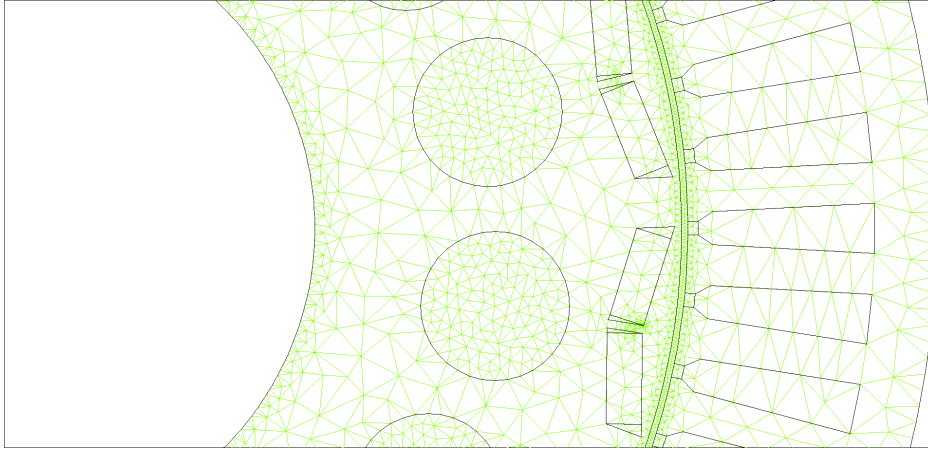


Figura 8.5: mesh polo IPM ottimizzato

Il tempo necessario per eseguire una simulazione é di circa due minuti.



### 8.3. PROVA A VUOTO

Le simulazioni a vuoto sono state eseguite:

- passo di 2 gradi elettrici
- da 0 a 720 gradi elettrici

Per il calcolo della f.e.m a vuoto si fa riferimento:

- velocità base (200 rpm)
- frequenza di 26.6 Hz

Dalle simulazione si ottengono :

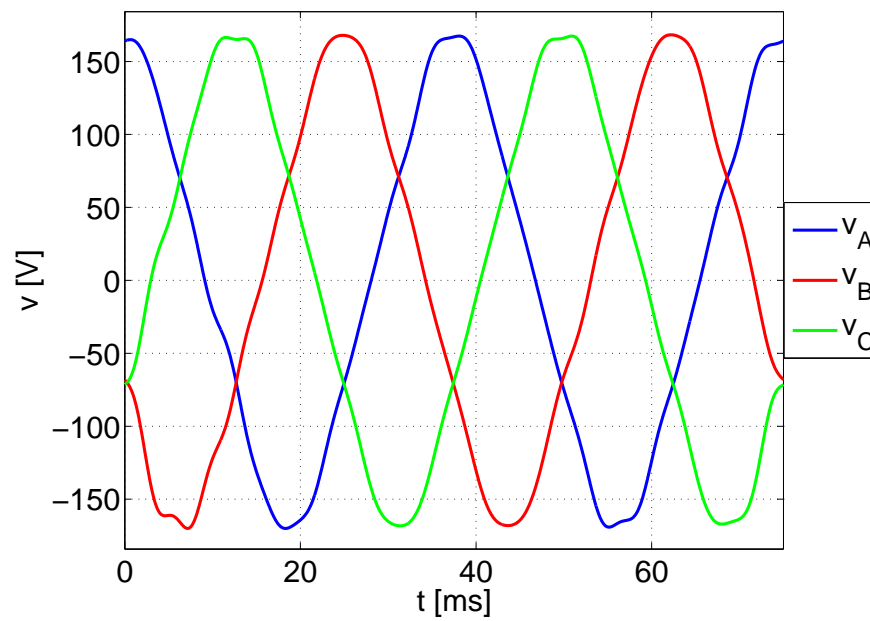


Figura 8.6: andamento temporale tensioni stellate

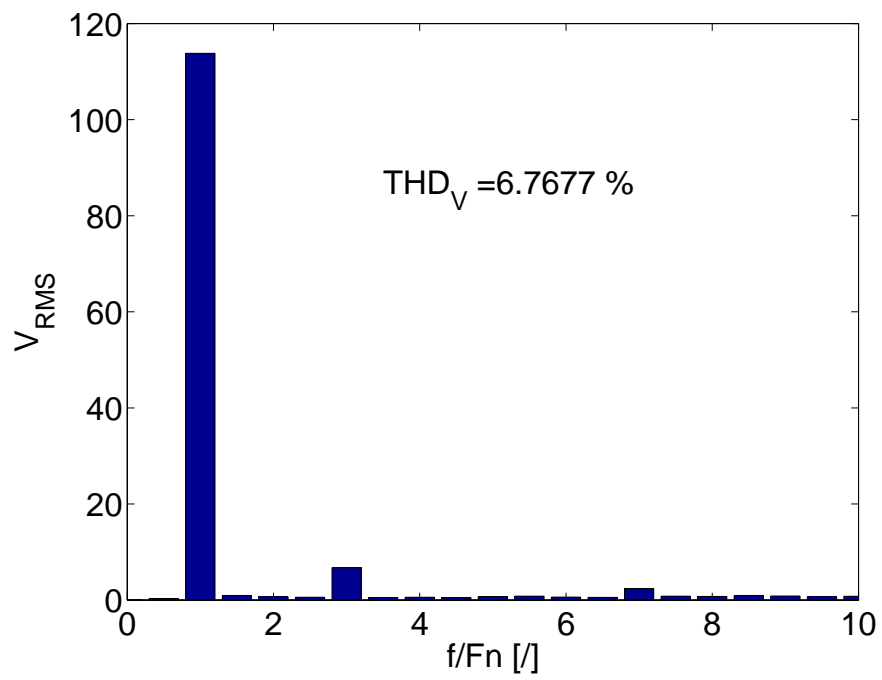


Figura 8.7: spettro medio tensioni stellate

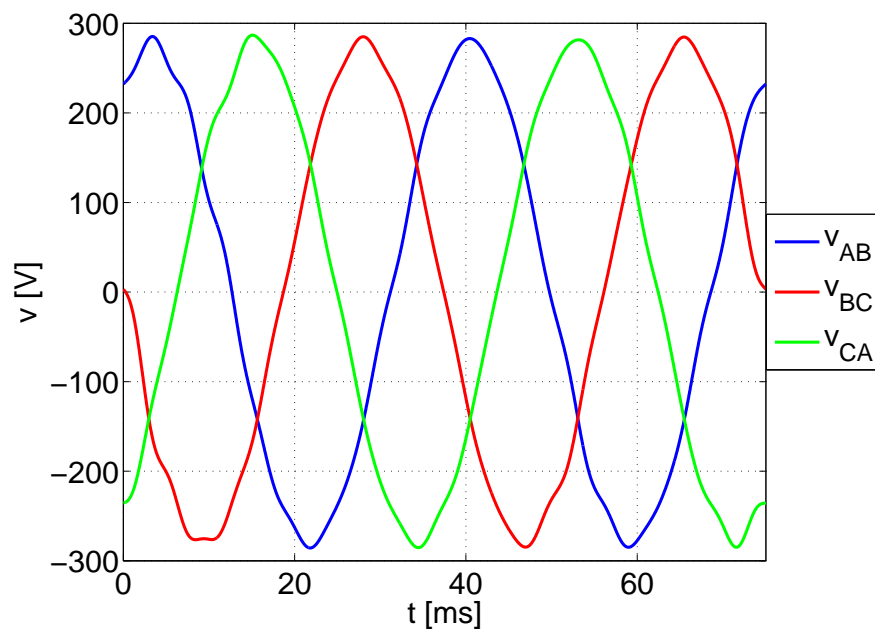


Figura 8.8: andamento temporale tensioni concatenate

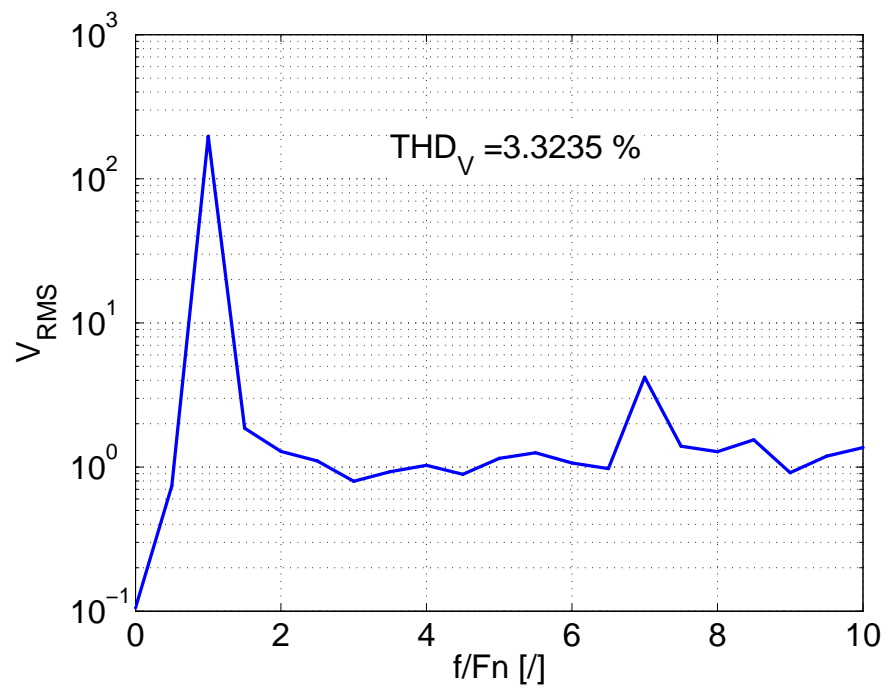


Figura 8.9: spettro medio tensioni concatenate

## 8.4. COGGING E SKEWING

Le simulazioni sono state eseguite:

- a vuoto
- passo di 0.06 gradi elettrici
- da 0 a 6 gradi elettrici (un passo di cava)

La coppia su un passo di cava (di statore) é la seguente:

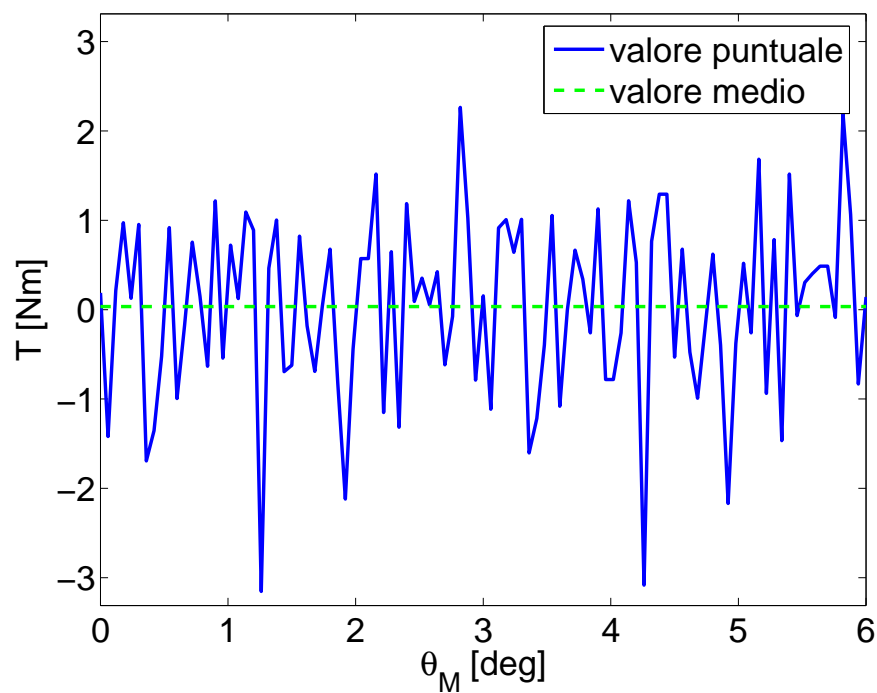


Figura 8.10: coppia su un passo di cava

Le condizioni dello skewing sono:

- angolo di skewing  $1/4$  del passo di cava (1,5 gradi elettrici)
- skewing discretizzato in cinque parti (magneti lunghi 30 mm)
- nel calcolo delle coppie di cogging non si é considerata l'eventuale componente continua

Per visualizzare meglio l'effetto dello skewing si graficano:

- la coppia senza skewing
- la coppia con skewing discreto
- la coppia con skewing continuo

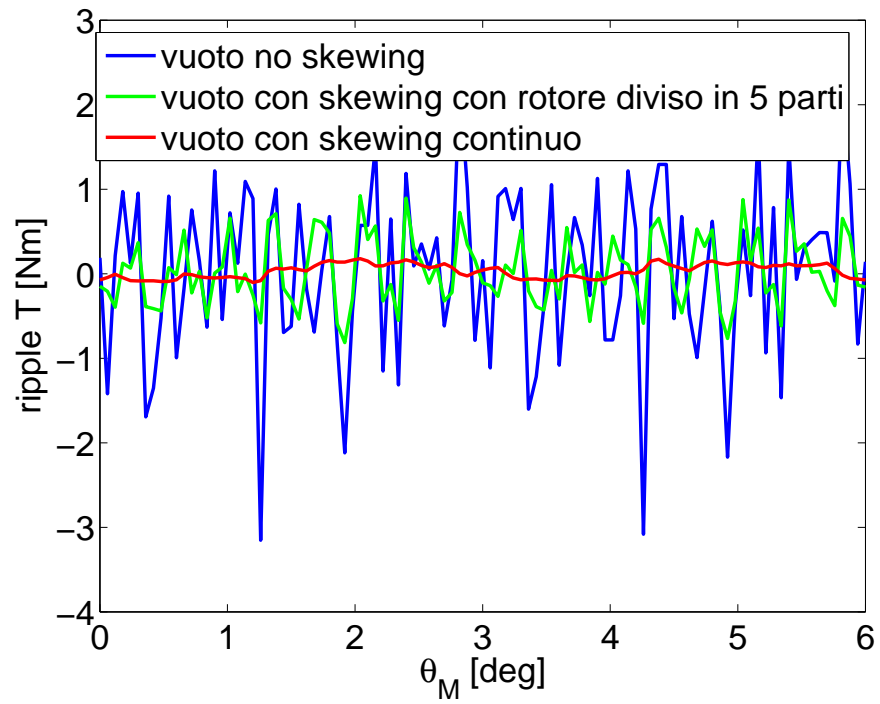


Figura 8.11: coppia

## 8.5. FLUSSI ED INDUTTANZE

Per non eseguire una simulazione specifica per il calcolo dei flussi concatenati (e delle relative induttanze) si utilizza la mappatura della coppia. Simulazioni eseguite:

- 20 simulazioni della corrente diretta da meno corrente nominale a più corrente nominale
- 10 simulazioni della corrente in quadratura a zero alla corrente nominale

Il valore dei flussi concatenati al variare della corrente diretta ed in quadratura:

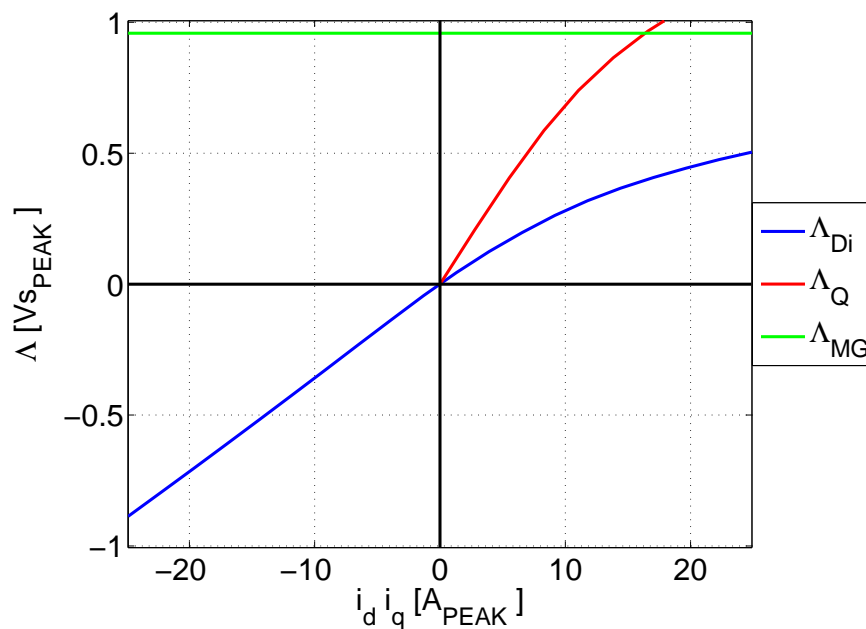


Figura 8.12: flussi

Dal flusso concatenato diretto ed in quadratura si ricavano:

- l'induttanza diretta apparente e differenziale
- l'induttanza in quadratura apparente e differenziale

Valore delle induttanze al variare della corrente:

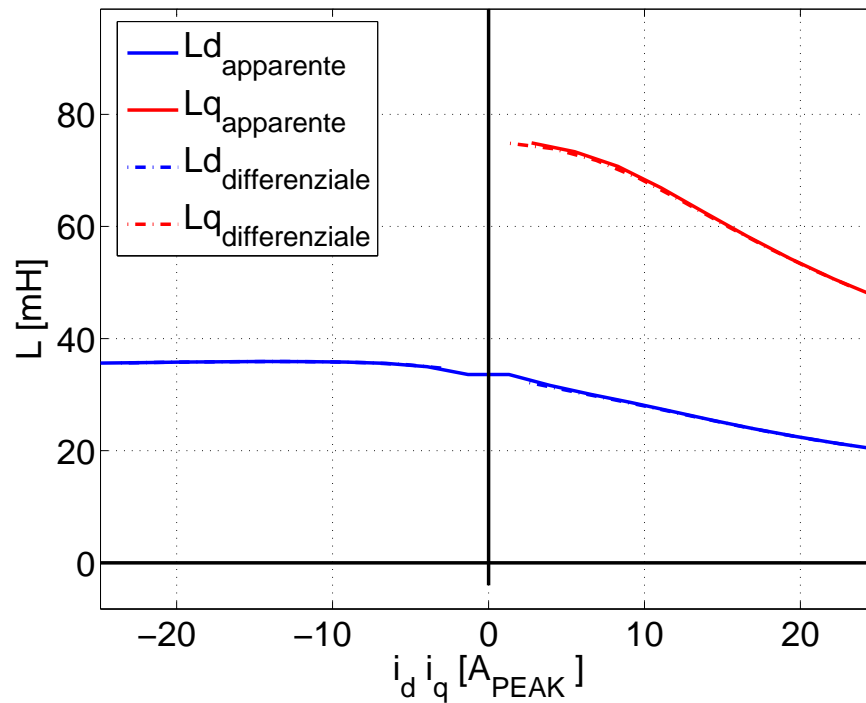


Figura 8.13: induttanze

per il calcolo delle induttanze apparenti si é usata la seguente formula:

$$I_{app_n} = \frac{I_n + I_{n+1}}{2} \quad (8.1)$$

$$L_{app_n} = \frac{\Lambda_n - \Lambda_{n+1}}{I_n - I_{n+1}} \quad (8.2)$$

ossia la derivata centrata nel valore medio della variazione della corrente rispetto la variazione del flusso concatenato.

La tabella esprime numericamente i valori dei grafici precedentemente illustrati :

<i>flussi concatenati</i>				<i>induttanze differenziali</i>			<i>induttanze apparenti</i>		
$i_D, i_Q$ [A]	$\Lambda_{MG}$ [Vs]	$\Lambda_D$ [Vs]	$\Lambda_Q$ [Vs]	$i_D, i_Q$ [A]	$L_D$ [mH]	$L_Q$ [mH]	$i_D, i_Q$ [A]	$L_D$ [mH]	$L_Q$ [mH]
-24,89	0,958	-0,887	-1,181	-24,89	35,62	47,45			
-22,27	0,958	-0,795	-1,121	-22,27	35,72	50,66	-23,58	35,67	48,96
-19,65	0,958	-0,704	-1,050	-19,65	35,80	54,26	-20,96	35,76	52,34
-17,03	0,958	-0,611	-0,967	-17,03	35,87	58,25	-18,34	35,83	56,10
-14,41	0,958	-0,517	-0,865	-14,41	35,91	62,53	-15,72	35,89	60,19
-11,79	0,958	-0,423	-0,740	-11,79	35,90	66,91	-13,10	35,91	64,47
-9,170	0,958	-0,328	-0,587	-9,17	35,82	70,73	-10,48	35,86	68,55
-6,550	0,958	-0,233	-0,406	-6,55	35,58	73,34	-7,86	35,72	71,77
-3,930	0,958	-0,137	-0,207	-3,93	34,98	74,91	-5,24	35,35	73,86
-1,310	0,958	-0,044	0,001	-1,31	33,60	$\infty$	-2,62	34,63	74,84
0	0,958	0	0	0	33,60	$\infty$	0	33,38	$\infty$
1,310	0,958	0,044	0,001	1,31	33,60	$\infty$	2,62	32,13	74,84
3,930	0,958	0,124	0,207	3,93	31,65	74,91	5,24	30,65	73,86
6,550	0,958	0,197	0,406	6,55	30,04	73,34	7,86	29,20	71,77
9,170	0,958	0,262	0,587	9,17	28,59	70,73	10,48	27,71	68,55
11,79	0,958	0,319	0,740	11,79	27,02	66,91	13,10	26,13	64,47
14,41	0,958	0,366	0,865	14,41	25,41	62,53	15,72	24,59	60,19
17,03	0,958	0,407	0,967	17,03	23,91	58,25	18,34	23,18	56,10
19,65	0,958	0,443	1,050	19,65	22,56	54,26	20,96	21,91	52,34
22,27	0,958	0,475	1,121	22,27	21,35	50,66	23,58	20,78	48,96
24,89	0,958	0,504	1,181	24,89	20,27	47,45			



## 8.6. VARIAZIONE DELLA VELOCITÀ

Dalle simulazioni F.E.M.M. eseguite si é ricavata la mappatura delle grandezze tipiche della macchina (coppia, flussi, induzioni, ...) in funzione della corrente diretta ed in quadratura.

Successivamente si sono rielaborati i risultati (dalla teoria sugli azionamenti) per determinare i seguenti parametri elettrici e meccanici tipici della regolazione della velocità.

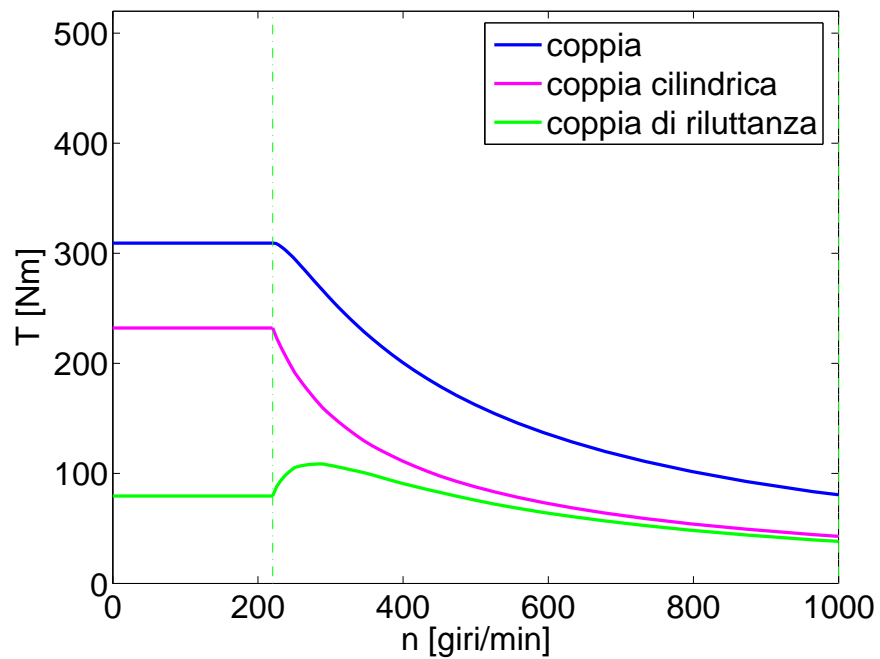


Figura 8.14: coppia in funzione della velocità

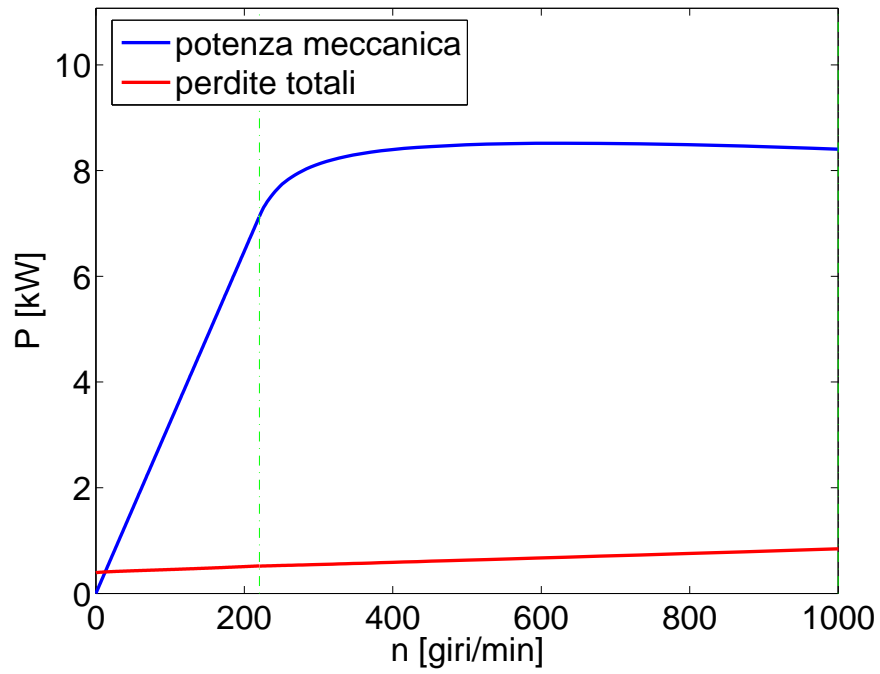


Figura 8.15: potenza in funzione della velocità

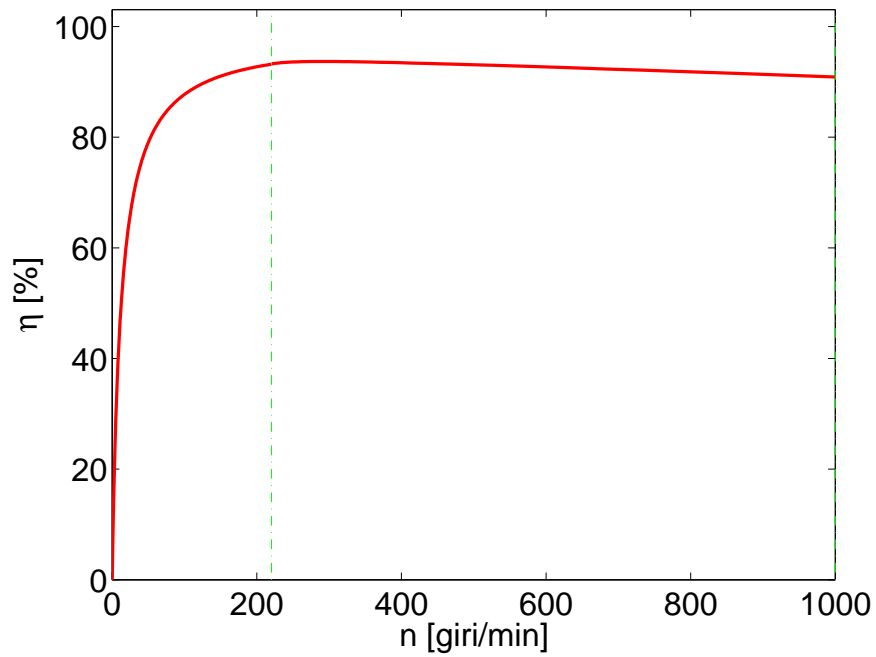


Figura 8.16: rendimento in funzione della velocità

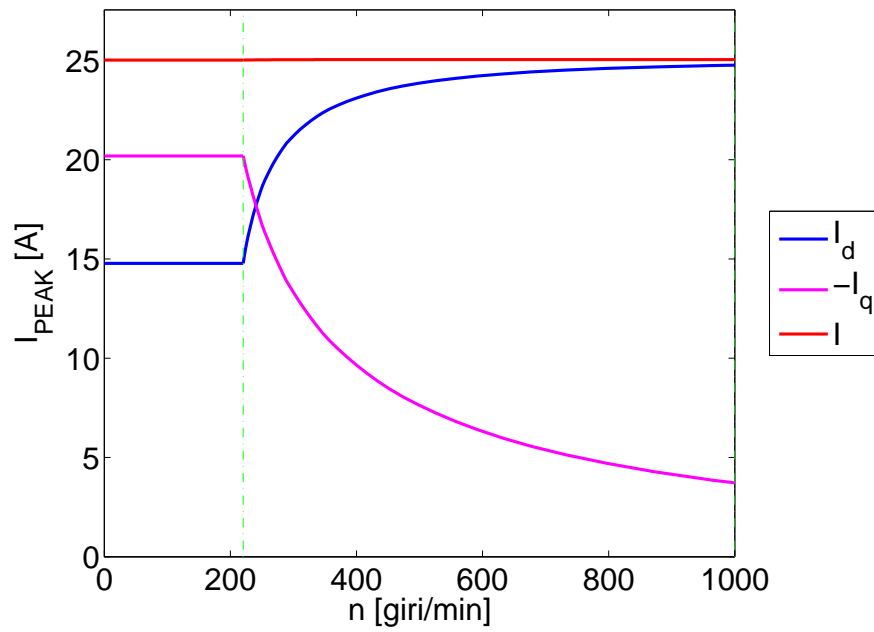


Figura 8.17: corrente in funzione della velocità

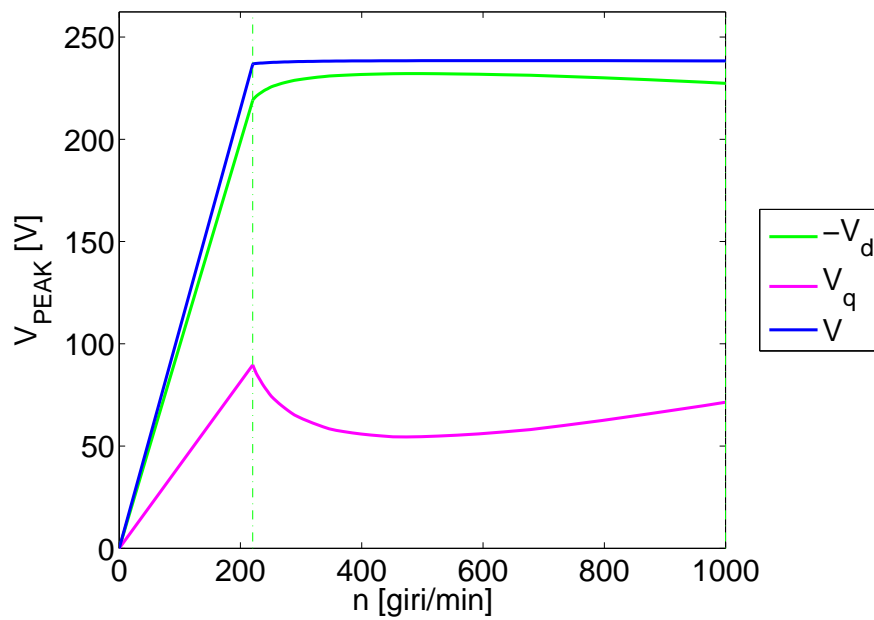


Figura 8.18: tensione in funzione della velocità

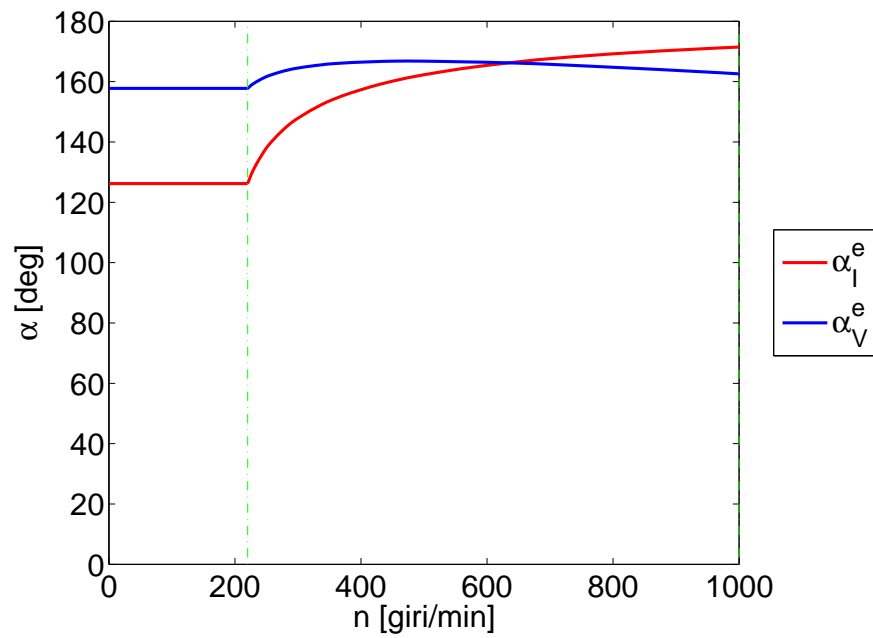


Figura 8.19: angoli in funzione della velocità

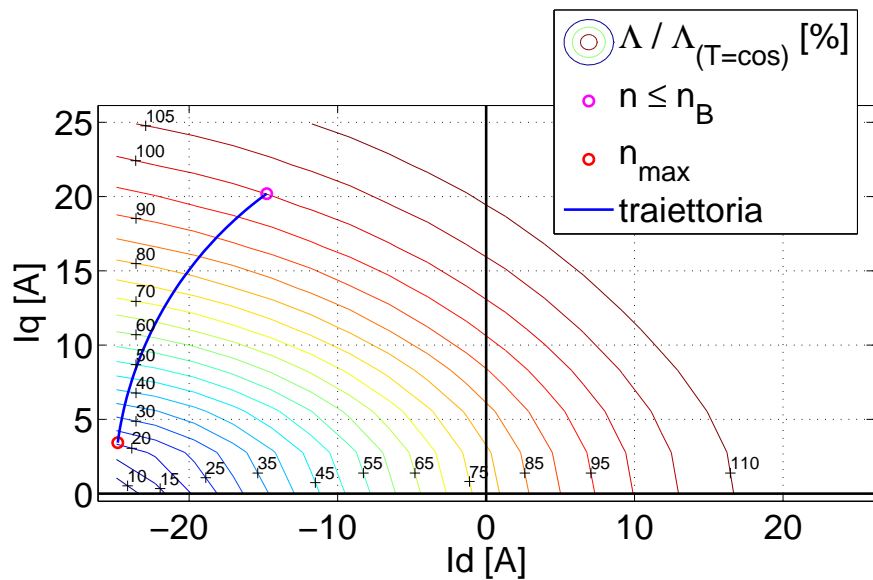


Figura 8.20: traiettoria nel flusso

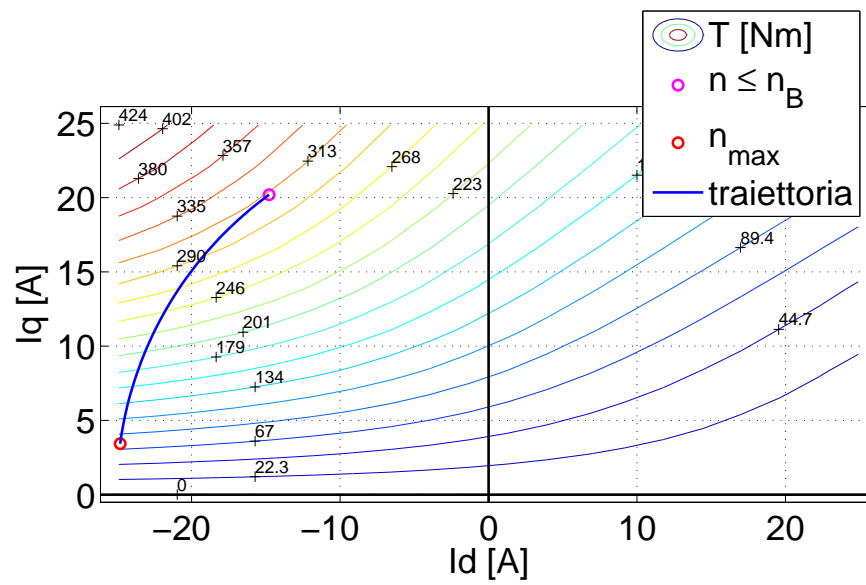


Figura 8.21: traiettoria nella coppia

## 8.7. CORRENTE MINIMA DI SMAGNETIZZAZIONE

Dal metodo iterativo si ricava:

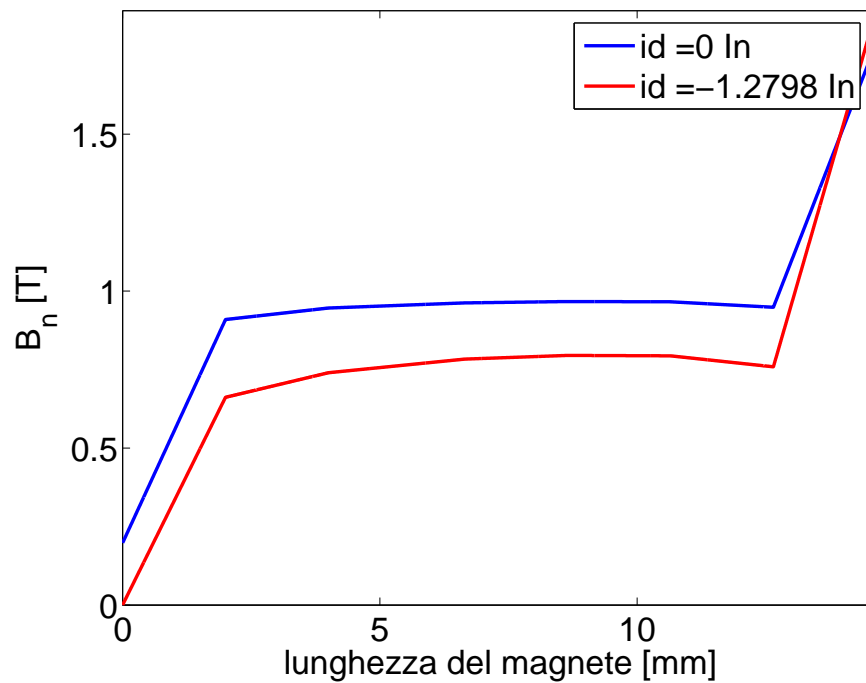


Figura 8.22: flusso sul magnete in funzione della corrente

La corrente minima di smagnetizzazione risulta:

$$I_{d_{sma}} = -1,28 I_n = -22,5 A \quad (8.3)$$

## 8.8. INDUZIONE A VUOTO

Le seguente immagine rappresenta l'induzione a vuoto con l'asse diretto ed in quadratura dello statore e del rotore allineati:

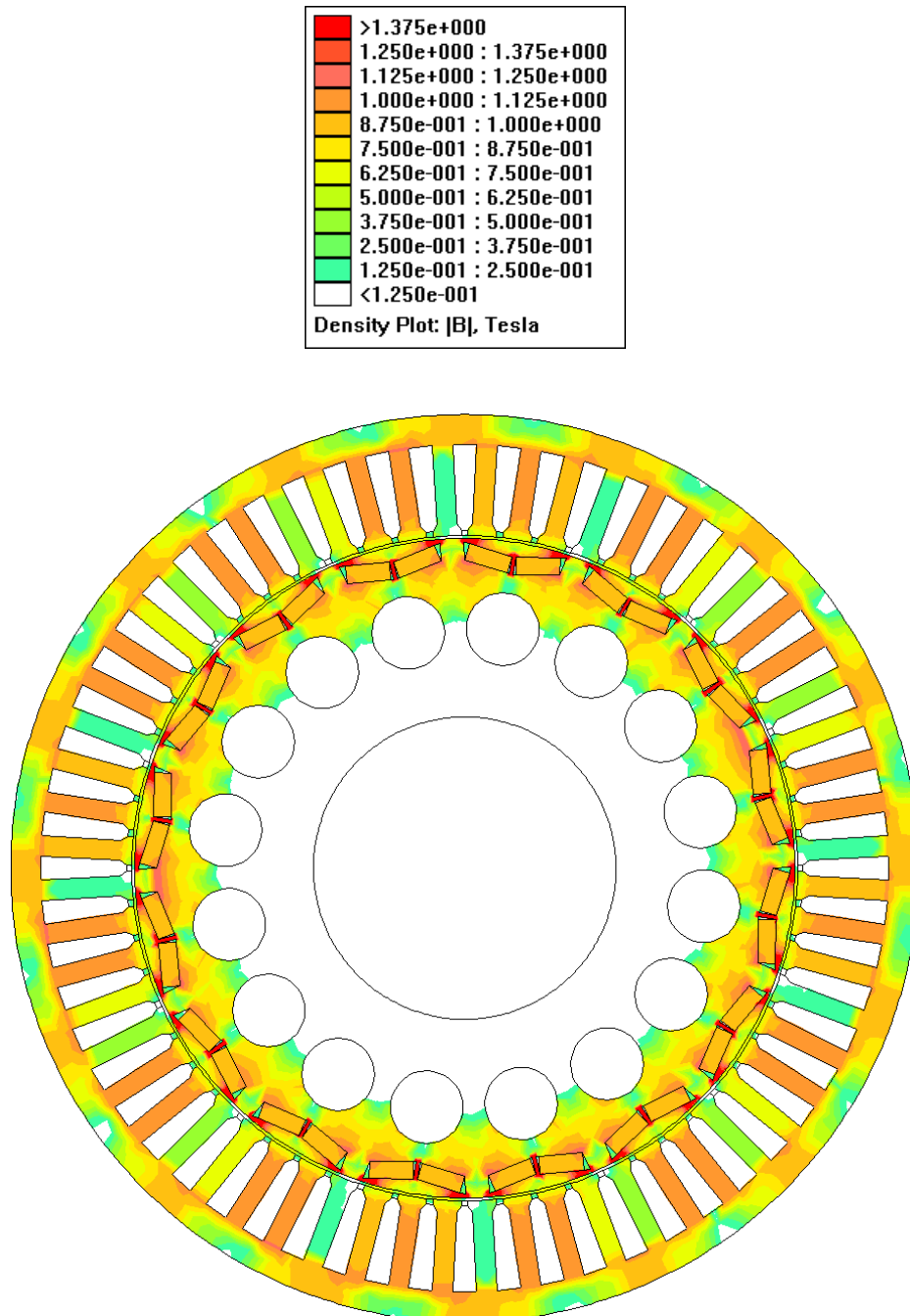


Figura 8.23: induzione IPM ottimizzato

Lo zoom dell'induzione un polo:

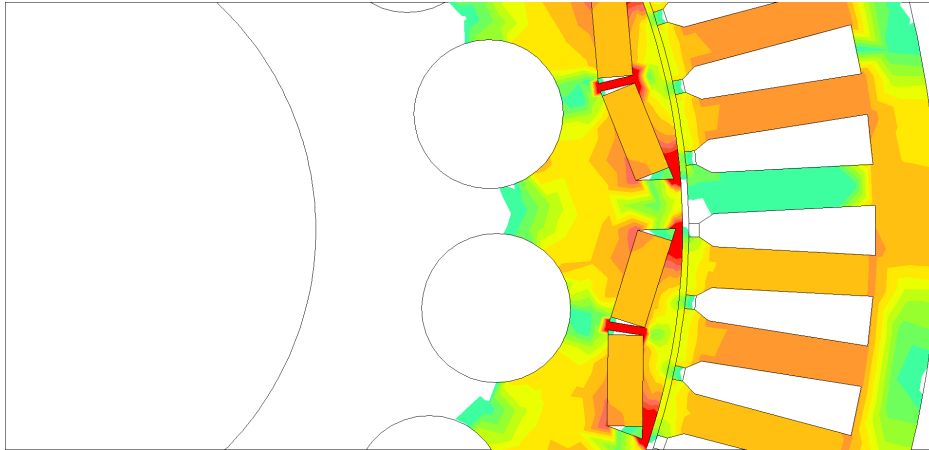


Figura 8.24: induzione polo IPM ottimizzato



---

---

## CAPITOLO 9

---

# ANALISI SPM

La tesi in esame era basata sul miglioramento delle caratteristiche di un motore SPM sia dal punto di vista del costo sia dal punto di del deflussaggio (regolazione della velocità).

Siccome la macchina SPM non é adatta ad un deflussaggio elevato, essendo un campo di deflussaggio ridotto, (inferiore a due) si é dovuto passare ad un motore IPM.

In questo capitolo si analizza comunque la macchina SPM per il raffronto con la macchina ottimizzata.

La lunghezza della macchina é di 150 mm.

Dati del rotore (interno) :

- *diametro esterno (al traferro)* :  $D_{re} = 218 \text{ mm}$
- *diametro interno (albero)* :  $D_{ri} = 100 \text{ mm}$
- *spessore del magnete* :  $t_m = 5 \text{ mm}$
- *ampiezza di un polo (angolo elettico)* :  $\alpha_{mg} = 150 \text{ mm}$

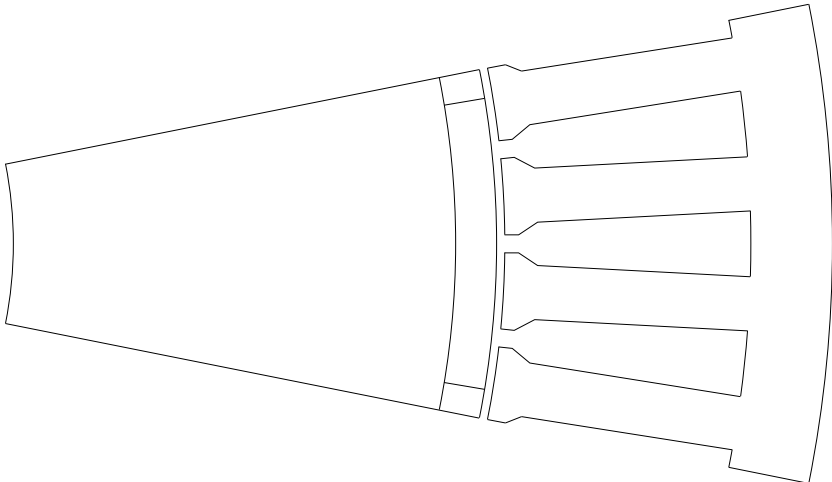


Figura 9.1: polo SPM

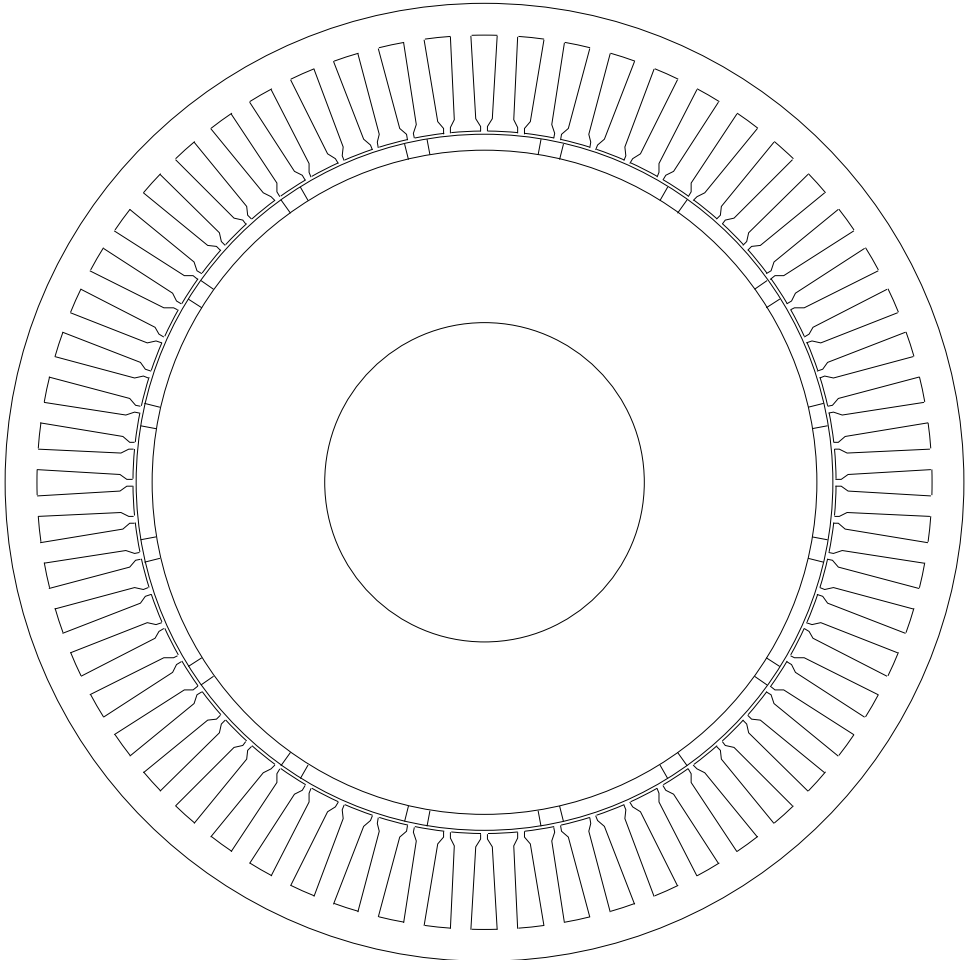


Figura 9.2: SPM

## 9.1. MESH

La mesh dell' SPM é la seguente:

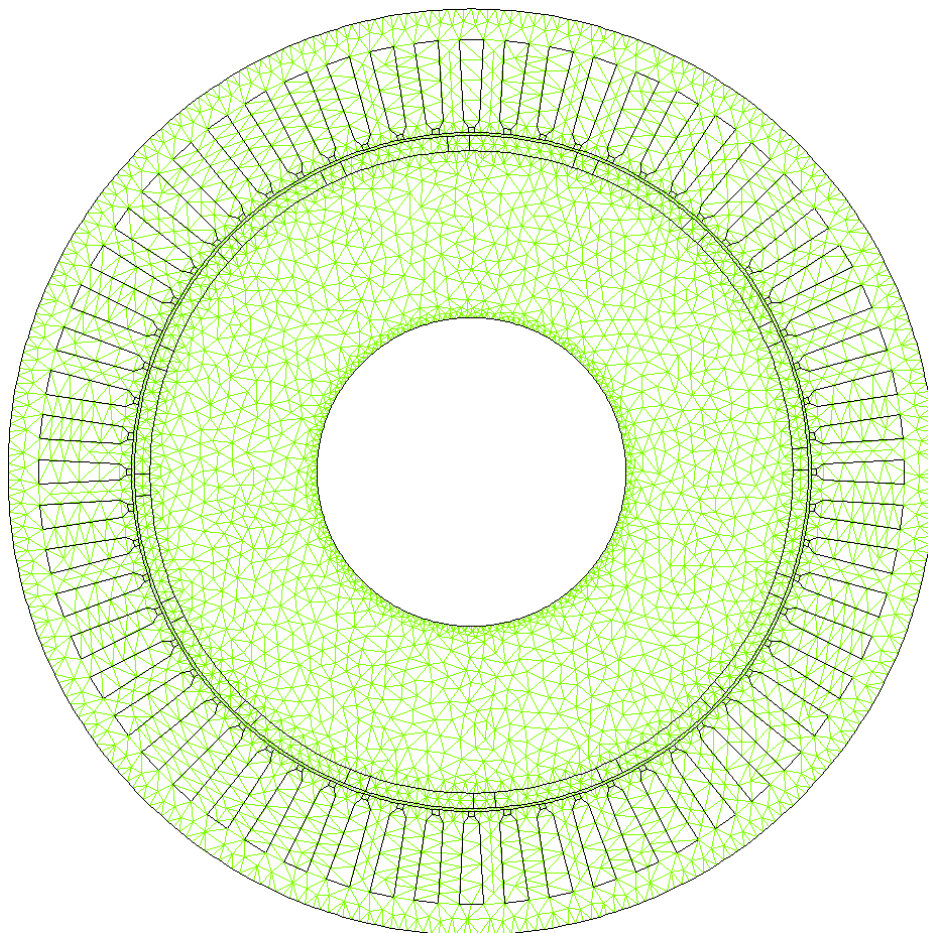
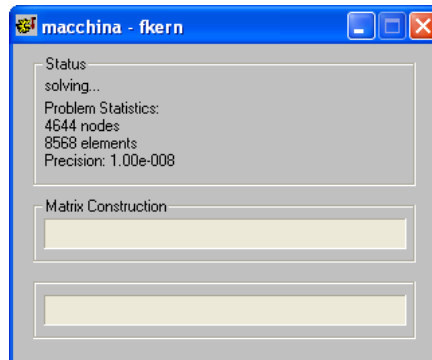


Figura 9.3: mesh SPM

Lo zoom della mesh un polo:

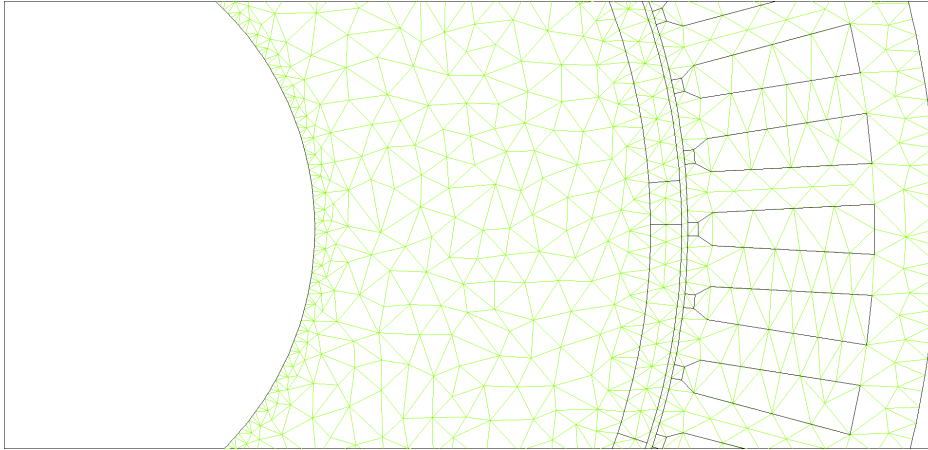


Figura 9.4: mesh polo SPM

Il tempo necessario per eseguire una simulazione é di circa quindici secondi.

## 9.2. PROVA A VUOTO

Le simulazioni sono state eseguite con:

- passo di 2 gradi elettrici
- da 0 a 720 gradi elettrici

Per il calcolo della f.e.m a vuoto si fa riferimento a:

- velocità base (200 rpm)
- frequenza di 26.6 Hz

Dalle simulazioni si ottengono :

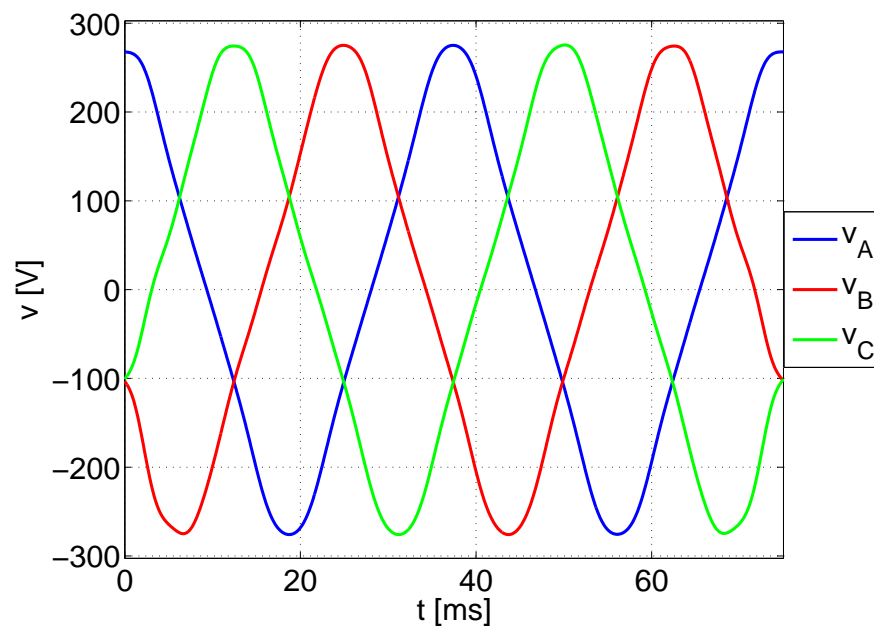


Figura 9.5: andamento temporale tensioni stellate

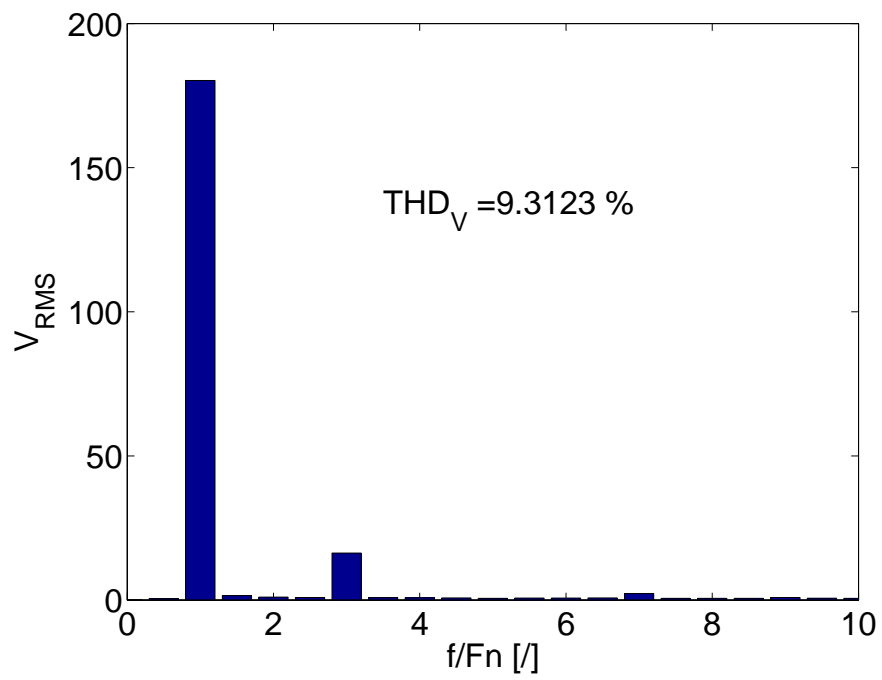


Figura 9.6: spettro medio tensioni stellate

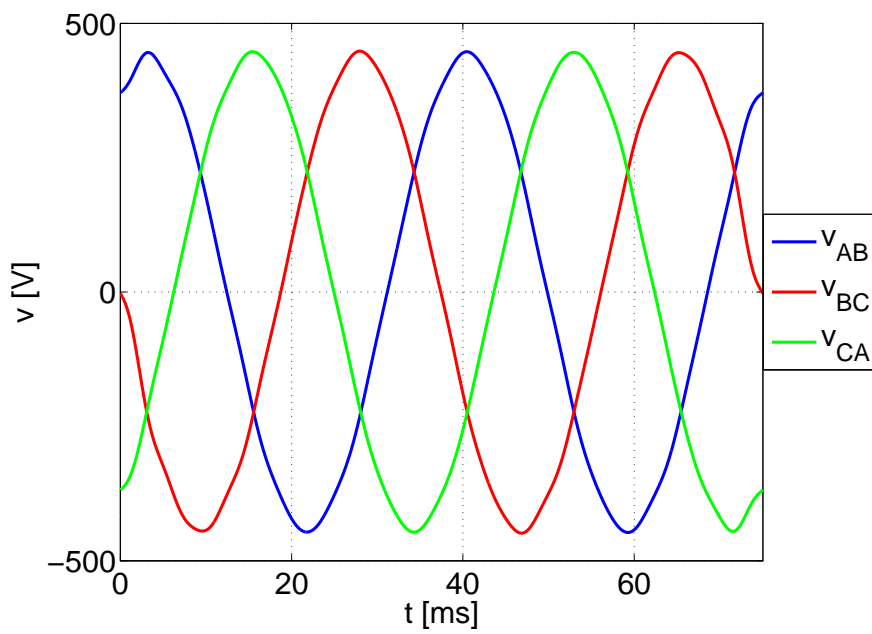


Figura 9.7: andamento temporale tensioni concatenate

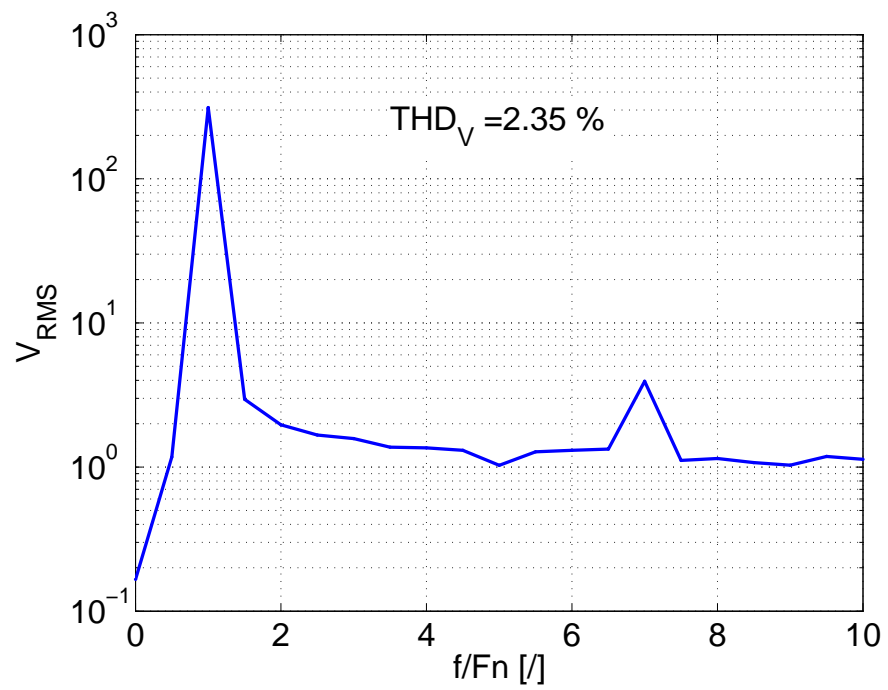


Figura 9.8: spettro medio tensioni concatenate

### 9.3. COGGING E SKEWING

Le simulazioni sono state eseguite:

- a vuoto
- passo di 0.06 gradi elettrici
- da 0 a 6 gradi elettrici (un passo di cava)

La coppia su un passo di cava (di statore) é la seguente:

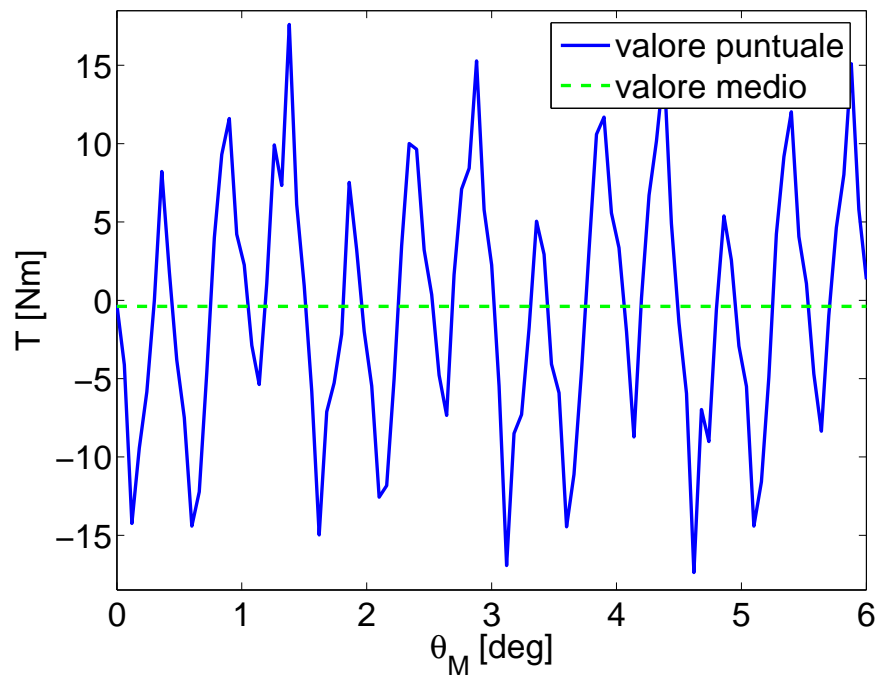


Figura 9.9: coppia su un passo di cava

Le condizioni dello skewing sono:

- angolo di skewing 1/4 del passo di cava (1,5 gradi elettrici)
- skewing discretizzato in cinque parti (magneti lunghi 30 mm)
- nel calcolo delle coppie di cogging non si é considerata l'eventuale componente continua



Per visualizzare meglio l'effetto dello skewing si graficano:

- la coppia senza skewing
- la coppia con skewing discreto
- la coppia con skewing continuo

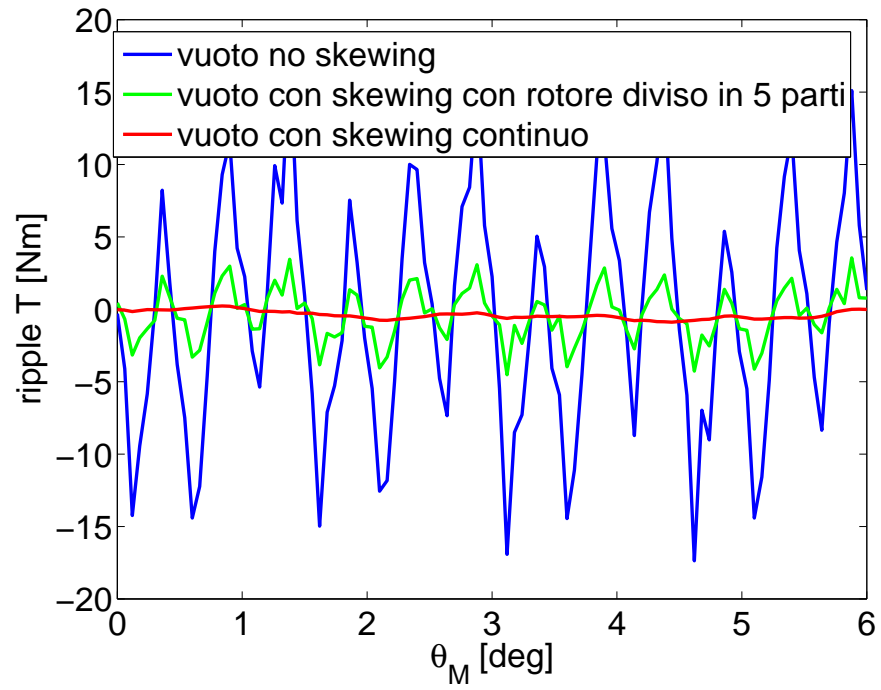


Figura 9.10: coppia

## 9.4. FLUSSI ED INDUTTANZE

Per non eseguire una simulazione specifica per il calcolo dei flussi concatenati (e delle relative induttanze) si utilizza la mappatura della coppia. Simulazioni eseguite:

- 20 simulazioni della corrente diretta da meno corrente nominale a più corrente nominale
- 10 simulazioni della corrente in quadratura a zero alla corrente nominale

Il valore dei flussi concatenati al variare della corrente diretta ed in quadratura:

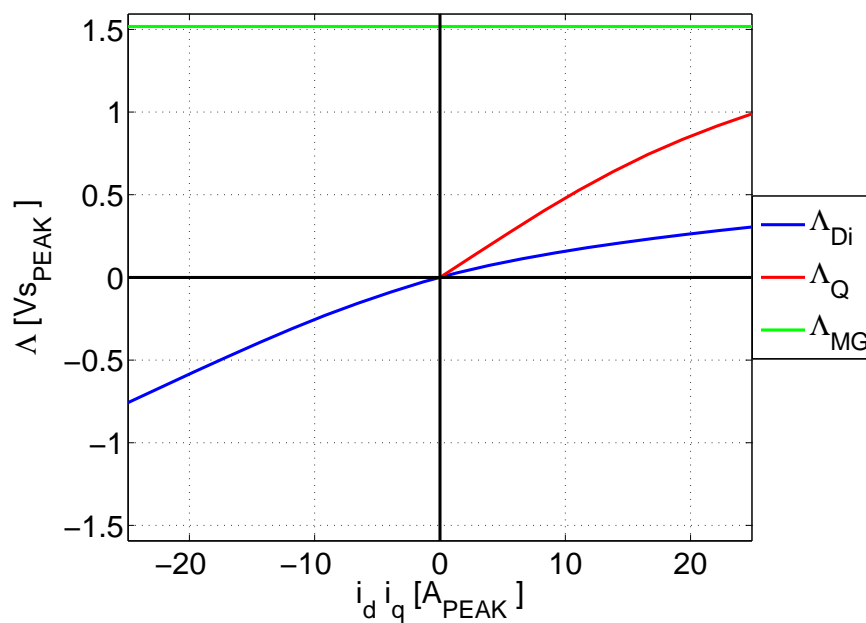


Figura 9.11: flussi

Dal flusso concatenato diretto ed in quadratura si ricava:

- l'induttanza diretta apparente e differenziale
- l'induttanza in quadratura apparente e differenziale

Valore delle induttanze al variare della corrente:

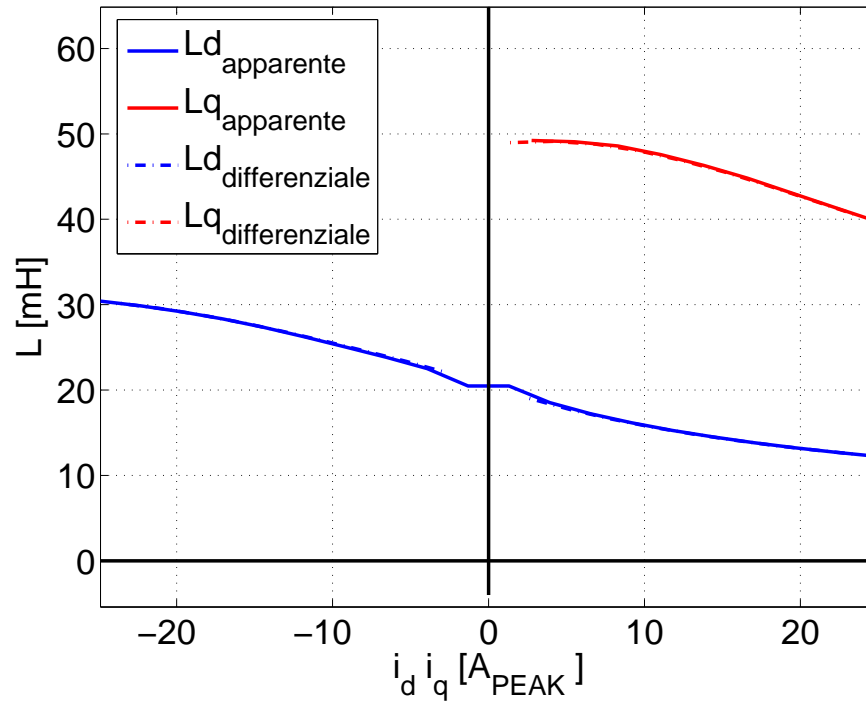


Figura 9.12: induttanze

per il calcolo delle induttanze apparenti si é usata la seguente formula:

$$I_{app_n} = \frac{I_n + I_{n+1}}{2} \quad (9.1)$$

$$L_{app_n} = \frac{\Lambda_n - \Lambda_{n+1}}{I_n - I_{n+1}} \quad (9.2)$$

cioé, la derivata centrata nel valore medio della variazione della corrente, rispetto la variazione del flusso concatenato.

## 9.5. VARIAZIONE DELLA VELOCITÀ

Dalle simulazioni F.E.M.M. eseguite si é ricavata la mappatura delle grandezze tipiche della macchina (coppia, flussi, induzioni, ...)in funzione della corrente diretta ed in quadratura.

Successivamente si sono rielaborati i risultati (dalla teoria sugli azionamenti) per determinare i seguenti parametri elettrici e meccanici tipici della regolazione della velocità.

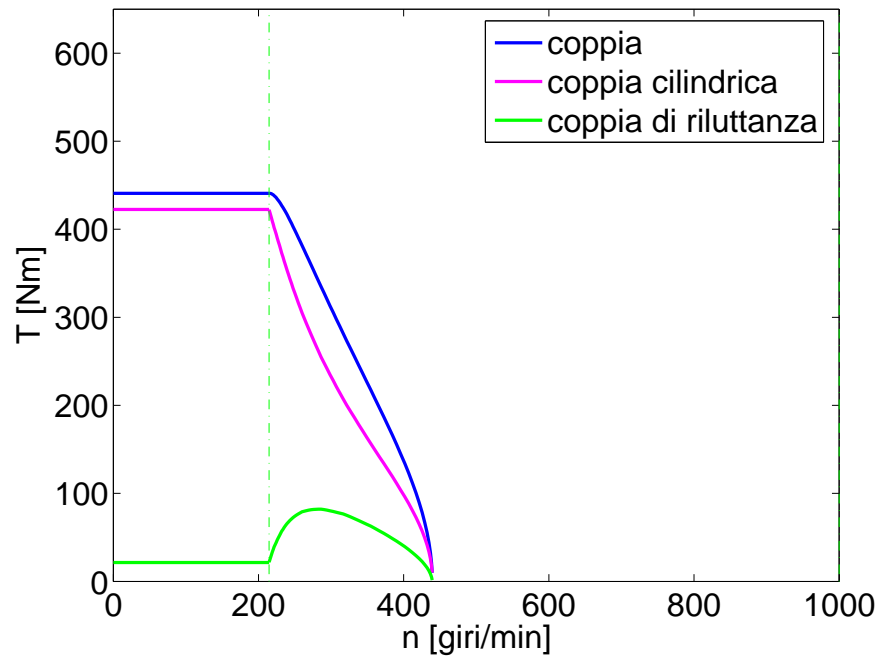


Figura 9.13: coppia in funzione della velocità

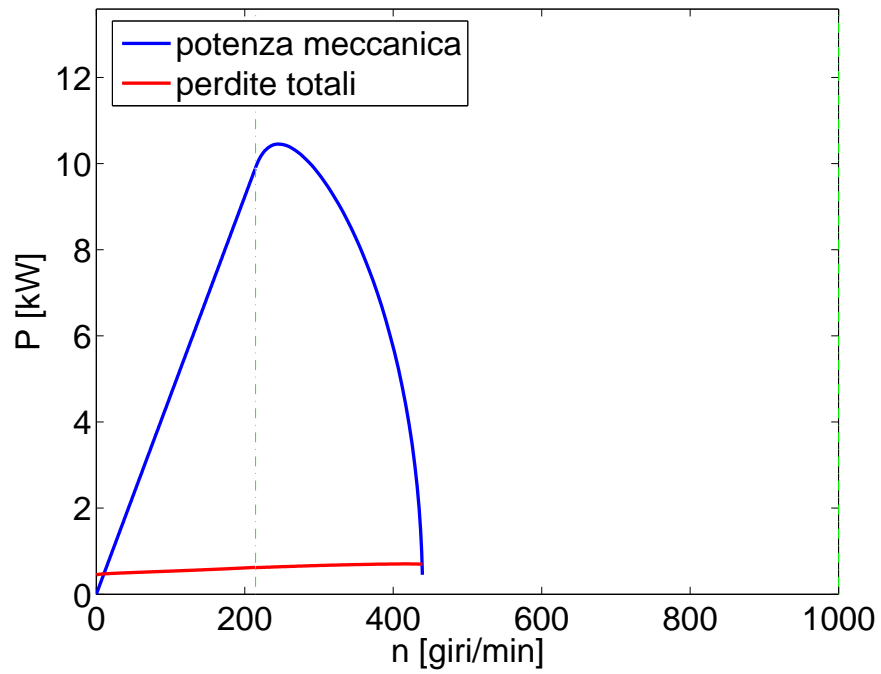


Figura 9.14: potenza in funzione della velocità

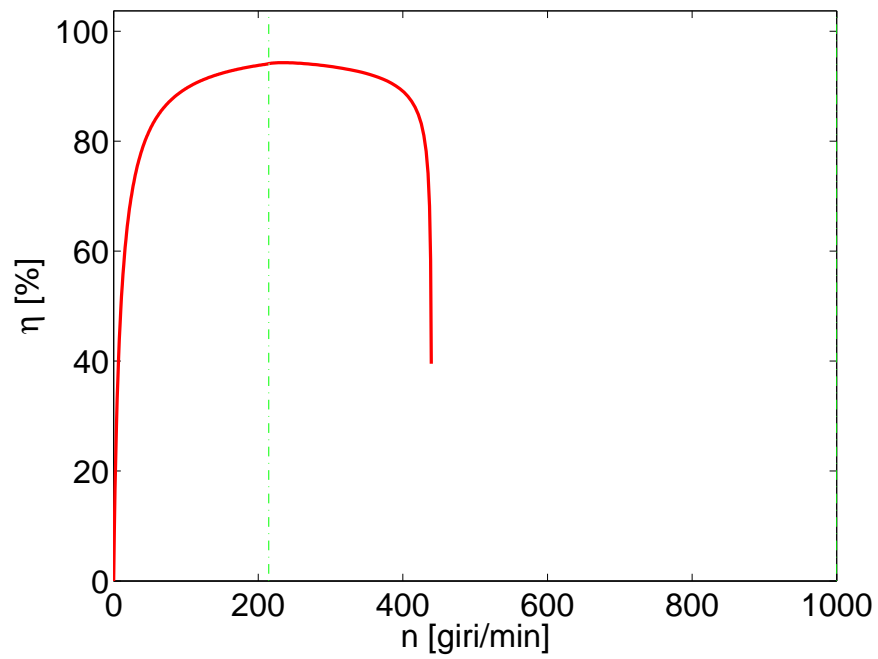


Figura 9.15: rendimento in funzione della velocità

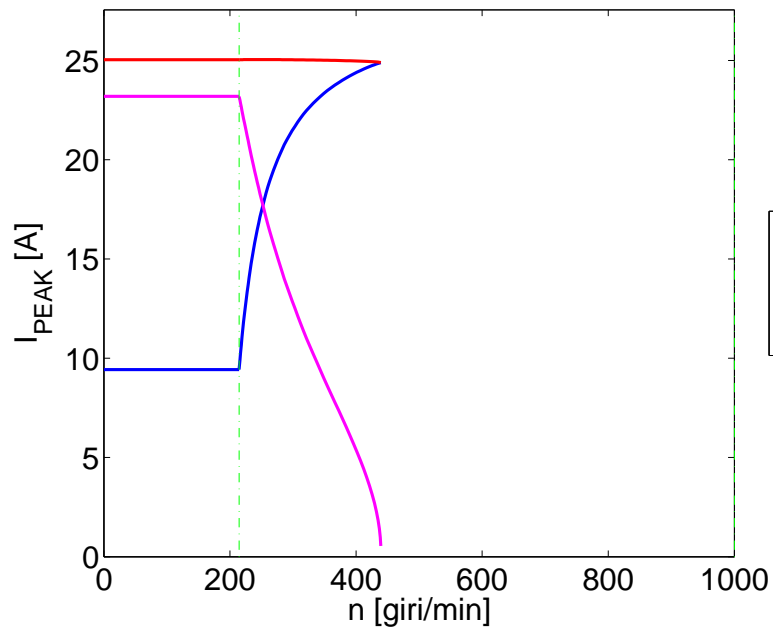


Figura 9.16: corrente in funzione della velocità

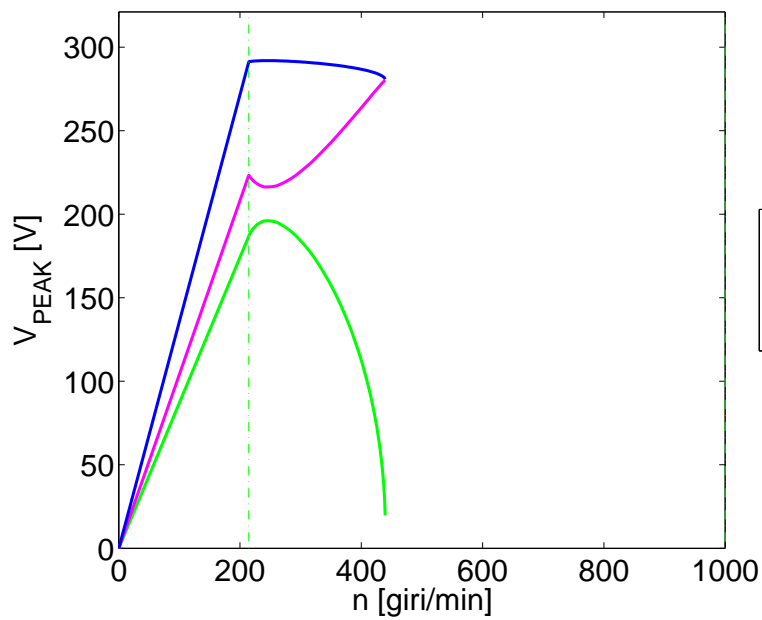


Figura 9.17: tensione in funzione della velocità

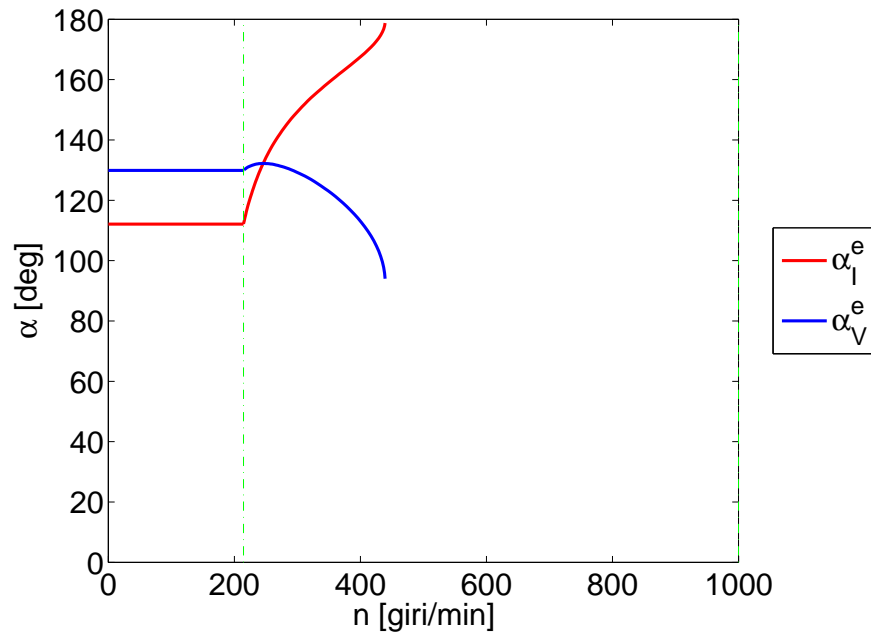


Figura 9.18: angoli in funzione della velocità

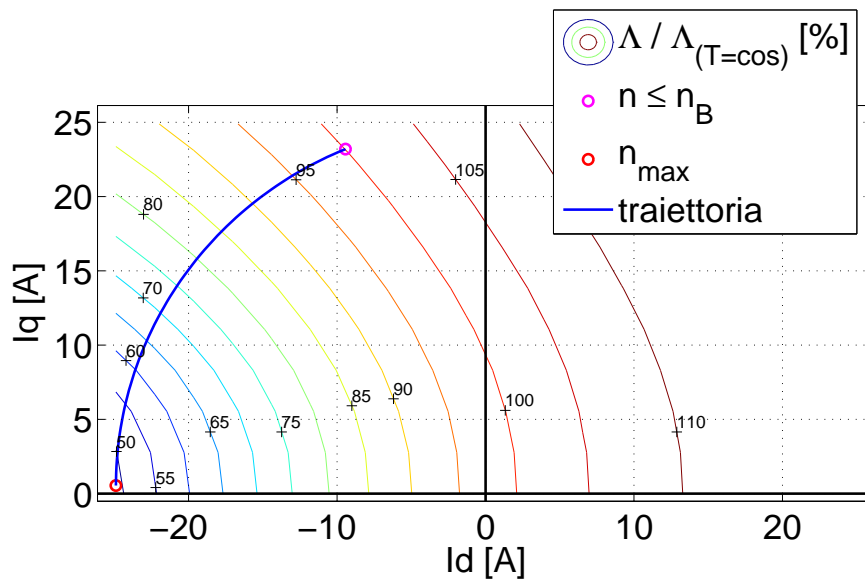


Figura 9.19: traiettoria nel flusso

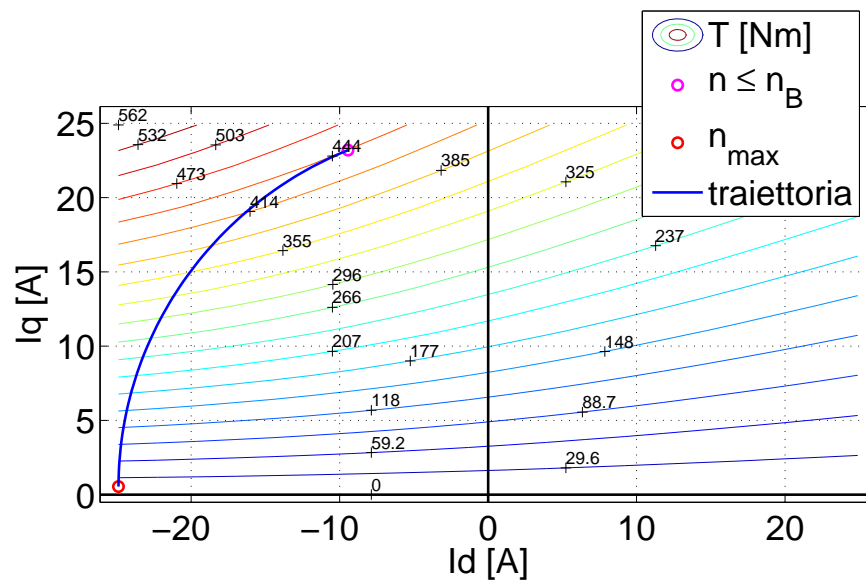


Figura 9.20: traiettoria nella coppia



## 9.6. CORRENTE MINIMA DI SMAGNETIZZAZIONE

Dal metodo iterativo si ricava:

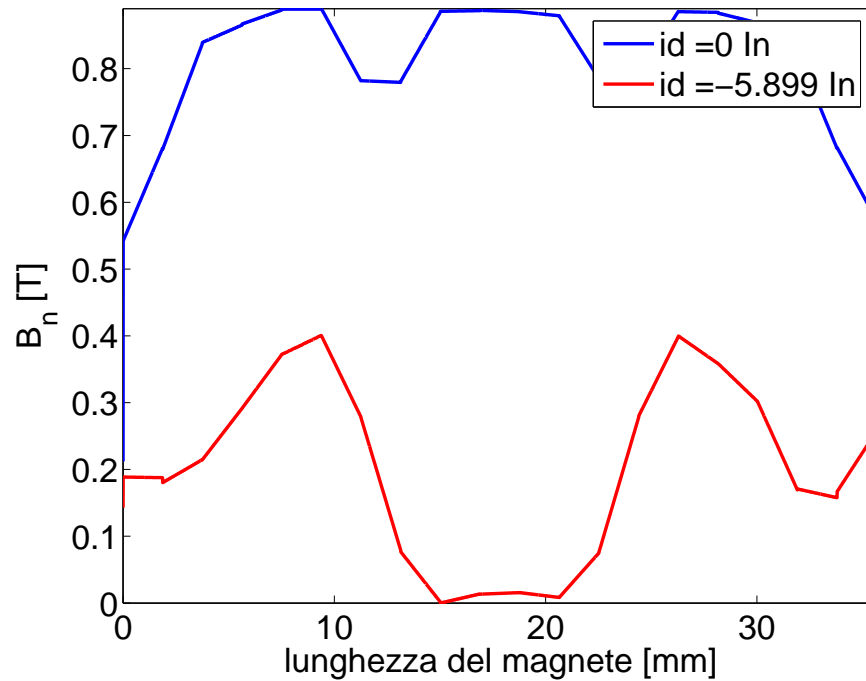


Figura 9.21: flusso sul magnete in funzione della corrente

Corrente minima di smagnetizzazione:

$$I_{d_{sma}} = -5,9 I_n = -103,8 A \quad (9.3)$$

## 9.7. INDUZIONE A VUOTO

Le seguente immagine rappresenta l'induzione a vuoto con l'asse diretto ed in quadratura dello statore e del rotore allineati:

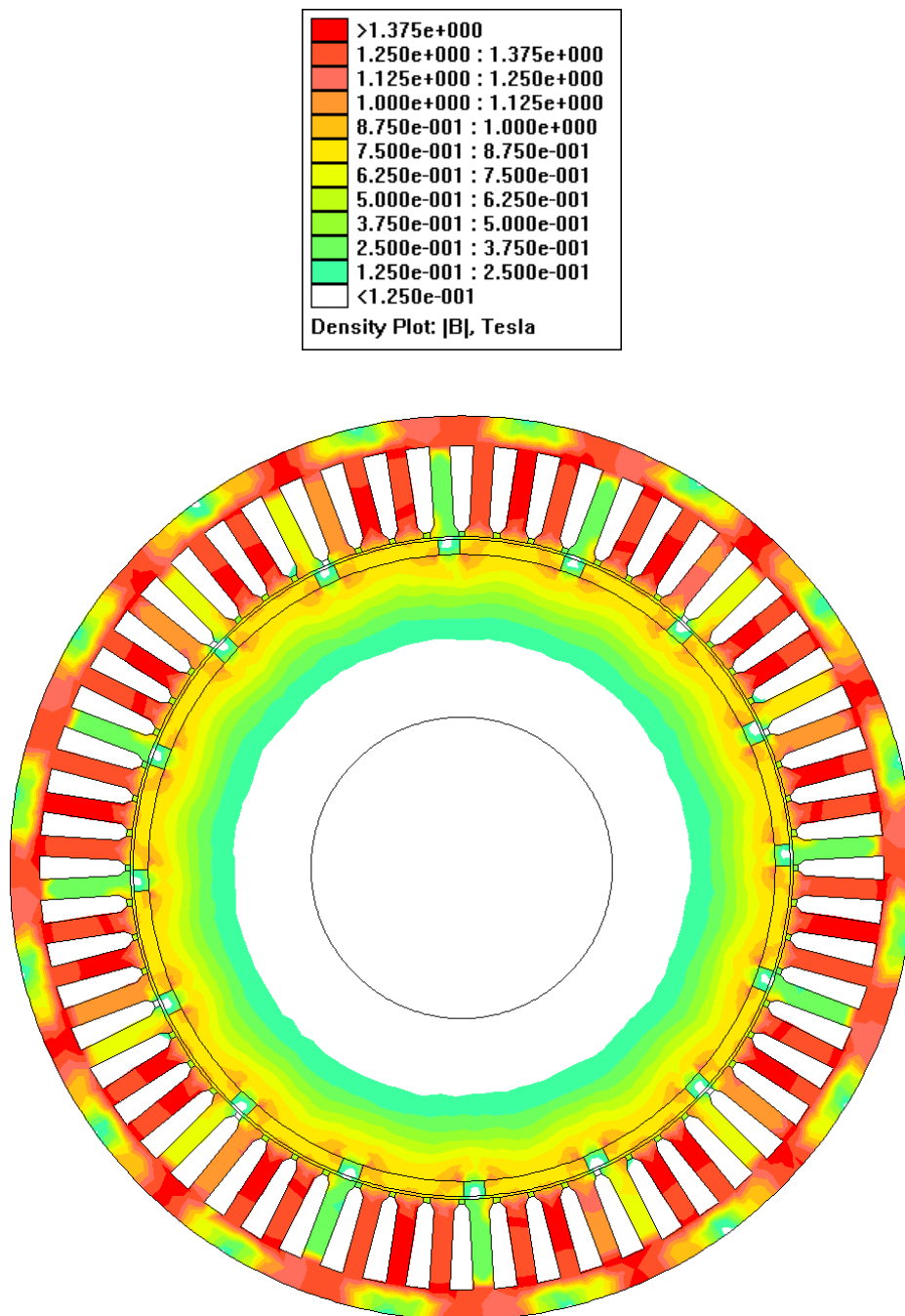


Figura 9.22: induzione SPM

Lo zoom dell'induzione un polo:

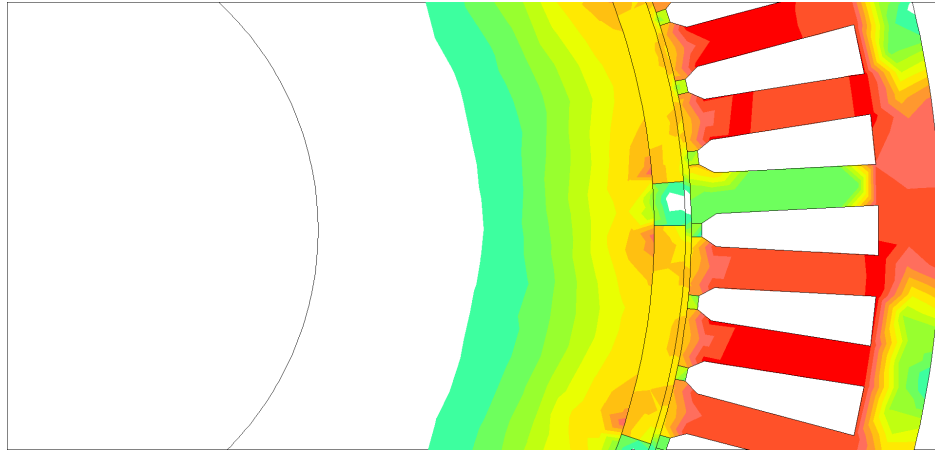


Figura 9.23: induzione polo SPM



---

---

## CAPITOLO 10

---

# ANALISI IPM MODIFICATO 1

Per incrementare la coppia durante il deflussaggio si può aumentare la coppia di riluttanza.

Per incrementare la coppia di riluttanza si può rendere il traferro anisotropo nella zona di fronte al magnete.

In questo capitolo si analizza questo tipo di IPM modificato per il raffronto con la macchina ottimizzata.

Dati del rotore (interno) :

– diametro esterno (al traferro)	:	$D_{re}$	=	218	mm
– diametro interno (albero)	:	$D_{ri}$	=	100	mm
– spessore del magnete	:	$t_m$	=	5.66	mm
– altezza del ponticello magnetico interno	:	$h_{ri}$	=	1.5	mm
– distanza barriera – traferro	:	$dbi$	=	46.78	mm
– altezza del ponticello magnetico esterno	:	$h_{re}$	=	1.36	mm
– distanza barriera – esterno	:	$dbe$	=	1.2	mm
– diametro del centro dei cerchi d'aria	:	$D_{cer}$	=	160	mm
– diametro cerchi d'aria	:	$d_{cer}$	=	24	mm
– raggio anisotropia traferro	:	$ragg$	=	5	mm

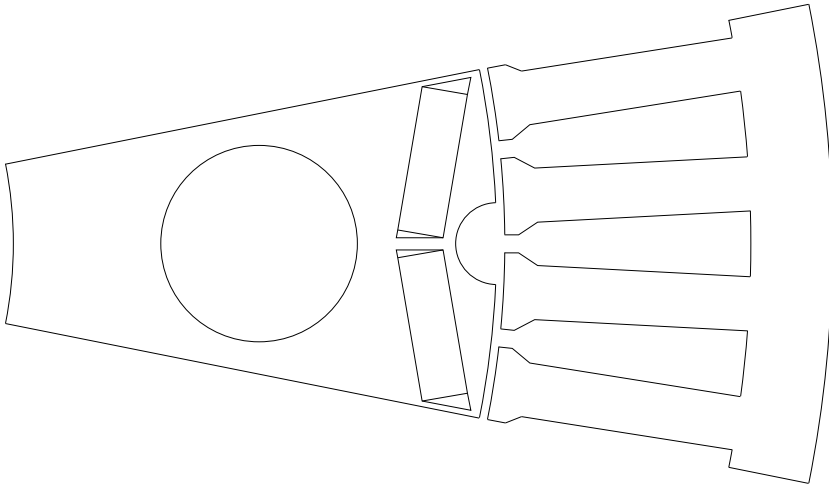


Figura 10.1: polo IPM modificato

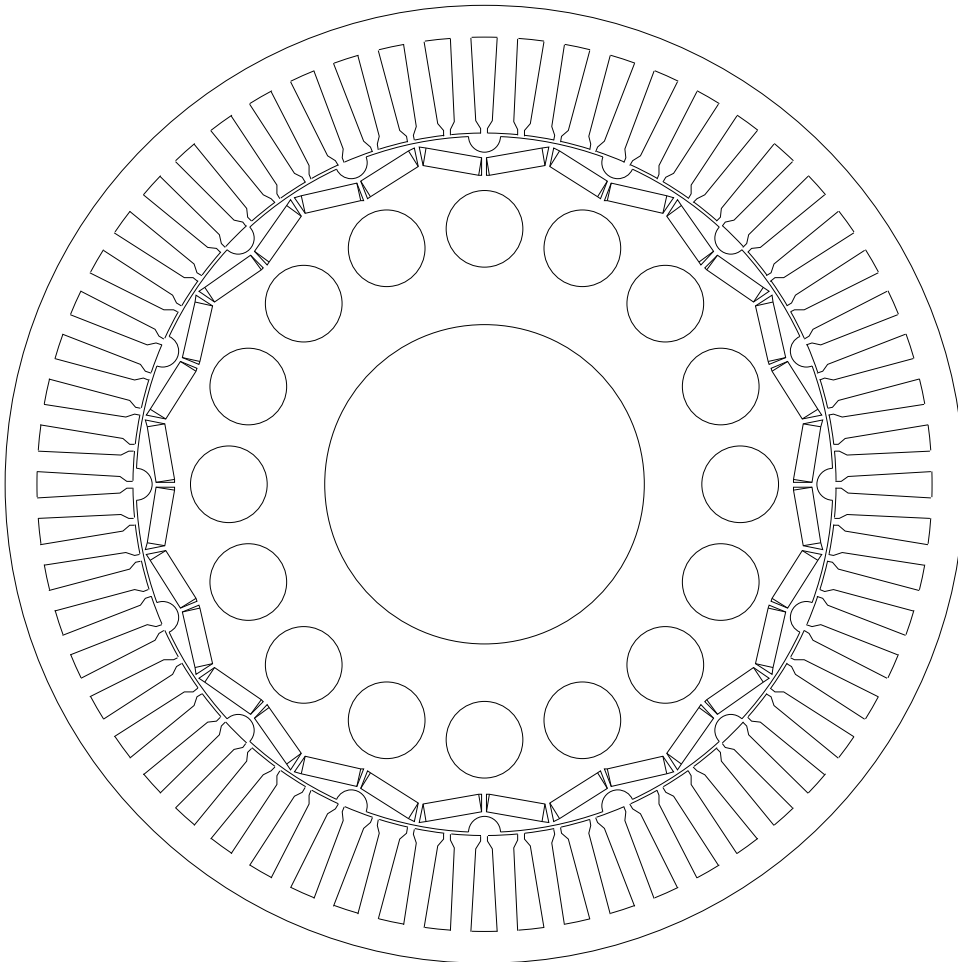


Figura 10.2: IPM modificato

## 10.1. MESH

La mesh dell' IPM modificato é la seguente:

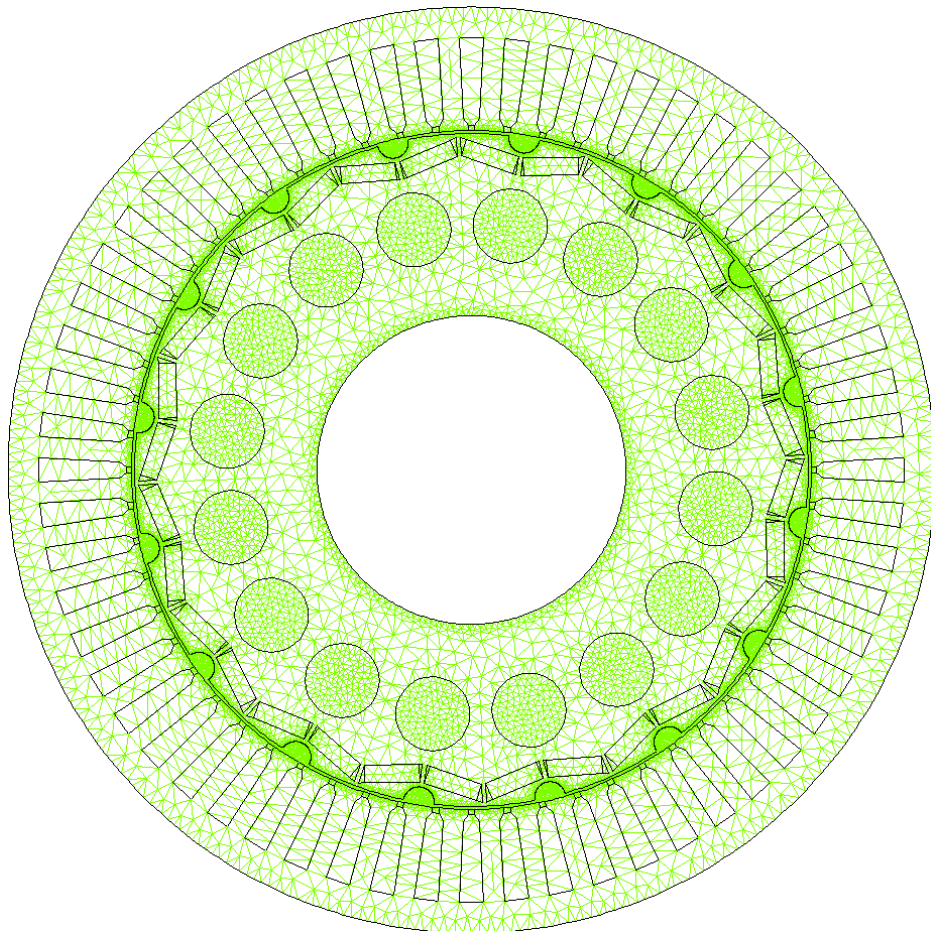
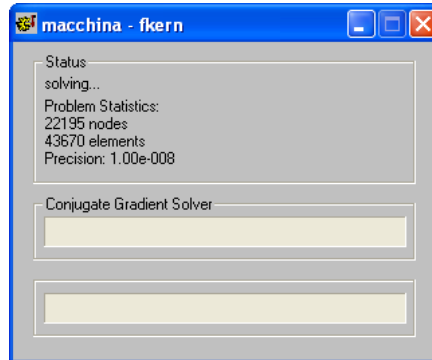


Figura 10.3: mesh IPM ottimizzato

Lo zoom della mesh un polo:

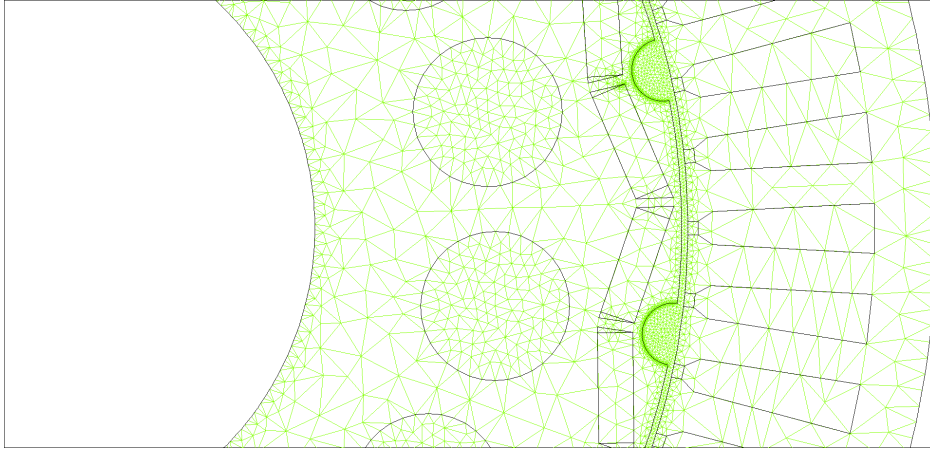


Figura 10.4: mesh polo IPM ottimizzato

Il tempo necessario per eseguire una simulazione é di circa due minuti.



## 10.2. PROVA A VUOTO

Le simulazioni sono state eseguite con:

- passo di 2 gradi elettrici
- da 0 a 720 gradi elettrici

Per il calcolo della f.e.m a vuoto si fa riferimento a:

- velocità base (200 rpm)
- frequenza di 26.6 Hz

Dalle simulazioni si ottengono :

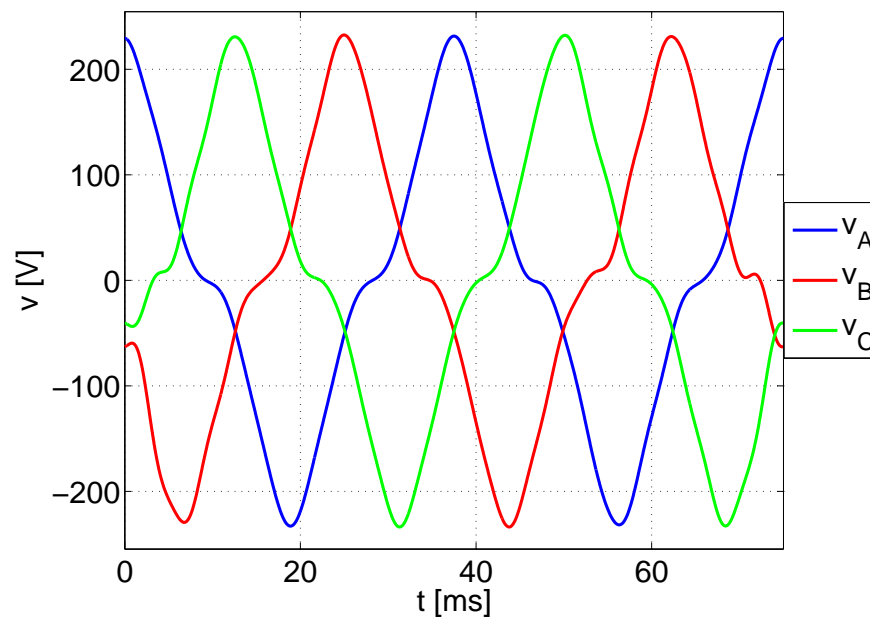


Figura 10.5: andamento temporale tensioni stellate

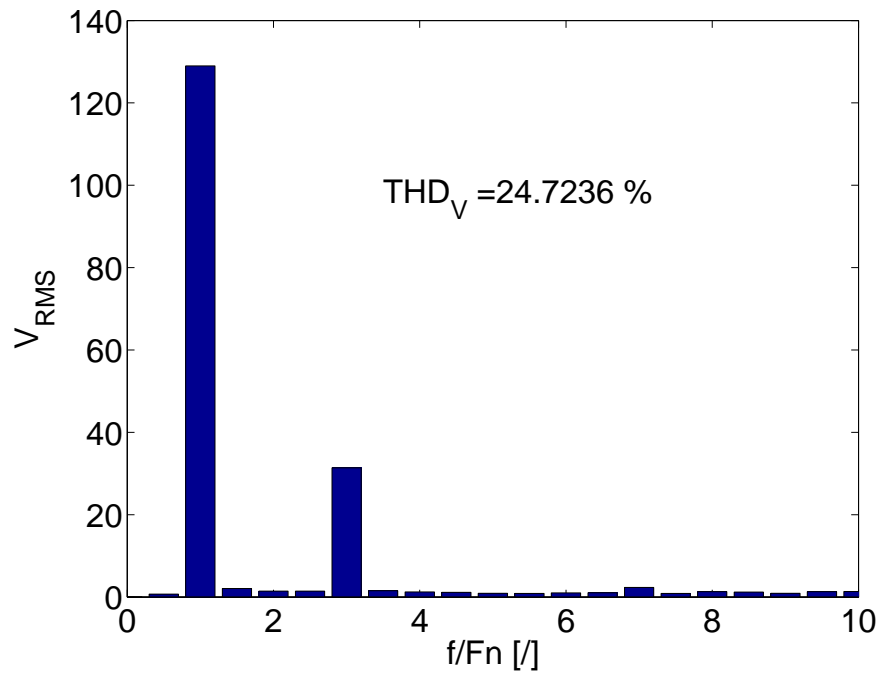


Figura 10.6: spettro medio tensioni stellate

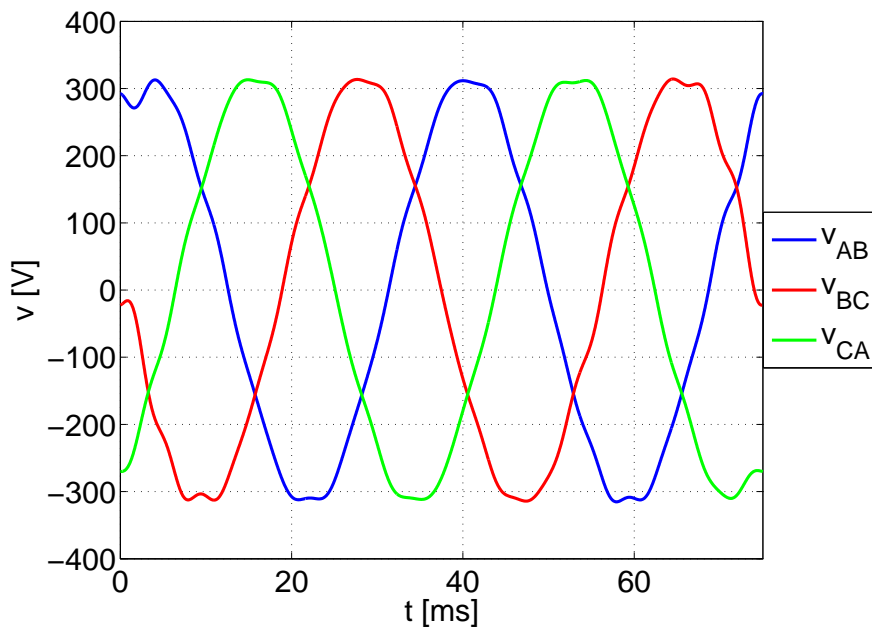


Figura 10.7: andamento temporale tensioni concatenate

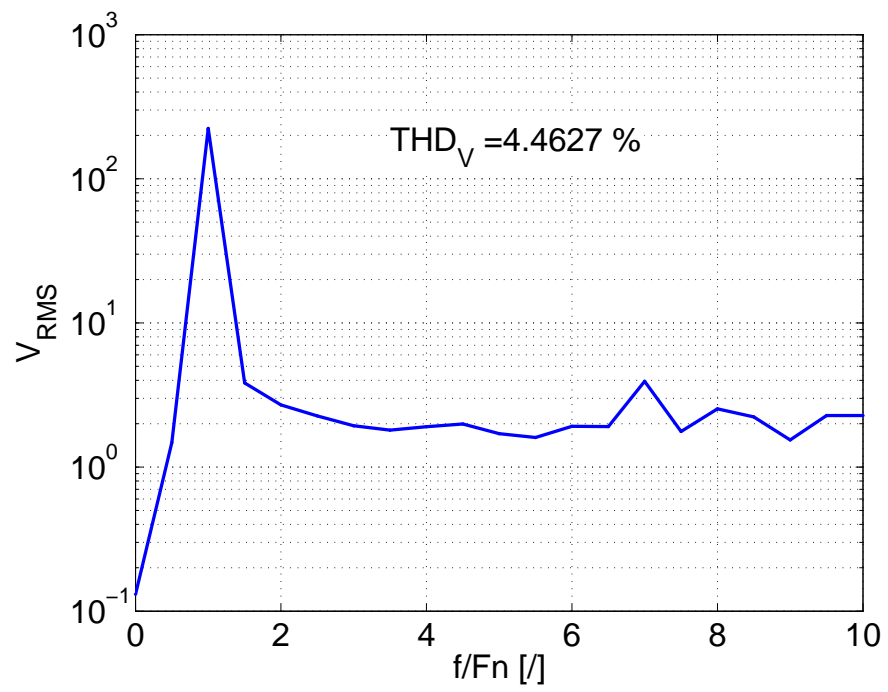


Figura 10.8: spettro medio tensioni concatenate

### 10.3. COGGING E SKEWING

Le simulazioni sono state eseguite:

- a vuoto
- passo di 0.06 gradi elettrici
- da 0 a 6 gradi elettrici (un passo di cava)

La coppia su un passo di cava (di statore) é la seguente:

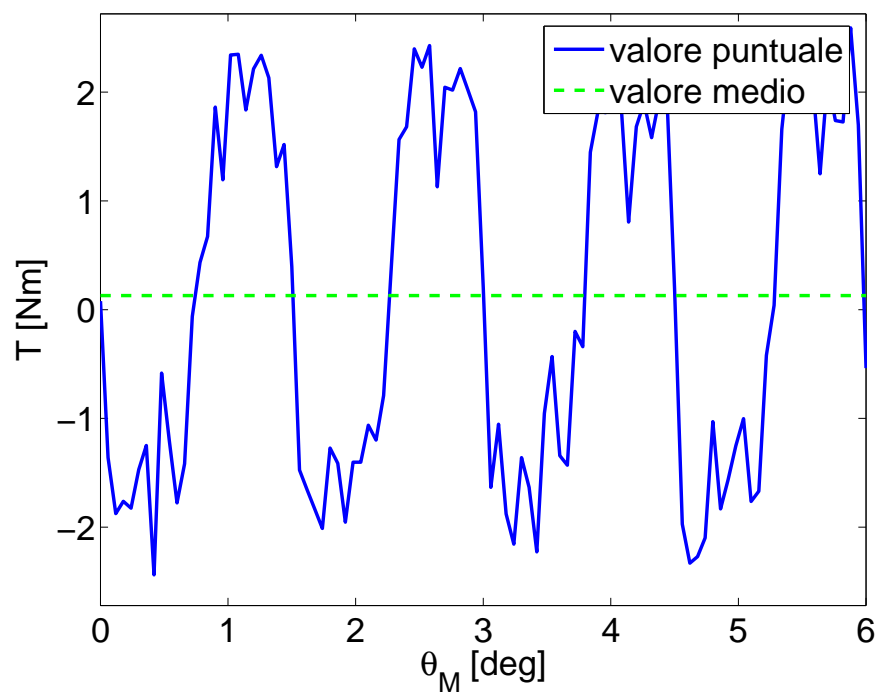


Figura 10.9: coppia su un passo di cava

Le condizioni dello skewing sono:

- angolo di skewing 1/4 del passo di cava (1,5 gradi elettrici)
- skewing discretizzato in cinque parti (magneti lunghi 30 mm)
- nel calcolo delle coppie di cogging non si é considerata l'eventuale componente continua

Per visualizzare meglio l'effetto dello skewing si graficano:

- la coppia senza skewing
- la coppia con skewing discreto
- la coppia con skewing continuo

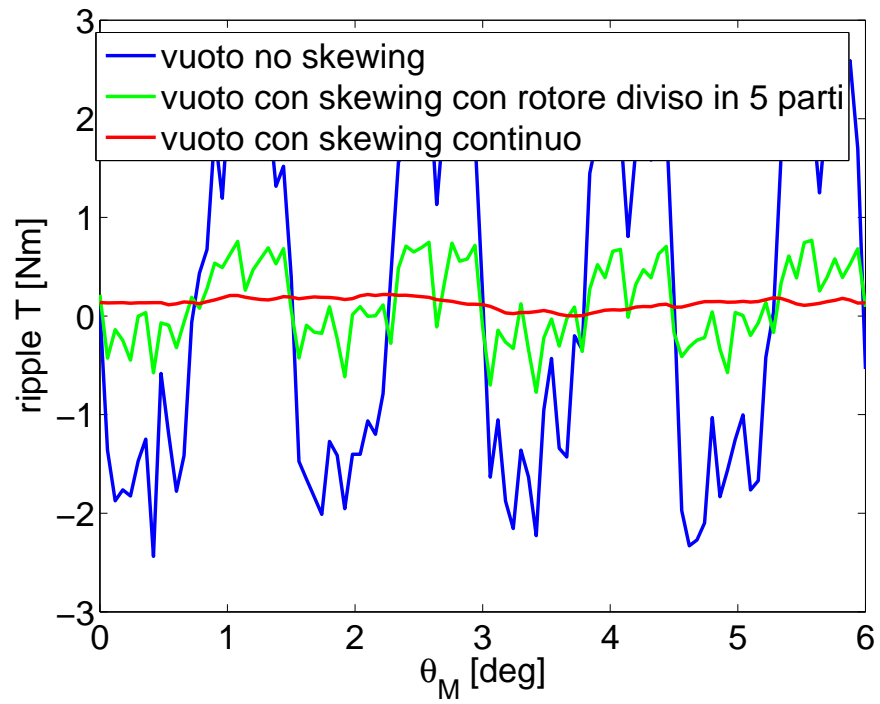


Figura 10.10: coppia

## 10.4. FLUSSI ED INDUTTANZE

Per non eseguire una simulazione specifica per il calcolo dei flussi concatenati (e delle relative induttanze) si utilizza la mappatura della coppia. Simulazioni eseguite:

- 20 simulazioni della corrente diretta da meno corrente nominale a piú corrente nominale
- 10 simulazioni della corrente in quadratura a zero alla corrente nominale

Il valore dei flussi concatenati al variare della corrente diretta ed in quadratura:

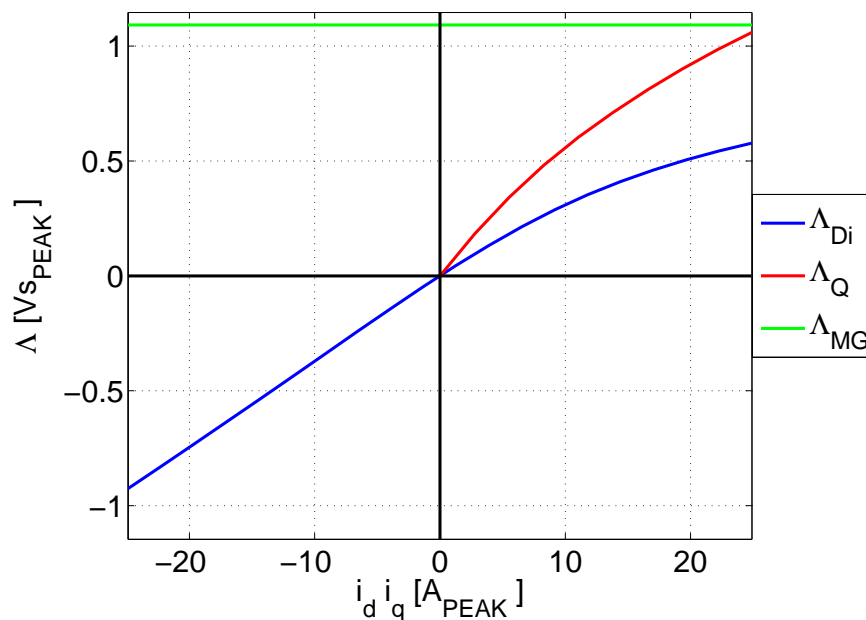


Figura 10.11: flussi

Dal flusso concatenato diretto ed in quadratura si ricava:

- l'induttanza diretta apparente e differenziale
- l'induttanza in quadratura apparente e differenziale

Valore delle induttanze al variare della corrente:

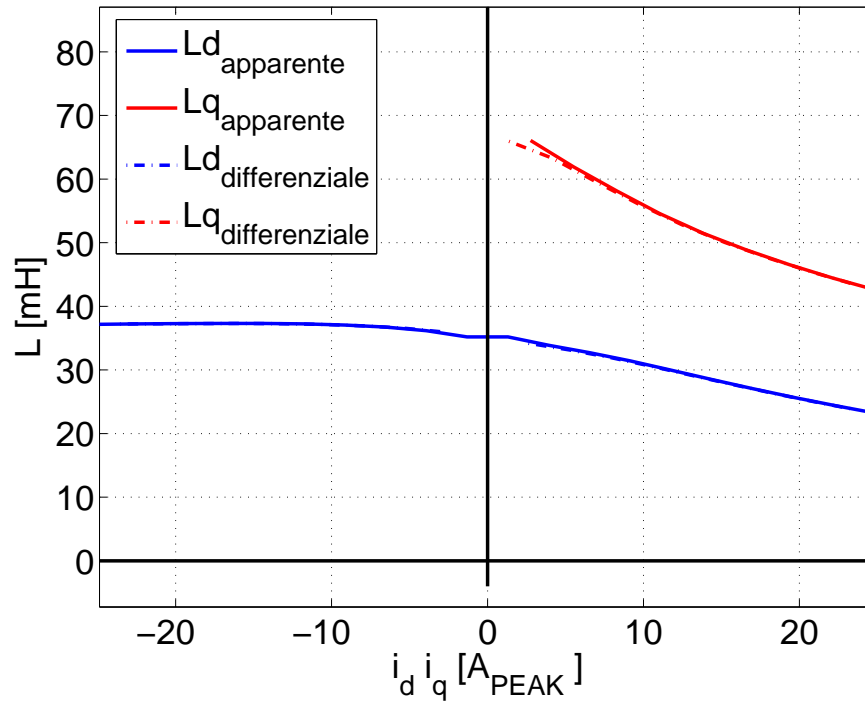


Figura 10.12: induttanze

per il calcolo delle induttanze apparenti si é usata la seguente formula:

$$I_{app_n} = \frac{I_n + I_{n+1}}{2} \quad (10.1)$$

$$L_{app_n} = \frac{\Lambda_n - \Lambda_{n+1}}{I_n - I_{n+1}} \quad (10.2)$$

cioé la derivata centrata nel valore medio della variazione della corrente rispetto la variazione del flusso concatenato.

## 10.5. VARIAZIONE DELLA VELOCITÀ

Dalle simulazioni F.E.M.M. eseguite si é ricavata la mappatura delle grandezze tipiche della macchina (coppia, flussi, induzioni, ...)in funzione della corrente diretta ed in quadratura.

Successivamente si sono rielaborati i risultati (dalla teoria sugli azionamenti) per determinare i seguenti parametri elettrici e meccanici tipici della regolazione della velocità.

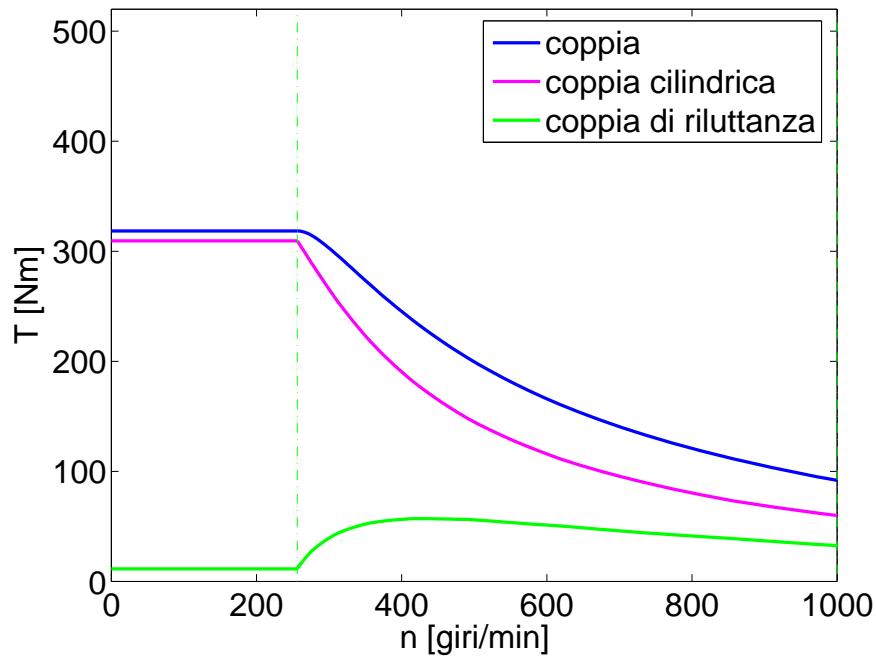


Figura 10.13: coppia in funzione della velocità



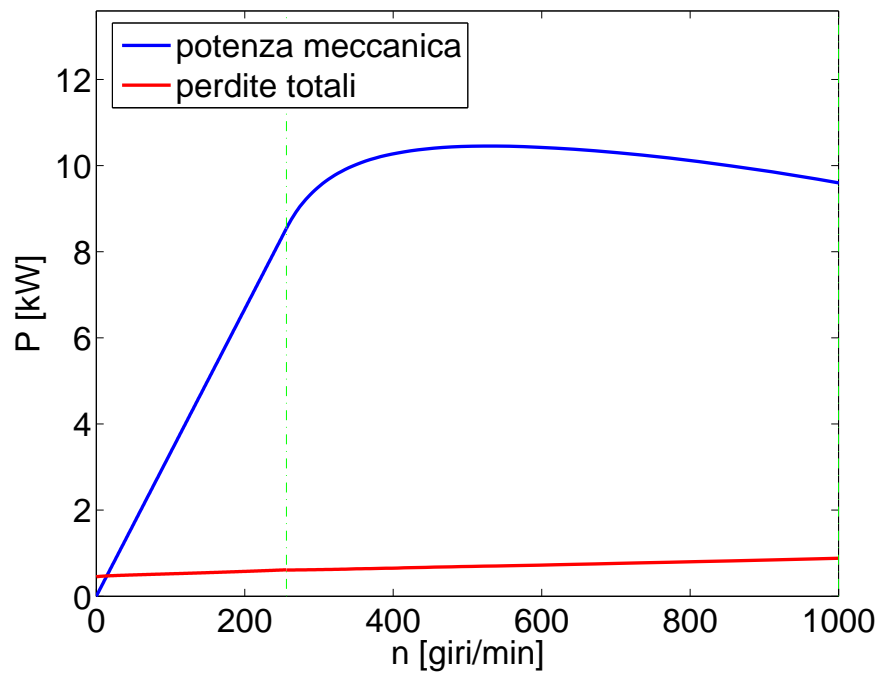


Figura 10.14: potenza in funzione della velocità

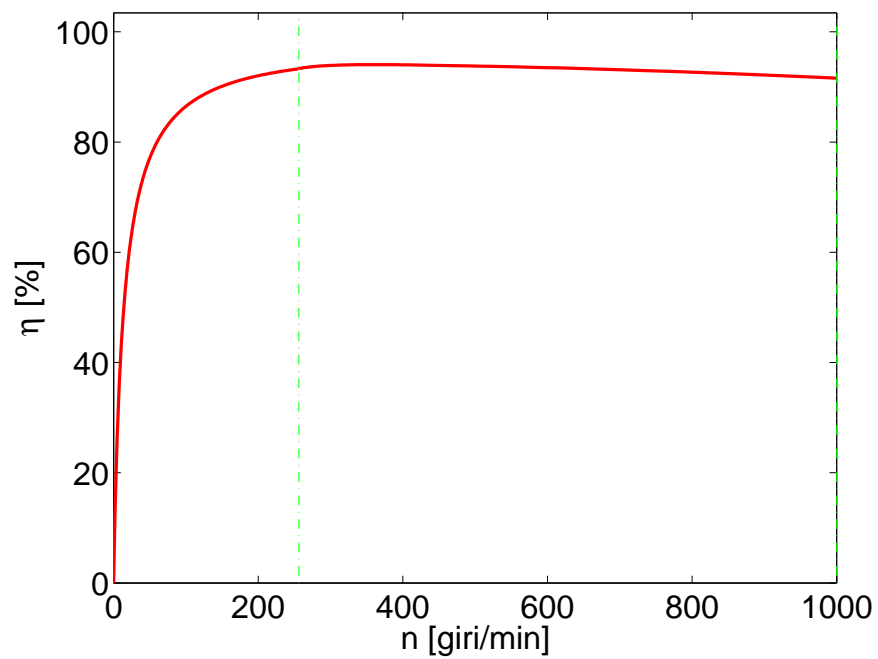


Figura 10.15: rendimento in funzione della velocità

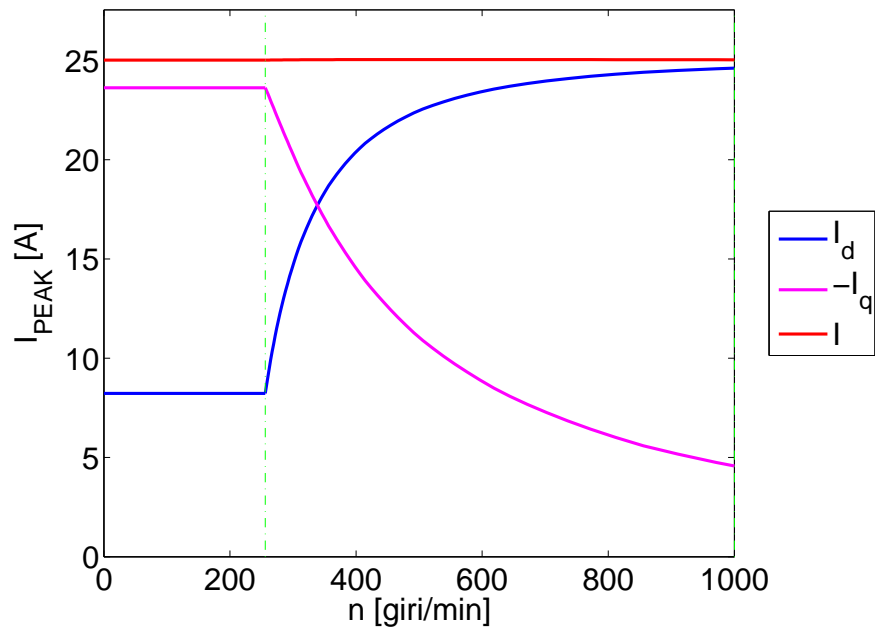


Figura 10.16: corrente in funzione della velocità

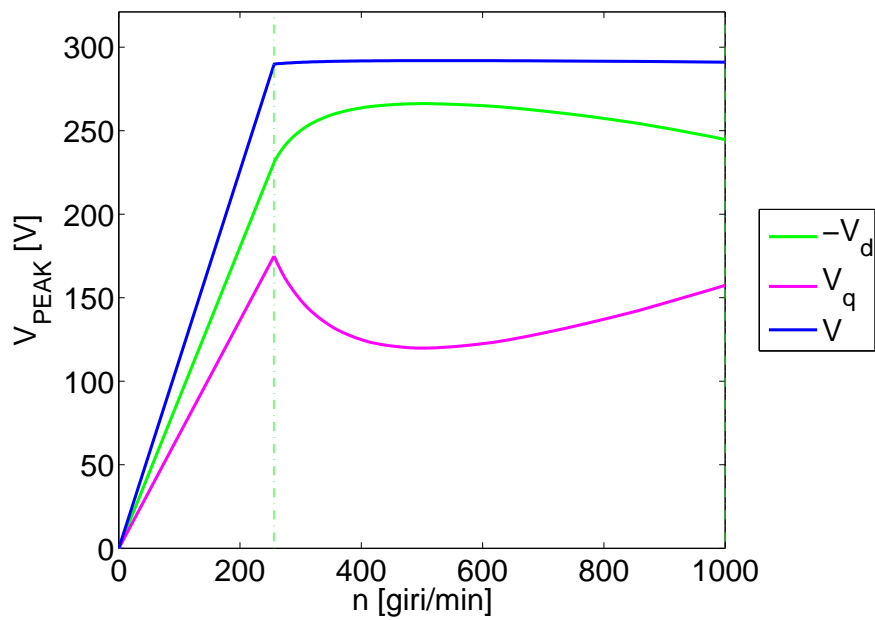


Figura 10.17: tensione in funzione della velocità

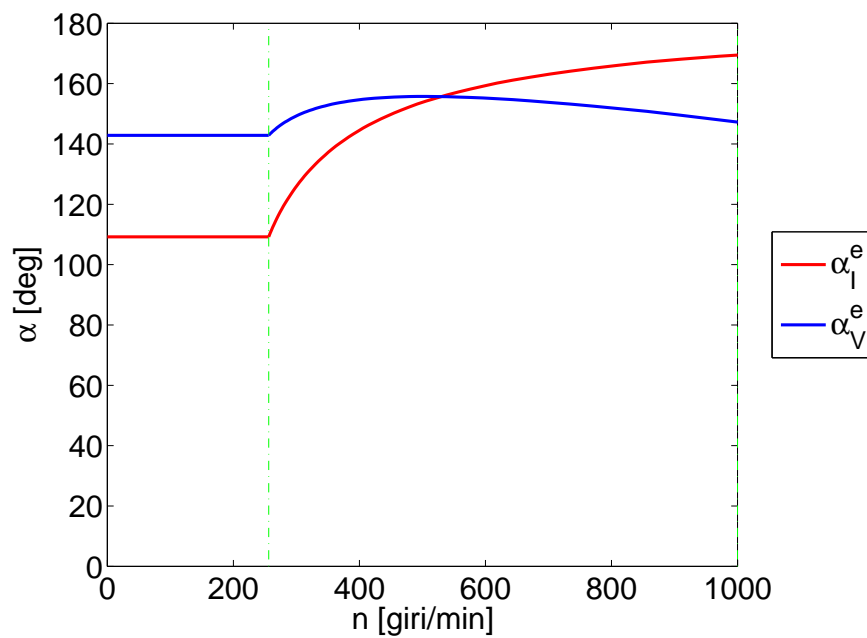


Figura 10.18: angoli in funzione della velocità

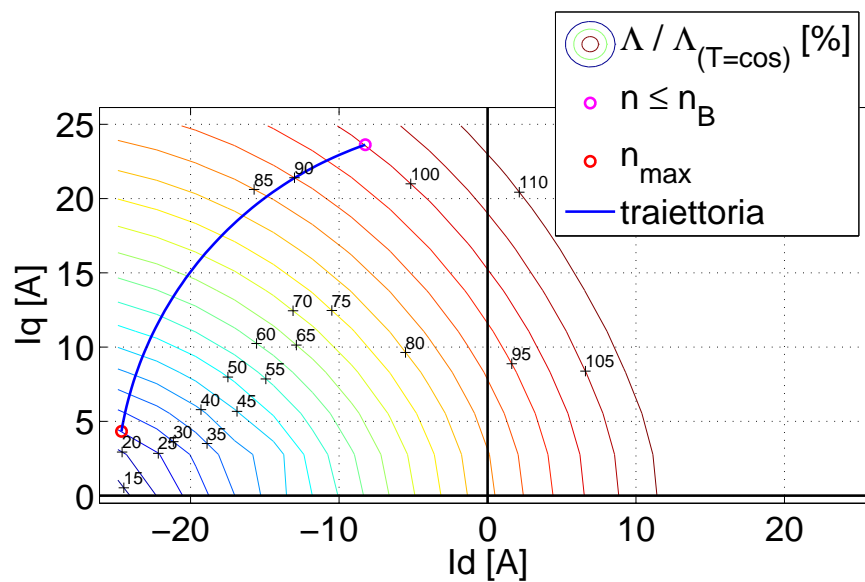


Figura 10.19: traiettoria nel flusso

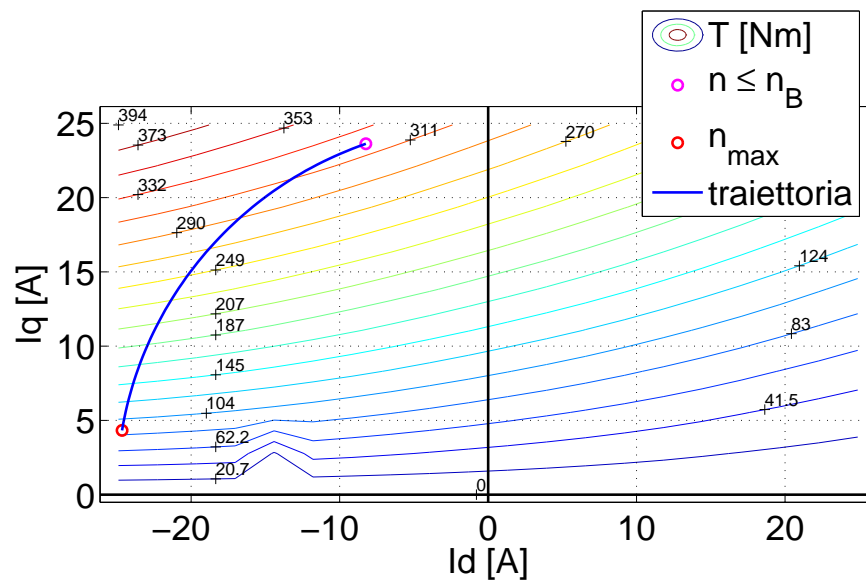


Figura 10.20: traiettoria nella coppia

## 10.6. INDUZIONE A VUOTO

Le seguente immagine rappresenta l'induzione a vuoto con l'asse diretto ed in quadratura dello statore e del rotore allineati:

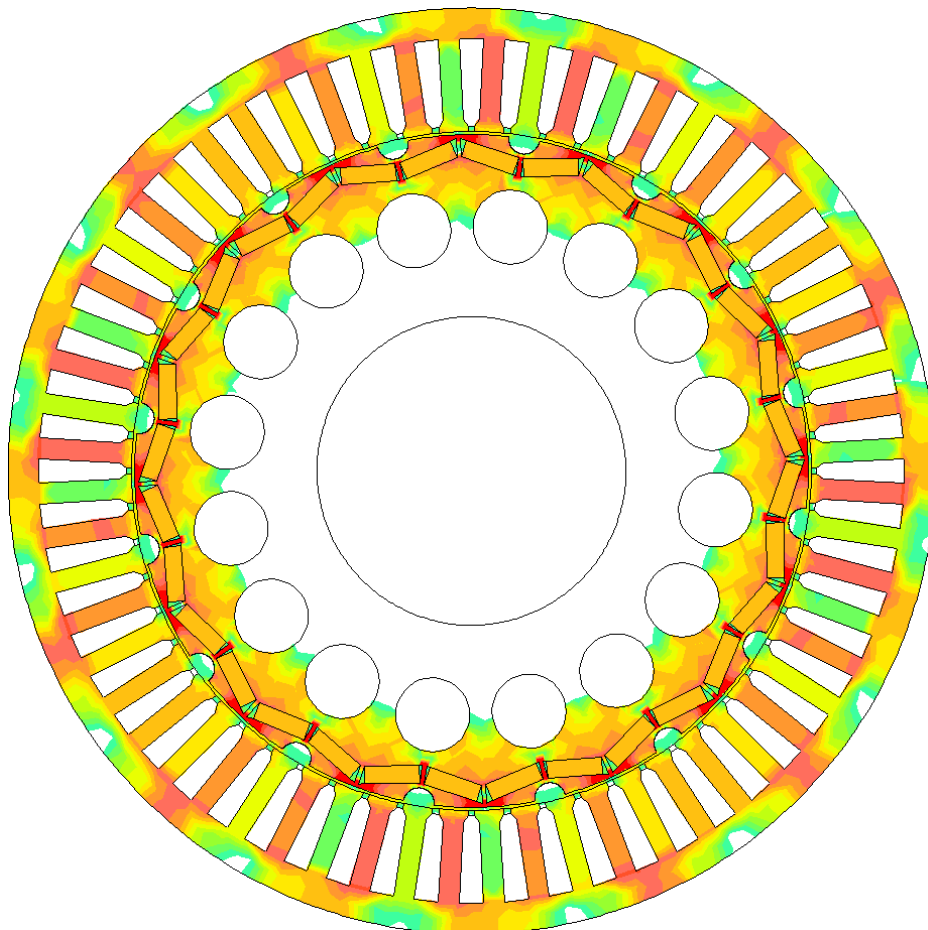
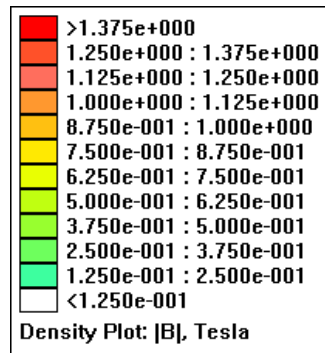


Figura 10.21: induzione IPM modificato

Lo zoom dell'induzione un polo:

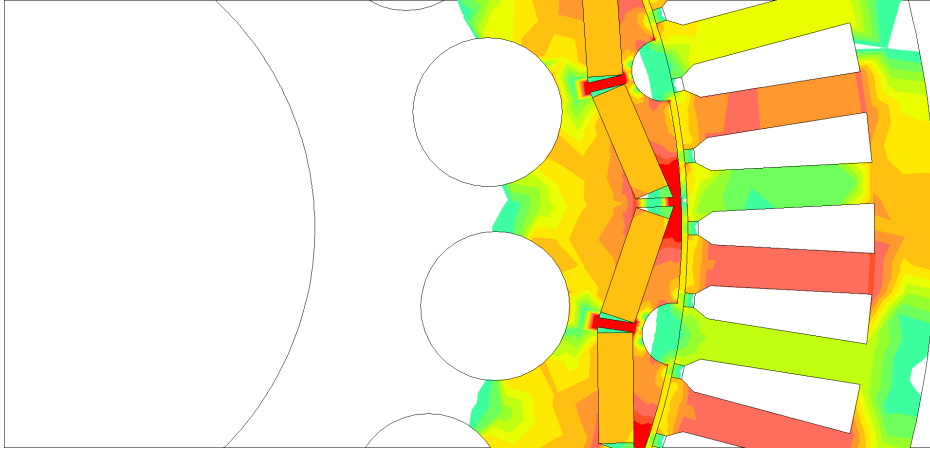


Figura 10.22: induzione polo IPM modificato

---

---

## CAPITOLO 11

---

### ANALISI IPM MODIFICATO 2

Per aumentare la coppia, durante il deflussaggio si può, cambiare tipologia di disposizione dei magneti interni.

In questo capitolo si analizza questo tipo di IPM per raffronto con la macchina ottimizzata.

Dati del rotore (interno) :

- *lunghezza motore* :  $L_{stk} = 150 \text{ mm}$
- *diametro esterno (al traferro)* :  $D_{re} = 218 \text{ mm}$
- *diametro interno (albero)* :  $D_{ri} = 100 \text{ mm}$

Dati magnete interno :

- *spessore del magnete* :  $tm_i = 4 \text{ mm}$
- *diametro del magnete* :  $Dm_i = 188 \text{ mm}$
- *larghezza del canale in quadratura* :  $dcan_q i = 4 \text{ mm}$
- *larghezza del canale diretto* :  $dcan_d i = 1 \text{ mm}$
- *larghezza finale (traferro) della barriera* :  $dbar_i = tm_i \text{ mm}$
- *distanza finale della barriera dal traferro* :  $hbar_i = 0.5 \text{ mm}$

Dati magnete esterno :

- *spessore del magnete* :  $tm_e = 2 \text{ mm}$
- *diametro del magnete* :  $Dm_e = 203 \text{ mm}$
- *larghezza del canale in quadratura* :  $dcan_q e = 4 \text{ mm}$
- *larghezza del canale diretto* :  $dcan_d e = 0 \text{ mm}$
- *larghezza finale (traferro) della barriera* :  $dbar_e = tm_e \text{ mm}$
- *distanza finale della barriera dal traferro* :  $hbar_e = 0.5 \text{ mm}$

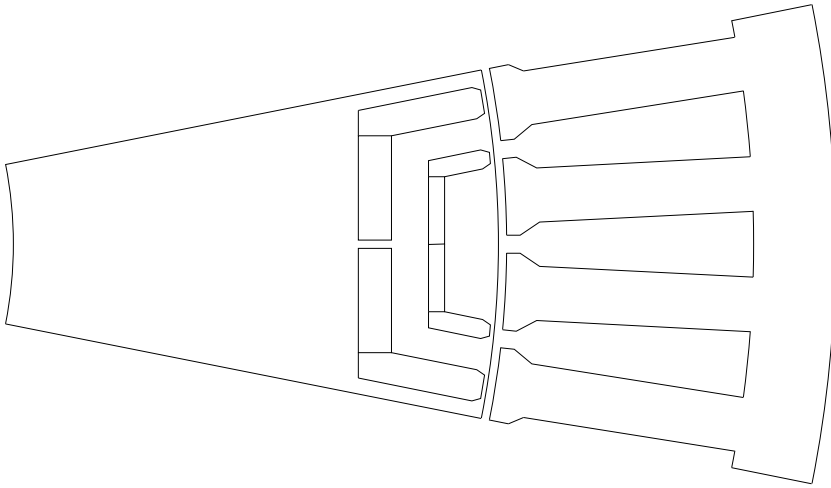


Figura 11.1: polo IPM modificato



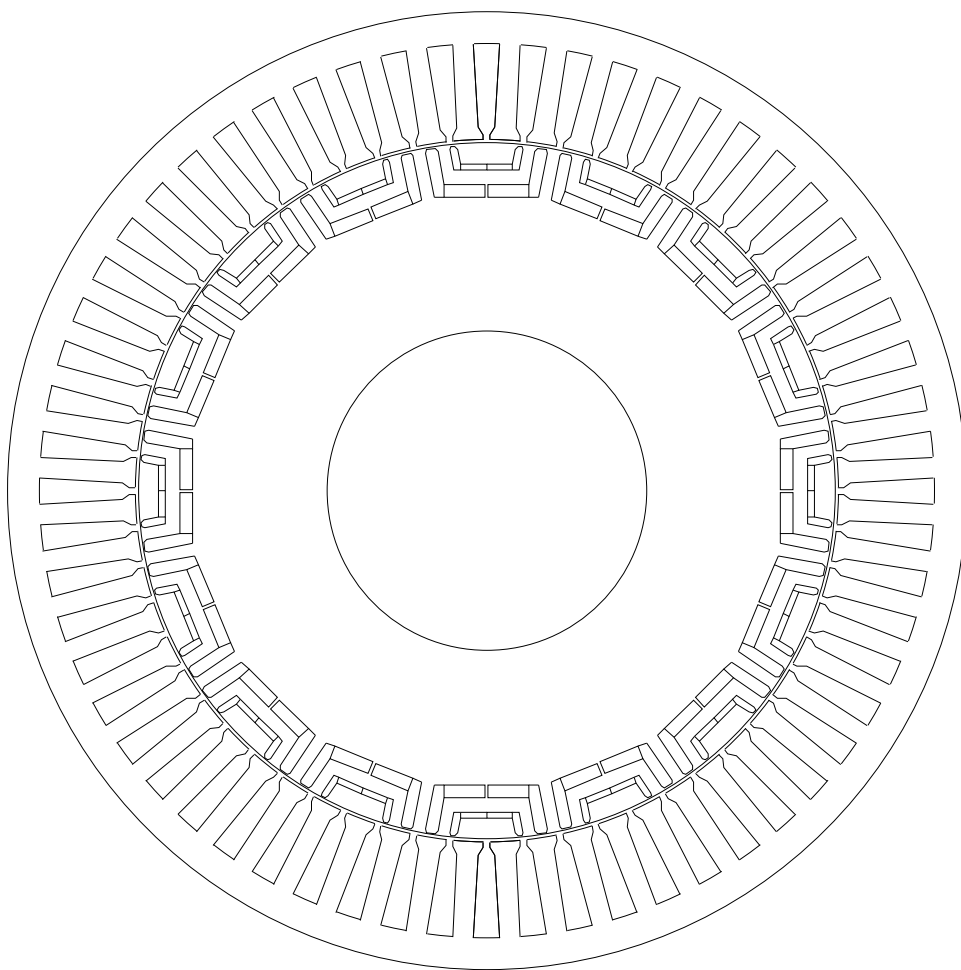


Figura 11.2: IPM modificato

## 11.1. MESH

La mesh dell' IPM modificato é la seguente:

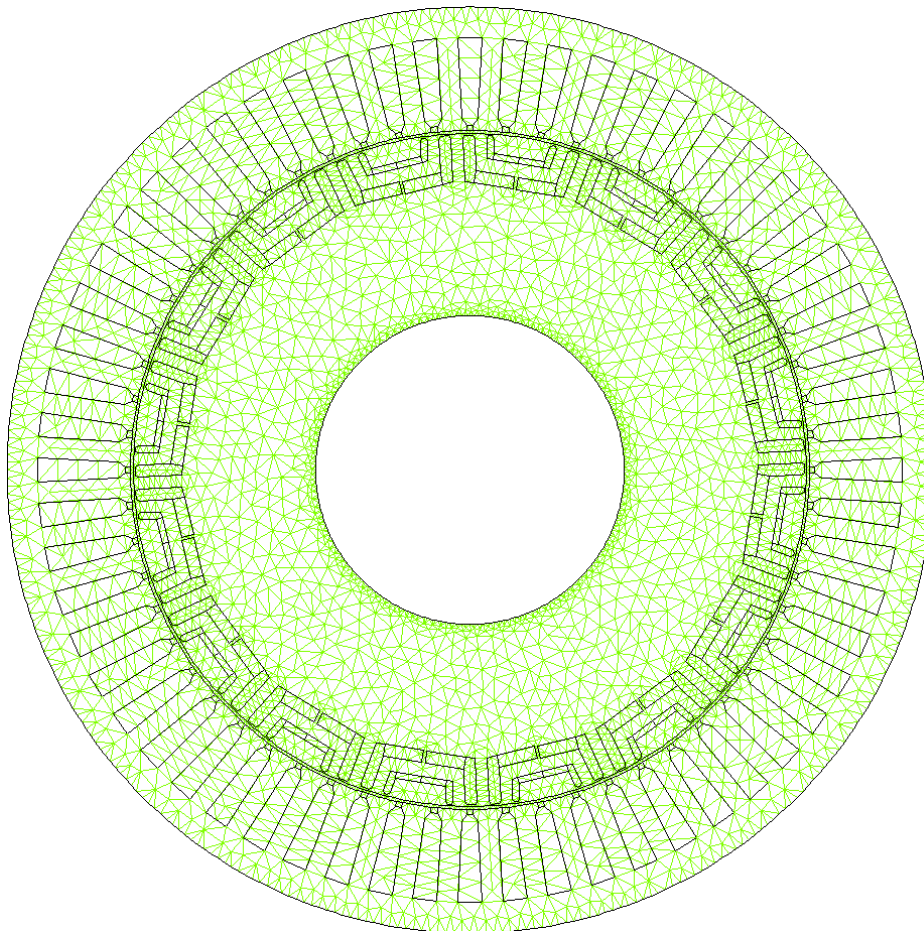
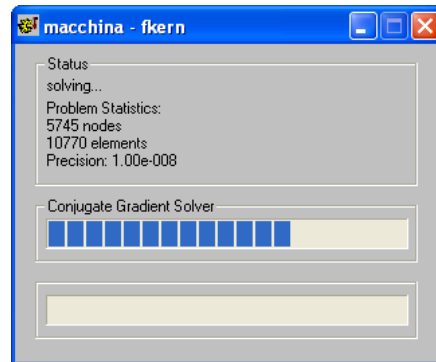


Figura 11.3: mesh IPM ottimizzato

Lo zoom della mesh un polo:

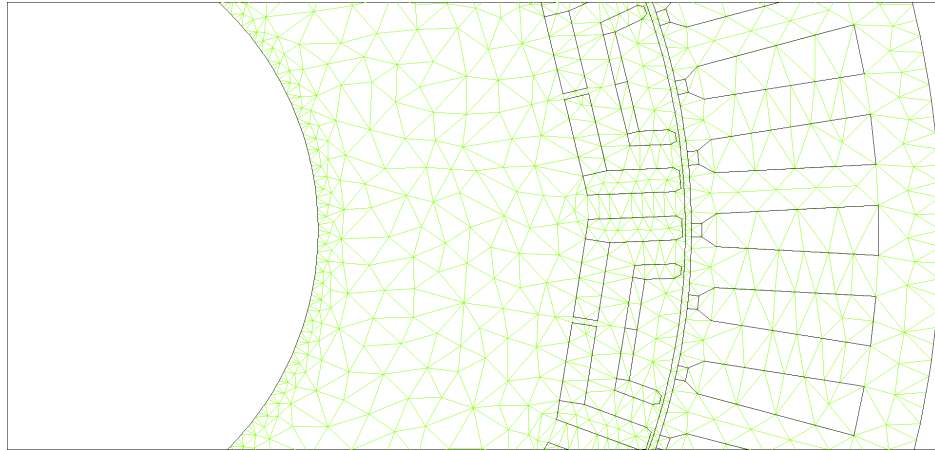


Figura 11.4: mesh polo IPM ottimizzato

Il tempo necessario per eseguire una simulazione é di circa trenta secondi.

## 11.2. PROVA A VUOTO

Le simulazioni sono state eseguite con:

- passo di 2 gradi elettrici
- da 0 a 720 gradi elettrici

Per il calcolo della f.e.m a vuoto si fa riferimento a:

- velocità base (200 rpm)
- frequenza di 26.6 Hz

Dalle simulazioni si ottengono :

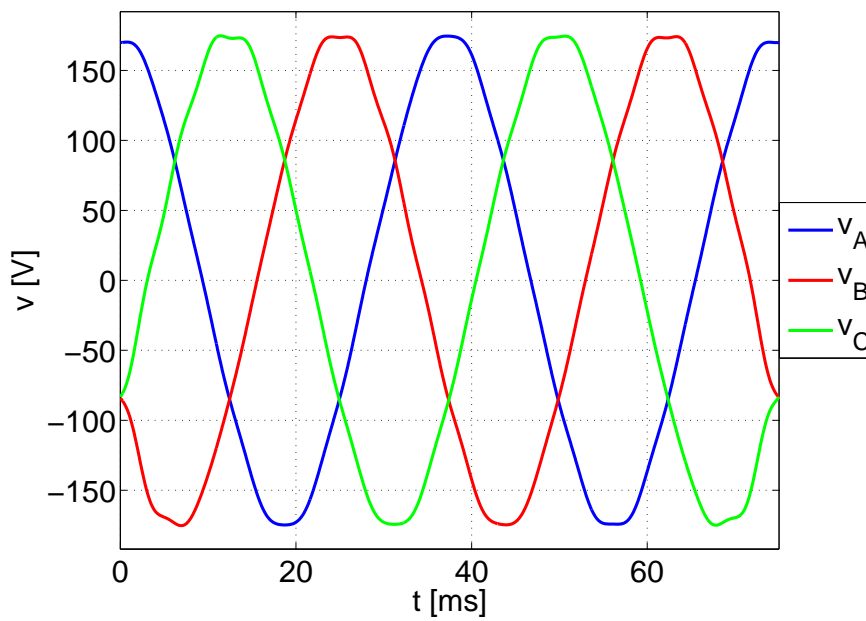


Figura 11.5: andamento temporale tensioni stellate

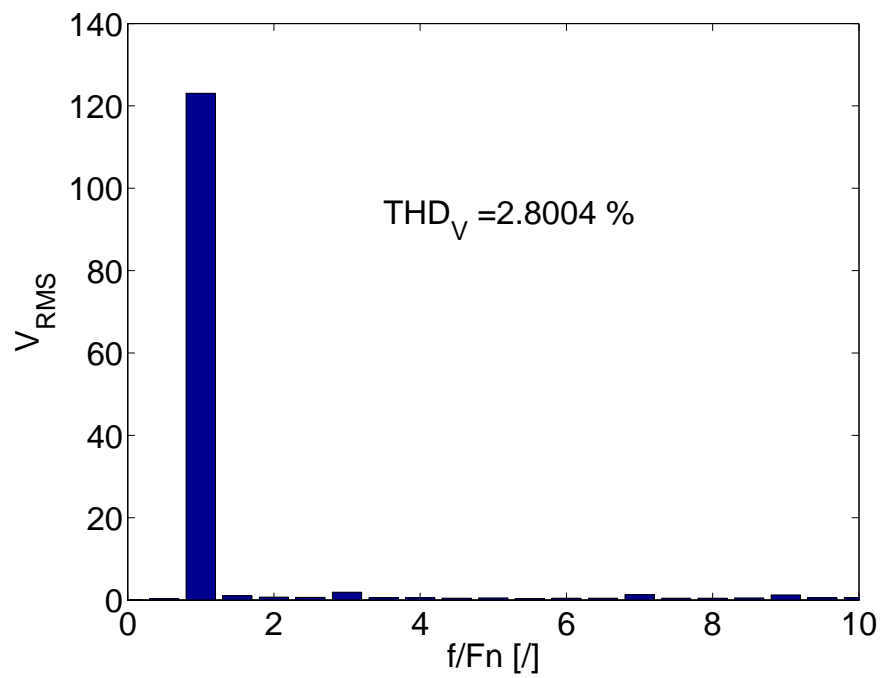


Figura 11.6: spettro medio tensioni stellate

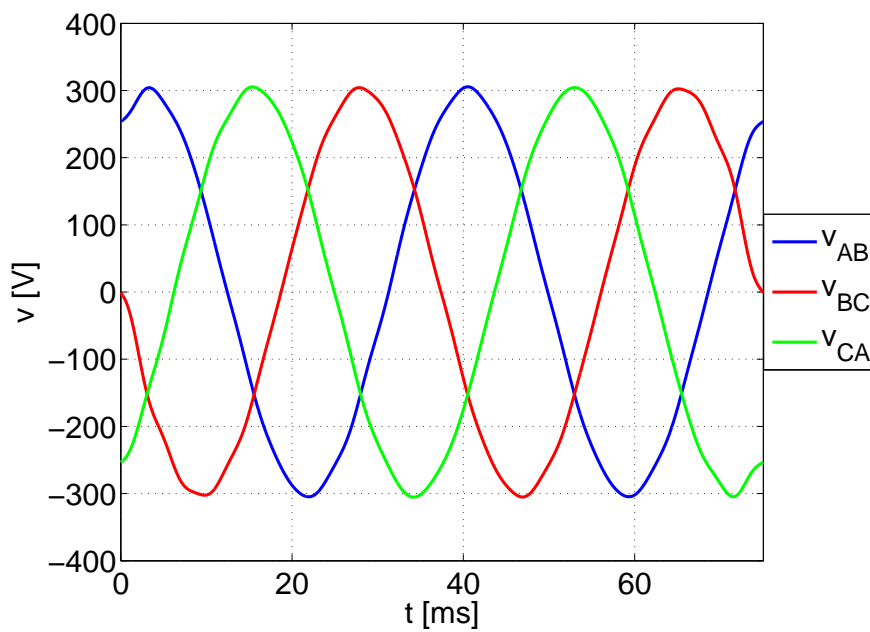


Figura 11.7: andamento temporale tensioni concatenate

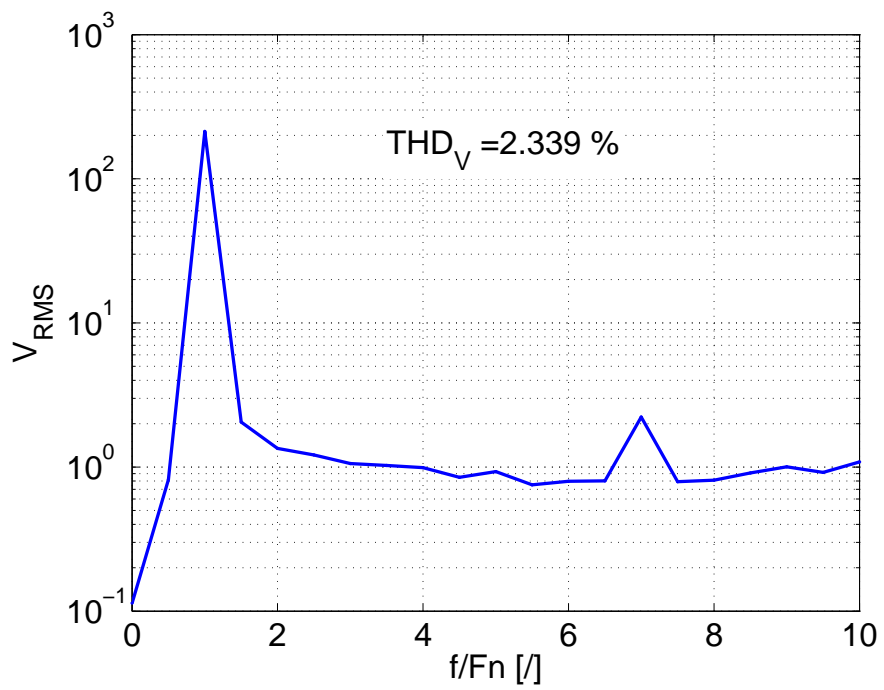


Figura 11.8: spettro medio tensioni concatenate

### 11.3. COGGING E SKEWING

Le simulazioni sono state eseguite:

- a vuoto
- passo di 0.06 gradi elettrici
- da 0 a 6 gradi elettrici (un passo di cava)

La coppia su un passo di cava (di statore) é la seguente:

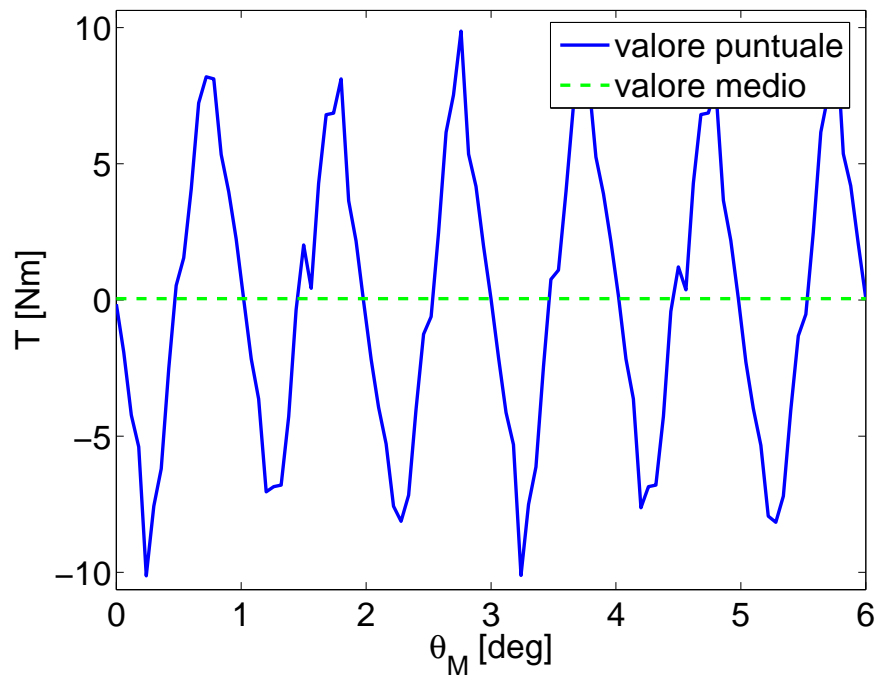


Figura 11.9: coppia su un passo di cava

Le condizioni dello skewing sono:

- angolo di skewing 1/4 del passo di cava (1,5 gradi elettrici)
- skewing discretizzato in cinque parti (magneti lunghi 30 mm)
- nel calcolo delle coppie di cogging non si é considerata l'eventuale componente continua

Per visualizzare meglio l'effetto dello skewing si graficano:

- la coppia senza skewing
- la coppia con skewing discreto
- la coppia con skewing continuo

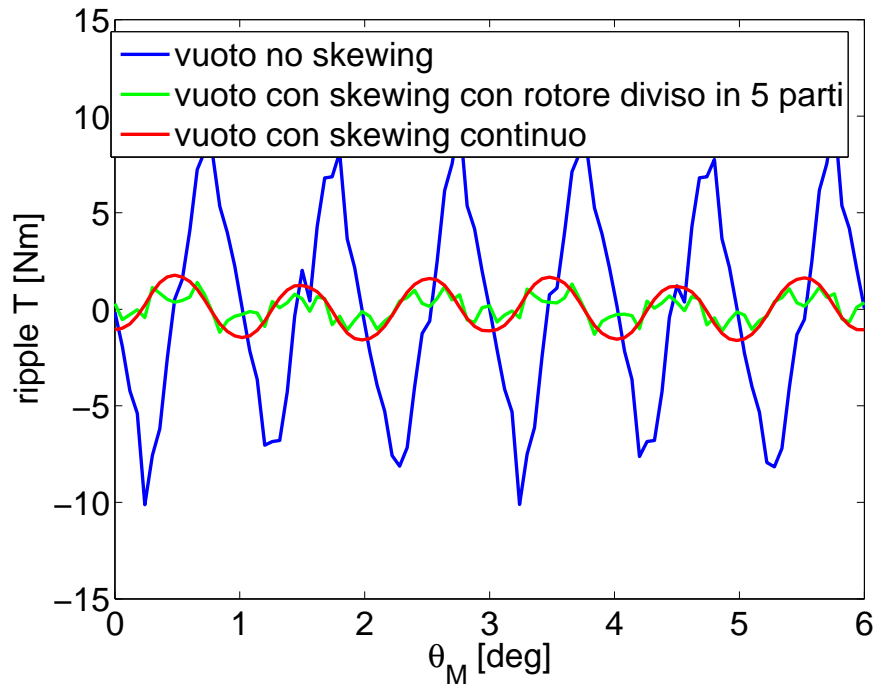


Figura 11.10: coppia



## 11.4. FLUSSI ED INDUTTANZE

Per non eseguire una simulazione specifica per il calcolo dei flussi concatenati (e delle relative induttanze) si utilizza la mappatura della coppia. Simulazioni eseguite:

- 20 simulazioni della corrente diretta da meno corrente nominale a piú corrente nominale
- 10 simulazioni della corrente in quadratura a zero alla corrente nominale

Il valore dei flussi concatenati al variare della corrente diretta ed in quadratura:

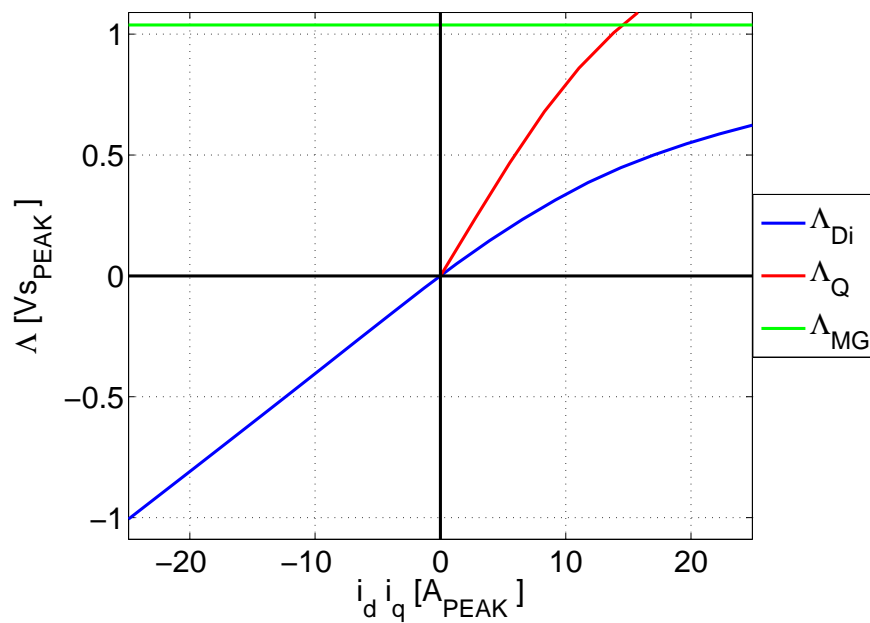


Figura 11.11: flussi

Dal flusso concatenato diretto ed in quadratura si ricava:

- l'induttanza diretta apparente e differenziale
- l'induttanza in quadratura apparente e differenziale

Valore delle induttanze al variare della corrente:

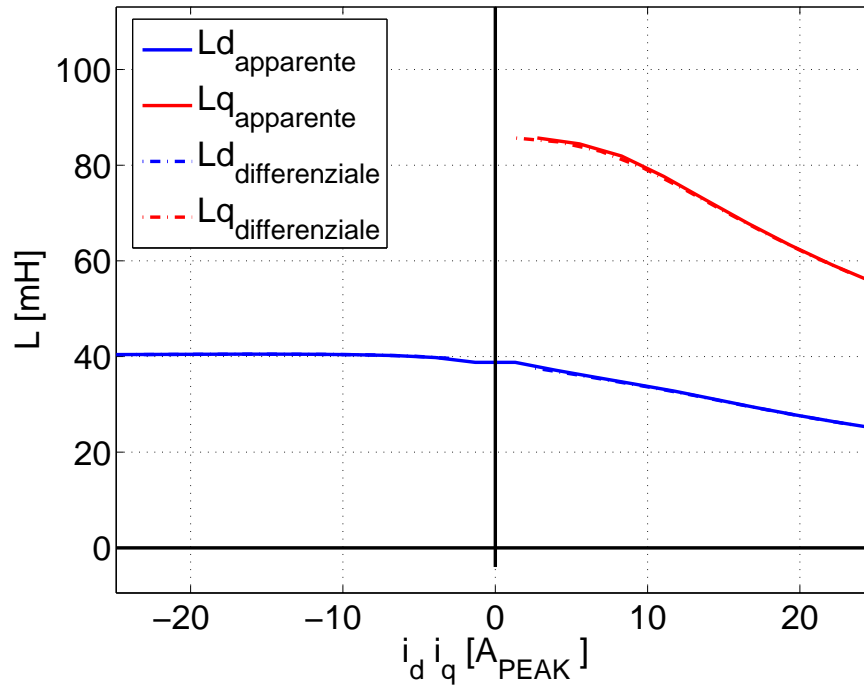


Figura 11.12: induttanze

per il calcolo delle induttanze apparenti si é usata la seguente formula:

$$I_{app_n} = \frac{I_n + I_{n+1}}{2} \quad (11.1)$$

$$L_{app_n} = \frac{\Lambda_n - \Lambda_{n+1}}{I_n - I_{n+1}} \quad (11.2)$$

cioé la derivata centrata nel valore medio della variazione della corrente rispetto la variazione del flusso concatenato.

## 11.5. VARIAZIONE DELLA VELOCITÀ

Dalle simulazioni F.E.M.M. eseguite si é ricavata la mappatura delle grandezze tipiche della macchina (coppia, flussi, induzioni, ...)in funzione della corrente diretta ed in quadratura.

Successivamente si sono rielaborati i risultati (dalla teoria sugli azionamenti) per determinare i seguenti parametri elettrici e meccanici tipici della regolazione della velocità.

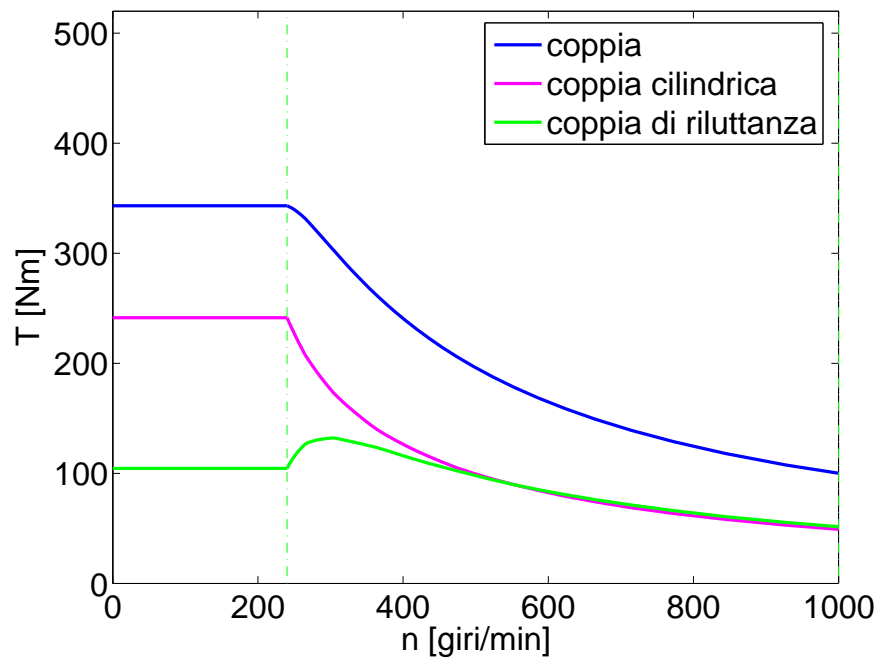


Figura 11.13: coppia in funzione della velocità

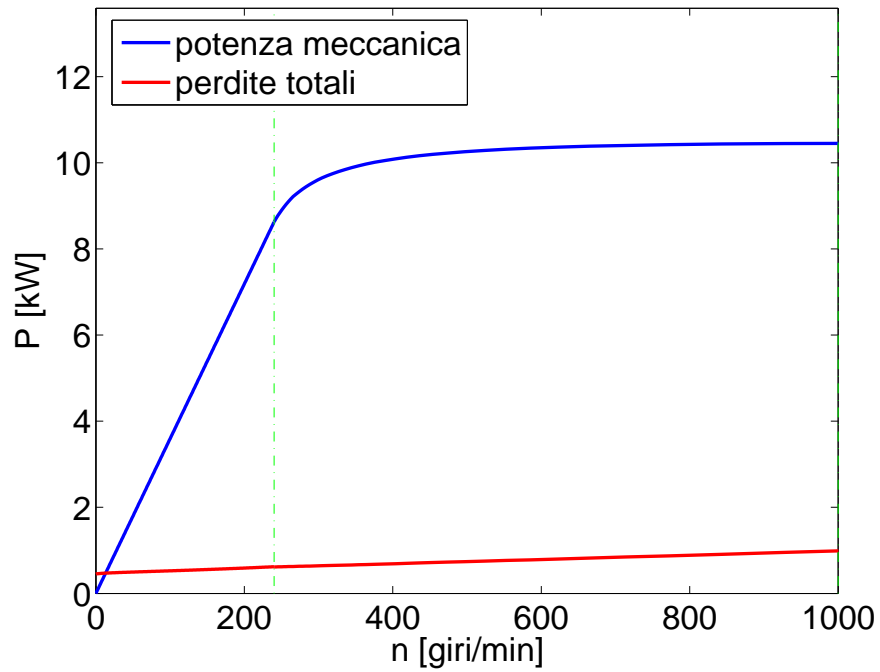


Figura 11.14: potenza in funzione della velocità

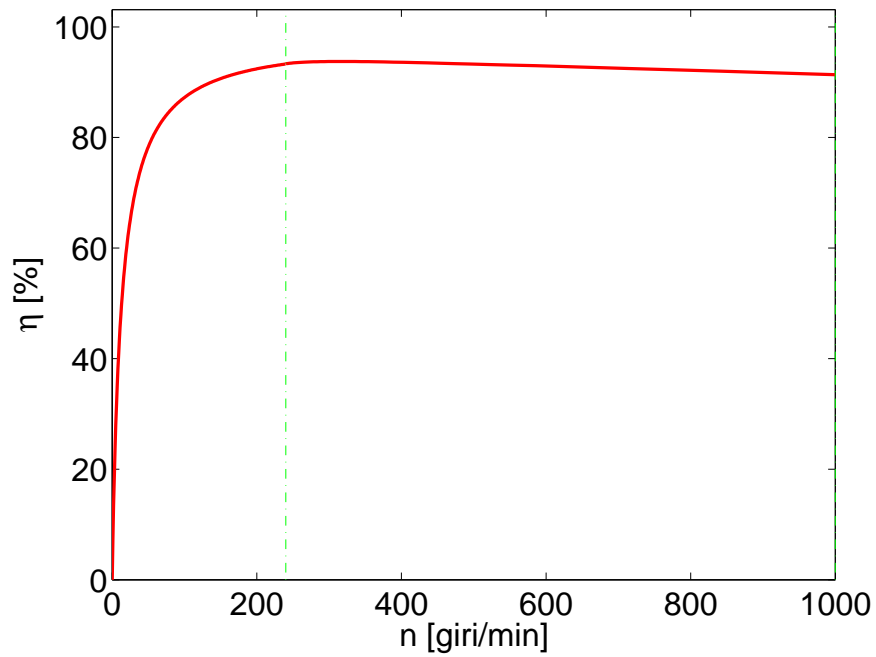


Figura 11.15: rendimento in funzione della velocità

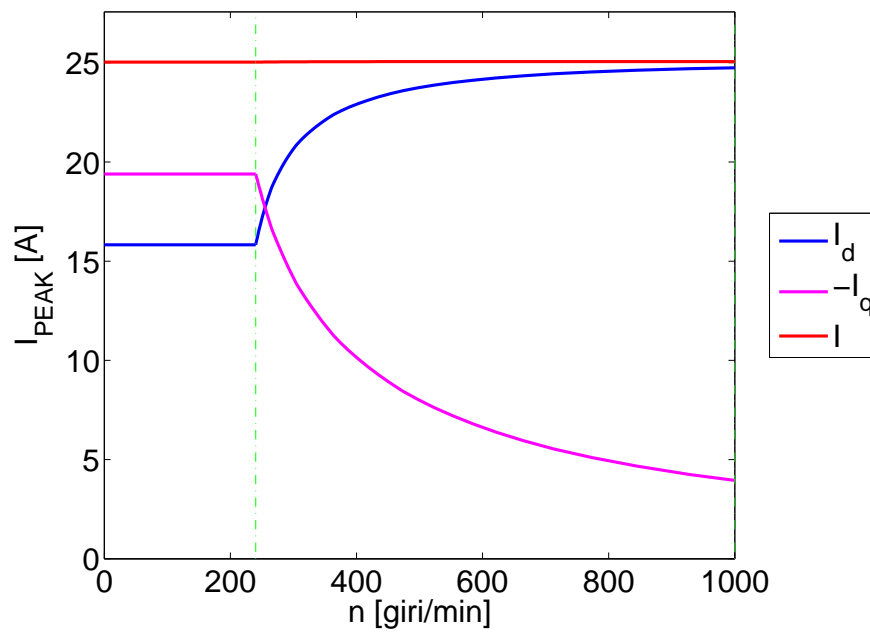


Figura 11.16: corrente in funzione della velocità

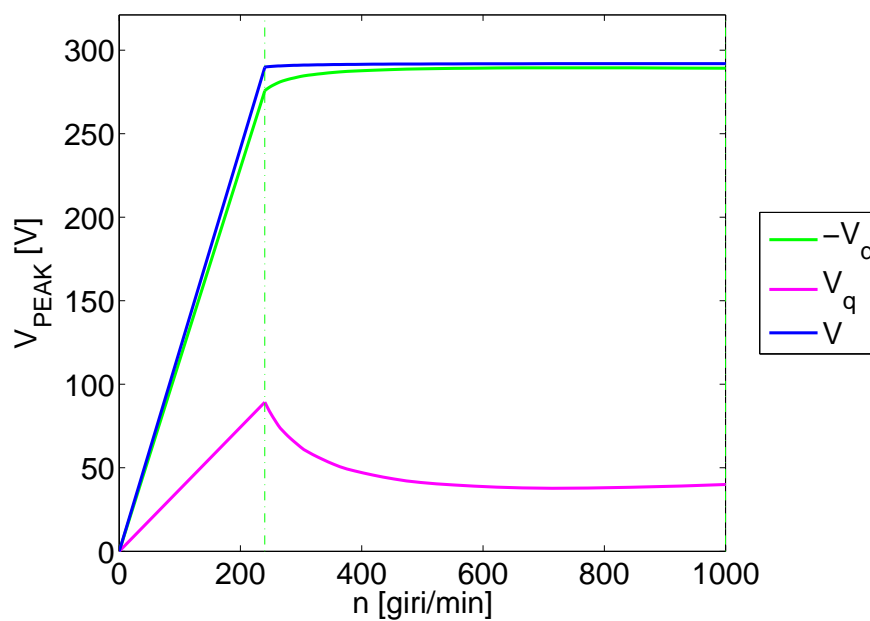


Figura 11.17: tensione in funzione della velocità

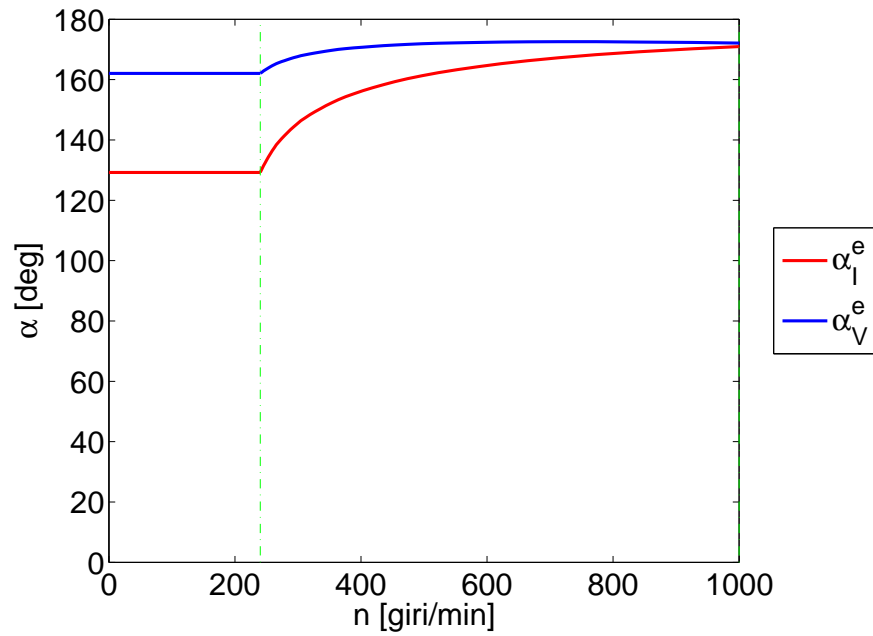


Figura 11.18: angoli in funzione della velocità

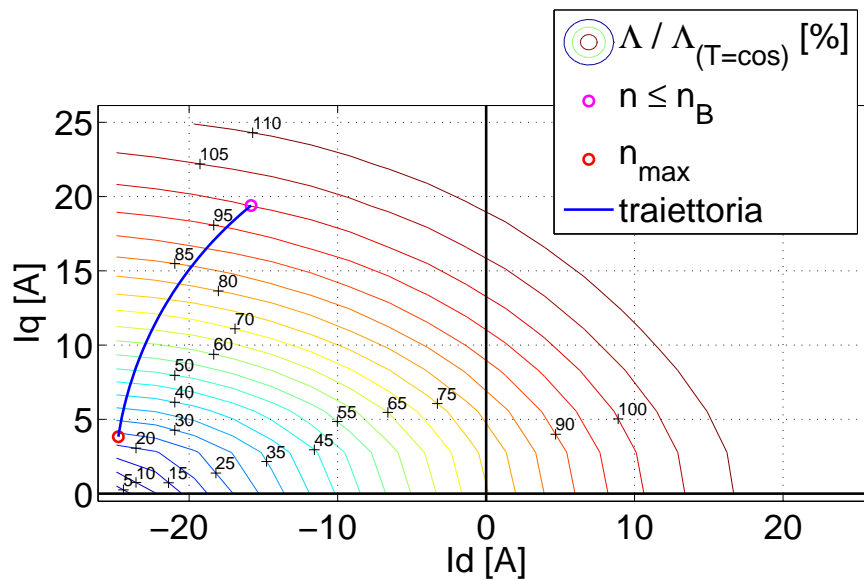


Figura 11.19: traiettoria nel flusso

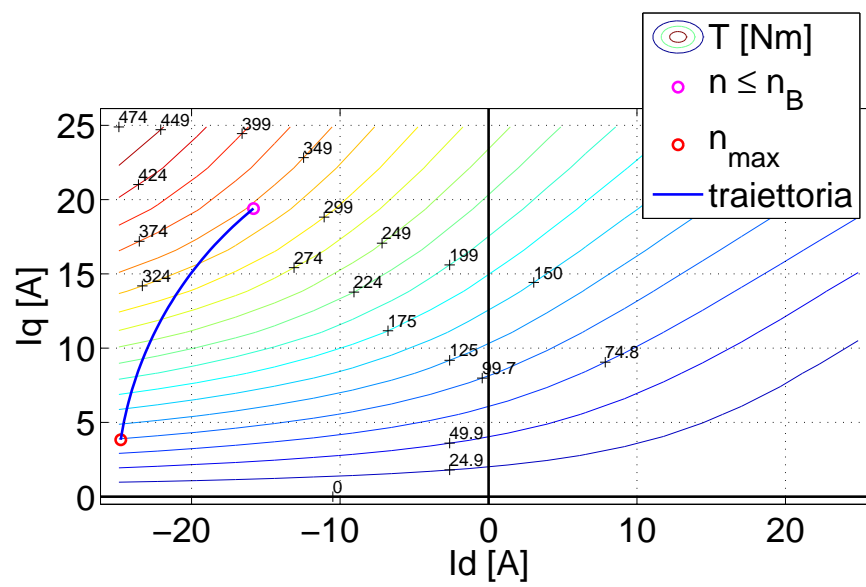


Figura 11.20: traiettoria nella coppia

## 11.6. INDUZIONE A VUOTO

Le seguente immagine rappresenta l'induzione a vuoto con l'asse diretto ed in quadratura dello statore e del rotore allineati:

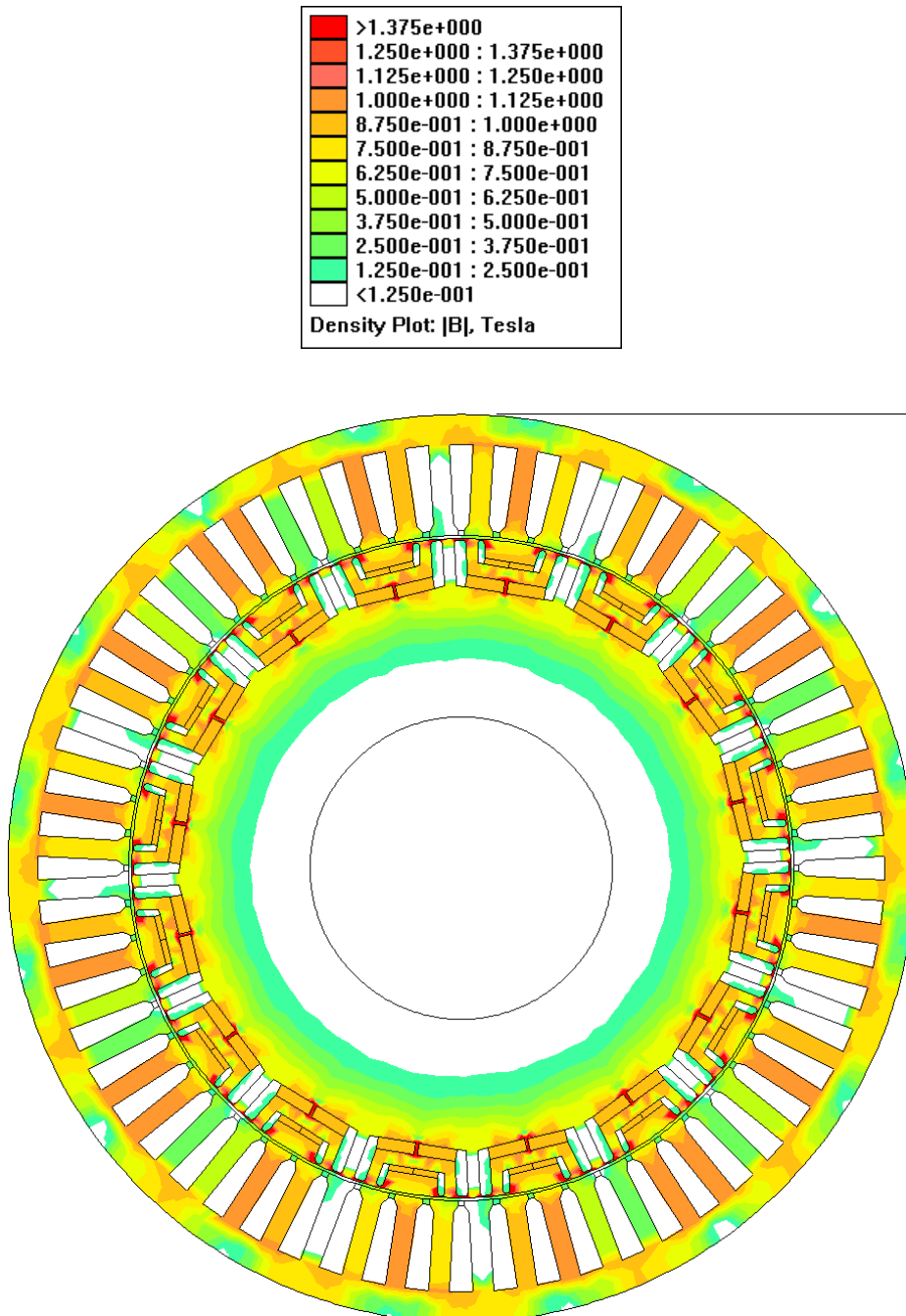


Figura 11.21: induzione IPM modificato



Lo zoom dell'induzione un polo:

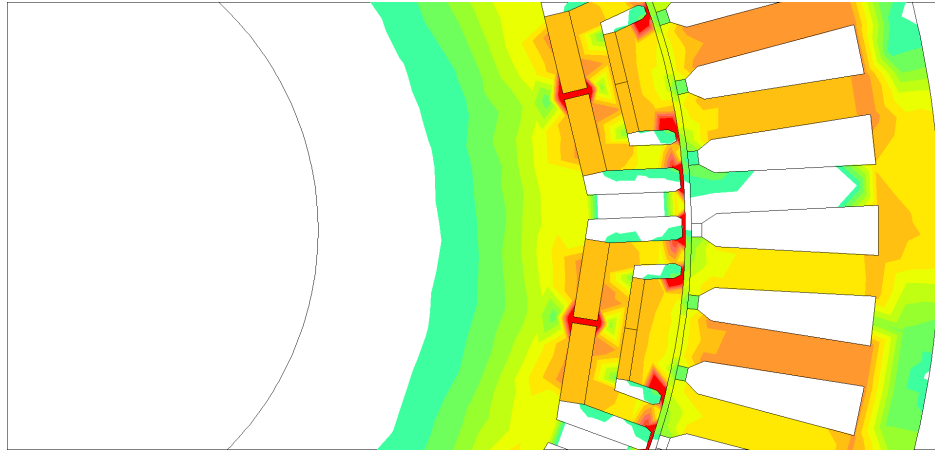


Figura 11.22: induzione polo IPM modificato



---

---

## CAPITOLO 12

---

# CONCLUSIONI

La macchina ottimizzata ha le seguenti proprietà rispetto alla macchina di partenza:

- risparmio dell' 8,3% rispetto alla macchina di partenza (con i costi scelti per i materiali) che corrisponde a 18,2 € su 220,7 €
- una diminuzione della tensione di alimentazione
- minor coppia di cogging
- analoga caratteristica meccanica con una miglioramento per elevato deflusso
- rendimento pressoché invariato al variare della velocità
- poco adatta a spunti di corrente

La macchina però non presenta solo benefici, ciò deriva dal fatto che l'ottimizzazione è mono-obiettivo.

Questa affermazione può avere due spiegazioni:

1. fisica  
l'effetto della diminuzione del volume del magnete comporta inevitabilmente una diminuzione di alcune prestazioni della macchina.
2. tramite ottimo di Pareto  
l'ottimo in un sistema multi-obiettivo è un compromesso tra i vari obiettivi (pesati)

Il metodo utilizzato presenta è mono-obiettivo, altri obiettivi (fem, corrente minima di smagnetizzazione, ...) non sono stati analizzati e sono svincolati dalla ricerca.

Si è dovuto usare questo metodo perché una ottimizzazione multi-obiettivo va a soluzione (non stocastica) in tempi non accettabili (1 anno) dato il tempo di durata di ogni singola simulazione.

L'IPM di partenza deriva da un SPM già esistente.  
Successivamente seguito si sono confrontati alcuni parametri dell'SPM e dell'IPM ottimizzato.

Si sono studiate anche delle varianti dell'IPM di partenza per migliorare la caratteristica meccanica nel deflussaggio.

## 12.1. FEM A VUOTO

Tensione concatenata delle due macchine a vuoto(fase A):

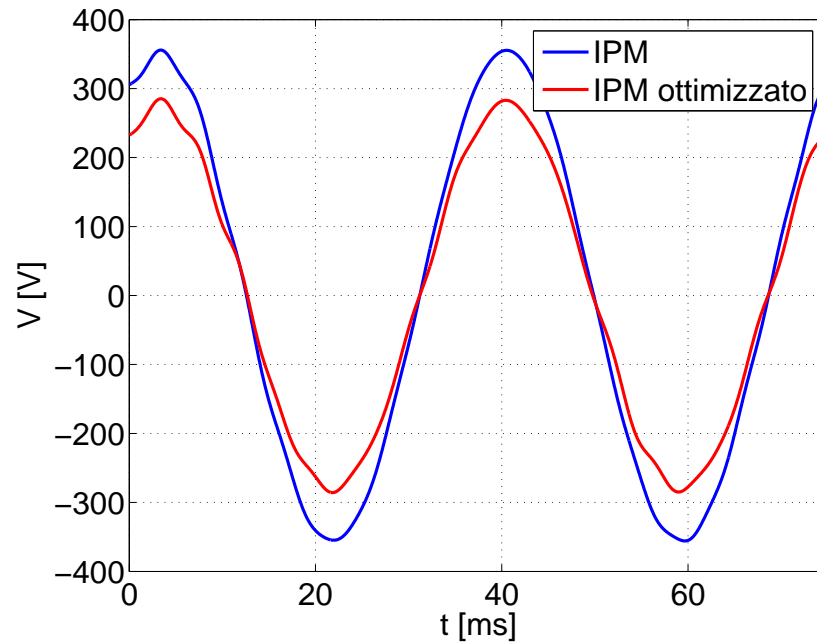


Figura 12.1: cogging a vuoto con skewing continuo

<i>macchina</i>	$V_{eff}$ [V]	THD [%]
<i>di partenza</i>	198	2,34
<i>ottimizzata</i>	139,5	3,32

La macchina ottimizzata presenta fem minore e un THD di poco maggiore rispetto alla macchina iniziale

## 12.2. COGGING E SKEWING

Coppia di cogging a vuoto delle due macchine:

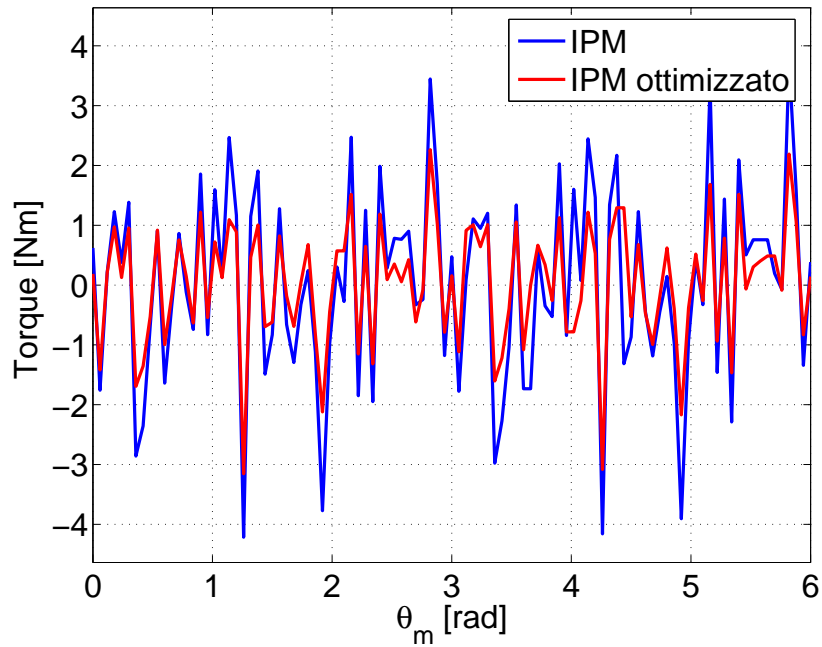


Figura 12.2: cogging a vuoto

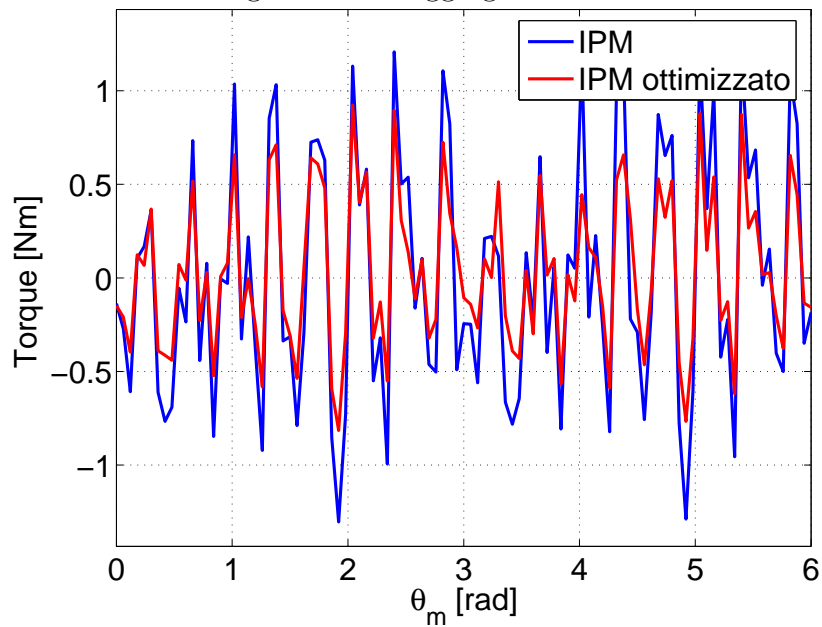


Figura 12.3: cogging a vuoto con skewing discreto

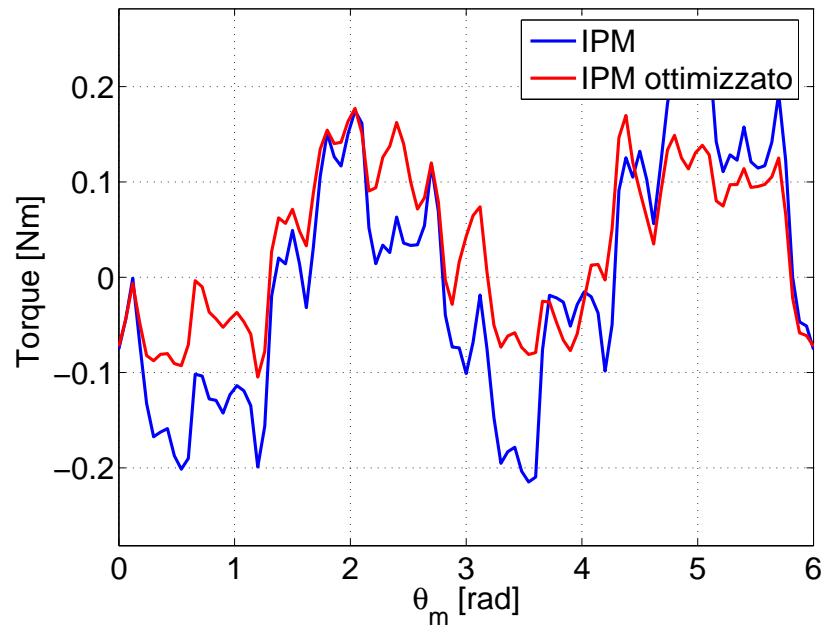


Figura 12.4: cogging a vuoto con skewing continuo

La coppia di cogging della macchina ottimizzata é sempre minore della coppia di cogging della macchina di partenza anche se si prevede uno skewing

### 12.3. EFFETTI SULLA COPPIA

Si osserva la differenza tra le caratteristiche meccaniche (coppia velocità) delle due macchine:

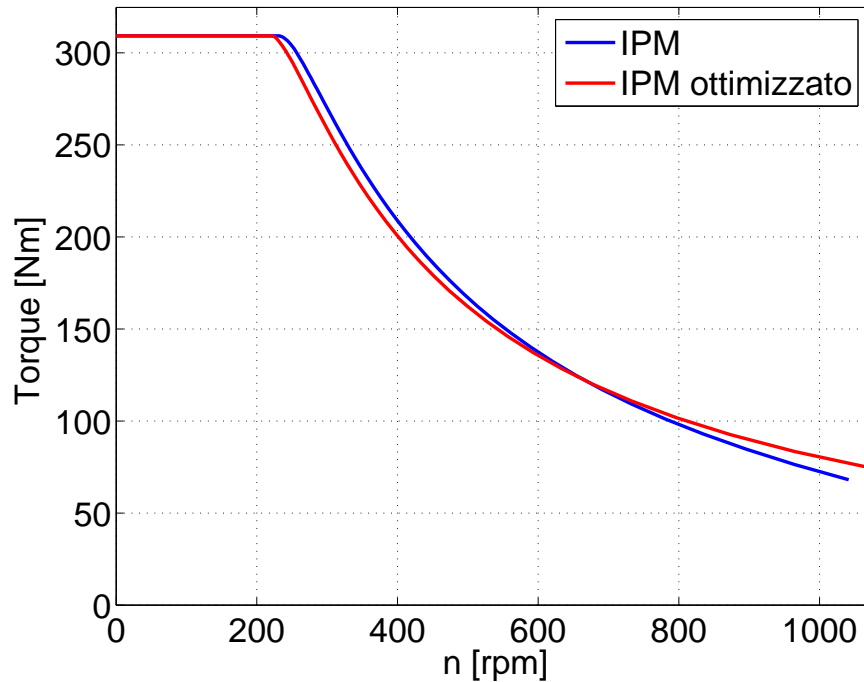


Figura 12.5: caratteristica meccanica

si nota :

- nella zona a flusso costante la coppia rimane invariata (vincolo di ottimizzazione)
- dalla velocità base a circa 625 rpm la coppia è leggermente inferiore
- oltre 625 rpm la coppia è leggermente superiore

Questa differenza si nota maggiormente se si scompone la coppia, in coppia cilindrica (magnete permanente) ed in coppia di riluttanza (anisotropia asse diretto ed in quadratura):



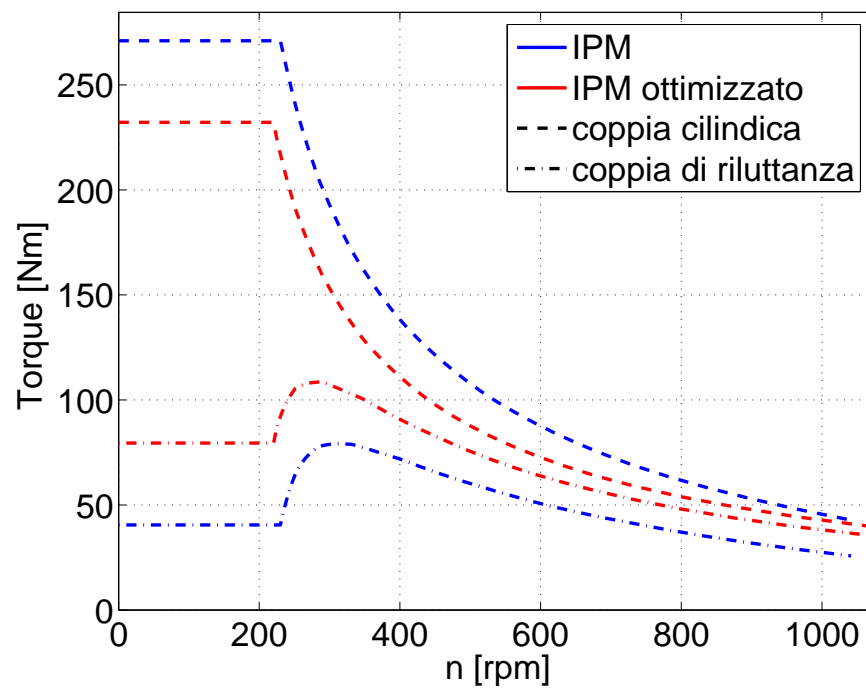


Figura 12.6: caratteristica meccanica

La coppia cilindrica é sempre minore perché il flusso concatenato del magnete é diminuito.

La coppia di riluttanza é sempre maggiore per garantire la coppia preimpostata in zona a flusso costante.

L'ottimizzatore ha scelto di aumentare la dissimmetria del circuito magnetico anziché aumentare la lunghezza della macchina.

## 12.4. EFFETTI SUL RENDIMENTO

Il confronto tra i rendimenti é il seguente:

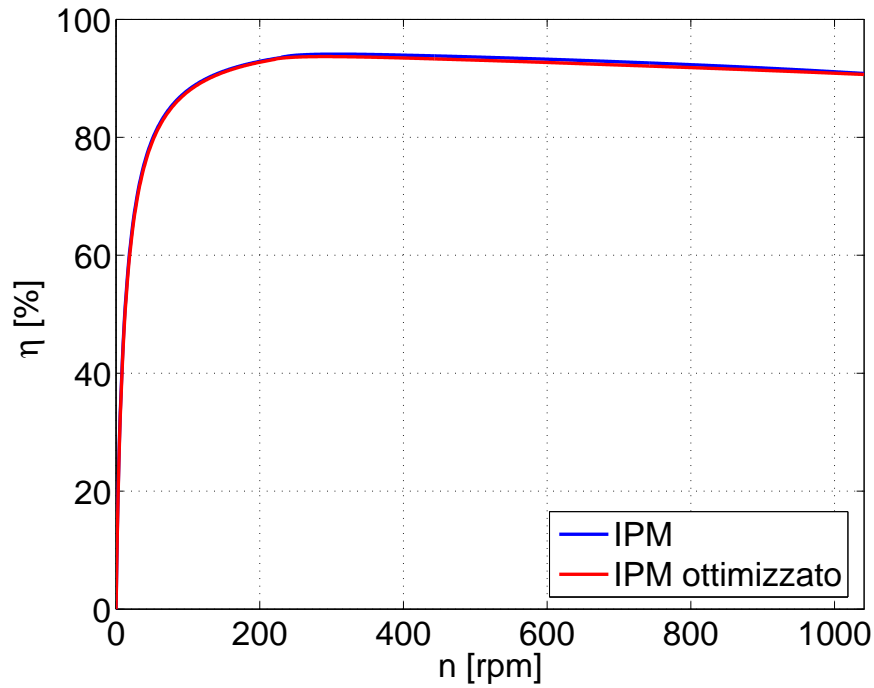


Figura 12.7: caratteristica meccanica

il rendimento della nuova configurazione é di poco inferiore alla configurazione di partenza, cio é dovuto alla maggior lunghezza (circa 4%) della macchina. Possiamo affermare che il rendimento é praticamente rimasto invariato.

## 12.5. CORRENTE MINIMA DI SMAGNETIZZAZIONE

La differenza tra la corrente minima di smagnetizzazione:

@ macchina di partenza : 35,2 A

@ macchina ottimizzata : 22,5 A

Tipicamente le macchine standard hanno una corrente minima di smagnetizzazione di circa 4-5 volte la corrente nominale.

La macchina ottimizzata non é adatta a spunti di corrente (come la macchina di partenza).

## 12.6. CONFRONTO TRA SPM E IPM OTTIMIZZATO

L'SPM ha una buona corrente di minima smagnetizzazione (circa 5,9 In), basso costo di realizzazione, le coppie di cogging di valore contenuto e rendimento discreto (circa 92%).

Per tale macchina non si é sviluppata una ottimizzazione perché presenta un piccolo campo di deflussaggio (circa 2).

Anche se si applicasse qualche variante non si arriverebbe ad ottenere un elevato campo di deflussaggio paragonabile a quello dell'IPM.

Confronto tra le caratteristiche meccaniche:

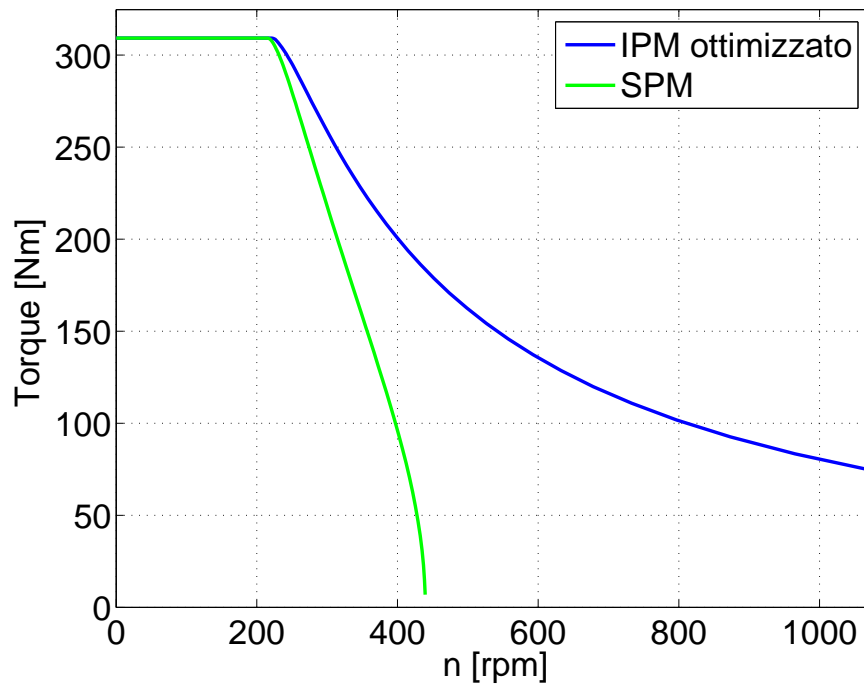


Figura 12.8: caratteristica meccanica

## 12.7. CONFRONTO IPM DI PARTENZA CON ALCUNE VARIAZIONI

Dal confronto tra IPM1 e l'IPM di partenza si nota che, a parità di costo la modifica presenta una maggiore coppia nella zona di deflussaggio; ciò é dovuto ad una maggiore coppia di riluttanza.

Caratteristiche meccaniche:

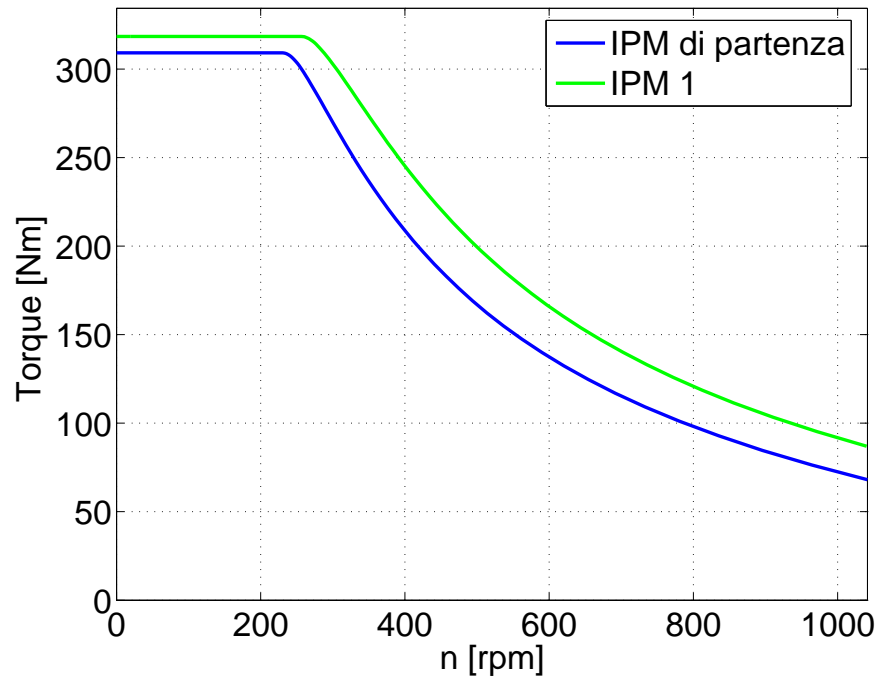


Figura 12.9: caratteristica meccanica

Se si applicasse tale modifica sull'IPM ottimizzato si avrebbe una variazione di coppia di riluttanza minore.

IPM2 é la configurazione con la migliore caratteristica meccanica:

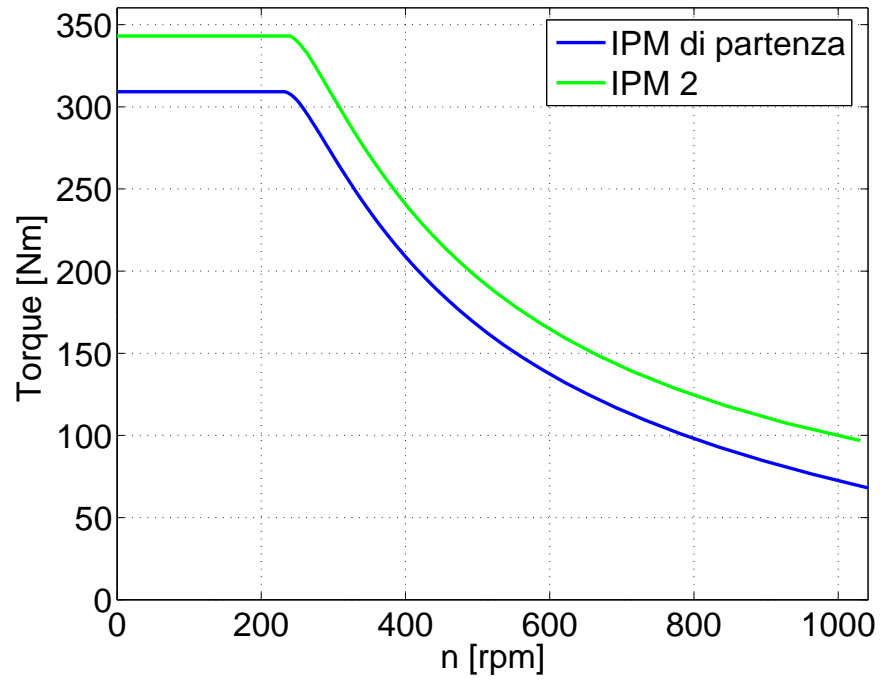


Figura 12.10: caratteristica meccanica

Anche tale modifica non viene presa in considerazione per l'elevato costo.

---

---

## CAPITOLO 13

---

# BIBLIOGRAFIA

Testi ed appunti utilizzati per la tesi di laurea:

@ METODO DI PROGETTAZIONE DELLE MACCHINE ELETTRICHE

di Bianchi Nicola e Bolognani Silverio

@ CALCOLO DELLE MACCHINE ELETTRICHE COL METODO AGLI ELEMENTI FINITI

di Nicola Bianchi

@ APPUNTI DEL CORSO DI AZIONAMENTI ELETTRICI(capitolo 6)

di Silverio Bolognani

@ UTILIZZO DEI LUA SCRIPT

di Nicola Bianchi e Michele Dai Pré