



# **Politecnico di Torino**

## **Dipartimento di Energia**

*Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica*

*Tesi di Laurea Magistrale*

### **Sviluppo di plastomagneti per la realizzazione di un motore a riluttanza assistito**

***Relatore***

*Prof. Luca Ferraris*

***Correlatori***

*Ing. Emir Pošković*

*Ing. Fausto Franchini*

*Prof. Nicola Bianchi*

***Candidato***

*Fabrizio Michele Maniscalco*

*Matricola 218709*

*A.A. 2018/2019*

# Indice

1. Introduzione .....	1
2. Synchronous Reluctance Motor (SynchRel).....	3
2.1. Coppia meccanica del SynchRel .....	3
2.2. Modello elettromeccanico del SynchRel.....	4
2.3. Geometrie .....	6
2.4. Comportamento magnetico saturato del SynchRel .....	9
2.5. Luogo di potenza massima in deflussaggio.....	11
2.6. Considerazioni.....	14
Vantaggi .....	15
Svantaggi.....	15
3. Synchronous reluctance motor assisted by permanent magnet (PMA <sub>s</sub> R).....	16
3.1. Descrizione del PMA <sub>s</sub> R .....	16
3.2. Non idealità .....	19
3.2.1. Variazione della posizione dell'MTPV .....	19
3.2.2. Variazione di $\lambda_m$ con la temperatura .....	21
3.2.3. Variazione del rapporto $\lambda_{q0}\lambda_{d0}$ .....	21
3.3. Funzionamento a basso carico e alta velocità .....	21
3.4. Aspetti controllistici .....	23
3.5. Considerazioni.....	24
Vantaggi .....	24
Svantaggi.....	24
4. Dati Tecnici macchina assegnata .....	25
Dati generali .....	25
Dati avvolgimenti.....	25
Dati Statore.....	25
Dati Rotore .....	26
5. Materiali magnetici e loro caratterizzazione.....	27
5.1. Proprietà magnetiche di un materiale magnetico .....	27
5.2. Caratterizzazione di un magnete .....	30
6. Realizzazione magneti permanenti .....	32
6.1. Stampaggio per iniezione .....	32
6.2. Stampaggio per compressione.....	37
6.3. Magnetizzazione.....	39
7. Magneti utilizzati .....	41
7.1. Magneti realizzati in laboratorio chimico .....	41
Magnet commerciali.....	42
8. Simulazioni .....	47

8.1. SynchRel .....	47
8.1.1. solving_core e post_processing .....	47
8.1.2. Sim_var_alphaie .....	49
8.1.3. Sim_var_thetam .....	50
8.1.4. Sim_mapping .....	53
8.2. PMAsR analizzati .....	56
9. Considerazioni sulle simulazioni .....	71
9.1. Calcolo del Power Factor in MTPA .....	71
9.2. Ripple di coppia .....	75
9.3. Condizioni di selezione del magnete .....	76
9.3.1. Proprietà magnetiche .....	76
9.3.2. Prestazioni motore .....	77
9.4. Selezione del magnete .....	78
9.4.1. Problemi meccanici nella realizzazione dei magneti .....	78
10. Adattamento geometrie in funzione del processo scelto .....	82
10.1. Geometrie sbarramenti .....	82
10.2. Linguette per skewing .....	83
10.3. Prestazioni ottenute con nuove geometrie .....	86
10.3.1. Confronto MTPA fra SynchRel e PMAsR .....	86
10.3.2. Ripple con nuova geometria .....	89
10.3.3. Power Factor .....	90
11. Lavorazioni ed assemblaggio .....	92
11.1. Lavorazioni magneti permanenti e soluzioni adottate .....	92
11.2. Supporto per la magnetizzazione dei magneti .....	95
11.3. Assemblaggio rotore .....	100
12. Risultati Test su banco prova .....	104
12.1. MTPA .....	104
12.1.1. Confronto tra macchine reali e simulazioni .....	104
12.1.2. Confronta tra PMAsR-2 e SynchRel-2 Reali .....	105
12.2. PF .....	107
13. Conclusioni .....	110
13.1. Valutazioni di processo .....	110
13.2. Valutazione risultati .....	111
13.3. Sviluppi futuri .....	111
14. Bibliografia .....	113
15. Indice Figure .....	114
16. Indice tabelle .....	116



# 1. Introduzione

Il motore a riluttanza variabile è una macchina elettrica A.C. sincrona senza avvolgimenti rotorici. Risulta quindi esente da perdite rotoriche per effetto Joule e, pertanto, non necessita di sistemi di dissipazione termica complessi. Il rotore è realizzato in modo tale da avere una induttanza variabile al traferro mediante zone di alta riluttanza chiamate *sbarramenti* e zone di materiale ferromagnetico con bassa riluttanza chiamate *canali*, che realizzano dei percorsi preferenziali per il passaggio del flusso magnetico generato dagli avvolgimenti di statore. È quindi una macchina efficiente (poche perdite) ed economica (il rotore può essere un pezzo unico ferromagnetico sagomato). La coppia viene prodotta quando si ha un certo angolo tra il punto con minima riluttanza e il campo statorico. In presenza di un carico diverso da zero l'asse rotorico con minima riluttanza si trova in ritardo rispetto al campo di armatura, perciò si produce una coppia di riluttanza pari a quella del carico.

Dato che l'induzione al traferro è sostenuta dal solo campo statorico, la macchina a riluttanza assorbe dalla rete una notevole quantità di potenza reattiva riducendo il fattore di potenza (PF) in modo considerevole. Per aumentare il PF, e quindi ridurre il dimensionamento dell'inverter, si possono inserire dei magneti all'interno degli sbarramenti. Un motore a riluttanza assistito da magneti permanente è particolarmente adatto negli azionamenti di tipo mandrino dove è richiesto un ampio campo di regolazione di velocità a potenza costante. I magneti infatti forniscono l'ulteriore vantaggio di aumentare il range di deflussaggio per funzionamento a potenza costante.

In alcune applicazioni viene richiesta una coppia maggiore rispetto a quella nominale anche a elevate velocità. Ciò corrisponde a una sovracorrente e quindi a un incremento di campo statorico che potrebbe smagnetizzare i magneti. La tesi proposta ha l'obiettivo di realizzare un prototipo di motore a riluttanza assistito da magneti permanenti che possano sostenere forti carichi magnetici senza subire smagnetizzazione.

L'idea nasce dalla collaborazione tra il Politecnico di Torino e l'Università degli Studi di Padova. Il lavoro sperimentale è stato svolto presso il laboratorio di ricerca di Alessandria, sede distaccata del Politecnico di Torino, con la cooperazione del professore Nicola Bianchi dell'Università degli Studi di Padova, che ha fornito il progetto di un motore a riluttanza ottimizzato per avere coppia maggiore, grazie al quale è stato possibile valutare le prestazioni del motore assistito da diversi tipi di magneti.

Nei primi capitoli è stato descritto il funzionamento del motore a riluttanza variabile, con e senza il rifasamento dei magneti permanenti, e le specifiche del progetto messo a disposizione dal professore Bianchi.

Successivamente sono state introdotte le principali grandezze che rappresentano le proprietà magnetiche dei magneti permanenti, i diversi processi per realizzarli e il metodo per caratterizzarli. Si è proceduto quindi con la descrizione dei magneti presi in esame selezionando sia campioni ottenuti in laboratorio che presenti in commercio. Le caratteristiche magnetiche di questi magneti sono state quindi utilizzate per simulare il comportamento del motore assistito e ricavare importanti dati che descrivono le sue prestazioni.

È stata fornita una descrizione del modello virtuale su MATLAB del motore a riluttanza e dei dati in uscita dalle simulazioni. L'elaborazione di questi dati ha permesso di ottenere dei parametri che descrivono le prestazioni del motore: il fattore di potenza; l'indice di ripple di coppia; la massima coppia a corrente impressa. È stato preso come riferimento il motore a riluttanza fornito dal professore Bianchi per confrontare le prestazioni del motore assistito dai magneti permanenti. Con l'assistenza dei magneti permanenti si è potuto riscontrare un aumento di coppia e di fattore di potenza in tutto il campo di regolazione di velocità superiore al 30 %.

Tali parametri, insieme alle proprietà magnetiche (campo magnetico coercitivo intrinseco) hanno permesso di fare una scelta tra i magneti considerati. Il processo di realizzazione ha rappresentato un importante fattore per la scelta del magnete in quanto ogni processo richiede delle strumentazioni che sono risultate non essere sempre disponibili, o comunque sostituibili, nel laboratorio di ricerca. Per lo stesso motivo è stato anche necessario modificare lievemente la geometria degli sbarramenti rotorici in modo tale da semplificare il processo di realizzazione dei magneti.

Le geometrie adattate hanno provocato nel motore assistito da magneti permanenti un peggioramento del ripple di coppia di circa il 50% rispetto al motore con la geometria originale. Il degrado di questo parametro è stata tuttavia compensato realizzando lo skewing dei lamierini di rotore. In questo modo si ottengono indici di ripple paragonabili a quelli di un motore senza skewing.

A seguito delle modifiche sui lamierini, il campo di regolazione di velocità a potenza costante ha subito, invece, un aumento di circa il 2 % rispetto al motore originale.

Infine, è stata commissionata la realizzazione dei lamierini e dell'albero motore con le opportune modifiche presso un'azienda milanese a stretto contatto con l'Università degli Studi di Padova e sono stati realizzati tutti i magneti da accoppiare al rotore.

## 2. Synchronous Reluctance Motor (SynchRel)

Il SynchRel è un motore sincrono come il brushless ma senza magneti sul rotore. È costituito da uno statore, che è uguale a quello presente in qualsiasi macchina brushless a distribuzione sinusoidale, e da un rotore opportunamente sagomato per avere elevata anisotropia.

### 2.1. Coppia meccanica del SynchRel

Per capire l'origine della coppia meccanica si consideri il sistema di equazioni elettriche e magnetiche della macchina con riferimento sincrono con lo statore in forma matriciale:

$$[v] = R[i] + \frac{d[\lambda]}{dt}$$

$$[\lambda] = [L(2\theta)][i]$$

dove:

- $[v]$ : matrice dei vettori di tensione di statore e rotore;
- $[i]$ : matrice dei vettori di corrente di statore e rotore;
- $[\lambda]$ : matrice dei vettori di flusso magnetico concatenato con statore e rotore;
- $[L(2\theta)]$ : matrice delle induttanze;
- le mutue induttanze tra gli avvolgimenti sono uguali, perciò risulta simmetrica;
- con l'ipotesi di sinusoidalità e linearità magnetica l'autoinduttanza di un avvolgimento varia con una periodicità doppia in funzione dell'angolo  $\theta$ .

Sostituendo la prima alla seconda si ottiene:

$$[v] = R[i] + \frac{d([L(2\theta)][i])}{dt} = R[i] + [L(2\theta)]\frac{d[i]}{dt} + \frac{d[L(2\theta)]}{d\theta}\frac{d\theta}{dt}[i]$$

Per effettuare un bilancio di potenza si moltiplica tutto per la matrice trasposta delle correnti:

$$[i]^T[v] = [i]^T R[i] + [i]^T [L(2\theta)]\frac{d[i]}{dt} + [i]^T \frac{d[L(2\theta)]}{d\theta} \omega [i]$$

dove:

- il termine al primo membro rappresenta la potenza elettrica entrante;
- i termini al secondo membro rappresentano rispettivamente:

- le perdite joule;
- la variazione di energia magnetica immagazzinata;
- termine aggiuntivo.

Per comprendere il significato del termine aggiuntivo si esamina l'espressione dell'energia magnetica e si deriva:

$$W = \frac{1}{2} [i]^T [L(2\theta)] [i]$$

$$\frac{dW}{dt} = \frac{1}{2} [i]^T [L(2\theta)] \frac{d[i]}{dt} + \frac{1}{2} \frac{d[i]^T}{dt} [L(2\theta)] [i] + \frac{1}{2} [i]^T \frac{d[L(2\theta)]}{d\theta} \omega [i]$$

Ne risulta che:

$$\frac{dW}{dt} = [i]^T [L(2\theta)] \frac{d[i]}{dt} + \frac{1}{2} [i]^T \frac{d[L(2\theta)]}{d\theta} \omega [i]$$

Confrontando il risultato con l'espressione del bilancio delle potenze si può affermare che metà del termine aggiuntivo rappresenta la variazione di energia magnetica, invece, l'altra metà rappresenta la potenza meccanica:

$$P_m = \frac{1}{2} [i]^T \frac{d[L(2\theta)]}{d\theta} \omega [i]$$

È possibile quindi esprimere la coppia:

$$T = \frac{P_m}{\omega_m} = \frac{P_m}{\omega} p = \frac{p}{\omega} \left( \frac{1}{2} [i]^T \frac{d[L(2\theta)]}{d\theta} \omega [i] \right) = p \left( \frac{1}{2} [i]^T \frac{d[L(2\theta)]}{d\theta} [i] \right)$$

La coppia così ottenuta è di tipo anisotropo perché è legata alla dipendenza di L da  $\theta$ . In particolare, questo motore presenta anisotropia solo sul rotore che non contiene magneti ed è rappresentabile come un unico pezzo di ferro opportunamente sagomato con alta anisotropia.

## 2.2. Modello elettromeccanico del SynchRel

Si può rappresentare la macchina in un sistema con due assi fissi solidali al rotore indicando, convenzionalmente, con l'asse diretto (d) quello ad alta permeanza, cioè la direzione maggioritaria del flusso, e con l'asse in quadratura (q) quello che limita maggiormente il flusso. In questo modo si

passa da un sistema di equazioni in cui i parametri dipendono dall'angolo  $\theta$  (distanza tra riferimenti statorici e rotorici) ad un sistema in cui i parametri sono indipendenti.

Dato che il rotore non presenta avvolgimenti, non ha senso fare distinzione tra equazioni di statore e rotore, quindi è possibile non utilizzare alcun pedice. Inoltre, si ottiene lo sfasamento tra i vettori di flusso e corrente grazie alla anisotropia costruttiva  $L_d \neq L_q$ :

$$\begin{cases} \lambda_d = L_d i_d \\ \lambda_q = L_q i_q \end{cases} \rightarrow \bar{\lambda}_{dq} = L_{dq} \bar{i}_{dq}$$

Il modello del SynchRel risulta:

$$\begin{cases} \bar{v}_{dq} = R \bar{i}_{dq} + \frac{d\bar{\lambda}_{dq}}{dt} + j\omega \bar{\lambda}_{dq} \\ \bar{\lambda}_{dq} = L_{dq} \bar{i}_{dq} \\ T = \frac{3}{2} p (\bar{\lambda}_{dq} \wedge \bar{i}_{dq}) = \frac{3}{2} p (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \end{cases}$$

Ammissa la linearità magnetica e con riferimento in assi rotanti, la matrice delle induttanze che lega flussi e correnti risulta diagonale e indipendente dall'angolo  $\theta$  (coefficienti mutui nulli). Questa affermazione è vera solo per riferimento ad assi rotanti d-q e non può essere associata al caso degli assi fissi  $\alpha$ - $\beta$ . Per analizzare la relazione tra corrente e flusso, si vuole provare a fare la trasformazione di assi da quelli sincroni con il rotore (d, q) a quelli solidali con lo statore ( $\alpha$ ,  $\beta$ ).

Si parte dall'ipotesi di linearità magnetica, scomponendo la matrice delle induttanze nella somma di due termini, otteniamo il complesso e coniugato del vettore corrente:

$$\bar{\lambda}_{dq} = \frac{L_d + L_q}{2} \bar{i}_{dq} + \frac{L_d - L_q}{2} \bar{i}'_{dq}$$

In questo modo è possibile trasformare agevolmente l'equazione nella rappresentazione in forma esponenziale:

$$e^{-j} \bar{\lambda}_{\alpha\beta} = \frac{L_d + L_q}{2} e^{-j\theta} \bar{i}_{\alpha\beta} + \frac{L_d - L_q}{2} e^{j\theta} \bar{i}'_{\alpha\beta}$$

Rappresentando i due coefficienti con  $L_0, L_1$  e evidenziando il vettore flusso si ottiene:

$$\bar{\lambda}_{\alpha\beta} = L_0 \bar{i}_{\alpha\beta} + L_1 e^{2j\theta} \bar{i}'_{\alpha\beta}$$

In forma complessa:

$$\lambda_\alpha + j\lambda_\beta = L_0(i_\alpha + ji_\beta) + L_1(i_\alpha - ji_\beta)(\cos 2\theta + jsin 2\theta)$$

In forma matriciale si ottiene:

$$\begin{bmatrix} \lambda_\alpha \\ \lambda_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_0 + L_1 \cos 2\theta & L_1 \sin 2\theta \\ L_1 \sin 2\theta & L_0 - L_1 \cos 2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}$$

Si può osservare che la matrice delle induttanze così ottenuta è dipendente dall'angolo  $\theta$  e risulta avere i coefficienti mutui diversi da zero a causa della anisotropia della macchina. Inoltre, si verifica che l'indipendenza delle  $L_d$  e  $L_q$  da  $\theta$  è realizzabile da un accoppiamento sinusoidale tra gli avvolgimenti e quindi da una loro distribuzione sinusoidale.

### 2.3. Geometrie

Per sapere come costruire il motore, ipotizzando la linearità magnetica, si sostituiscono le espressioni dei flussi alla coppia:

$$T = \frac{3}{2}p(\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) = \frac{3}{2}p(L_d - L_q)i_d i_q$$

Quindi, a parità di condizioni di alimentazione, si può affermare che:

$$T \propto (L_d - L_q)$$

Ciò significa che per avere coppia elevata deve essere massimizzata la differenza tra le induttanze.<sup>1</sup> Infatti, un alto rapporto ( $L_d/L_q$ ) garantisce un angolo tra corrente e flusso elevato, ma ciò non è sufficiente per avere maggiore coppia che necessita anche la seguente condizione:

$$T \uparrow \leftrightarrow (L_d - L_q) \uparrow \leftrightarrow \begin{cases} L_d & \text{alta} \\ L_q & \text{bassa} \end{cases}$$

Per valutare il valore di induttanza ottimale si ci riferisce a una struttura semplice come quella proposta in Figura 2-1, dove  $\beta$  è il passo polare:

---

<sup>1</sup>Giacomo Bacco and Nicola Bianchi "Geometry Analysis and Optimization of PM-Assisted Reluctance Motors" in *IEEE* v. 53, n. 5, p. 4338-4347, settembre/ottobre 2017

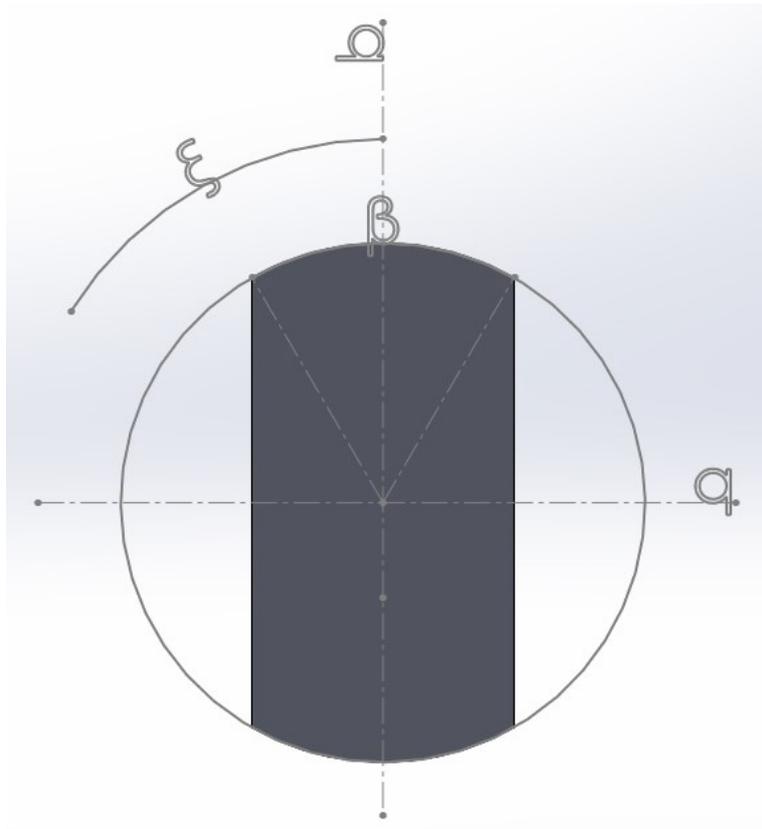


Figura 2-1 Schizzo di base del Synchronrel

Applicando ai due assi una forza magnetomotrice unitaria si può dimostrare che:

$$L_d \propto \frac{1}{2}(\beta + \sin \beta)$$

$$L_q \propto \frac{1}{2}(\beta - \sin \beta)$$

Perciò la coppia risulta proporzionale a:

$$T \propto (L_d - L_q) = \frac{1}{2}(\beta + \sin \beta) - \frac{1}{2}(\beta - \sin \beta) = \sin \beta$$

Per massimizzare la coppia è necessario che la parte magnetica del rotore occupi il 50 % del passo polare, cioè  $\beta = \pi/2$ . Ne consegue che il rapporto di anisotropia risulta basso rispetto a quello della macchina a induzione (circa 20):

$$\frac{L_d}{L_q} = 4.5$$

Ciò dà luogo a:

- basso PF;
- basso rapporto  $kW/kVA$  (diretta conseguenza del PF basso);
- minore coppia rispetto al motore a induzione, circa il 20% in meno.

Per poter realizzare una struttura ad alta anisotropia (alta  $L_d$ , bassa  $L_q$ ) si suddivide il rotore in diversi segmenti magneticamente isolati tra loro. più sotto è proposto uno schema qualitativo a due poli. Da notare che per realizzare un unico lamierino i vari segmenti dovranno essere congiunti da pezzi di ferro saturati.

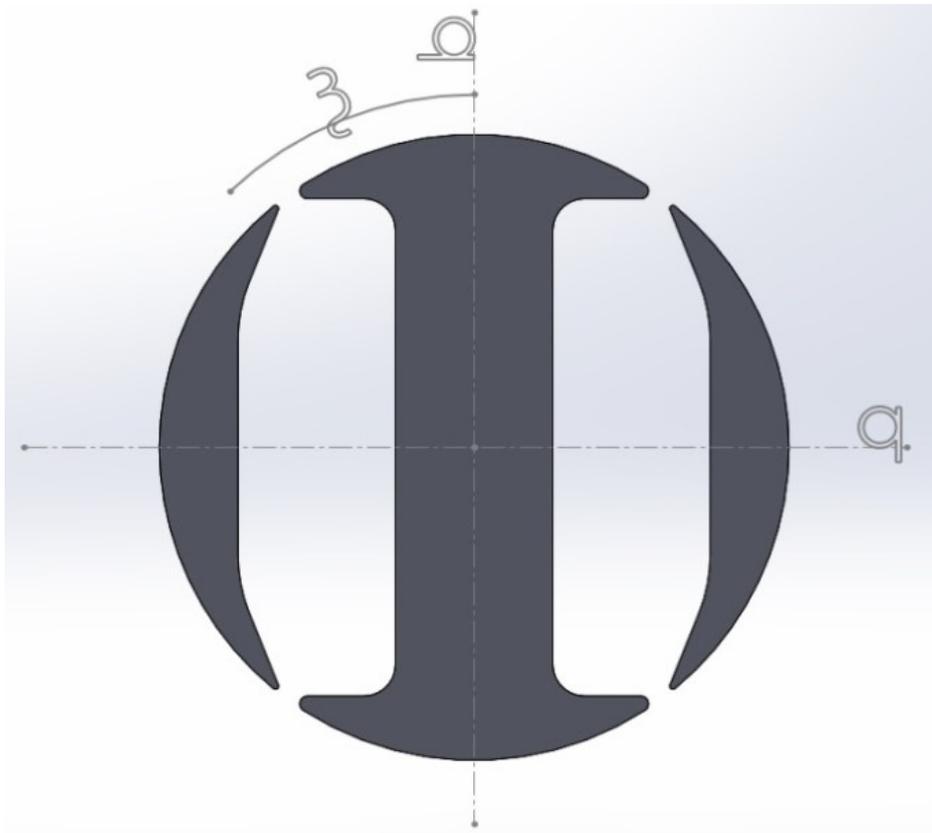


Figura 2-2 Schizzo sbarramenti del SynchRel

Applicando nuovamente una forza magnetomotrice in entrambi gli assi si ottiene che:

- asse d: l'andamento di induzione è proporzionale a quello dell'eccitazione. Inoltre, rispetto a tale asse il rotore può essere considerato come un pezzo unico di ferro ( $L_d$  alta);
- asse q: il rotore si polarizza magneticamente perciò si ottiene una reazione a gradino di potenziale magnetico la cui prima armonica tende a compensare la prima armonica di forza magnetomotrice di eccitazione in quadratura. Tutto ciò concorre ad avere una bassa  $L_q$ .

Pertanto, più alto è il numero di segmenti rotorici più efficace sarà la compensazione della forza magnetomotrice.

Si è quindi ricavata qualitativamente la geometria di base della macchina sincrona a riluttanza. In genere il rotore è a laminazione trasversale e con un numero di poli non elevato. più sotto è riportata la geometria ottenuta per 4 poli:

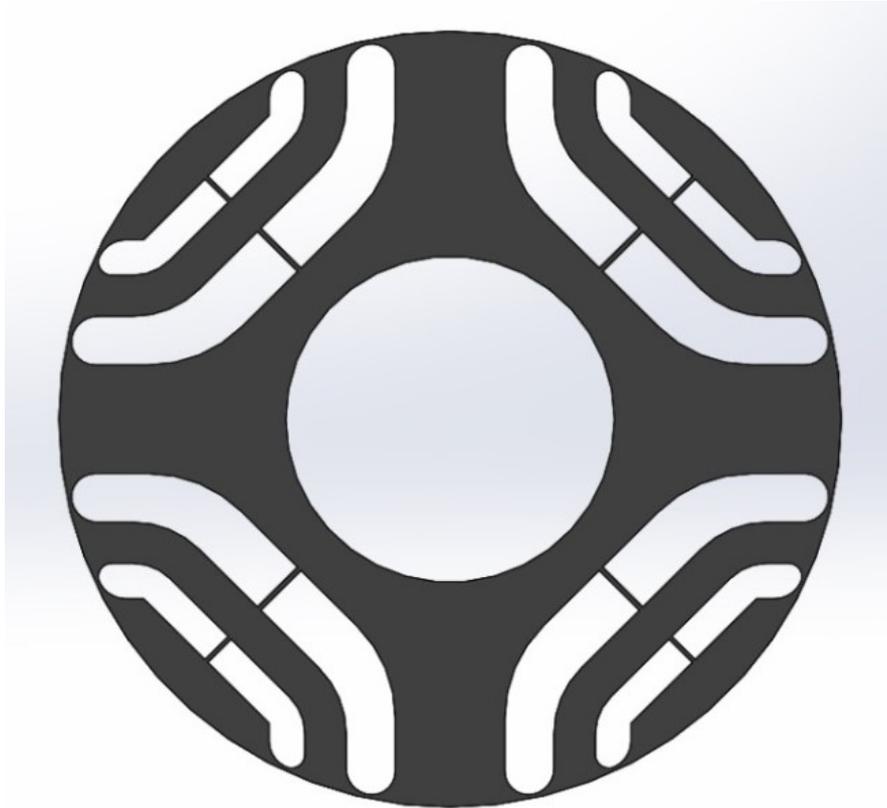


Figura 2-3 Disegno completo del SyncheRel

Poiché i pezzi di congiunzione resistono bene a flessione e meno bene a trazione, si inseriscono dei ponticelli in direzione radiale. La tenuta meccanica è affidata ai ponticelli disposti al traferro e, internamente, agli sbarramenti, che vengono saturati dalla forza magnetomotrice di statore. La presenza dei ponticelli interni però permette a una parte di flusso disperso di attraversare il rotore. Tale quota di flusso corrisponde a una riduzione di coppia e a un peggioramento del PF.

#### 2.4. Comportamento magnetico saturato del SynchRel

Per definire quantitativamente le prestazioni della macchina è necessario considerare la non linearità magnetica:

$$\begin{cases} \lambda_d = \lambda_d(i_d, i_q) \\ \lambda_q = \lambda_q(i_d, i_q) \end{cases}$$

Per descrivere in modo completo il funzionamento della macchina si deve tenere conto del fenomeno di “cross-saturation”. Si può dimostrare che, alimentando la macchina con una certa  $i_d \neq 0$  e una  $i_q = 0$  si ottiene un andamento di  $\lambda_d$  più alto rispetto al caso in cui  $i_q \neq 0$ . Stessa situazione avremo per  $\lambda_q$  ma invertendo il ruolo delle correnti ( $i_d = 0$  e  $i_q \neq 0$ ). Una rappresentazione di questo fenomeno è proposta nella Figura 2-4.

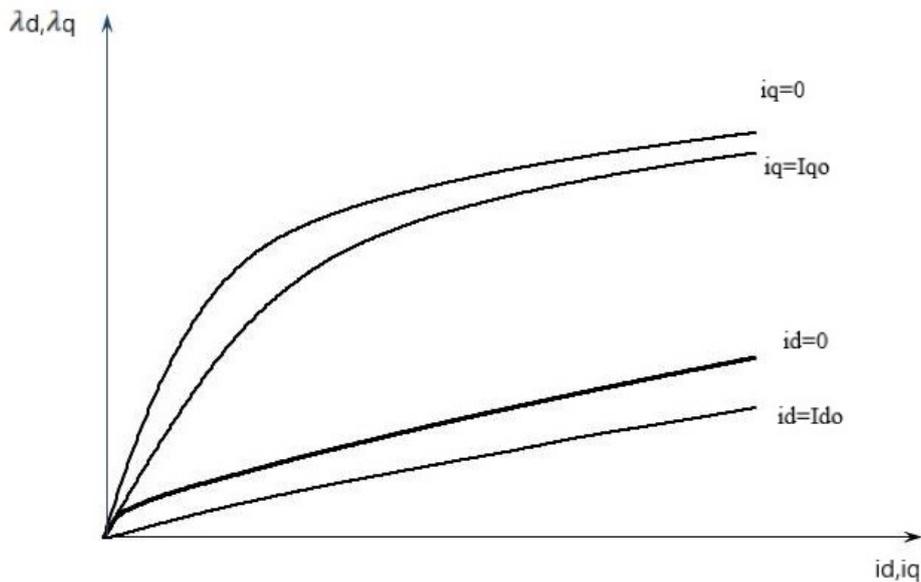


Figura 2-4 Cross-saturation del SynchRel

Trascurando le correnti parassita, il sistema è conservativo, perciò l’energia necessaria a magnetizzare la macchina non dipende dal percorso di magnetizzazione. Ciò significa che le aree sottese dalle due coppie di curve sono uguali ed è valida la relazione di reciprocità:

$$\frac{\partial \lambda_d}{\partial i_q} = \frac{\partial \lambda_q}{\partial i_d}$$

Da quanto visto, non è corretto usare l’induttanza apparente per definire le prestazioni di coppia, data la variabilità di questo parametro, bensì è opportuno definire un sistema di induttanze differenziali.

$$\begin{bmatrix} \lambda_d \\ \lambda_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \lambda_d}{\partial i_d} & \frac{\partial \lambda_d}{\partial i_q} \\ \frac{\partial \lambda_q}{\partial i_d} & \frac{\partial \lambda_q}{\partial i_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}$$

Si dovrà fare riferimento alla seguente espressione:

$$\begin{cases} \lambda_d = \lambda_d(i_d, i_q) \\ \lambda_q = \lambda_q(i_d, i_q) \end{cases} \rightarrow T = \frac{3}{2} p (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d)$$

Nei primi tratti lineari la relazione tra corrente e flusso è di tipo algebrico (come visto nella rappresentazione in assi fissi  $\alpha$ - $\beta$ ) e ciò permette una risposta dinamica veloce. In virtù di una buona risposta dinamica, conviene variare entrambe le correnti. Questo può però essere fatto fino a quando non interviene la cross-saturation. Quando la corrente usata è circa 1/3 di quella nominale, l'asse  $d$  si satura e quindi conviene variare solo la  $i_q$ .

Inoltre, dato che il rotore non ha avvolgimenti, non si hanno perdite per effetto joule. Ciò significa avere efficienze elevate per qualsiasi punto di lavoro.

## 2.5. Luogo di potenza massima in deflussaggio

Per conoscere il comportamento della macchina è necessario individuare le relazioni di dimensionamento della potenza in determinati intervalli di velocità.

I valori limite istantanei di tipo assoluto di tensione e corrente sono imposti dall'inverter ( $V_{max}$ ,  $I_{max}$ ).

Ponendosi su assi sincroni con il rotore, trascurando le perdite resistive e considerando le condizioni di regime, è possibile affermare che la tensione è proporzionale al prodotto tra velocità angolare e flusso:

$$V_{dq} \cong j\omega \lambda_{dq}$$

Per accelerare il motore la tensione aumenta e il modulo di corrente è quello massimo consentito dall'inverter. Il flusso è in genere scelto per ottimizzare le prestazioni del motore. Come mostrato in Figura 2-5, all'aumentare della velocità la tensione si avvicina a quella massima imposta dall'inverter.

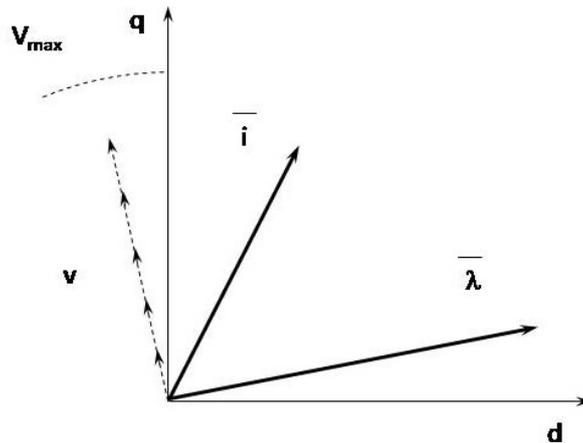


Figura 2-5 Prima fase di accelerazione del SynchronRel

Raggiunta la  $V_{max}$ , per poter aumentare la velocità mantenendo la potenza massima costante, è ragionevole pensare di ridurre il modulo di flusso mantenendo la corrente costante. Ciò significa che la coppia decresce in maniera inversamente proporzionale alla velocità. Questo provvedimento è comunemente chiamato *deflussaggio* di cui viene proposta la rappresentazione in Figura 2-6.

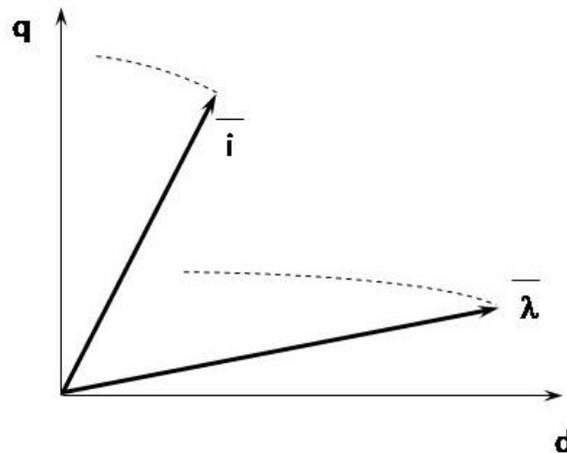


Figura 2-6 Deflussaggio a potenza costante del SynchronRel

Si può dimostrare che il vettore di corrente si muove su una circonferenza e il vettore flusso su un'ellisse:

$$\begin{cases} i_d = \frac{\lambda_d}{L_d} \\ i_q = \frac{\lambda_q}{L_q} \end{cases} \rightarrow i_d^2 + i_q^2 = \left(\frac{\lambda_d}{L_d}\right)^2 + \left(\frac{\lambda_q}{L_q}\right)^2 = I_{max}^2$$

La rotazione del vettore di flusso procede fino a quando non incontra la bisettrice del piano che corrisponde al luogo dei punti a massima coppia a tensione impressa (MTPV):

$$T = \frac{3}{2}p(\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) = \frac{3}{2}p\left(\lambda_d \frac{\lambda_q}{L_q} - \lambda_q \frac{\lambda_d}{L_d}\right) = \frac{3}{2}p\left(\frac{1}{L_q} - \frac{1}{L_d}\right)\lambda_d \lambda_q$$

Chiamando  $\delta$  l'angolo tra il flusso e l'asse d si può scrivere che:

$$\begin{cases} \lambda_d = \lambda_s \cos \delta \\ \lambda_q = \lambda_s \sin \delta \end{cases} \rightarrow T \propto \lambda_s^2 \cos \delta \sin \delta = \lambda_s^2 \sin 2\delta \rightarrow \frac{\partial T}{\partial \delta} = 0 \leftrightarrow \delta = \frac{\pi}{4} \text{ rad} = 45^\circ$$

Arrivati quindi alla bisettrice, per aumentare la velocità, basta ridurre entrambi i moduli di flusso e corrente, mantenendo inalterato il loro argomento, come mostrato in Figura 2-7.

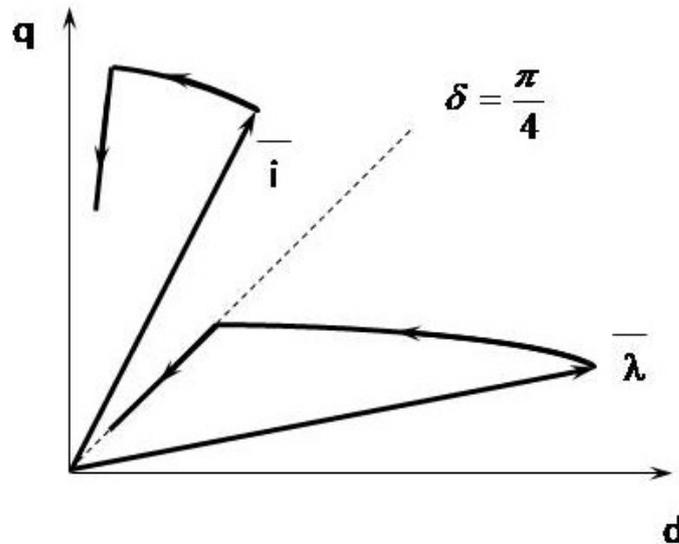


Figura 2-7 Deflussaggio su MTPV del SynchRel

È interessante notare che, se si continuasse a ruotare  $\bar{i}$  e di conseguenza  $\bar{\lambda}$ , i due vettori si allineerebbero con l'asse q, annullando le loro componenti in asse diretto e, di conseguenza, anche la coppia, come si può osservare dalla precedente espressione.

Quando si raggiunge l'MTPV la coppia decresce con il quadrato della velocità.

Alla luce di quello che si è detto, si possono distinguere tre zone di funzionamento ben rappresentate in Figura 2-8:

$$\begin{cases} 0 < \omega < \omega_1 \rightarrow \text{zona 1} \\ T = \text{cost} \end{cases}$$

la  $\omega_1$  corrisponde alla velocità per la quale si arriva a incontrare la limitazione di tensione;

$$\begin{cases} \omega_1 < \omega < \omega_2 \\ P \cong \text{cost} \rightarrow \text{zona 2} \\ T \propto \omega^{-1} \end{cases}$$

la  $\omega_2$  corrisponde alla velocità per la quale si incontra la bisettrice;

$$\begin{cases} \omega > \omega_2 \\ P \propto \omega^{-1} \rightarrow \text{zona 3} \\ T \propto \omega^{-2} \end{cases}$$

si fanno diminuire i moduli di tensione e corrente facendo restare costanti gli argomenti.

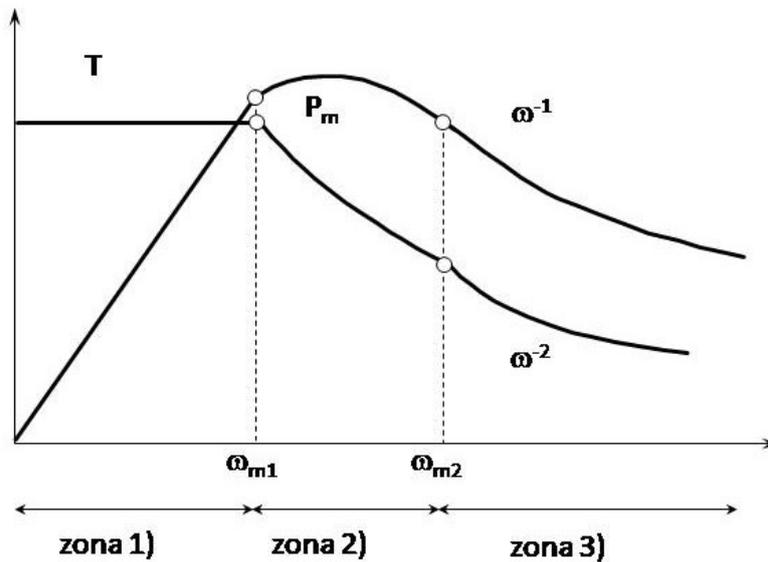


Figura 2-8Zone di funzionamento del SynchronRel

Per azionamenti tipo mandrino, in cui è richiesta un ampio intervallo di velocità a potenza prefissata, il motore sincrono a riluttanza richiede un sovra-dimensionamento dell'inverter. Per poter risolvere questo problema si realizza quello che viene chiamato motore a riluttanza assistito o rifasato, che presenta stessa geometria del SynchronRel ma con l'aggiunta di magneti all'interno degli sbarramenti.

## 2.6. Considerazioni

È opportuno riassumere i vantaggi e gli svantaggi di tale macchina:

### **Vantaggi**

- è sincrona con le grandezze statoriche, quindi non ha scorrimento;
- non ha avvolgimenti rotorici, quindi ha basse perdite e un'alta efficienza;
- in relazione al precedente punto, a basse velocità può assorbire maggiore corrente. Ciò permette di avere una coppia elevata;
- ha una struttura robusta e facile da realizzare adatta a una produzione in serie;
- la laminazione trasversale consente lo “skewing” del rotore;

### **Svantaggi**

- ha un basso rapporto di anisotropia  $L_d/L_q \cong 4$ , ne consegue un angolo tra flusso e corrente piccolo e quindi un basso PF;
- presenta uno stretto range di deflussaggio. Ciò penalizza il dimensionamento dell'inverter.

### 3. Synchronous reluctance motor assisted by permanent magnet (PMAsR)

Si tratta di un motore sincrono che presenta sia una struttura anisotropa che i magneti permanenti.

#### 3.1. Descrizione del PMAsR

La struttura di partenza è quella del SynchRel perciò è possibile adottare le stesse convenzioni.

Come nel SynchRel, questa macchina presenta elevata anisotropia rotorica necessaria per ottenere una componente di coppia di riluttanza. La presenza dei magneti, invece, serve per migliorare il comportamento in deflussaggio.

Un motore che sfrutta i magneti interni per produrre coppia meccanica è il brushless anisotropo o IPM (Interior Permanent Magnet).più sotto,per definire le convenzioni di assi di questa macchina elettrica, si schematizzala struttura di un rotore IPM a 2 poli.

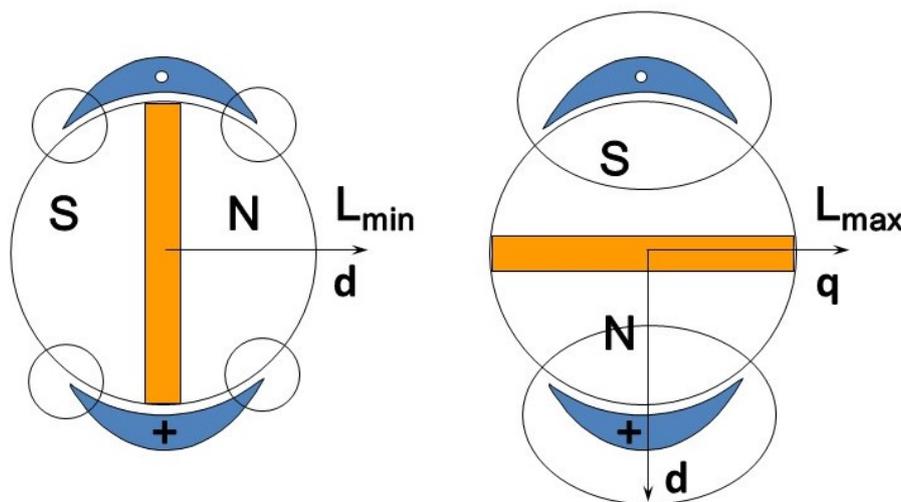


Figura 3-1 Schematizzazione IPM con 2 poli

L'autoinduttanza  $L$  di un avvolgimento varia con una periodicità doppia in funzione dell'angolo meccanico  $L(2\theta)$ .

Nel caso a sinistra di Figura 3-1, le linee di campo prodotte dall'avvolgimento di statore fanno fatica ad attraversare il magnete quindi si ha una bassa permeabilità magnetica, circa uguale a quella dell'aria. Questa disposizione è caratterizzata da un valore di minima induttanza in quanto le linee di campo concatenano solo una parte dell'avvolgimento corrispondenti agli estremi indicati con dei cerchi. Nel caso a destra di Figura 3-1, il magnete non ostacola le linee di campo sono limitate dal

solo traferro, che comunque risulta piccolo, e possono concatenare completamente l'avvolgimento. In queste condizioni l'induttanza è massima.

In un IPM si associa all'asse con minima induttanza (quindi massima riluttanza) l'asse **d** e all'asse con massima induttanza (quindi minima riluttanza) l'asse **q**.

Riportando le convenzioni dell'IPM al PMA<sub>s</sub>R si devono invertire gli assi **d** e **q**, e disporre i magneti in modo tale che, il polo nord di ciascun magnete è rivolto verso il polo nord del magnete adiacente realizzando un polo N nella zona compresa tra i due magneti e un polo S nella zona successiva (Figura 3-2).

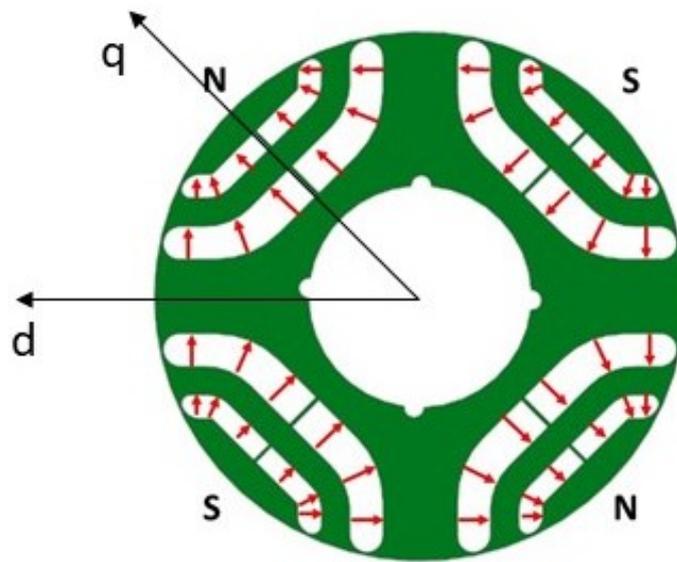


Figura 3-2 Orientamento linee di campo magnetico dei PM

Rispetto all'IPM, il PMA<sub>s</sub>R presenta:

- rotore ad alta anisotropia, totalmente diverso rispetto all'IPM;
- $\lambda_m$  è una parte minoritaria del flusso totale che permette di scegliere piccoli magneti con buone caratteristiche magnetiche o magneti che riempiono completamente gli sbarramenti ma di bassa qualità magnetica;
- range di deflussaggio del PMA<sub>s</sub>R superiore rispetto all'IPM grazie all'elevata anisotropia.

Si è visto che nel SynchRel si raggiunge relativamente in fretta la bisettrice (MTPV) oltre la quale si riducono le prestazioni in coppia e occorre cambiare strategia di deflussaggio, rinunciando al funzionamento a potenza costante. Per evitare ciò, si può pensare di traslare il vettore di flusso verso il basso (Figura 3-3) in modo tale che, percorrendo l'ellisse in deflussaggio, non si raggiunga

mai la bisettrice se non nell'origine. In questo modo la zona 3 scompare e si può lavorare a corrente massima ( $I_{max}$ ) per qualsiasi velocità.

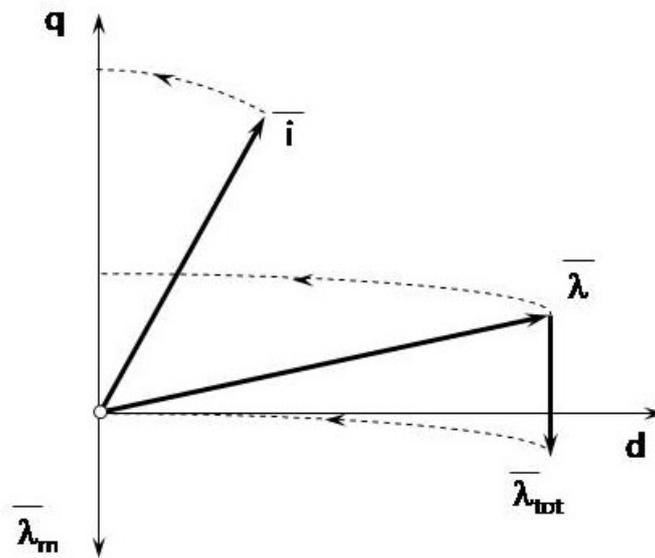


Figura 3-3 Effetto dei magneti sulla traiettoria dell'estremo del vettore flusso nel PMASR

Ciò può essere fatto introducendo una limitata quantità di magneti all'interno degli sbarramenti (Figura 3-4) per avere un limitato flusso  $\lambda_m$  che si oppone/compensa alla componente di flusso in quadratura. Si noti che, in questo modo, si riduce l'induttanza in quadratura ( $L_d \rightarrow 0$ ).

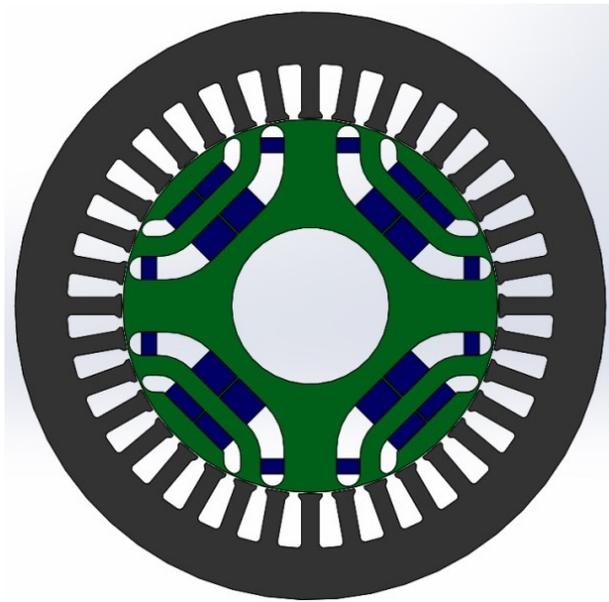


Figura 3-4 Disegno completo del PMASR

Si può osservare che, con le condizioni ottenute in deflussaggio,  $\bar{\lambda}_{tot}$  decresce in modo inversamente proporzionale ad  $\omega_0$ , ma poiché l'angolo tra i due vettori  $\bar{i}$  e  $\bar{\lambda}_{tot}$  tende a  $\pi/2$  (Figura 3-5), il loro prodotto esterno si massimizza.

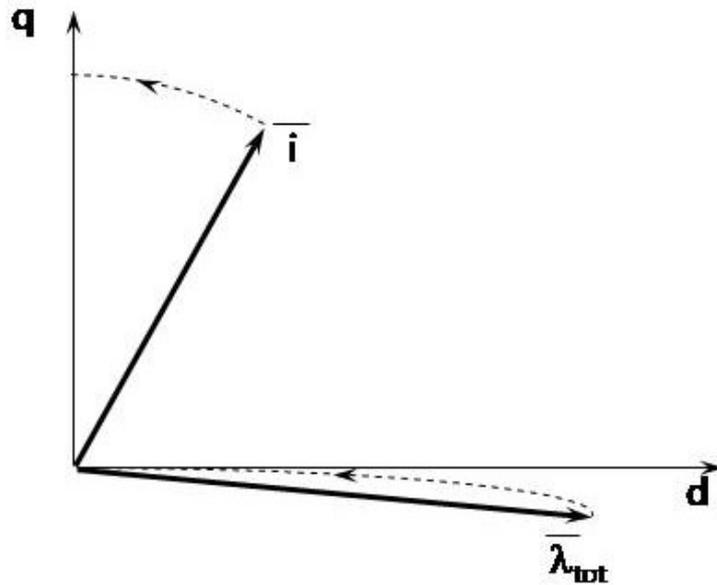


Figura 3-5 Deflussaggio PMASR

Ciò significa che, essendo  $T \propto \bar{\lambda}_{tot} \wedge \bar{i}$ , la coppia decresce meno rapidamente rispetto al SynchRel al crescere della velocità.

Inoltre, si può notare che, essendo i vettori  $\bar{i}$  e  $\bar{\lambda}_{tot}$  quasi in quadratura è possibile affermare che il fattore di potenza è alto già a basse velocità e tende a un valore prossimo ad 1 in deflussaggio.

## 3.2. Non idealità

Virtualmente si potrebbe avere quindi un range infinito di deflussaggio. Nella pratica però sarà necessario tenere conto di alcune non idealità.

### 3.2.1. Variazione della posizione dell'MTPV

Ipotizzando la linearità magnetica, la coppia presenta un termine dovuto alla presenza dei magneti e uno di anisotropia (o riluttanza):

$$T = \frac{3}{2}p[\lambda_m i_d + (L_d - L_q)i_d i_q]$$

Sapendo che:

$$\begin{cases} \lambda_d = L_d i_d = \lambda \cos \delta \\ \lambda_q = L_q i_q - \lambda_m = \lambda \sin \delta \end{cases} \rightarrow \begin{cases} i_d = \frac{\lambda_d}{L_d} \\ i_q = \frac{\lambda_q + \lambda_m}{L_q} \end{cases}$$

Sostituendo e semplificando:

$$\begin{aligned} T &\propto \lambda_m \frac{\lambda_d}{L_d} + (L_d - L_q) \frac{\lambda_d \lambda_q + \lambda_m}{L_d L_q} \\ &= \lambda_m \frac{\lambda_d L_q}{L_d L_q} + (L_d - L_q) \frac{\lambda_d \lambda_q}{L_d L_q} + (L_d - L_q) \frac{\lambda_d \lambda_m}{L_d L_q} \\ &= \left( \frac{1}{L_q} - \frac{1}{L_d} \right) \lambda_d \lambda_q + \frac{1}{L_q} \lambda_d \lambda_m \end{aligned}$$

Esprimendo in funzione dell'angolo  $\delta$ :

$$T \propto \left( \frac{1}{L_q} - \frac{1}{L_d} \right) \lambda^2 \cos \delta \sin \delta + \frac{1}{L_q} \lambda_m \lambda \cos \delta$$

Per determinare la posizione della MTPV si deriva la coppia in funzione di  $\delta$  e si eguaglia a zero:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial \delta} &\propto \left( \frac{1}{L_q} - \frac{1}{L_d} \right) \lambda^2 (\cos^2 \delta - \sin^2 \delta) + \frac{1}{L_q} \lambda_m \lambda \sin \delta = 0 \\ \left( \frac{1}{L_q} - \frac{1}{L_d} \right) \lambda^2 (1 - 2 \sin^2 \delta) + \frac{1}{L_q} \lambda_m \lambda \sin \delta &= 0 \end{aligned}$$

Introducendo il rapporto di anisotropia  $\xi = L_d/L_q$ :

$$\frac{1}{L_q} - \frac{1}{L_d} = \frac{L_d - L_q}{L_d L_q} = \frac{\xi - 1}{\xi L_q}$$

Sostituendo e raccogliendo:

$$\left( \frac{\xi - 1}{\xi L_q} \right) \lambda^2 (1 - 2 \sin^2 \delta) + \frac{1}{L_q} \lambda_m \lambda \sin \delta = 0$$

$$(1 - 2 \sin^2 \delta) + \frac{\lambda_m}{\lambda} \frac{\xi}{\xi - 1} \sin \delta = 0$$

Ricordando che il passo polare è stato indicato con  $\beta$  e risolvendo:

$$2 \sin^2 \delta + \beta \sin \delta - 1 = 0 \rightarrow \sin \delta = \frac{1}{4} \left( -\beta + \sqrt{\beta^2 + 8} \right)$$

Supponendo che:

$$\begin{cases} \frac{\lambda_m}{\lambda} = 1 \\ \xi = 10 \end{cases} \rightarrow \sin \delta \cong 0.5 \rightarrow \delta \cong 30^\circ$$

Ciò significa che l'MTPV ha una pendenza inferiore al caso del SynchRel. Nella pratica però si preferisce deflussare fino a un valore limite  $\lambda = \lambda_{min} > \lambda_m$ . In questo modo si può risparmiare sui magneti.

### 3.2.2. Variazione di $\lambda_m$ con la temperatura

L'entità di questo fenomeno varia a seconda del coefficiente termico del materiale ferromagnetico. In particolare l'effetto di tali variazioni sarà minore quanto più piccolo è il  $\lambda_m$ .

### 3.2.3. Variazione del rapporto $\lambda_{q0}/\lambda_{d0}$

La compensazione con  $\lambda_m$  si effettua in funzione del punto di lavoro, perciò occorrerà scegliere una precisa condizione  $\lambda_{q0}, \lambda_{d0}$  rispetto alla quale effettuarla.

A causa di tutte queste non idealità si può ottenere una compensazione totale di flusso solo a una determinata temperatura per un certo carico. Tuttavia, anche se si ha una parziale compensazione, il vantaggio che si ottiene è comunque considerevole. Si ottengono infatti PF elevati.

## 3.3. Funzionamento a basso carico e alta velocità

Per funzionamento a basso carico e alta velocità, nel caso in cui si voglia deflussare fino ad un valore  $\lambda'_{tot} < \lambda_m$ , sarà necessaria una componente smagnetizzante  $i'_q$ :

$$\lambda'_{tot} = \lambda_m - L_q i'_q$$

L'effetto di tale corrente è quello di traslare la traiettoria ellittica del vettore di flusso verso l'alto per raggiungere, ad alte velocità e basso carico, il valore  $\lambda'_{tot}$  (Figura 3-6)

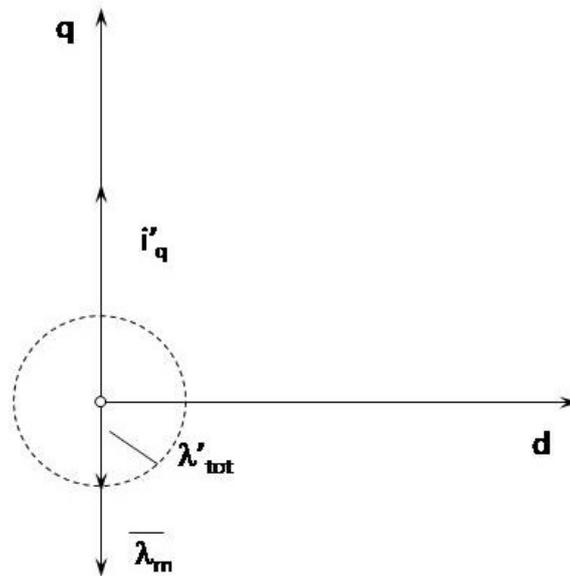


Figura 3-6 Diagramma per funzionamento a basso carico

Si introducono però delle perdite aggiuntive a vuoto che devono essere limitate.

Si osserva che se  $\lambda'_{tot} = k_m \lambda_m$  con  $k_m < 1$  si ha che:

$$i'_q = \frac{\lambda_m - k_m \lambda_m}{L_q} = (1 - k_m) \frac{\lambda_m}{L_q}$$

Per ridurre le perdite è necessario:

$$i'_q \downarrow \leftrightarrow L_q \uparrow \text{ riduzione di anisotropia}$$

Un aumento di induttanza provoca un aumento di  $\lambda_q$  che dovrà essere compensato da una maggiore  $\lambda_m$  per ottenere lo stesso range di deflussaggio, perciò la  $i'_q$  resta la stessa. Quindi per risolvere l'inconveniente si dovrà rinunciare ad avere un elevato range di deflussaggio.

Si può affermare che:

- per ridurre l'effetto di  $\lambda_m$  si deve imporre una corrente smagnetizzante  $i'_q$  che non dipende dall'anisotropia della macchina;
- per richiedere meno corrente smagnetizzante  $i'_q$  (ciò equivale a ridurre le perdite) bisogna accontentarsi di un ridotto range di deflussaggio che dipende dall'anisotropia della macchina. Pertanto, migliore è l'anisotropia minore è la necessità di  $\lambda_m$ .

### 3.4. Aspetti controllistici

Un aspetto positivo del PMASR è quello di permettere a una piccola parte di linee di flusso magnetico, prodotto dai magneti, di saturare i ponticelli. Quindi i magneti permanenti devono essere progettati per poter dare un flusso minimo maggiore rispetto a quello che può attraversare i ponticelli. In questo modo si riduce l'effetto negativo del flusso disperso che li attraversa.

Alla luce delle considerazioni fatte, si può pensare che il fenomeno di cross-saturation<sup>2</sup> è più mitigato rispetto al SynchRel in quanto non risente dell'effetto dei ponticelli (Figura 3-7, Figura 3-8). Inoltre, la caratteristica  $\lambda_q(i_d, i_q)$  risulta traslata verso il basso a causa della presenza dei magneti.

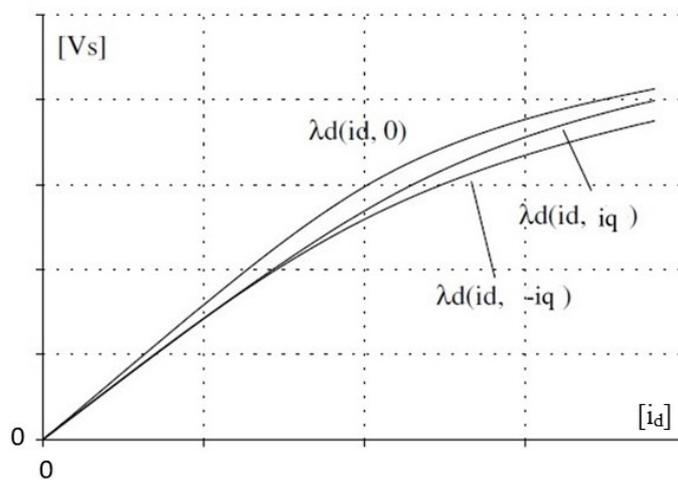


Figura 3-7 Cross-saturation PMASR:  $\lambda_d(i_d, i_q)$

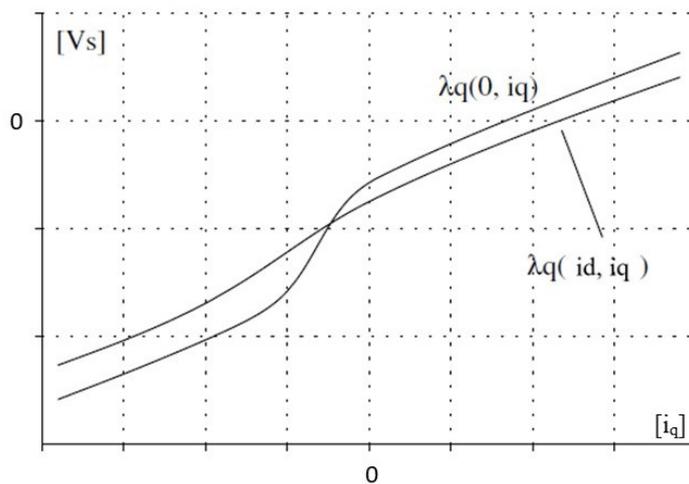


Figura 3-8 Cross-saturation PMASR:  $\lambda_q(i_d, i_q)$

<sup>2</sup> Alfredo Vagati, Michele Pastorelli, Federico Scapino, Giovanni Franceschini "Impact of Cross Saturation in Synchronous Reluctance Motors of the Transverse-Laminated Type" in *IEEE* v.36, n. 4, p. 1039-1046 luglio/agosto 2000

Un aspetto interessante è quello di non poter invertire la coppia cambiando segno alla  $i_q$ , come si potrebbe fare con il SynchRel, in quanto per non peggiorare l'effetto dei magneti deve essere sempre opposta a  $\lambda_m$ . In alternativa, si inverte la  $i_d$ . In questo modo vettori risultano essere specchiati rispetto all'asse q come mostrato in Figura 3-9:

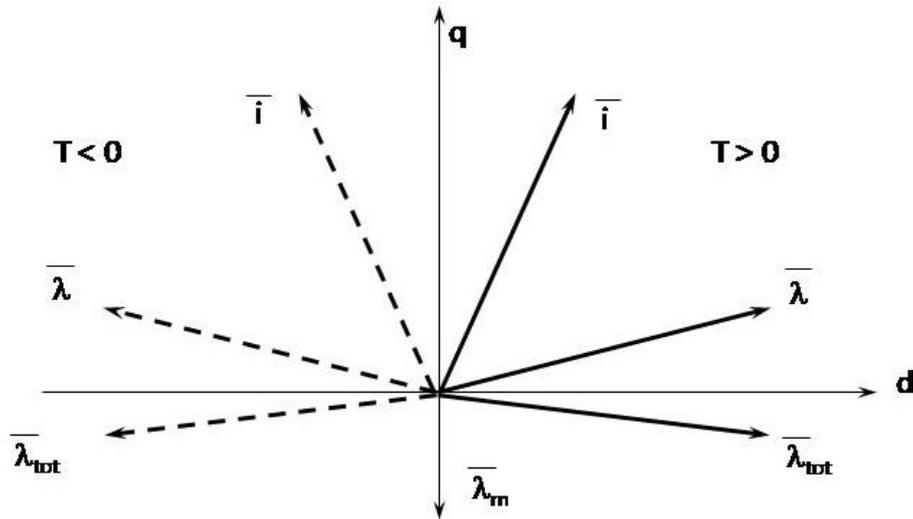


Figura 3-9 Passaggio del funzionamento del PMASR da motore a freno

Il passaggio da  $i_d$  a  $-i_d$  implica una variazione di flusso pari a  $\Delta\lambda_d = 2L_d i_d$ . È noto che la tensione è proporzionale alla variazione di flusso, pertanto, poiché è limitata dall'inverter, si ha un fenomeno di "slew-rate" e sarà necessario un tempo maggiore per effettuare tale variazione:

$$\Delta v = \frac{\Delta\lambda_d}{\Delta t}$$

### 3.5. Considerazioni

A questo punto è opportuno riassumere i vantaggi e gli svantaggi di tale macchina:

#### Vantaggi

- comprende tutti i vantaggi del motore a riluttanza;
- a parità di condizioni nominali con il SynchRel, ha
- un maggiore range di deflussaggio;
- maggiore PF.

#### Svantaggi

- il costo dei magneti può influire sulla competitività con altre macchine.

## 4. Dati Tecnici macchina assegnata

Per valutare l'applicabilità dei magneti realizzati, è stato fornito dall'Università degli Studi di Padova il modello virtuale di un motore a riluttanza con doppio sbarramento a canali costanti rappresentato in Figura 4-1. Si riportano in questo paragrafo i dati tecnici di tale macchina.

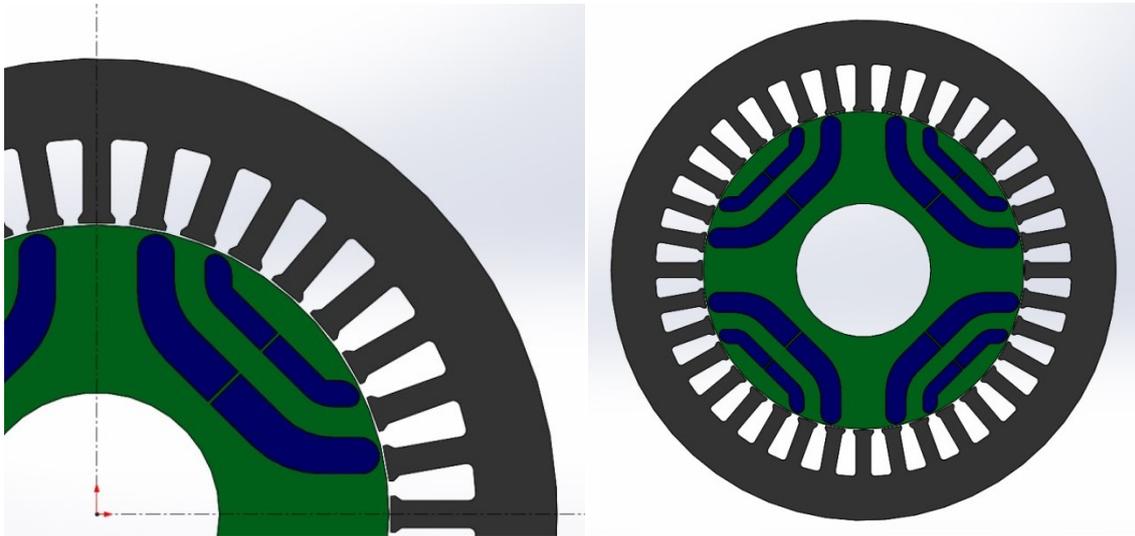


Figura 4-1 Sezione motore a riluttanza assistito da magneti permanenti

### Dati generali

$$p = 2$$

pole pairs

$$Lstk = 40 * mm$$

stacklength

$$kpack = 0.96$$

packaging factor

### Dati avvolgimenti

$$nc = 67$$

number of seriesconductors per slot

$$npp = 1$$

number of parallepaths

$$kfill = 0.45$$

slot fillfactor

### Dati Statore

$$Qs = 36$$

number of slots (total in the stator)

$$De = 150 * mm$$

outerdiameter

$$Ds = 96 * mm$$

innerdiameter

$$wt = 4.45 * mm$$

width of the statortooth

$$wso = 2.5 * mm$$

slot opening

$hs = 13.85 * mm$

$hso = 0.7 * mm$

$hwed = 1 * mm$

$ws = 4.3 * mm$

$wse = 6.5 * mm$

$angleSlot1 = 5$

slot height

slot opening height

wedgeheight

slot width (outwards)

slot width (inwards)

(deg) angle of the first slot ("Islot1")

### **Dati Rotore**

$rotor\_alignment = 0$

$Dre = 95.2 * mm$

$Dri = 40 * mm$

$tm = 0 * mm$

$hri = 6.92 * mm$

$dbi = 0.6 * mm$

$hre = 4 * mm$

$dbe = 0.5 * mm$

rotorinitial position

outerdiameter

innerdiameter

magnetthickness

innerribheight

distancepm - airgap

outerribheight

distancepm - out

## 5. Materiali magnetici e loro caratterizzazione

### 5.1. Proprietà magnetiche di un materiale magnetico

Per descrivere le proprietà magnetiche di un materiale si può considerare la sua struttura atomica.<sup>3</sup> L'atomo è costituito da un certo numero di elettroni che ruota attorno a un nucleo. Questa struttura può essere vista come una spira conduttrice percorsa da corrente che, per effetto della legge di Ampere, genera un campo magnetico la cui direzione coincide con quella dell'asse atomico. In assenza di campi magnetici esterni, il campo magnetico dell'elettrone è orientato in maniera casuale, ma quando si impone un campo magnetico esterno diverso da zero si ottiene una polarizzazione delle spire atomiche che corrisponde a una variazione dell'orientamento dell'asse attorno al quale ruotano gli elettroni. La variazione dell'orientamento della spira atomica provoca delle correnti di magnetizzazione che possono essere descritte introducendo il vettore "intensità di magnetizzazione" o "polarizzazione magnetica"  $M$  (A/m). Considerando un cilindro di materiale magnetico, si può schematizzare più sotto l'effetto del campo magnetico esterno:

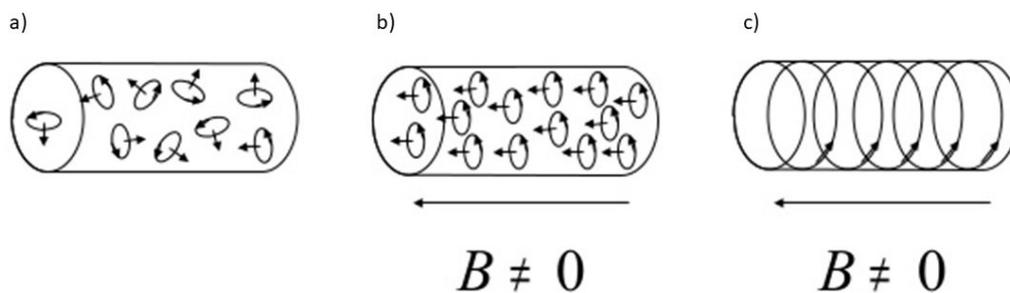


Figura 5-1 Effetto del campo magnetico esterno su un materiale magnetico

- in condizioni nominali gli atomi di ferro sono orientati a caso, quindi il campo magnetico totale è nullo ( $B=0$ );
- in presenza di un campo magnetico esterno, le "spire" atomiche percorse da corrente si orientano e generano un campo magnetico diverso da zero ( $B \neq 0$ );
- la sovrapposizione delle correnti elementari dei singoli atomi è equivalente ad una corrente che circola sulla superficie del cilindro, chiamata corrente di magnetizzazione.

<sup>3</sup>Franceschetti, Giancarlo. Magneti Permanenti. [Online] [http://web.mclink.it/MC5690/capitolo1\\_3.html](http://web.mclink.it/MC5690/capitolo1_3.html). (Ultima consultazione 31-07-2018)

Si vuole descrivere il comportamento del materiale magnetico al variare del campo magnetico esterno  $H$ . Per tale scopo ci si riferisce alla Figura 5-2. Lo stato del materiale magnetico smagnetizzato è descrivibile dal punto 0 all'origine del piano B-H. Aumentando gradualmente  $H$  aumenta anche  $B$  lungo la curva OA chiamata "curva di prima magnetizzazione". In questa fase le spire atomiche si orientano progressivamente con la direzione del campo esterno generando una polarizzazione magnetica  $M$  crescente. Per valori di  $H$  sempre più grandi vanno diminuendo gli atomi che ancora devono essere orientati fino a raggiungere la condizione chiamata di "saturazione" ( $B_{sat}, H_{sat}$ ) in cui tutti gli atomi hanno stesso orientamento. In saturazione  $M$  diventa costante e  $B$  si può approssimare a una retta con pendenza pari a  $\mu_0 H$ . Riducendo  $H$  fino ad annullarsi si raggiunge un valore di induzione diverso da zero definito "induzione residua"  $B_r$  che indica che il materiale magnetico è magnetizzato. Ciò significa che le spire atomiche mantengono l'orientamento imposto dal campo esterno.

Riducendo ulteriormente  $H$  per valori negativi si continua a percorrere tale ciclo che ha una non linearità rappresentata da una curvatura detta comunemente "ginocchio". Si raggiunge un punto di lavoro a induzione nulla che è definito come "campo magnetico coercitivo"  $H_c$ , cioè il valore di campo magnetico necessario affinché il magnete si smagnetizzi. Successive riduzioni di  $H$  permettono di tracciare il resto del ciclo di isteresi affetto da saturazione.

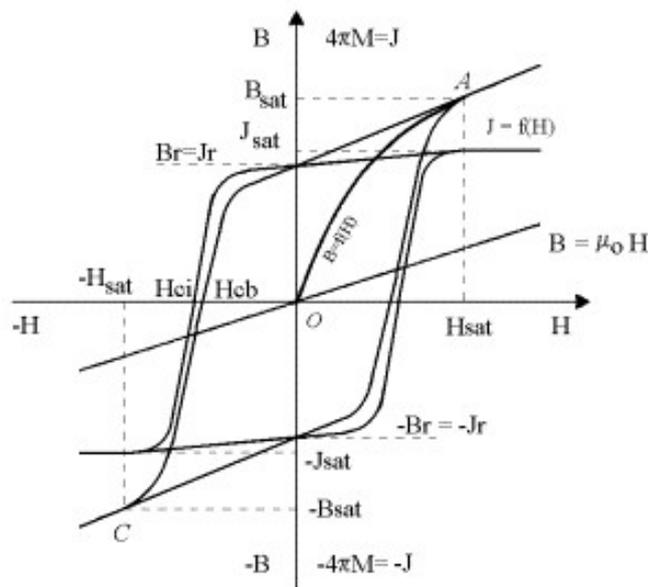


Figura 5-2 Confronto tra ciclo di isteresi  $B(H)$  e ciclo di isteresi intrinseco  $J(H)$

Sottraendo punto per punto ad ogni valore di  $B(H)$  il corrispondente valore  $\mu_0 H$  si ottiene una curva chiamata di “magnetizzazione intrinseca”  $J(H)$ . I punti notevoli di  $J(H)$  sono l’induzione residua  $B_r = J_r$  e la “forza coercitiva intrinseca”  $H_{ci}$ .

L’induzione magnetica totale  $B$  può essere definita, per il principio di sovrapposizione degli effetti, dalla somma del campo di induzione  $B_0 = \mu_0 H$  e del campo di magnetizzazione intrinseca  $J_c$  prodotto dalla corrente di magnetizzazione:

$$B = B_0 + J_c$$

La porzione di caratteristica che permette di conoscere la resistenza alla smagnetizzazione del materiale è quella all’interno del secondo quadrante del piano B-H. È preferibile che, per applicazioni motoristiche, il materiale abbia una caratteristica nel secondo quadrante:

- lineare;
- con bassa pendenza ( $\mu \cong \mu_0$ ).

Per capire meglio come utilizzare il magnete in applicazioni in cui è soggetto a campi  $H$  negativi smagnetizzanti, si consideri solo il secondo quadrante del piano B-H riportato in Figura 5-3:

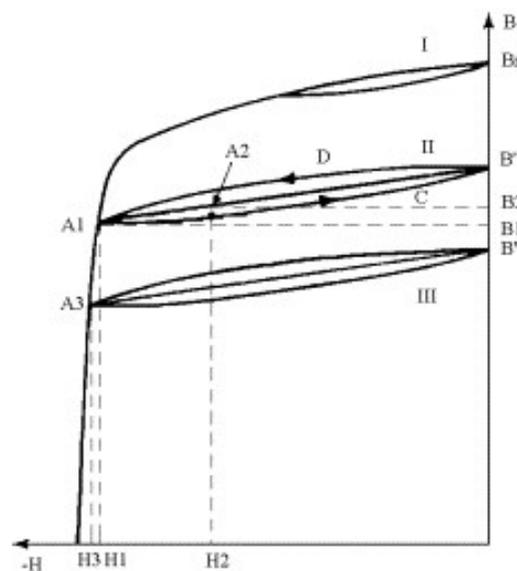


Figura 5-3 Caratteristica di smagnetizzazione

Fornendo un campo esterno di intensità pari a  $-H_1$  oltre il ginocchio si produce una smagnetizzazione irreversibile. In questo caso se si riporta gradualmente  $H = 0$  allora si percorre una traiettoria II diversa da quella originale I a cui corrisponde un valore di induzione  $B'$  più basso

rispetto a  $B_r$ . Variando  $H$  tra 0 e  $-H_1$  si traccia un ciclo di isteresi minore che, per alcune applicazioni pratiche, può essere approssimato a una retta con pendenza pari a quella passante per il punto  $B_r$ . Per evitare di smagnetizzare il magnete si deve lavorare nel tratto lineare della caratteristica prima del ginocchio.

## 5.2. Caratterizzazione di un magnete

La caratterizzazione dei magneti permanenti consiste nella misura delle grandezze fisiche descritte ( $J_c$ ,  $H_{ci}$ ,  $H_{CB}$ ,  $B_r$ ). Lo strumento utilizzato per effettuare tali misure è l'isteresigrafo (Figura 5-4).



Figura 5-4 Isteresigrafo

In base ai parametri in ingresso (dimensioni geometriche del campione, tipo di magnete, tipo di sensore), inseriti nel software di un computer dedicato, vengono controllati andamento e valore di corrente che circola in un avvolgimento in modo tale da smagnetizzare il magnete. Le misure vengono effettuate mediante l'ausilio di un sensore costituito da un avvolgimento disposto in modo concentrico al magnete. I dati vengono forniti al gaussmetro e poi al computer che permette una visualizzazione grafica della caratteristica di smagnetizzazione (Figura 5-5).



## 6. Realizzazione magneti permanenti

I magneti possono essere realizzati con diversi metodi, che costituiscono un fattore di scelta industriale importante per poter velocizzare o rendere più efficiente il processo di costruzione del motore in esame. Si distinguono due processi principali:

- stampaggio per iniezione;
- stampaggio per compressione.

### 6.1. Stampaggio per iniezione

È un processo rapido concepito per la realizzazione in breve tempo di una grande quantità dello stesso prodotto plastico. Prevede la fusione della sostanza plastica e la successiva iniezione ad alta pressione all'interno di uno stampo.

Alcuni magneti utilizzati in questa trattazione contengono il poliammide di tipo 6 (PA6) e sono indicati con la sigla CPPA6. La PA6 è un polimero facile da lavorare che possiede buone proprietà meccaniche per sforzi di taglio, urti, abrasione. La presenza del PA6 implica l'utilizzo del processo di stampo per iniezione. Le percentuali di materiale ferromagnetico e PA6 che compongono la miscela determinano le caratteristiche del magnete. I composti utilizzati sono il NdFeB con densità di  $7 \text{ g/cm}^3$  e il PA6 con densità intorno a  $1 \text{ g/cm}^3$ .

Indicando con X e Y, rispettivamente, la percentuale desiderata di NdFeB e di PA6, si può ricavare la densità della miscela (Z) come segue:

$$\frac{Z}{100} = \frac{X}{7} + \frac{Y}{1} \rightarrow Z = 100 * \left( \frac{X}{7} + \frac{Y}{1} \right)$$

#### - Miscelatura

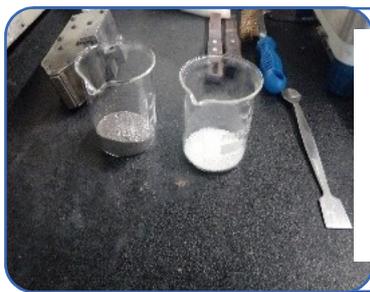
Il macchinario utilizzato per miscelare questi composti si chiama **Brebender**. Esso è costituito da due viti sagomate che ruotano con verso opposto e che vengono riscaldate per poter fondere il polimero. Un coperchio permette il contenimento delle sostanze da miscelare. La temperatura e la velocità di utilizzo per materiale PA6 sono, rispettivamente, di 200-270°C e 30-100 rpm. Dato che la capienza massima del miscelatore è di  $38.7 \text{ cm}^3$ , la massa di miscela da inserirvi risulta:

$$m = Z * 38.7$$

Noti X e Y è possibile ricavare la massa dei singoli composti da inserire nel miscelatore:

$$m_{NdFeB} = X * \frac{m}{100} \quad m_{PA6} = Y * \frac{m}{100}$$

Dopo aver definito le quantità necessarie, si segue la procedura di miscelatura esposta più sotto:



### Preparazione

- Preparare le quantità corrette di sostanze da inserire nel miscelatore
- Portare la temperatura di lavoro a 240 °C
- Portare la velocità del miscelatore fino a 20 rpm



### Procedura di miscelatura

- Introdurre lentamente il polimero PA6
- Introdurre la polvere di NdFeB



- Porre il tappo sulla bocca di ingresso del miscelatore
- Aumentare la velocità fino a 60 rpm
- L'indice di una corretta miscelatura è dato dalla vibrazione del tappo. Se ciò non avviene le cause possono dipendere da un'errata temperatura di lavoro oppure un errato calcolo del volume di sostanze



### Procedura di estrazione della miscela

- Togliere il tappo
- Arrestare la velocità di rotazione delle viti
- Estrarre la maschera
- Raschiare la miscela sia dalla maschera che dalle viti
- Lasciare raffreddare



### Miscela ottenuta

- La miscela ottenuta è conservata per successive lavorazioni
- È necessario ripulire lo strumento di lavoro seguendo da capo il procedimento appena esposto ma usando un polimero specifico (LUPOLEN) anziché la miscela. La procedura di pulizia va ripetuta 4-5 volte per eliminare

Figura 6-1 Procedimento di miscelatura

- *Macinatura*

La miscela ottenuta è granulosa e non omogenea e può causare la formazione di spazi vuoti durante lo stampo ad iniezione. Ciò può essere evitato riducendola in polvere fine mediante macinatura che si articola in due fasi (Figura 6-2):

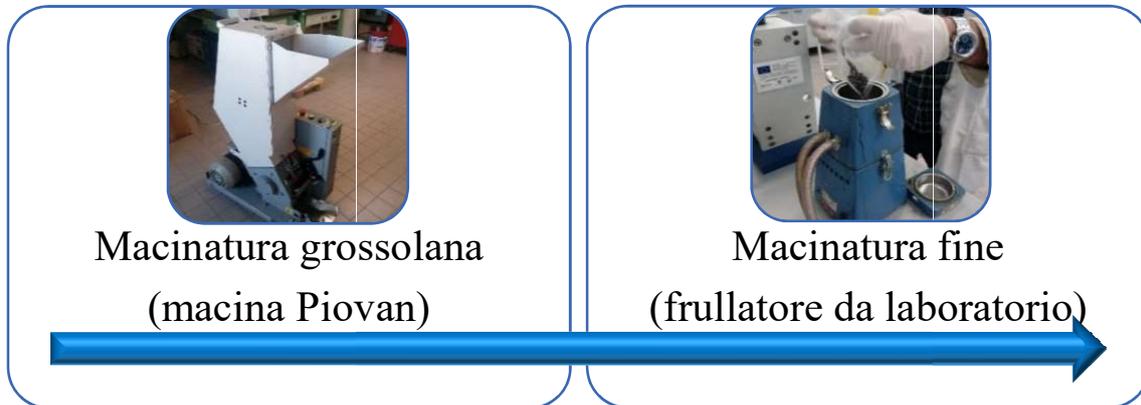


Figura 6-2 Procedimento di macinatura

- *Pressatura*

Per effettuare lo stampo a iniezione è necessario conoscere le dimensioni dello stampo per potere calcolare il volume e quindi anche la massa di miscela.

Altezza (mm)	4.03
Diametro (mm)	14.97
Raggio (mm)	7.49
Sezione (mm <sup>2</sup> )	176.01
Volume (mm <sup>3</sup> )	709.31
Massa (g)	3.103

Tabella 6-1 Dimensioni geometriche stampo per processo di iniezione

Può capitare che la miscela contenga delle particelle di acqua a causa dell'umidità ambientale. Esse durante il processo di iniezione possono evaporare formando delle bolle d'aria all'interno del magnete svantaggiose per le prestazioni magnetiche dello stesso. Per questo motivo è necessario eliminare tutta l'umidità che la miscela ha accumulato durante le precedenti lavorazioni facendola essiccare all'interno di un forno che può realizzare il vuoto (Figura 6-3). La temperatura e la durata di essiccazione sono in genere indicate dal produttore all'interno della scheda tecnica del polimero utilizzato.



Figura 6-3 Forno per trattamento termico a vuoto

Dopo che è stata eliminata tutta l'umidità, si realizza una struttura a strati (Figura 6-4) con 2 piastre e lo stampo in mezzo per contenere la polvere durante il processo di pressatura. Per evitare che il campione finale si attacchi alle piastre si utilizza uno spray distaccante sulle facce rivolte verso la sagoma.

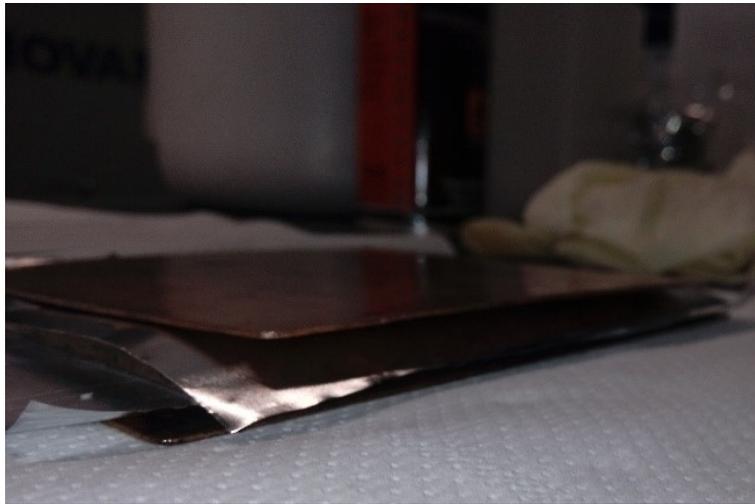


Figura 6-4 Sandwich per pressatura nel processo di iniezione

La pressa utilizzata permette di regolare le temperature delle due piastre e la pressione di lavoro (Figura 6-5). La piastra superiore è fissa mentre quella inferiore può traslare verticalmente. Inoltre, le piastre hanno un sistema di canali al loro interno che permette il passaggio di fluidi refrigeranti (acqua, aria) per raffreddare il campione dopo l'iniezione in stampo.



Figura 6-5 Pressa con piastre riscaldate

A questo punto si procede con lo stampo a iniezione le cui fasi sono schematizzate in Figura 6-6:

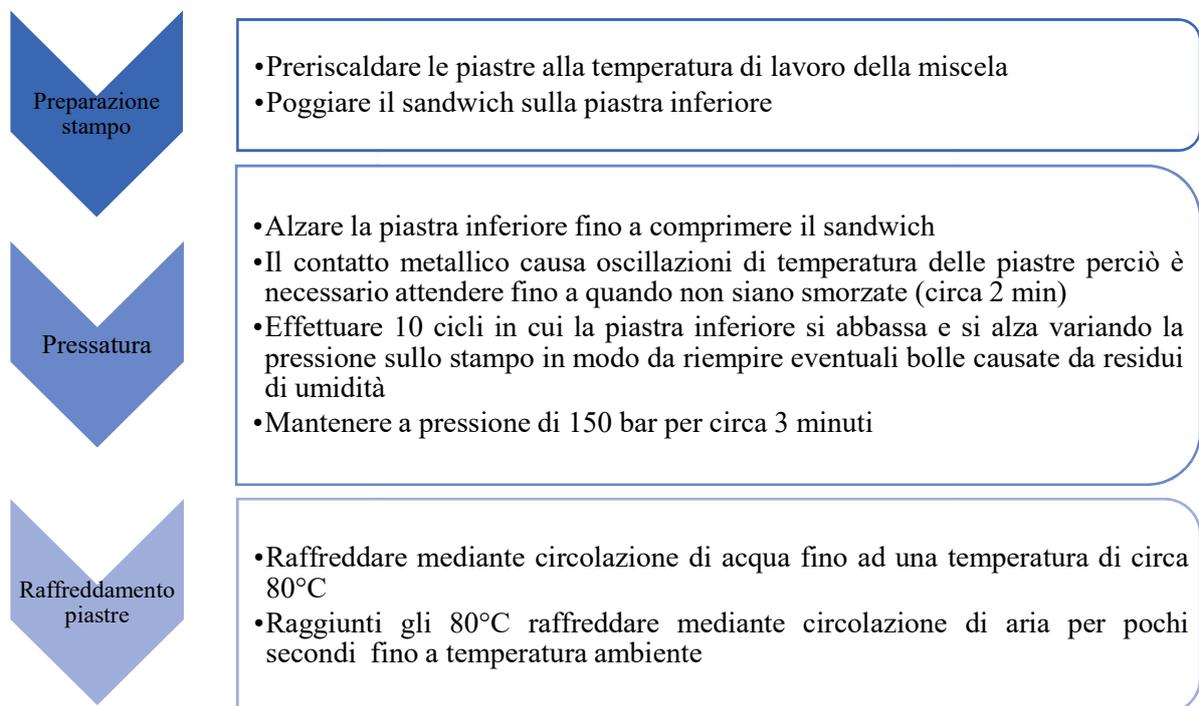


Figura 6-6 Procedura pressatura per processo di iniezione

## 6.2. Stampaggio per compressione

Lo stampaggio per compressione è un processo di lavorazione delle polveri metalliche mescolate con opportuni “leganti chimici” che permette di realizzare componenti che richiedono un certo livello di robustezza.

Il legante utilizzato per la realizzazione dei magneti è la resina fenolica. Si tratta di un polimero sintetico ottenuto dalla reazione tra fenolo e formaldeide. Questo materiale è termoindurente, cioè una volta prodotto non può essere nuovamente fuso in quanto la struttura reticolare diventa fragile e ha una temperatura di lavoro massima fino a 300°C. La polvere metallica invece è il NdFeB. I campioni realizzati miscelando queste sostanze sono indicati con l’acronimo CPF. Variando la quantità di resina fenolica e di NdFeB si possono realizzare campioni con caratteristiche differenti.



Figura 6-7 Miscela di resina fenolica e NdFeB

I componenti sono stati mescolati prima a mano (Figura 6-7) e poi mediante un agitatore meccanico tridimensionale chiamato **Turbula** (Figura 6-8) che permette una miscelazione rapida ed omogenea. Questo trattamento è stato eseguito per 30 minuti.



Figura 6-8Turbula

Le polveri metalliche così ottenute sono sottoposte alle operazioni di pressatura e di cottura.

- *Pressatura*

Mediante la pressa, la miscela viene compressa in uno stampo per aumentare le forze di coesione tra i grani della polvere e per dare una forma compatta e precisa al pezzo (Figura 6-9). Lo stampo utilizzato è di forma cilindrica con diametro di 40 mm.

Le proprietà magnetiche e meccaniche del magnete dipendono dalla modalità con cui viene effettuata questa operazione.

I parametri che determinano la qualità del magnete durante il compattamento possono essere impostati via software e si distinguono in:

- pressione esterna ( $P_{es}$ ): pressione applicata al volume di miscela per aumentare le forze di coesione, inoltre influisce anche sull'altezza del campione;
- pressione di mantenimento ( $P_{ma}$ ): durante la pressatura il campione accumula energia elastica che potrebbe causare delle crepe nel caso di una rapida estrazione dallo stampo, pertanto durante questa fase viene imposta una pressione di mantenimento affinché si mantenga l'integrità del campione;
- altezza camera ( $h_c$ ): l'altezza della camera dello stampo determina l'altezza del campione finale (ad esempio, con una  $P_{es} = 500 \text{ MPa}$ ,  $P_{ma} = 6 \text{ bar}$  ed  $h_c = 14 \text{ mm}$  si ottengono per una miscela di NdFeB e resina fenolica una altezza del campione di  $h \approx 5.5 \text{ mm}$ ).

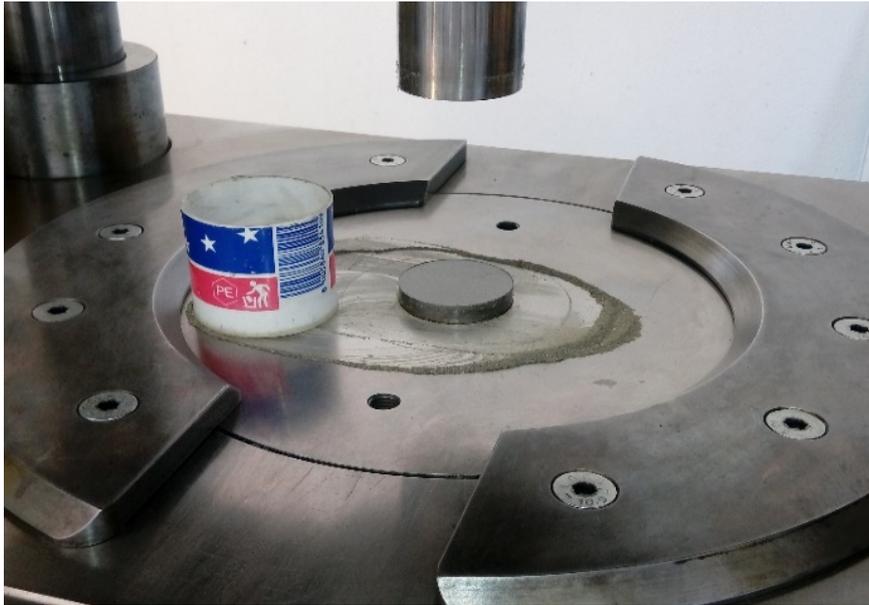


Figura 6-9 Pezzo in uscita da pressa

- *Cottura*

Il pezzo in uscita dalla pressa risulta ancora fragile, pertanto è necessaria un'operazione di cottura per fondere i leganti che compongono la miscela. Ciò permette di formare un reticolo di legamenti robusti tra i granuli di polvere metallica. La temperatura di cottura deve essere inferiore a quella di fusione di quest'ultima.

### 6.3. **Magnetizzazione**

Il principio di magnetizzazione è lo stesso descritto nel 5.1. Viene infatti prodotto, mediante una bobina conduttrice percorsa da corrente, un campo magnetico con intensità sufficiente da saturare il magnete investito da flusso magnetico.



Figura 6-10 Magnetizzatore

Lo strumento utilizzato è il **magnetizzatore** (Figura 6-10). più sotto, i campioni vengono fissati su un supporto di plastica e il tutto viene posizionato all'intero di una bobina con N spire. Per avviare la magnetizzazione si preme un tasto.

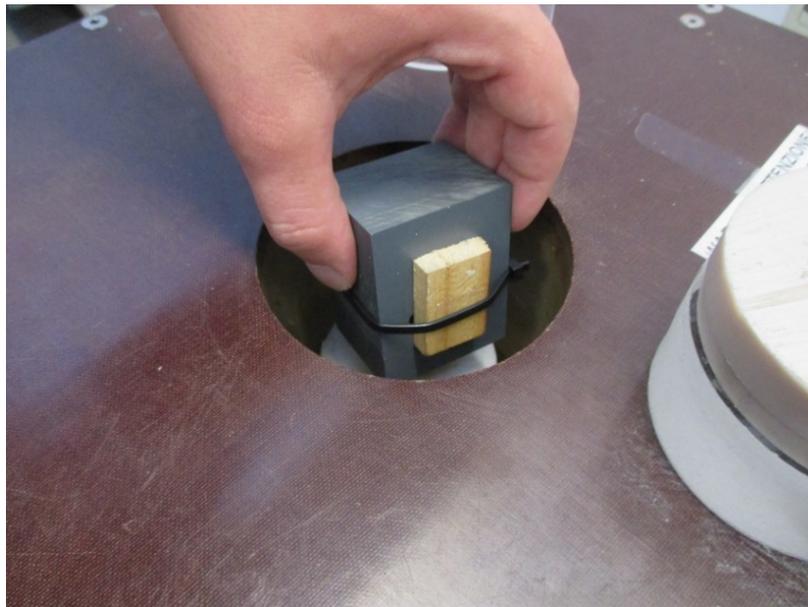


Figura 6-11 Inserimento magneti nella bobina del magnetizzatore

## 7. Magneti utilizzati

Si sono utilizzati per la simulazione del modello della macchina elettrica sia magneti realizzati in laboratorio che magneti presenti in commercio. Sono state successivamente rappresentate la densità di campo magnetico estrinseco ( $B(H)$ ) ed intrinseco ( $J(H)$ ) rispettivamente con linea continua e linea tratteggiata

### 7.1. Magneti realizzati in laboratorio chimico

- CPPA6 e CPF

Le serie di magneti CPPA6 e CPF sono stati realizzati in laboratorio miscelando diverse percentuali di NdFeB, rispettivamente, con poliammide(PA6) e con resina fenolica. I magneti CPPA6 si prestano al processo di iniezione e i magneti CPF invece sono particolarmente adatti per il processo di compressione.

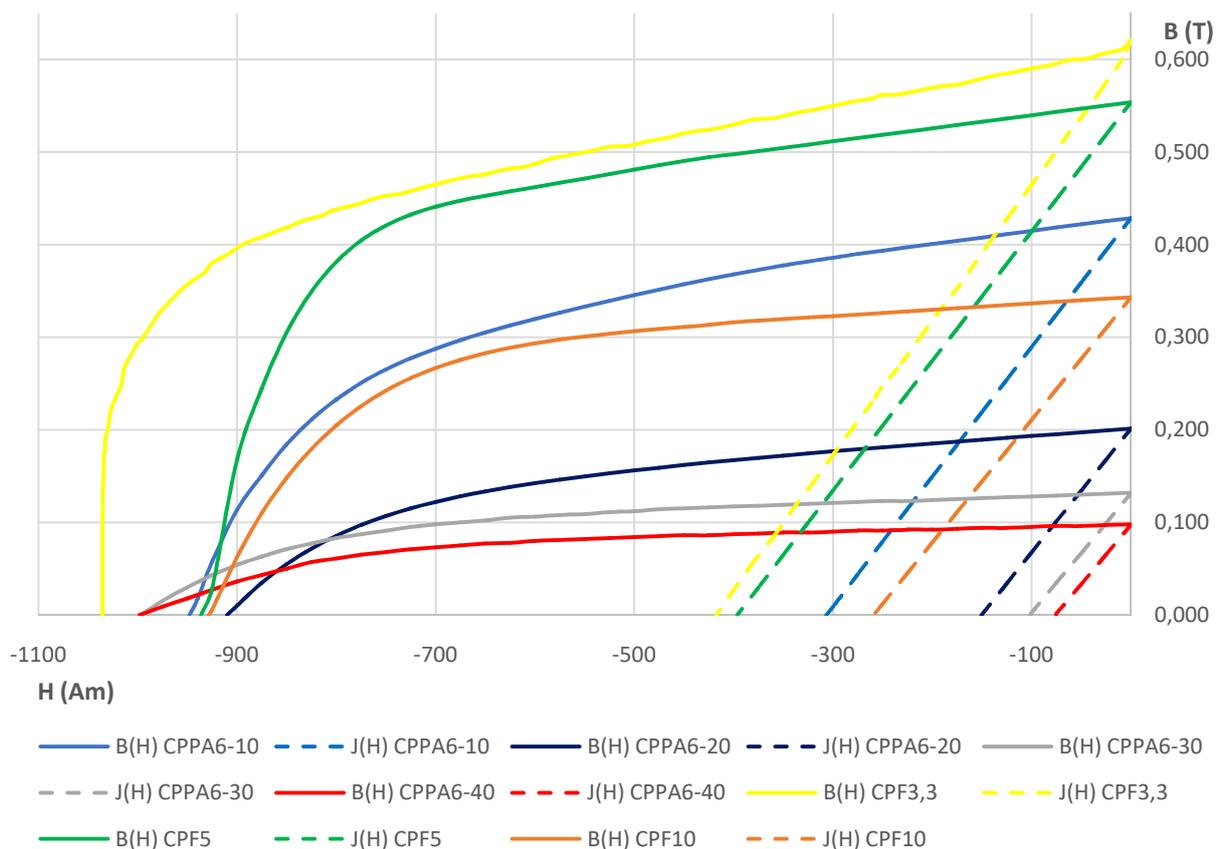


Figura 7-1 Caratteristiche di smagnetizzazione serie di magneti CPPA6 e CPF

La caratterizzazione è avvenuta mediante **isteresigrafo** che ha permesso di ottenere le rispettive caratteristiche magnetiche riportate in Figura 7-1.

Si riportano in Tabella 7-1 i valori delle grandezze magnetiche di principale interesse:

<b>Magneti</b>	<b>H<sub>cj</sub> (kA/m)</b>	<b>H<sub>cB</sub> (kA/m)</b>	<b>μ<sub>r</sub> (H/m)</b>	<b>Br (T)</b>
<b>CPPA6-10 (10% di Nylon)</b>	948	306700	1,112	0,429
<b>CPPA6-20 (20% di Nylon)</b>	910	150464	1,065	0,201
<b>CPPA6-30 (30% di Nylon)</b>	997	101200	1,034	0,132
<b>CPPA6-40 (40% di Nylon)</b>	998	75368	1,030	0,097
<b>CPF R W 3,3% (3,3% di resina fenolica)</b>	1017	429510	1,133	0,612
<b>CPF5 (5% di resina fenolica)</b>	937	396238	1,113	0,554
<b>CPF10 (10% di resina fenolica)</b>	923	259112	1,053	0,343

Tabella 7-1 Dati dei magneti

## Magneti commerciali

Si è deciso di testare anche magneti presenti in commercio per avere una più ampia e completa varietà di campioni. I magneti sono stati scelti, oltre che per le caratteristiche magnetiche, anche per le loro proprietà meccaniche.

- *NdFeB37*

Questo magnete risulta avere un forte campo magnetico:

$$H_{cJ} = 950 \text{ kA/m}$$

$$\mu_r = 1.048 \text{ H/m}$$

perciò si è pensato che il volume di materiale magnetico da inserire negli sbarramenti potrebbe essere ridotto, realizzando magneti di forma rettangolare (Figura 7-2).

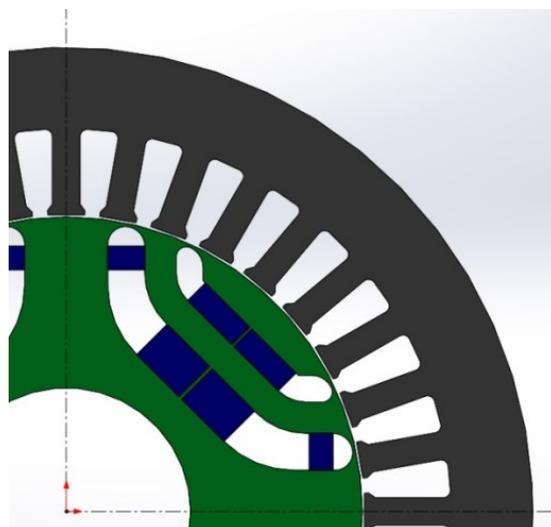


Figura 7-2 PMAsR con magneti rettangolari

Questa forma permette di ridurre la quantità di materiale, e quindi i costi, senza influire sulle prestazioni del motore. Inoltre, risulta essere particolarmente facile da realizzare in laboratorio e semplifica il processo di magnetizzazione in quanto per ogni parallelepipedo la direzione di magnetizzazione è normale a una delle sue facce.

- *Ferrite anisotropa*

I magneti in ferrite dura anisotropa vengono realizzati orientando i granuli di ferrite in una direzione preferenziale applicando un forte campo magnetico durante il processo di stampo. La loro magnetizzazione dovrà avvenire quindi nella stessa direzione di orientamento dei granuli. In genere, presentano dei valori di  $H_{CJ}$  e  $B_r$  elevati, si è ritenuto pertanto che la forma più efficace per questi magneti sia quella rettangolare con l'ulteriore vantaggio di un più agevole accoppiamento con gli sbarramenti.

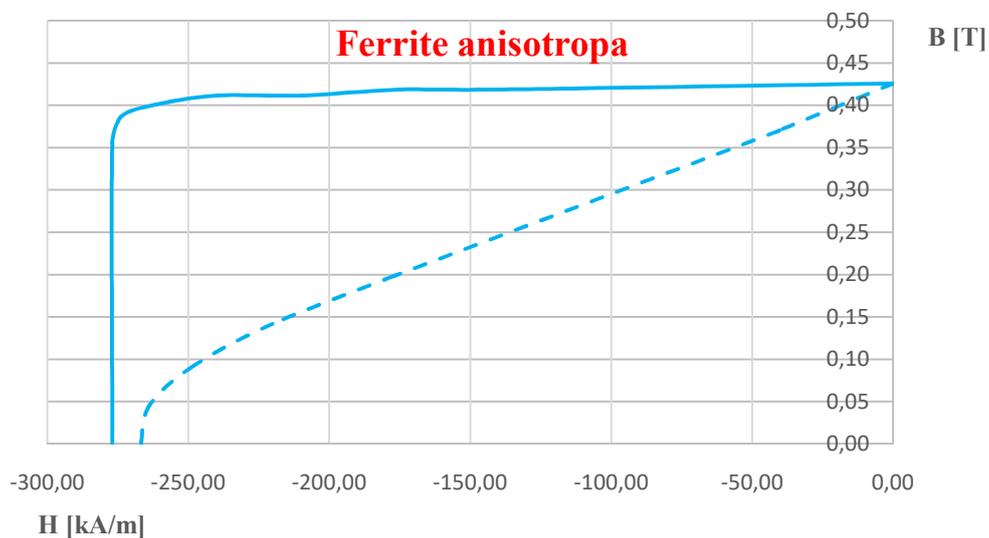


Figura 7-3 Caratteristiche magnetiche Ferrite Anisotropa

$$B_r = 0,426 \text{ T}$$

$$H_{CB} = 268 \text{ kA/m}$$

$$H_{CJ} = 275 \text{ kA/m}$$

- *Plastoferrite*

Per semplificare le operazioni di inserimento del magnete negli sbarramenti si potrebbero utilizzare le plastoferriti, cioè magneti adatti a essere iniettati a specifica temperatura. La loro magnetizzazione però è complicata in quanto deve avvenire successivamente all'inserimento. Questo problema potrebbe essere risolto generando un campo magnetico esterno mediante gli avvolgimenti statorici. Nella plastoferrite il campo magnetico coercitivo e la permeabilità magnetica relativa sono:

$$B_r = 0,280 \text{ T}$$

$$H_{CJ} = 187,24 \text{ kA/m}$$

$$\mu_r = 1,02 \text{ H/m}$$

- I-CER 1612 (CIBAS)

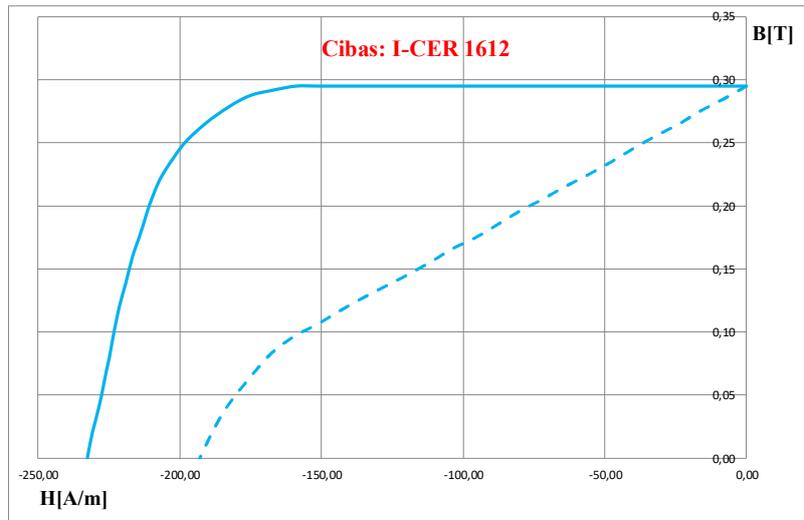


Figura 7-4 Caratteristica magnetica I-CER 1612

$$B_r = 0.300 \text{ T}$$

$$H_{CB} = 193 \text{ kA/m}$$

$$H_{cJ} = 233 \text{ kA/m}$$

- Plastoren8 (CIBAS)

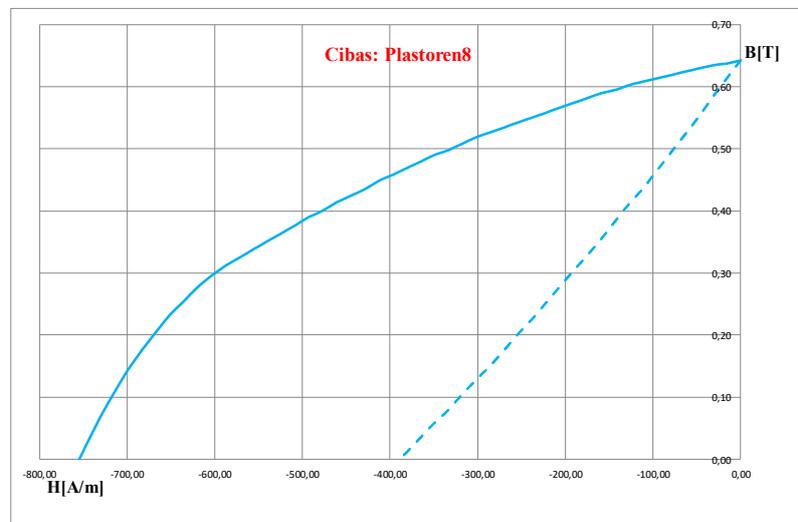


Figura 7-5 Caratteristica magnetica Plastoren8

$$B_r = 0.643 \text{ T}$$

$$H_{CB} = 388 \text{ kA/m}$$

$$H_{cJ} = 755 \text{ kA/m}$$

Il Plastoren8 ha il vantaggio di essere un magnete flessibile quindi si suppone possa agevolare l'accoppiamento con gli sbarramenti. In questo modo è possibile magnetizzare il magnete in un'unica direzione e poi fletterlo per fare variare la direzione di intensità di campo magnetico seguendo la forma degli sbarramenti.

- Granuli MQIP-M260

I granuli MQIP-M260 si presentano in pellet (Figura 7-6) e sono adatti al processo di iniezione.



Figura 7-6 Granuli MQIP-M260

La loro caratteristica magnetica è rappresentata più sotto:

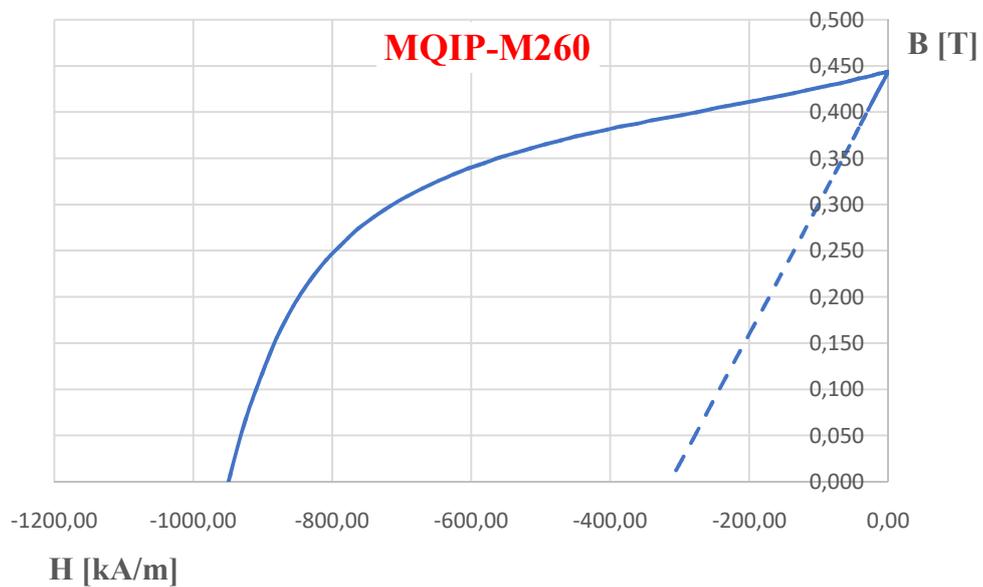


Figura 7-7 Caratteristica magnetica MQIP-M260

$$B_r = 0.444 \text{ T}$$

$$H_{CB} = 314,18 \text{ kA/m}$$

$$H_{CJ} = 949,07 \text{ kA/m}$$

- Granuli FB23

Anche i granuli FB23 si presentano in pellet (Figura 7-8) e si prestano al processo di iniezione.



Figura 7-8 FB23

La caratteristica di smagnetizzazione di questo magnete è rappresentata più sotto:

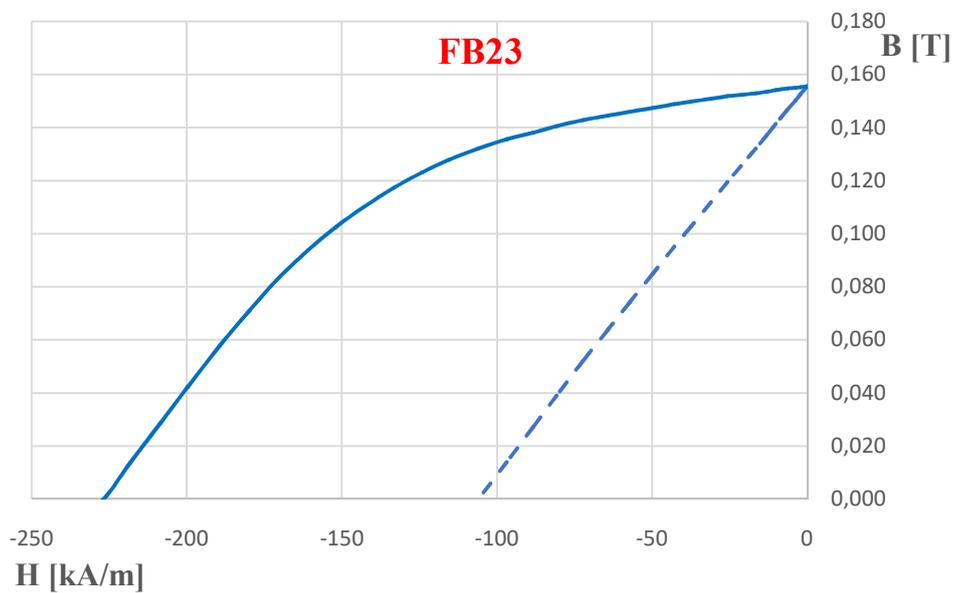


Figura 7-9 Caratteristica magnetica FB23

$$Br = 0.156 T$$

$$H_{CB} = 105,36 kA/m$$

$$H_{CJ} = 227,26 kA/m$$

## 8. Simulazioni

Le simulazioni sono state effettuate mediante l'utilizzo di due software:

- MATLAB: fornisce il modello elettromeccanico e le specifiche del motore;
- FEMM (*finite element method magnetics*): permette di risolvere problemi magnetici ed elettrostatici a basse frequenze mediante il metodo di calcolo con elementi finiti.

I due programmi lavorano in parallelo in modo tale da ottenere una descrizione completa delle prestazioni della macchina. Mediante gli strumenti OctaveFEMM di Matlab è possibile interfacciare i due programmi in modo tale da estrarre informazioni utili all'analisi.

Verranno descritte le curve relative alle prestazioni della macchina SynchRel, ovvero la macchina a riluttanza senza magneti permanenti, per poter avere un riferimento di paragone con le PMA<sub>sR</sub> con i diversi magneti scelti.

### 8.1. SynchRel

#### 8.1.1. *solving\_core* e *post\_processing*

Le simulazioni si differenziano per i dati forniti in ingresso alle equazioni definite nei file `matlabsolving_core` e `post_processing`.

I dati forniti possono essere:

- $I_{pk}$  ampiezza del vettore di corrente;
- $\alpha_{ie}$  angolo del vettore di corrente rispetto all'asse di riferimento d;
- $\vartheta_m$  angolo meccanico del rotore rispetto allo statore.

Per determinare la coppia sono necessarie le componenti di corrente e flusso proiettate sul sistema di assi d-q rappresentati in Figura 8-1 assieme al sistema di riferimento trifase di assi complanari 123 sfasati tra loro di  $120^\circ$ , rispetto al quale ruota ad una velocità  $\omega_m$ .

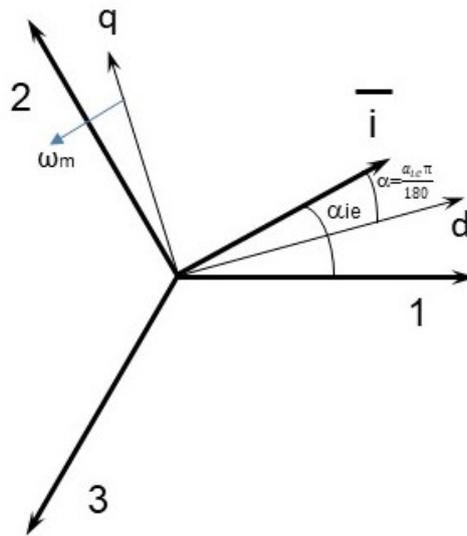


Figura 8-1 Riferimenti assi fisi ed assi rotanti

Mediante le equazioni definite in solving\_core si possono ottenere i componenti del vettore rotante di corrente proiettati sugli assi d e q:

$$\begin{cases} i_d = I_{pk} \cos\left(\frac{\alpha_{ie}\pi}{180}\right) \\ i_q = I_{pk} \sin\left(\frac{\alpha_{ie}\pi}{180}\right) \end{cases}$$

Sapendo che quando l'angolo meccanico varia di  $360^\circ$  l'angolo elettrico varia  $p \cdot 360^\circ$ :

$$\vartheta_e = p \cdot \vartheta_m \cdot \frac{\pi}{180}$$

allora si possono ricavare le correnti di fase  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$ :

$$\begin{cases} i_1 = i_d \cos(\vartheta_e) - i_q \sin(\vartheta_e) \\ i_2 = i_d \cos\left(\vartheta_e - \frac{2}{3}\pi\right) - i_q \sin\left(\vartheta_e - \frac{2}{3}\pi\right) \\ i_3 = i_d \cos\left(\vartheta_e + \frac{2}{3}\pi\right) - i_q \sin\left(\vartheta_e + \frac{2}{3}\pi\right) \end{cases}$$

E infine, si ottiene la corrente che circola nella singola cava q:

$$I_{slot} = n_{cs}(i_1 \cdot k_1(q) + i_2 \cdot k_2(q) + i_3 \cdot k_3(q))$$

Dove  $p$  è il numero di paia poli,  $n_{cs}$  è il numero di conduttori in serie per cava e le matrici  $k_1(q)$ ,  $k_2(q)$  e  $k_3(q)$  rappresentano la posizione dei conduttori delle fasi nelle cave.

Per poter definire i flussi concatenati con le fasi si può applicare il teorema del rotore all'induzione magnetica  $\vec{B}$ . È noto che in condizione magnetostatica o quasi-magnetostatica, la circuitazione del potenziale vettore lungo qualsiasi linea chiusa è uguale al flusso del campo magnetico concatenato con tale linea:

$$\varphi = \int_S \vec{B} \cdot \vec{n} \, ds = \oint_l \vec{A} \cdot \vec{t} \, dl$$

Mediante l'ausilio di FEMM, per effettuare calcoli con il metodo degli elementi finiti, si può estrarre tale informazione mediante il comando OctaveFEMM `mo_blockintegral(1)`. Considerando che il campo ha la stessa direzione normale alla superficie rivolta verso il traferro e con l'ipotesi di campo vettoriale conservativo del flusso, si possono ricavare i flussi concatenati con gli avvolgimenti delle fasi:

$$\begin{cases} \lambda_1 = n_{cs} \cdot k_1(q) \cdot \text{real}(Az) \\ \lambda_2 = n_{cs} \cdot k_2(q) \cdot \text{real}(Az) \\ \lambda_3 = n_{cs} \cdot k_3(q) \cdot \text{real}(Az) \end{cases}$$

Inoltre, è possibile ottenere le componenti del vettore di flusso proiettate sugli assi  $d$  e  $q$ :

$$\begin{cases} \lambda_d = \frac{2}{3} \left[ \lambda_1 \cdot \cos(\vartheta_e) + \lambda_2 \cdot \cos\left(\vartheta_e - \frac{2}{3}\pi\right) + \lambda_3 \cdot \cos\left(\vartheta_e - \frac{4}{3}\pi\right) \right] \\ \lambda_q = \frac{2}{3} \left[ \lambda_1 \cdot \sin(\vartheta_e) + \lambda_2 \cdot \sin\left(\vartheta_e - \frac{2}{3}\pi\right) + \lambda_3 \cdot \sin\left(\vartheta_e - \frac{4}{3}\pi\right) \right] \end{cases}$$

Mediante le grandezze in assi  $d$ - $q$  è possibile ricavare la coppia  $T$ , come indicato nei modelli elettromeccanici delle macchine in esame.

### 8.1.2. Sim\_var\_alphaie

Con questa simulazione viene fornito in ingresso l'ampiezza e l'argomento del vettore corrente i quali, con due cicli `for` annidati, vengono fatti variare con un determinato passo. Le condizioni di simulazione sono le stesse per tutti i magneti:

$$\begin{array}{ll} I_{pk,min} = 4 \, A & \alpha_{ie,min} = 0 \, \text{deg} \\ I_{pk,step} = 2 \, A & \alpha_{ie,step} = 1.5 \, \text{deg} \\ I_{pk,max} = 20 \, A & \alpha_{ie,max} = 90 \, \text{deg} \end{array}$$

Alla fine della simulazione, mediante la funzione *process\_var\_alphaie*, è possibile ottenere l'andamento di coppia al variare di  $\alpha_{ie}$  e anche la matrice dei componenti in asse diretto ( $\lambda_d$ ) e in quadratura ( $\lambda_q$ ) di  $\lambda_{tot}$ , che ci serviranno per ricavare il PF.

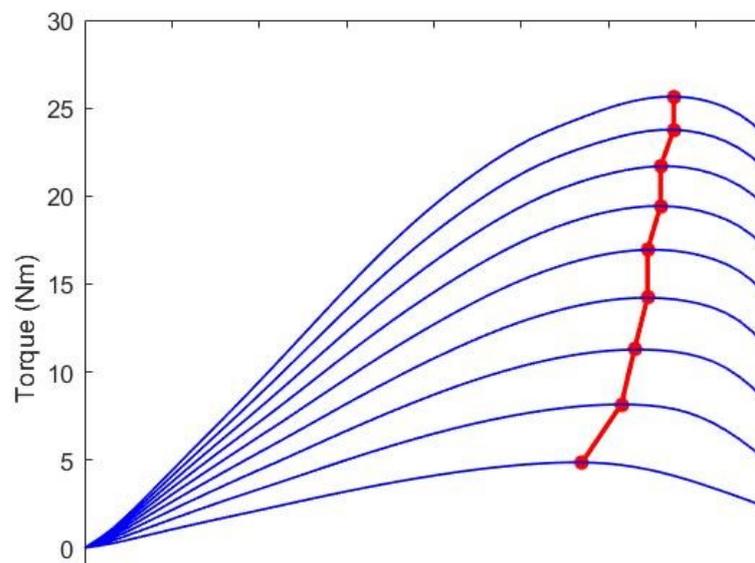


Figura 8-2T- $\alpha_{ie}$  SynchRel

La famiglia di curve nella Figura 8-2 rappresenta l'andamento di coppia al variare dell'angolo del vettore di corrente rispetto al riferimento. I dati di principale interesse sono i valori di coppia massima di ogni curva. Ad ognuno di questi punti corrisponde una coppia di componenti in asse d e q del vettore di flusso. Dall'unione di questi dati in un piano d-q si ottiene la traccia di punti di lavoro a massima coppia per corrente impressa (MTPA). È preferibile che la curva rappresentata in rosso sia il più ripida possibile affinché il PF non sia troppo piccolo per coppie elevate.

### 8.1.3. *Sim\_var\_thetam*

Fissato un angolo elettrico tra  $I$  e  $\lambda_{tot}$  *Sim\_var\_thetam* varia l'angolo meccanico e calcola l'andamento di:

- densità di flusso;
- flussi concatenati con le fasi;
- coppia.

Inoltre, tale simulazione ne determina anche il contenuto armonico mediante scomposizione di Fourier. È possibile ottenere tali diagrammi dalla funzione *process\_var\_thetam*.

L'intervallo e il passo con cui è fatto variare l'angolo meccanico sono i seguenti:

$$\vartheta_{m,min} = 0$$

$$\vartheta_{m,step} = 6/p$$

$$\vartheta_{m,max} = 360/p$$

Si è scelto come angolo elettrico quello relativo al punto appartenente alla MTPA per una corrente di  $I_{pk}=10$  A. Questo valore si ottiene dalla curva  $T-\alpha_{ie}$  fornita nella precedente simulazione e sarà diverso per ogni magnete. I diagrammi di seguito mostrano come influisce la variazione dell'angolo meccanico sulle grandezze magnetiche e meccaniche:

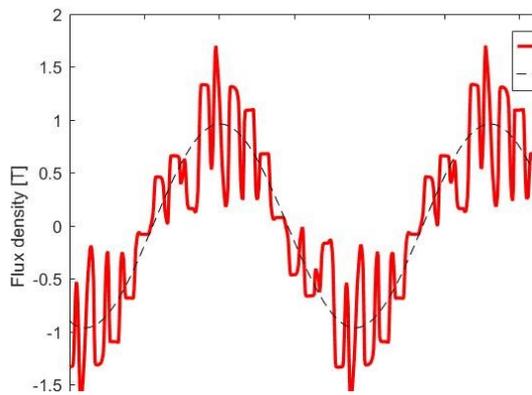


Figura 8-3B- $\vartheta_m$ SynchRel

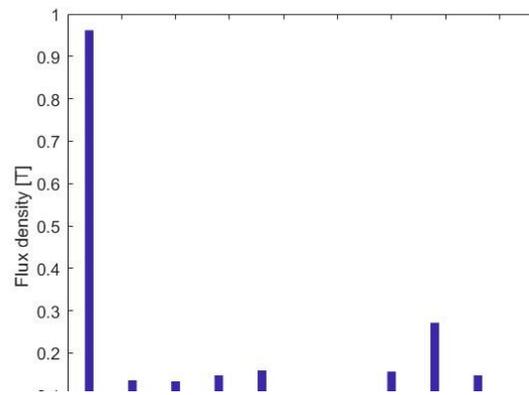


Figura 8-4B-ordine\_armonicoSynchRel

Il valore di induzione al traferro è stato ricavato da FEMM mediante il comando `mo_makeplot(2, Bg_points, 'Bg.txt', 1)` di OctaveFEMM e conservato nel file temporaneo `Bg.txt`. Dopo aver definito il parametro di densità di flusso `Bg`, il file temporaneo è stato cancellato. Questa operazione ripetuta a ogni spostamento del rotore permette di ottenere l'andamento di colore rosso in Figura 8-3. Per una rotazione completa del rotore si contano 36 picchi di induzione che corrispondono al passaggio cava-dente di statore.

più sopra, mediante la scomposizione di Fourier si è ottenuto lo spettro armonico dell'andamento che risulta avere un contenuto di 34° armonica elevato e che è la causa principale di ripple di coppia.

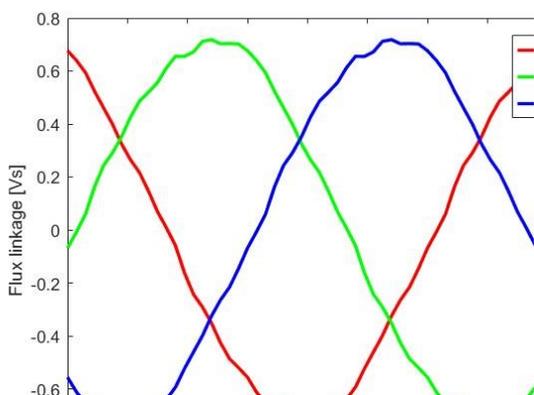


Figura 8-5  $\psi-\vartheta_m$  SynchRel

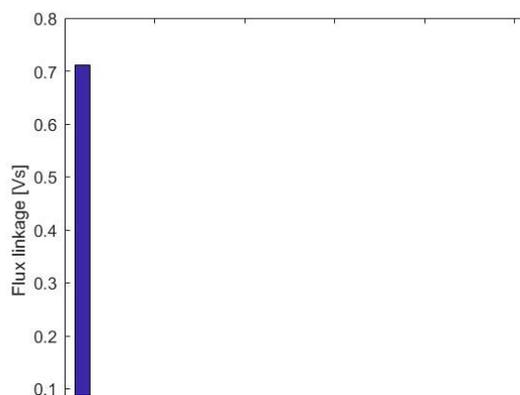


Figura8-6  $\psi$ -ordine\_armonico SynchRel

Il diagramma in Figura 8-5 rappresenta il flusso concatenato con le fasi. più sopra, mediante scomposizione di Fourier si osserva che, oltre la fondamentale, il contenuto armonico che vale la pena considerare è quello di quinta armonica.

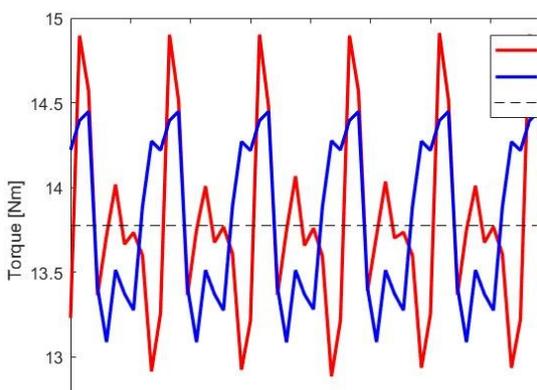


Figura 8-7  $T-\vartheta_m$  SynchRel

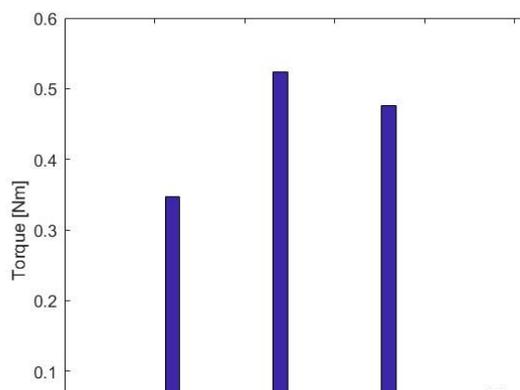


Figura 8-8  $T$ -ordine\_armonico SynchRel

In Figura 8-7 si riportano gli andamenti di coppia al variare dell'angolo meccanico. Viene indicata con  $T_{mxw}$  (in rosso) il tensore di coppia con carico pesato allo stato stazionario, definito mediante il comando di estrazione dati di OctaveFEMM *mo\_blockintegral(22)*, e con  $T_{dq}$  (in blue) la coppia ottenuta dal modello elettromeccanico della macchina definita nel primo capitolo e riportata di seguito:

$$T_{dq} = \frac{3}{2} p (FluxD * i_q - FluxQ * i_d)$$

In entrambe le coppie si possono osservare tre picchi ogni  $30^\circ$  che indicano la coppia applicata a un punto del rotore quando passa sotto le cave in cui sono presenti gli avvolgimenti delle fasi alimentate.

Si riscontra una certa differenza tra  $T_{mxw}$  e  $T_{dq}$  causata dall'incertezza del modello elettromeccanico che trascura le non linearità della macchina. Tuttavia i valori medi coincidono. Le valutazioni qualitative saranno effettuate considerando la  $T_{mxw}$  in quanto è stata calcolata con una maggiore precisione rispetto alla  $T_{dq}$ . Come previsto a causa delle oscillazioni di induzione, la coppia è affetta da ripple.

#### 8.1.4. Sim\_mapping

Questa simulazione permette, al variare delle componenti in asse diretto e in quadratura della corrente ( $I_d$ ,  $I_q$ ), di calcolare:

- la coppia in assi fissi solidali al rotore ( $T_{dq}$ );
- le perdite joule di statore;
- densità del flusso di statore;
- perdite nel ferro;
- potenza;
- fattore di potenza (PF).

Gli intervalli e i passi con cui vengono fatte variare le componenti di corrente  $I_d$  ed  $I_q$  sono i seguenti:

$$\begin{array}{lll} I_{dmax} = 14 \text{ A} & I_{qmax} = 14 \text{ A} & I_{step} = 0.25 \text{ A} \\ I_{dmin} = 0 \text{ A} & I_{qmin} = 0 \text{ A} & \end{array}$$

Dalla funzione *process\_mapping* è possibile ottenere i diagrammi nei piani di:

- coppia-velocità meccanica;
- potenza-velocità meccanica;
- corrente-velocità meccanica;
- $I_d - I_q$ .

I parametri utilizzati per avviare questa funzione sono:

$$\begin{array}{ll} V_{nom} = 230 \text{ V} & w_{max} = 20 * 10^3 \text{ rpm} \\ I_{nom} = 10 \text{ A} & \alpha_{ie,step} = 0.5 * 10^{-3} \\ Ni_{vec} = 100 & \alpha_{ie,vec} = 0: \alpha_{ie,step}: \pi/2 \end{array}$$

Dove:

- $V_{nom}, I_{nom}$  sono rispettivamente tensione e corrente nominale;
- $Ni_{vec}$  è il numero di punti generati dell'MTPA equidistanti tra un valore minimo (1A) e il valore nominale di corrente;
- $w_{max}$  è la velocità di rotazione massima;
- $\alpha_{ie,step}$  passo di variazione dell'angolo del vettore corrente;
- $\alpha_{ie,vec}$  vettore dell'angolo di corrente.

Per evidenziare le diverse zone di funzionamento descritte nel capitolo 2.5, sono stati utilizzati colori diversi per ogni zona. Partendo da velocità meccanica nulla si incontrano le zone di funzionamento:

- Zona 1 (rossa): funzionamento a coppia costante fino al valore  $w_1$  in cui si raggiunge massima potenza. Come è noto tale zona corrisponde alla percorrenza della curva MTPA nel piano  $i_d-i_q$ ;
- Zona 2 (verde): deflussaggio il cui range dipenderà dal tipo di macchina e dal tipo di magnete nel caso di rifasamento magnetico per PMA sR;
- Zona 3 (blue): si percorre la curva MTPV per ottenere maggiore velocità.

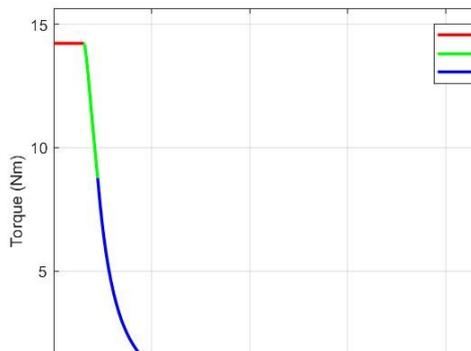


Figura 8-9 T-w SynchronRel

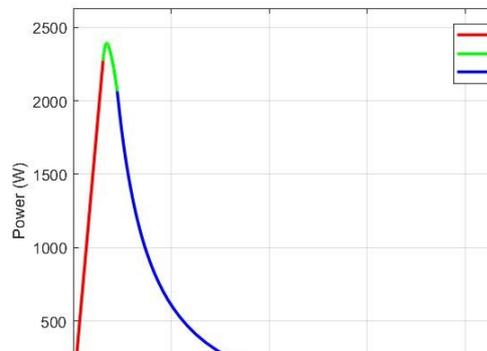


Figura 8-10 P-w SynchronRel

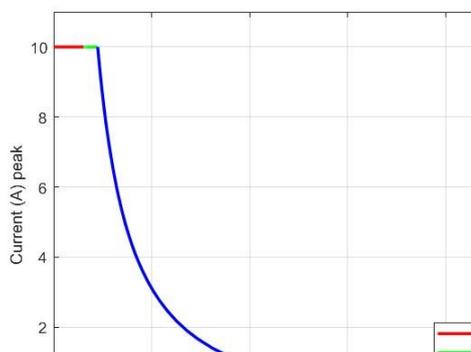


Figura 8-11 I-w SynchronRel

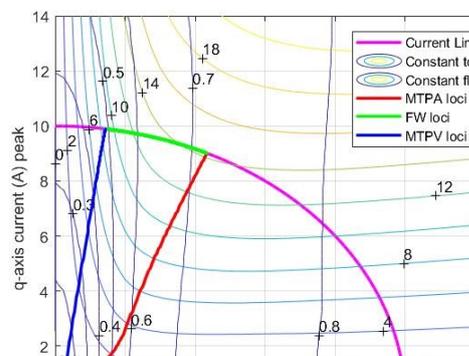


Figura 8-12  $i_q - i_d$  SynchronRel

Questi quattro grafici permettono di osservare da diversi punti di vista l'estensione del range di deflussaggio a potenza quasi costante e l'estensione del funzionamento in MTPV, riducendo ampiezza di corrente e di flusso concatenato. Si può osservare che lavorando in MTPV si raggiungono velocità molto elevate a discapito della coppia che si riduce con andamento esponenziale. Questa zona di funzionamento è particolarmente adatta per la propulsione di veicoli elettrici dove, ad alte velocità, l'inerzia del veicolo è elevata e si oppone alla riduzione di velocità e quindi la coppia può essere utilizzata principalmente per vincere gli attriti aerodinamici.

## 8.2. PMAsR analizzati

Le stesse simulazioni descritte per il SynchRel sono state effettuate anche per il PMAsR, sostituendo le caratteristiche del magnete tra quelli selezionati. L'unica differenza con le precedenti simulazioni è, quindi, l'aggiunta di un componente di flusso prodotto dal magnete  $\lambda_m$ . Come già spiegato nel capitolo 3, questo termine permette di traslare il vettore di flusso totale verso il quarto quadrante del piano d-q e, quindi, aumentare il range di deflussaggio a potenza costante. Per vedere l'effetto del magnete sul deflussaggio vengono riportati in questo capitolo i seguenti diagrammi:

- T- $\alpha_{ie}$ ;
- T- $w_m$ (rpm);
- P(W)- $w_m$ (rpm);
- I(A)- $w_m$ (rpm);
- $i_d$ - $i_q$ .

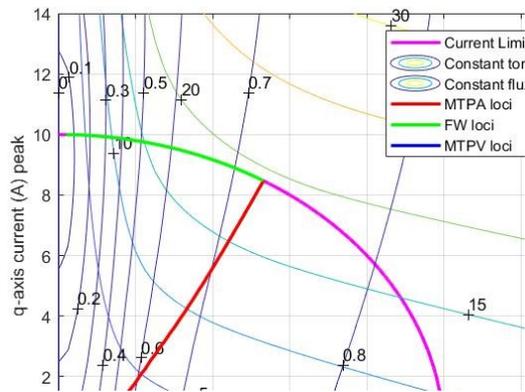
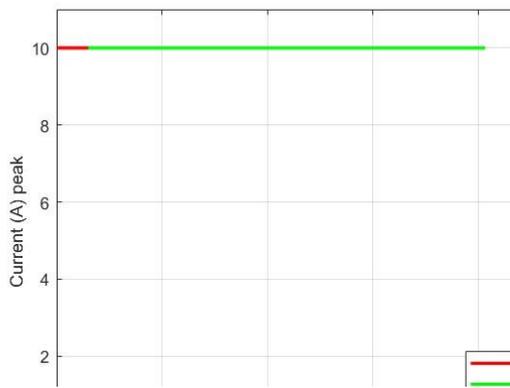
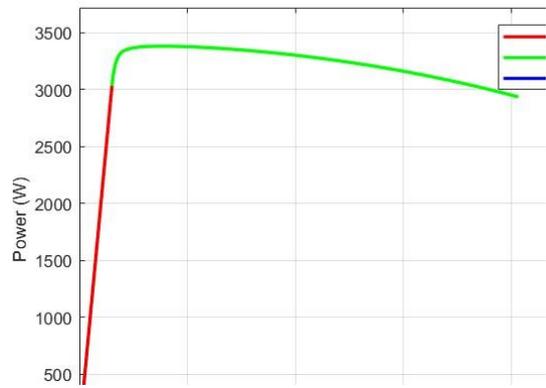
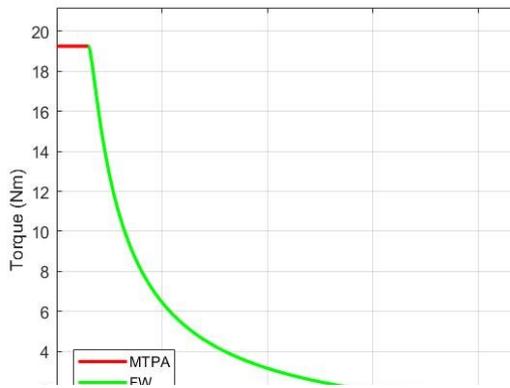
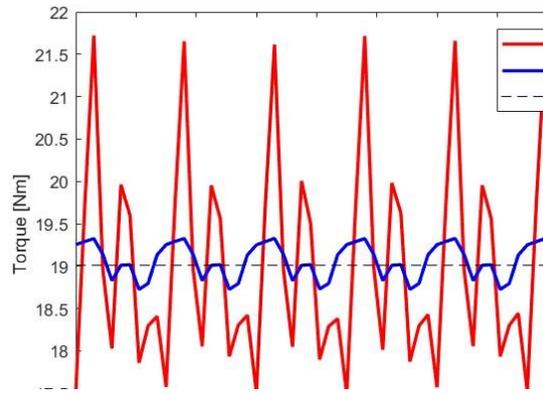
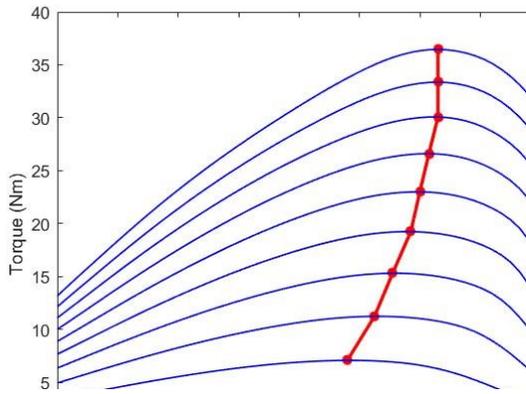
Inoltre, per analizzare come influisce il magnete sul ripple di coppia, viene fornita anche la caratteristica T- $\vartheta_m$ .

Con riferimento al paragrafo 3.3, per funzionamento a basso carico e con  $\lambda_m$  elevato è necessario fornire una componente di corrente  $i'_q$  smagnetizzante per imporre la condizione di deflussaggio:

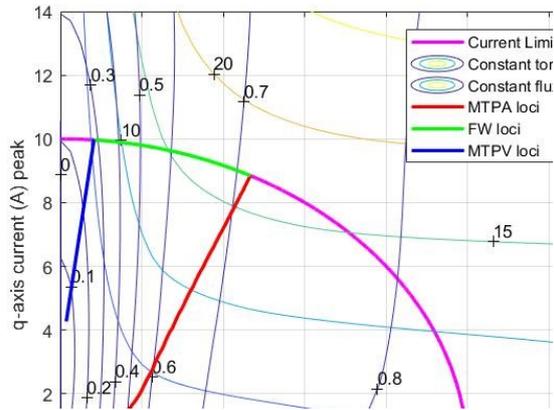
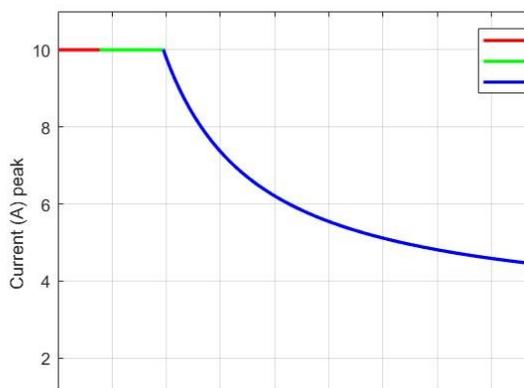
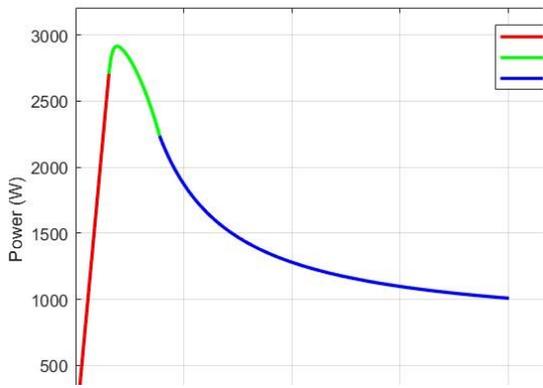
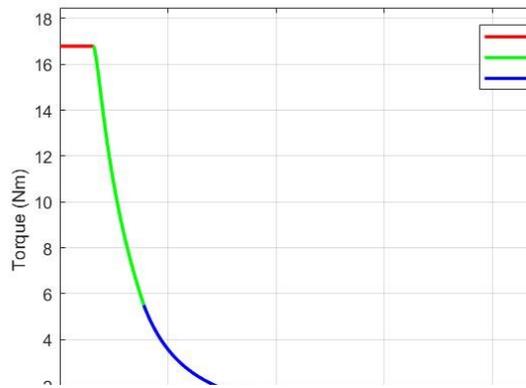
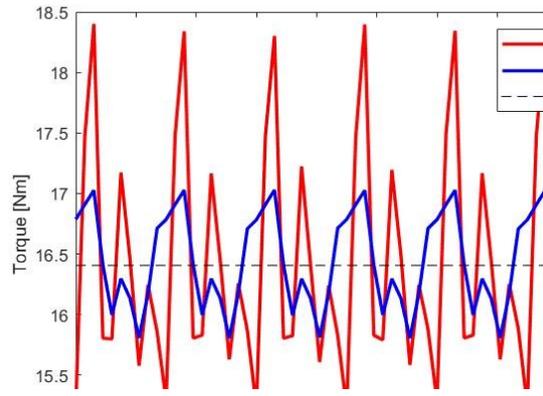
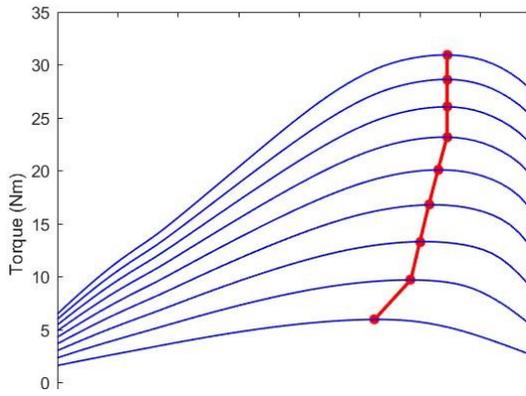
$$\lambda'_{tot} = \lambda_m - L_q i'_q$$

Per questo motivo nella simulazione *sim\_mapping* del PMAsR con alcuni magneti particolarmente forti viene imposta una  $I_{nom} > 10$  A.

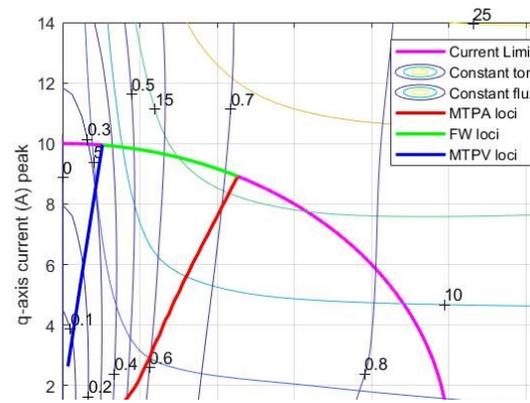
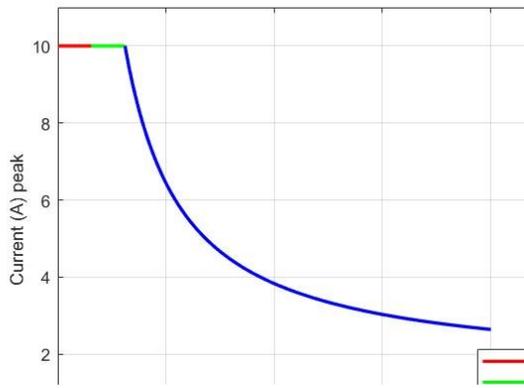
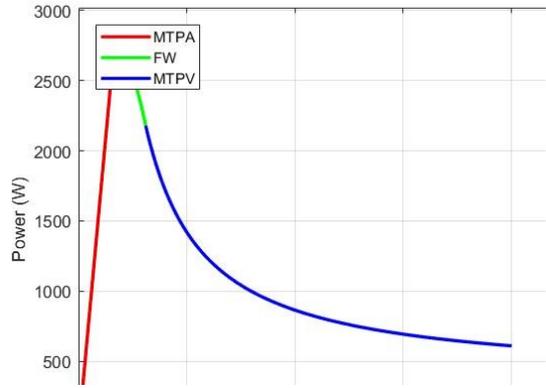
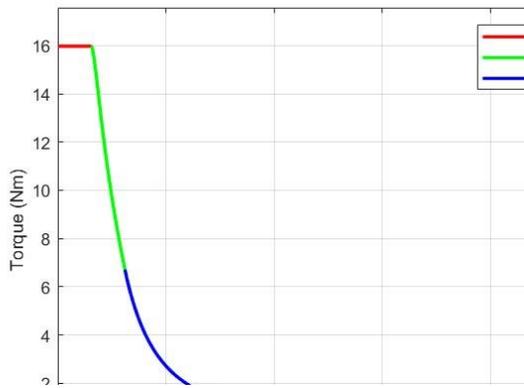
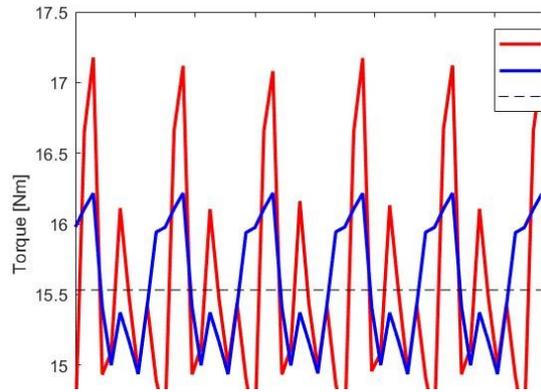
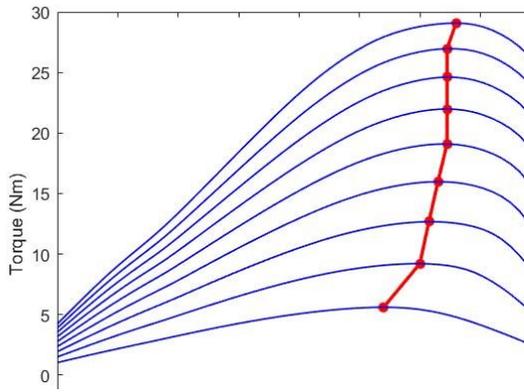
- PMA<sub>s</sub>R con CPPA6-10



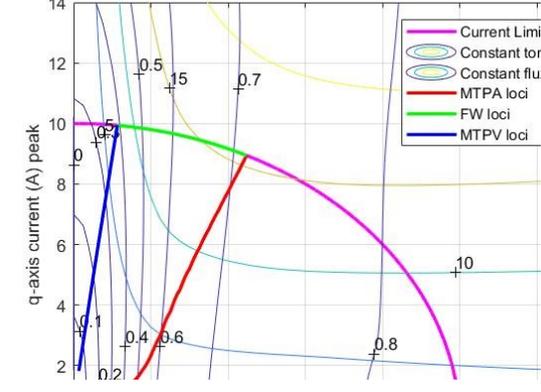
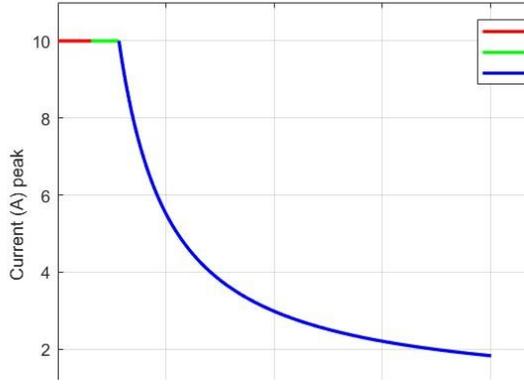
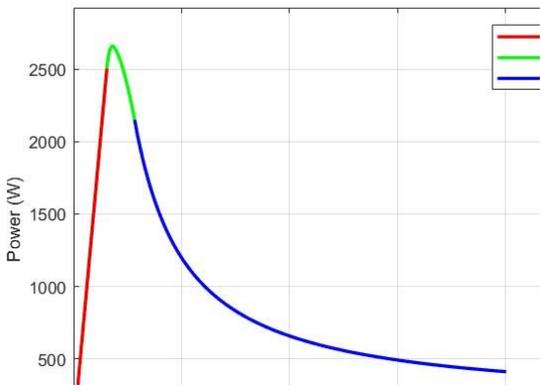
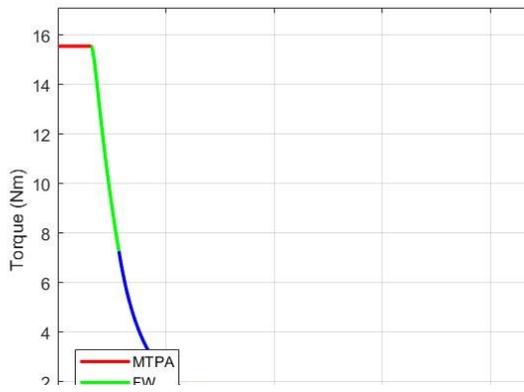
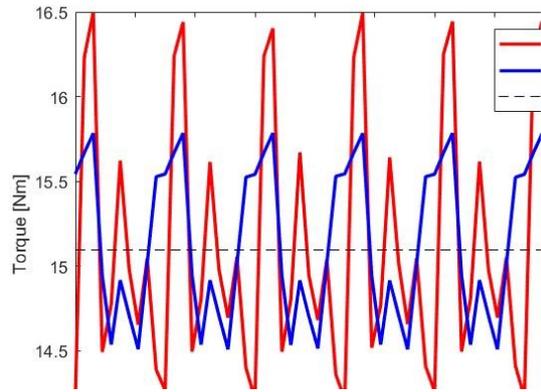
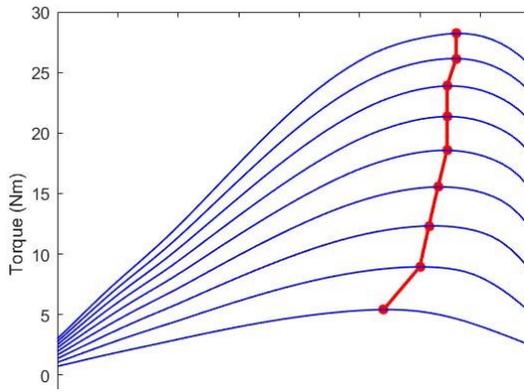
- PMA<sub>s</sub>R con CPPA6-20



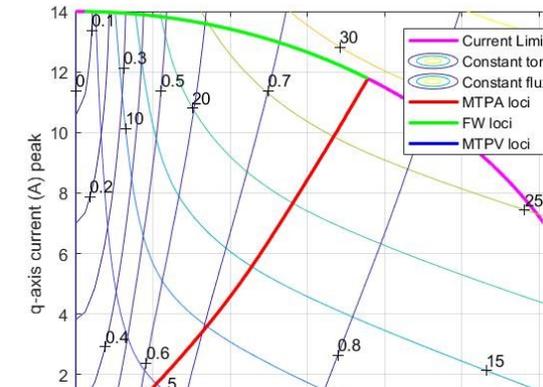
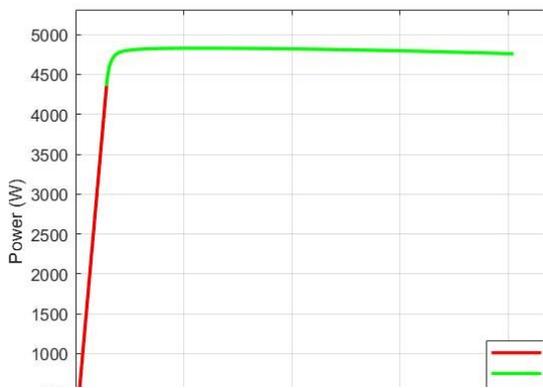
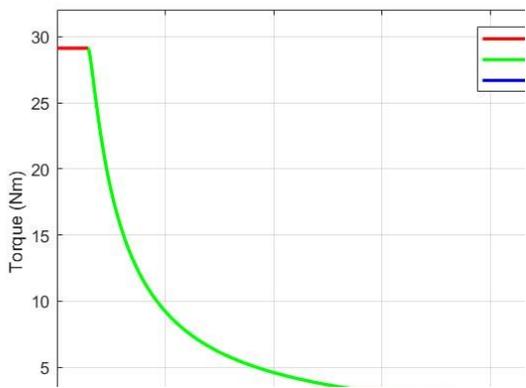
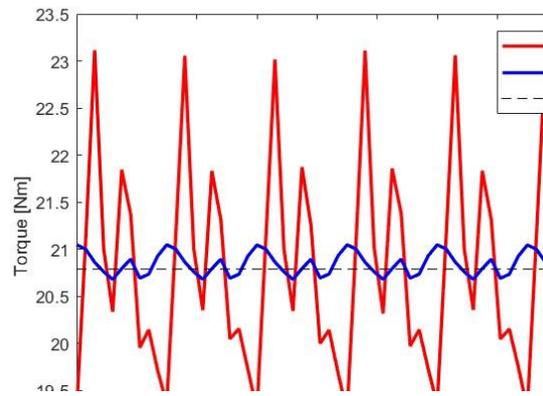
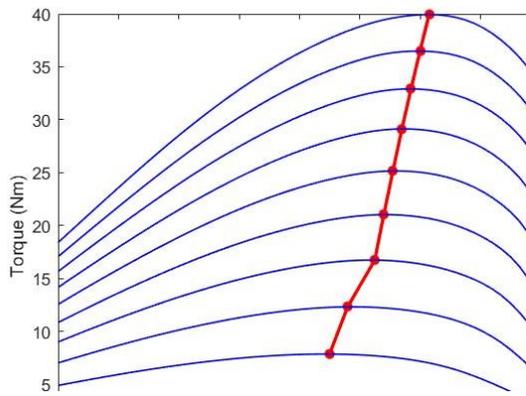
- PMA<sub>s</sub>R con CPPA6-30



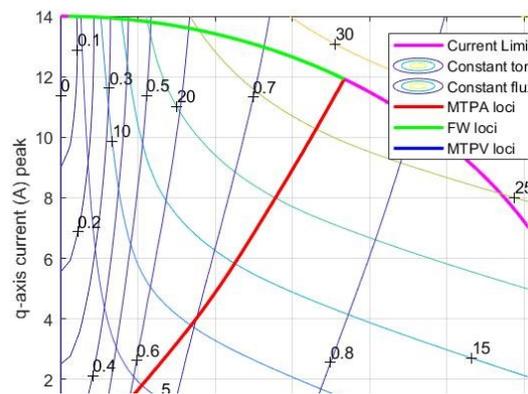
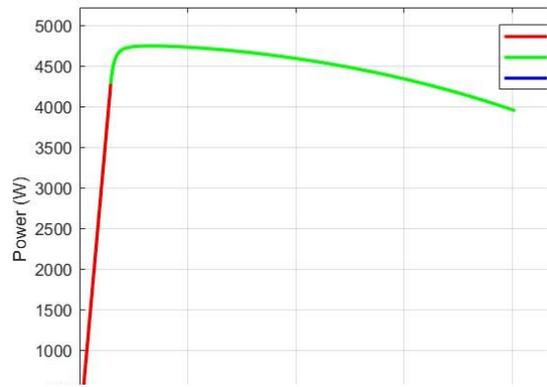
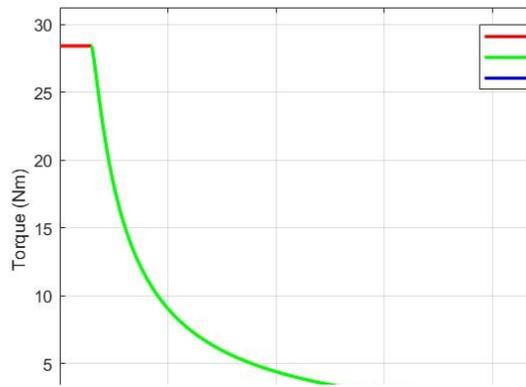
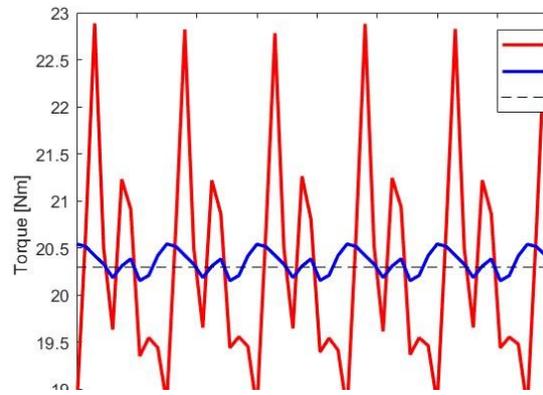
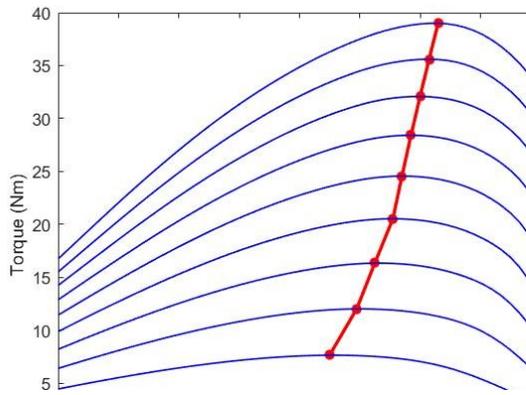
- PMA<sub>s</sub>R con CPPA6-40



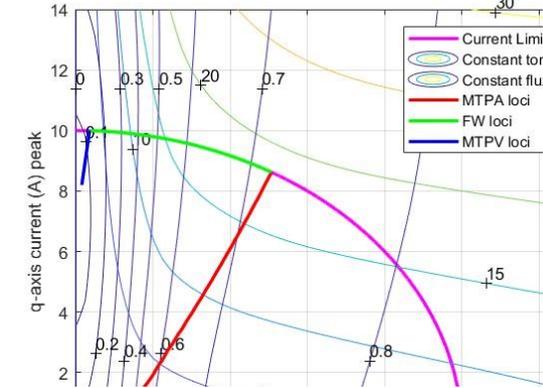
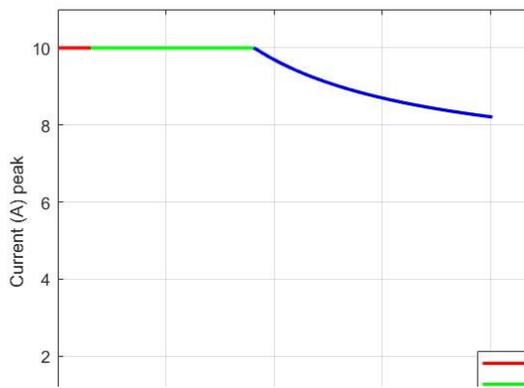
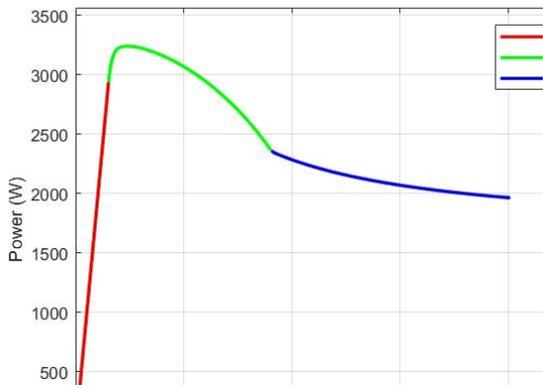
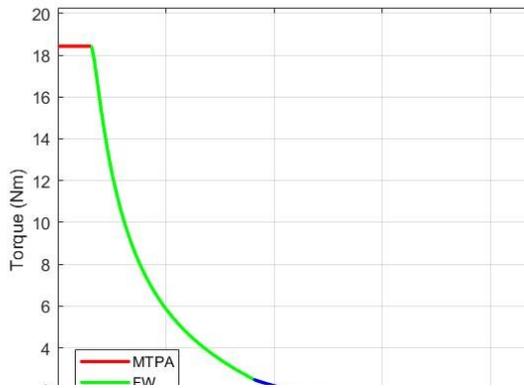
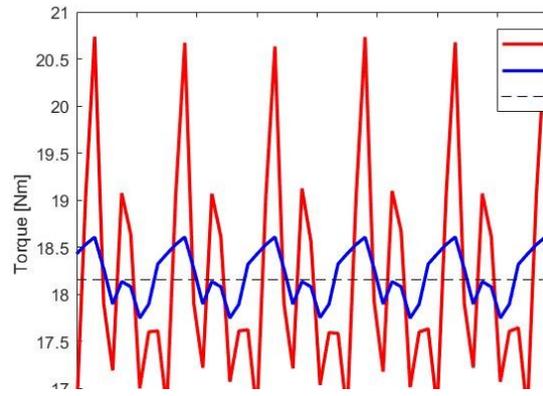
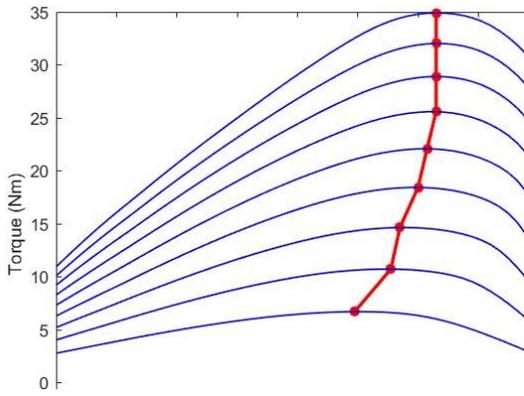
- PMA<sub>s</sub>R con CPF RW 3,3%



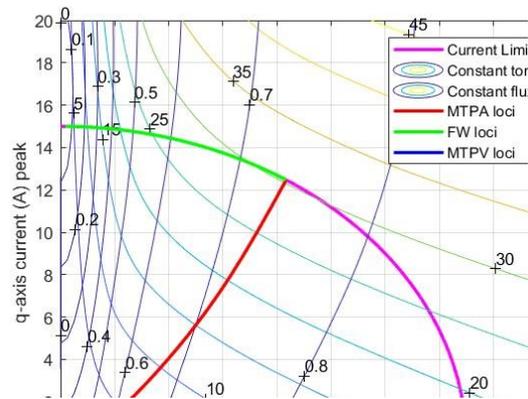
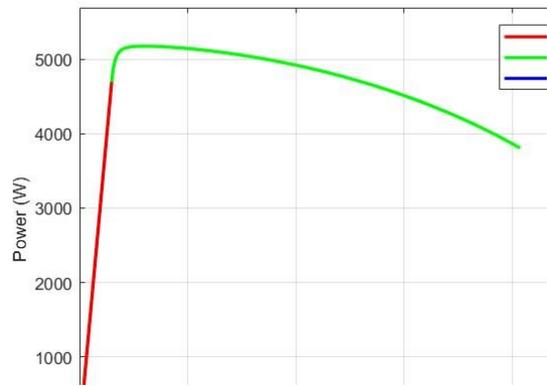
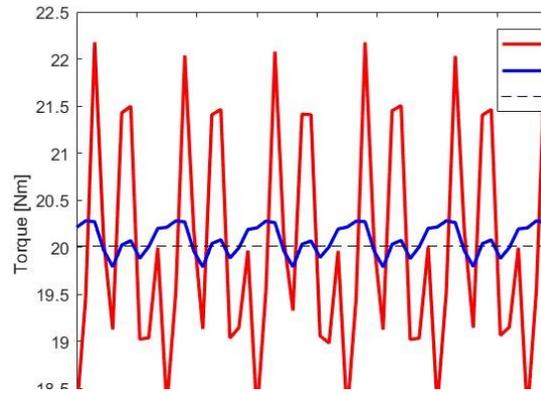
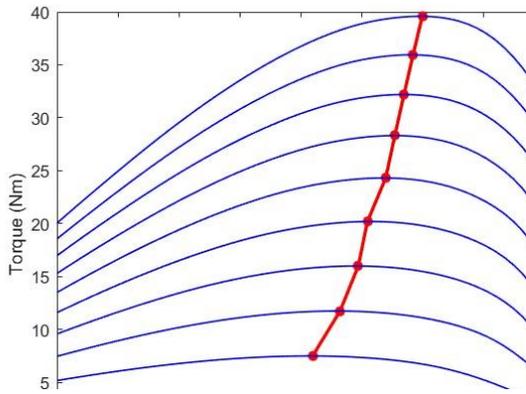
- PMA<sub>s</sub>R con CPF5



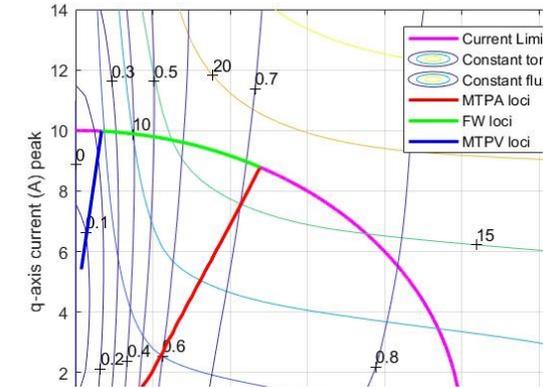
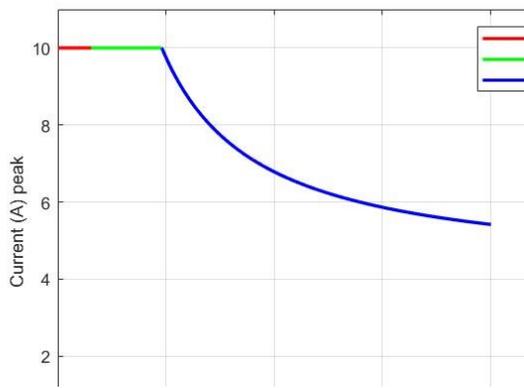
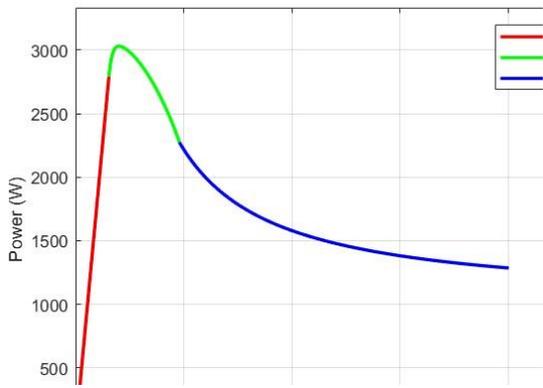
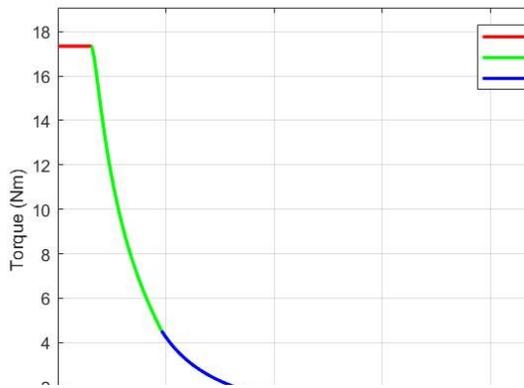
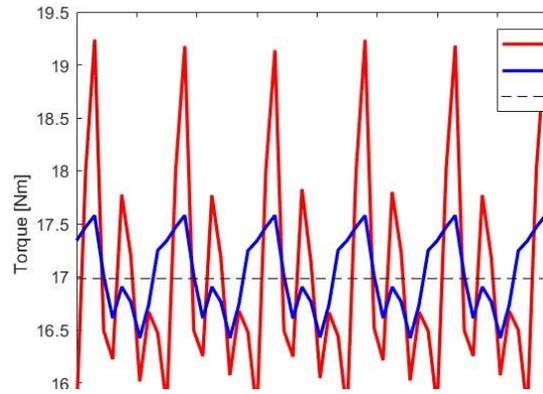
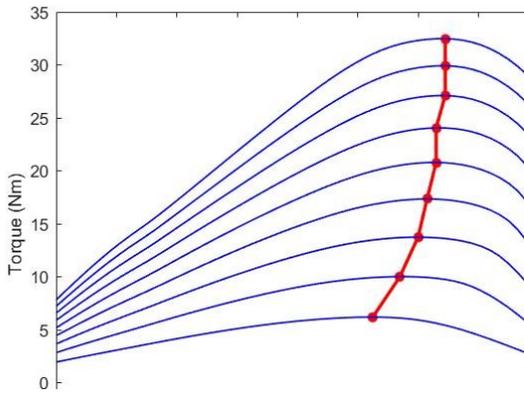
- PMA<sub>s</sub>R con CPF10



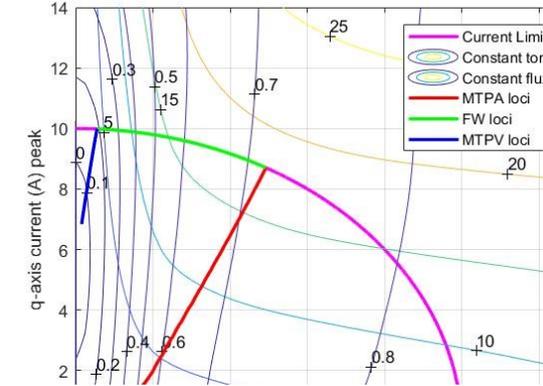
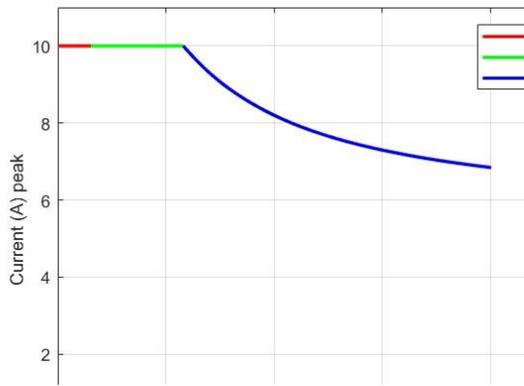
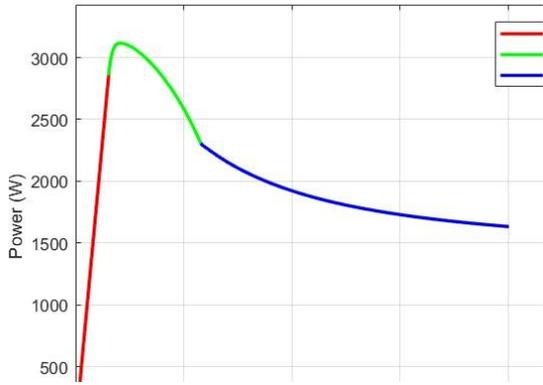
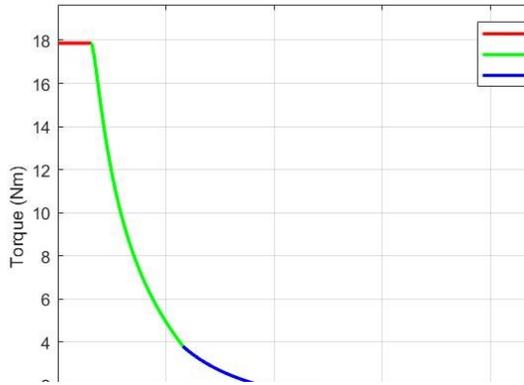
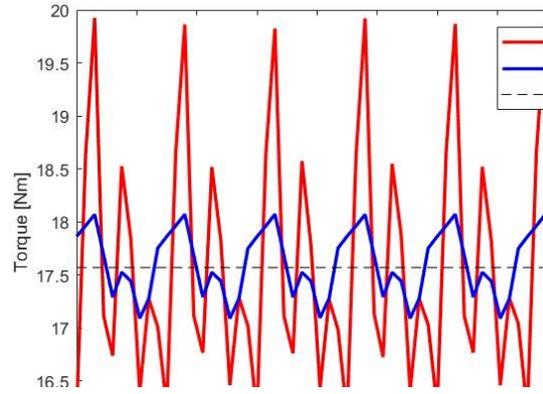
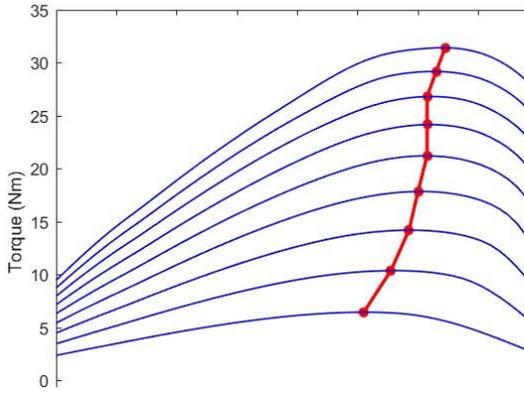
- PMA<sub>s</sub>R con NdFeB 37



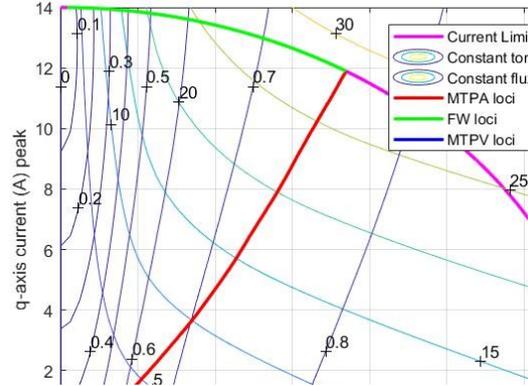
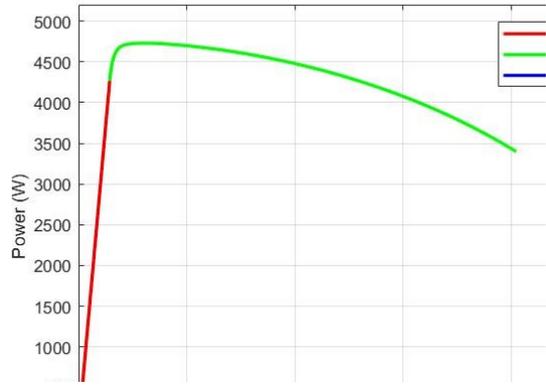
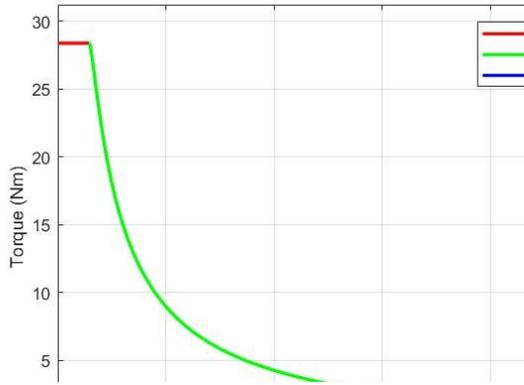
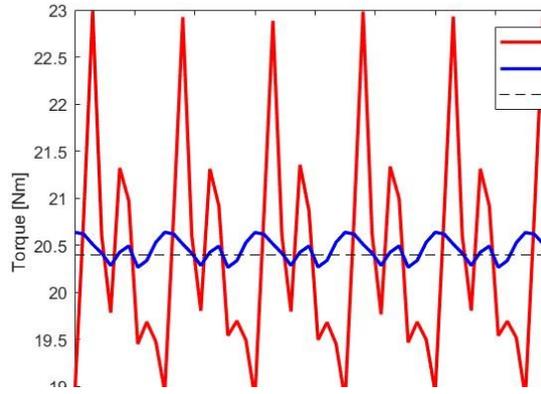
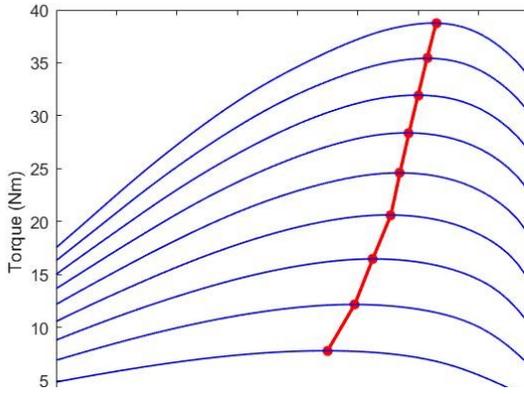
- PMA<sub>s</sub>R con Plastroferrite



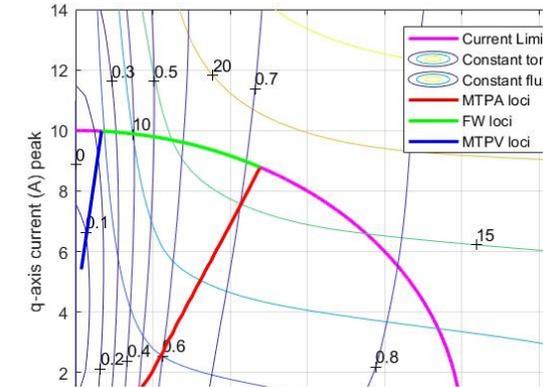
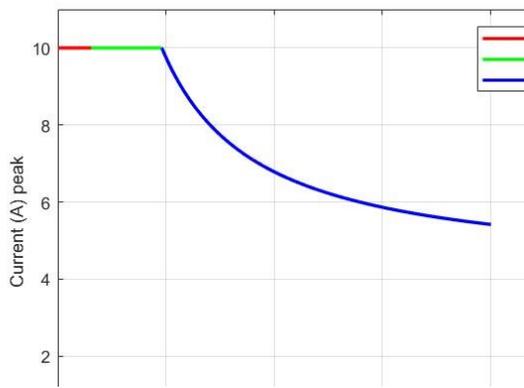
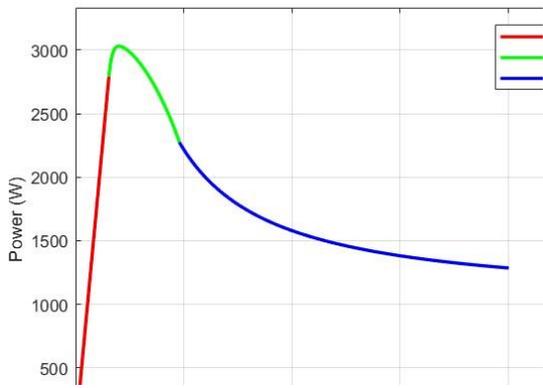
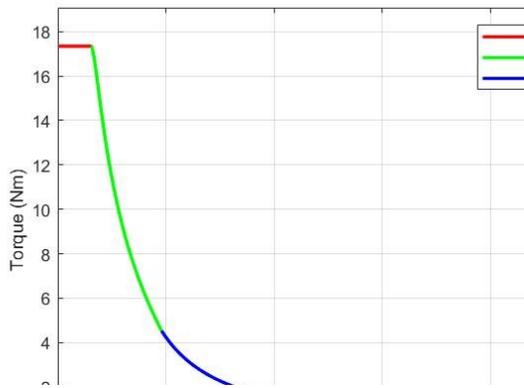
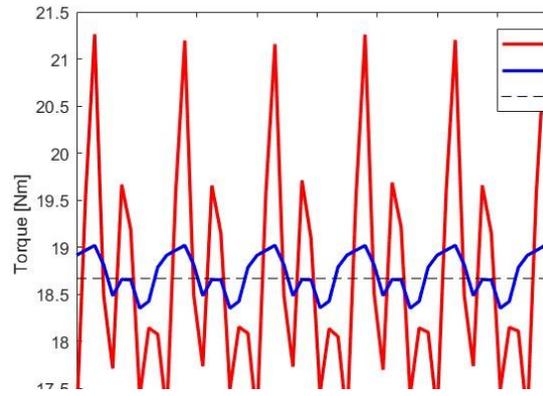
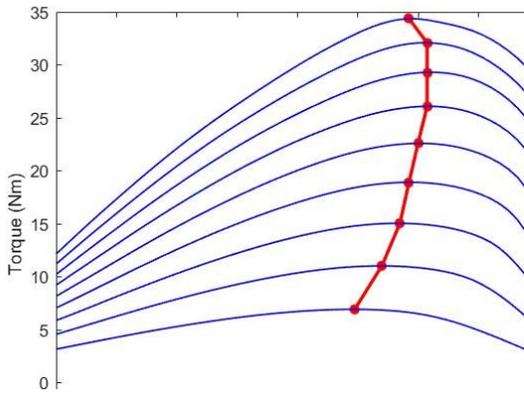
- PMA<sub>s</sub>R con I-CER 1612



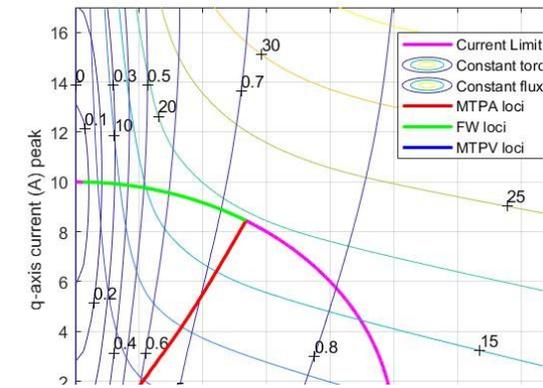
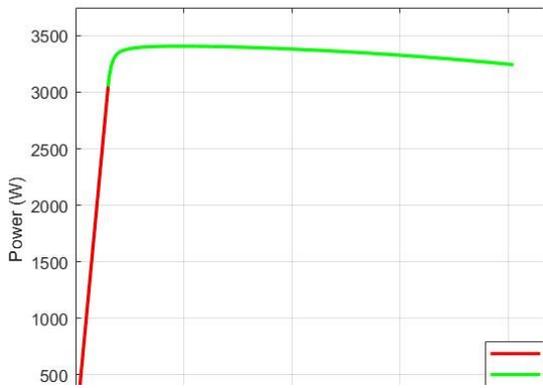
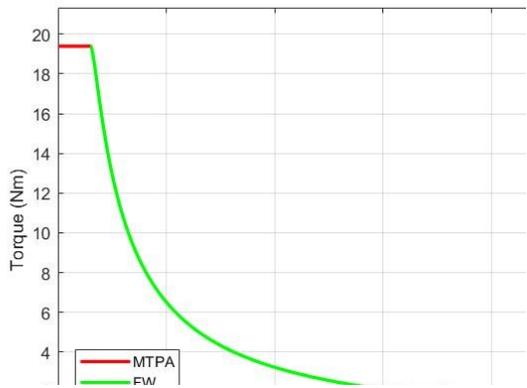
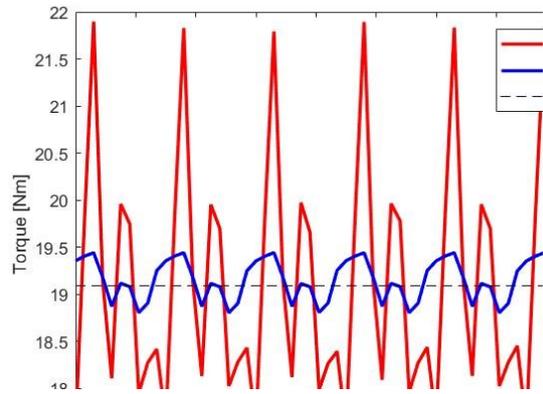
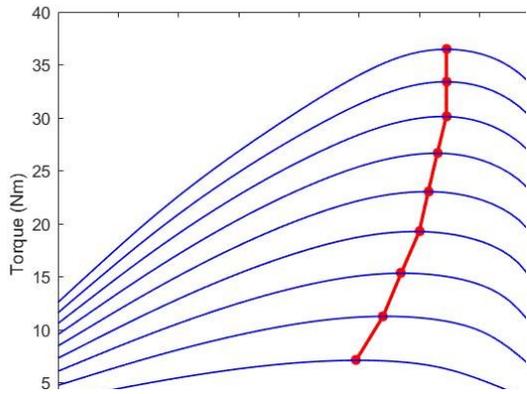
- PMA<sub>s</sub>R con Plastoren 8



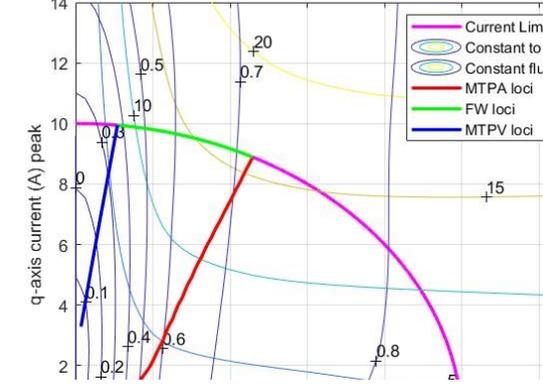
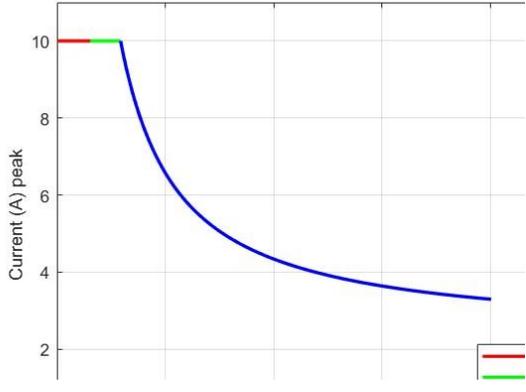
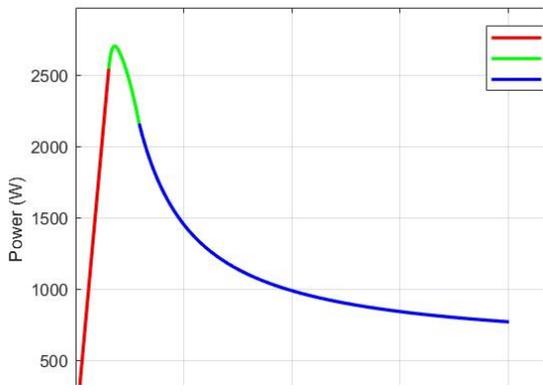
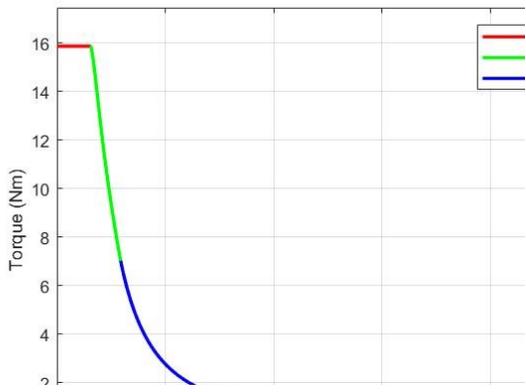
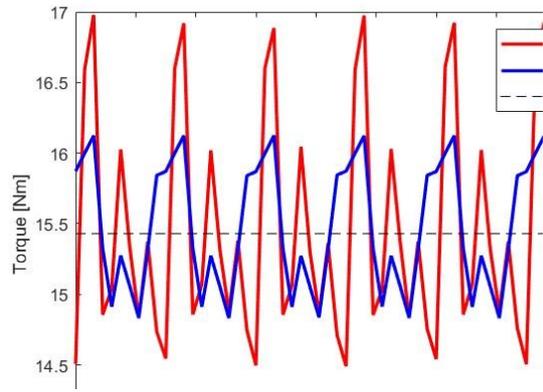
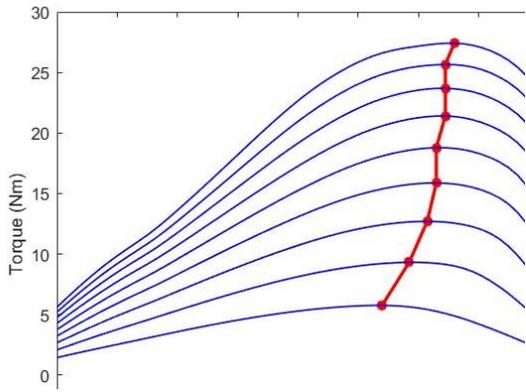
- PMA<sub>s</sub>R con Ferrite anisotropa



- PMA<sub>s</sub>R con MQIP-M260



- PMA<sub>s</sub>R con FB23



## 9. Considerazioni sulle simulazioni

A questo punto bisogna scegliere il magnete più adatto per la realizzazione di un prototipo. Sia le caratteristiche dei magneti che le simulazioni del modello forniscono delle informazioni che permettono di effettuare questa scelta.

### 9.1. Calcolo del Power Factor in MTPA

Come è noto, il primo effetto del magnete è quello di modificare le componenti di flusso  $\lambda_d$  e  $\lambda_q$ . Occorre quindi valutare come varia il vettore di  $\lambda_{tot}$ . Dai calcoli effettuati tramite MATLAB è possibile estrapolare le matrici dei flussi in asse diretto e in quadratura ( $\lambda_d$ ,  $\lambda_q$ ) al variare dell'angolo meccanico di rotore e dell'ampiezza di corrente per ogni simulazione. Individuando in tali matrici i valori corrispondenti alla MTPA, si può ricavare l'angolo ( $\gamma$ ) del vettore flusso rispetto all'asse d:

$$\gamma = \tan^{-1} \left( \frac{\lambda_q}{\lambda_d} \right)$$

Di seguito viene riportata la Tabella 9-1 con i valori di  $\gamma$  di ogni caratteristica.

Inom (A)		No PM	CPPA6-10	CPPA6-20	CPPA6-30	CPPA6-40	CPFR W 3,3%	CPF5	CPF10	Plasto-ferrite	NdFeB 37	I-CER 1612	Plastoren 8	Ferrite anisotropa	MQIP-M260	FB23
20	$\lambda_d$	0,654	0,767	0,725	0,698	0,691	0,782	0,773	0,760	0,735	0,758	0,728	0,773	0,790	0,762	0,685
	$\lambda_q$	0,462	0,168	0,322	0,376	0,396	0,045	0,086	0,211	0,284	-0,006	0,310	0,095	0,193	0,186	0,415
	$\gamma$	0,615	0,215	0,418	0,494	0,520	0,058	0,110	0,271	0,368	-0,008	0,403	0,122	0,240	0,239	0,545
18	$\lambda_d$	0,656	0,761	0,724	0,712	0,692	0,780	0,773	0,756	0,733	0,750	0,740	0,773	0,767	0,757	0,702
	$\lambda_q$	0,433	0,133	0,287	0,332	0,364	-0,001	0,041	0,178	0,250	-0,049	0,263	0,049	0,168	0,150	0,367
	$\gamma$	0,584	0,173	0,378	0,437	0,484	-0,001	0,053	0,231	0,329	-0,066	0,341	0,063	0,216	0,196	0,482
16	$\lambda_d$	0,670	0,752	0,721	0,710	0,704	0,774	0,769	0,749	0,728	0,740	0,749	0,769	0,760	0,749	0,703
	$\lambda_q$	0,393	0,096	0,252	0,298	0,320	-0,049	-0,006	0,143	0,216	-0,093	0,209	0,001	0,121	0,112	0,327
	$\gamma$	0,531	0,127	0,336	0,397	0,427	-0,063	-0,007	0,189	0,288	-0,124	0,272	0,002	0,158	0,149	0,436
14	$\lambda_d$	0,667	0,748	0,714	0,705	0,699	0,765	0,761	0,738	0,731	0,725	0,743	0,762	0,749	0,746	0,701
	$\lambda_q$	0,360	0,050	0,216	0,262	0,285	-0,096	-0,053	0,106	0,173	-0,135	0,162	-0,051	0,078	0,067	0,285
	$\gamma$	0,495	0,067	0,294	0,356	0,387	-0,125	-0,070	0,143	0,233	-0,184	0,214	-0,066	0,103	0,089	0,386
12	$\lambda_d$	0,673	0,740	0,714	0,695	0,690	0,750	0,749	0,731	0,718	0,706	0,731	0,749	0,741	0,739	0,705
	$\lambda_q$	0,317	0,003	0,172	0,226	0,249	-0,143	-0,100	0,062	0,137	-0,177	0,110	-0,102	0,028	0,020	0,234
	$\gamma$	0,441	0,004	0,237	0,314	0,346	-0,189	-0,133	0,084	0,188	-0,246	0,149	-0,135	0,038	0,027	0,320
10	$\lambda_d$	0,659	0,725	0,706	0,690	0,686	0,729	0,730	0,719	0,709	0,686	0,720	0,729	0,727	0,725	0,690
	$\lambda_q$	0,281	-0,045	0,128	0,182	0,206	-0,190	-0,147	0,016	0,094	-0,224	0,056	-0,154	-0,021	-0,029	0,189
	$\gamma$	0,403	-0,062	0,180	0,258	0,292	-0,255	-0,199	0,023	0,131	-0,315	0,077	-0,208	-0,028	-0,040	0,267
8	$\lambda_d$	0,649	0,709	0,689	0,676	0,673	0,698	0,707	0,705	0,690	0,651	0,699	0,705	0,704	0,709	0,676
	$\lambda_q$	0,239	-0,097	0,084	0,138	0,163	-0,237	-0,198	-0,034	0,050	-0,266	0,007	-0,211	-0,068	-0,081	0,137
	$\gamma$	0,353	-0,136	0,122	0,202	0,238	-0,327	-0,273	-0,048	0,072	-0,388	0,010	-0,290	-0,096	-0,114	0,200
6	$\lambda_d$	0,623	0,676	0,656	0,645	0,643	0,662	0,668	0,668	0,664	0,605	0,671	0,663	0,673	0,677	0,655
	$\lambda_q$	0,197	-0,147	0,038	0,094	0,120	-0,290	-0,247	-0,080	0,001	-0,312	-0,043	-0,267	-0,116	-0,133	0,079
	$\gamma$	0,306	-0,214	0,059	0,144	0,184	-0,412	-0,354	-0,119	0,001	-0,476	-0,065	-0,382	-0,171	-0,193	0,120
4	$\lambda_d$	0,580	0,618	0,615	0,606	0,606	0,591	0,605	0,621	0,612	0,535	0,617	0,596	0,616	0,621	0,606
	$\lambda_q$	0,148	-0,199	-0,016	0,039	0,066	-0,339	-0,298	-0,134	-0,050	-0,362	-0,094	-0,326	-0,167	-0,185	0,018
	$\gamma$	0,250	-0,311	-0,027	0,064	0,109	-0,521	-0,458	-0,212	-0,081	-0,594	-0,151	-0,501	-0,265	-0,290	0,029

Tabella 9-1 componenti di flusso magnetico e di  $\gamma$  in funzione della corrente

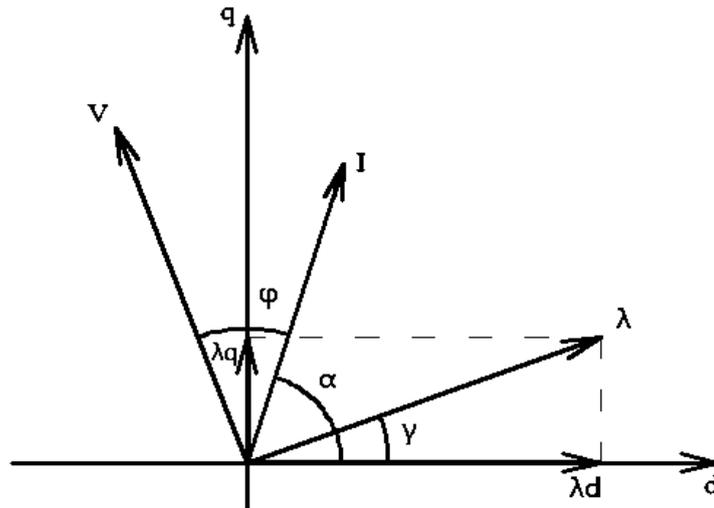


Figura 9-1 Esempio per il calcolo PF

Il diagramma più sopra rappresenta i vettori di tensione, corrente e flusso nel piano d-q. Si può osservare che, noti  $\alpha$  e  $\gamma$  e sapendo che la tensione ed il flusso sono in quadratura, è possibile ricavare l'angolo tra tensione e corrente  $\varphi$ :

$$\varphi = 90 + \gamma - \alpha$$

Si può, quindi, ottenere il fattore di potenza della MTPA per ogni campione:

$$PF = \cos \varphi$$

Come spiegato nel secondo capitolo, la coppia è legata al prodotto incrociato delle componenti di flusso con le componenti di corrente in assi diretto e quadratura. Perciò, note le matrici di  $\lambda_d$  e  $\lambda_q$ , è stata calcolata la coppia:

$$T = \frac{3}{2} p [\lambda_m i_d + (L_d - L_q) i_d i_q]$$

Si riporta di seguito la Tabella 9-2 che definisce i valori di coppia, angolo della corrente e PF della MTPA in funzione della corrente con i magneti permanenti in esame.

Inom (A)		No PM	CPPA6-10	CPPA6-20	CPPA6-30	CPPA6-40	CPF R W 3,3%	CPF5	CPF10	Plasto-ferrite	NdFeB 37	I-CER 1612	Plastoren 8	Ferrite anisotropa	MQJP-M260	FB23
20	T(Nm)	25,65	36,53	30,94	29,08	28,22	39,94	39,00	34,91	32,47	39,59	31,43	38,86	34,36	36,47	27,41
	alpha (deg)	67,50	63,00	64,50	66,00	66,00	61,50	63,00	63,00	64,50	60,00	64,50	63,00	58,50	64,50	66,00
	PF	0,53	0,77	0,65	0,61	0,59	0,850	0,836	0,737	0,687	0,870	0,662	0,829	0,704	0,775	0,570
18	T(Nm)	23,76	33,37	28,63	26,96	26,14	36,49	35,61	32,01	29,91	35,95	29,18	35,43	32,09	33,40	25,65
	alpha (deg)	67,50	63,00	64,50	64,50	66,00	60,00	61,50	63,00	64,50	58,50	63,00	61,50	61,50	64,50	64,50
	PF	0,56	0,80	0,68	0,64	0,62	0,867	0,852	0,763	0,715	0,885	0,688	0,847	0,756	0,802	0,600
16	T(Nm)	21,70	30,08	26,04	24,61	23,88	32,92	32,08	28,90	27,10	32,20	26,82	31,95	29,30	30,12	23,69
	alpha (deg)	66,00	63,00	64,50	64,50	64,50	58,50	60,00	63,00	64,50	57,00	61,50	60,00	61,50	64,50	64,50
	PF	0,58	0,83	0,71	0,67	0,64	0,884	0,870	0,790	0,743	0,900	0,718	0,865	0,793	0,829	0,637
14	T(Nm)	19,43	26,62	23,18	21,98	21,36	29,14	28,42	25,58	24,05	28,32	24,17	28,39	26,09	26,66	21,43
	alpha (deg)	66,00	61,50	64,50	64,50	64,50	57,00	58,50	63,00	63,00	55,50	61,50	58,50	61,50	63,00	64,50
	PF	0,61	0,84	0,74	0,70	0,67	0,900	0,887	0,817	0,762	0,914	0,757	0,885	0,825	0,847	0,674
12	T(Nm)	16,95	23,01	20,09	19,09	18,57	25,18	24,57	22,08	20,79	24,32	21,23	24,61	22,59	23,03	18,79
	alpha (deg)	64,50	60,00	63,00	64,50	64,50	55,50	57,00	61,50	63,00	54,00	61,50	57,00	60,00	61,50	63,00
	PF	0,63	0,86	0,76	0,73	0,70	0,916	0,904	0,836	0,790	0,928	0,798	0,905	0,846	0,866	0,703
10	T(Nm)	14,22	19,25	16,79	15,98	15,54	21,05	20,54	18,43	17,34	20,21	17,86	20,64	18,92	19,26	15,87
	alpha (deg)	64,50	58,50	61,50	63,00	63,00	54,00	55,50	60,00	61,50	51,00	60,00	55,50	58,50	60,00	63,00
	PF	0,66	0,88	0,78	0,75	0,72	0,931	0,920	0,854	0,809	0,934	0,825	0,923	0,867	0,885	0,739
8	T(Nm)	11,28	15,33	13,31	12,67	12,32	16,76	16,36	14,64	13,74	16,01	14,21	16,50	15,05	15,33	12,70
	alpha (deg)	63,00	55,50	60,00	61,50	61,50	52,50	52,50	57,00	60,00	49,50	58,50	52,50	57,00	57,00	61,50
	PF	0,68	0,89	0,80	0,77	0,74	0,947	0,928	0,864	0,828	0,950	0,847	0,934	0,887	0,895	0,767
6	T(Nm)	8,16	11,26	9,70	9,20	8,94	12,35	12,04	10,72	10,02	11,76	10,39	12,20	11,03	11,26	9,32
	alpha (deg)	61,50	52,50	58,50	60,00	60,00	48,00	49,50	55,50	57,00	46,50	55,50	49,50	54,00	54,00	58,50
	PF	0,69	0,90	0,82	0,79	0,76	0,949	0,938	0,886	0,838	0,960	0,859	0,948	0,897	0,907	0,784
4	T(Nm)	4,87	7,10	5,97	5,61	5,41	7,89	7,66	6,71	6,19	7,52	6,47	7,82	6,92	7,11	5,76
	alpha (deg)	57,00	48,00	52,50	54,00	54,00	45,00	45,00	49,50	52,50	42,00	51,00	45,00	49,50	49,50	54,00
	PF	0,68	0,91	0,81	0,77	0,74	0,9652	0,9469	0,8801	0,8400	0,9705	0,8629	0,9598	0,9038	0,9143	0,7916

Tabella 9-2 Coppia e PF in funzione della corrente

Osservando più sotto l'andamento di PF in funzione della corrente, si riscontra una sua graduale riduzione.

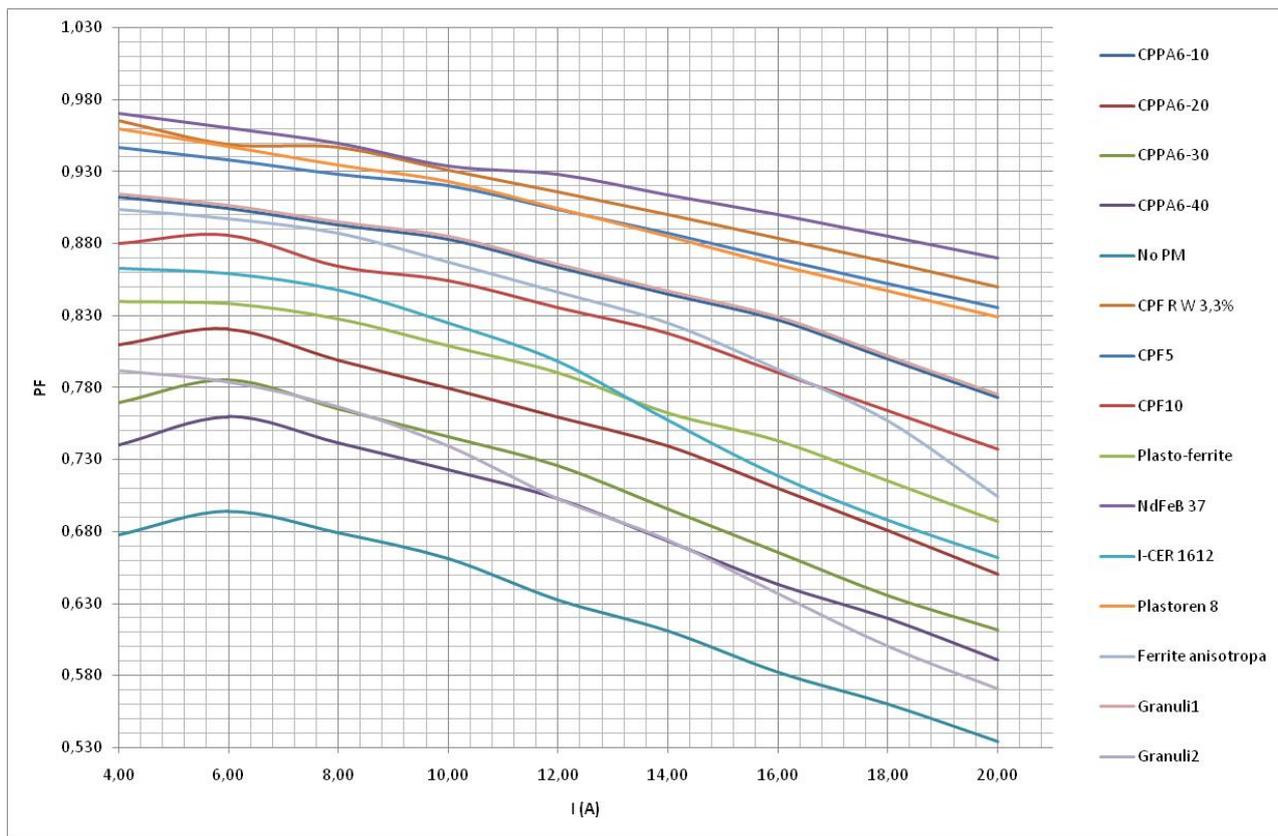


Figura 9-2 Andamento PF al variare della corrente

Affinché si raggiunga più in ritardo possibile la MTPV e quindi avere un ampio range di deflussaggio a potenza costante, si è introdotto il magnete che ha il compito di smagnetizzare la macchina traslando il vettore  $\lambda_{tot}$  in basso in modo tale che al deflussaggio raggiunga l'origine. Al crescere dell'ampiezza di corrente, il  $\lambda_{tot}$  assume una pendenza sempre maggiore. Trascurando le perdite per effetto joule, si può ritenere che la tensione è in quadratura rispetto a  $\lambda_{tot}$ , perciò al crescere di tale pendenza l'angolo tra V e I aumenta e quindi il PF decresce.

È interessante osservare più sotto l'andamento in MTPA di coppia al crescere della corrente.

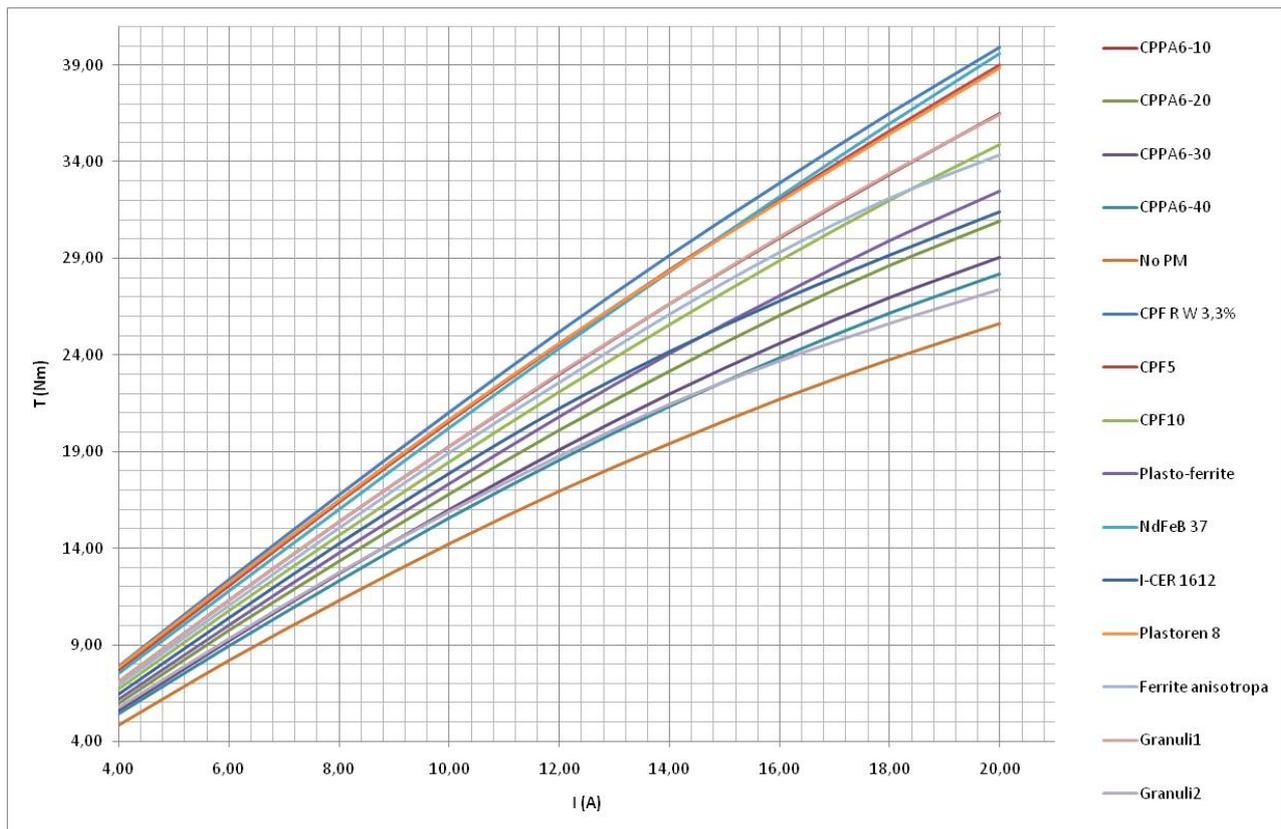


Figura 9-3 Andamento MTPA al variare della corrente

La coppia assume per tutti i magneti un andamento crescente. Ciò è dovuto:

- alla non linearità delle caratteristiche  $\lambda - i$  in assi d e q, con  $\lambda_d > \lambda_q$ ;
- alla mitigazione della “cross-saturation” a causa della saturazione dei ponticelli che ha come effetto quello di ridurre la pendenza della variazione di  $\lambda_d$ ;
- alla MTPA che, al crescere della corrente, ha una pendenza sempre più elevata  $i_q \gg i_d$ .

Perciò, dato che:

$$T \approx \lambda_d * i_q + \lambda_q * i_d$$

il secondo termine risulta trascurabile (circa il 10%) rispetto al primo. Quindi la coppia cresce proporzionalmente con la corrente, in particolare con la componente di asse in quadratura in quanto diventa sempre più rilevante rispetto alla componente in asse diretto.

## 9.2. Ripple di coppia

I motori a riluttanza hanno, per loro natura, una situazione locale magnetica diversa al variare della posizione del rotore causata dall'esposizione delle cave di statore al traferro e dall'alternanza di assi d e q caratterizzati da induttanze diverse ( $L_d > L_q$ ). Questa situazione si traduce in un'ondulazione di coppia chiamata "cogging torque" o "ripple". Mediante le simulazioni è stato ottenuto un diagramma che mostra il ripple di coppia ( $T_{dq} - \vartheta_m$  e  $T_{mxw} - \vartheta_m$ ). La coppia ricavata mediante l'analisi agli elementi finiti  $T_{mxw}$  ha un grado di precisione maggiore rispetto a quella ottenuta mediante il modello elettromeccanico  $T_{dq}$ , pertanto è bene fare le considerazioni sul ripple di coppia tenendo conto della sola  $T_{mxw}$ . Per valutare l'entità del fenomeno, è utile individuare un indice di ripple.

Confrontando il valore medio di coppia con i valori istantanei campionati in mezzo giro di macchina, è possibile ottenere l'ampiezza del ripple medio di coppia:

$$\tilde{T} - T_{mxw}(t) = \Delta T_{ripple}(t)$$

In questo modo si ottiene un vettore che contiene i valori di ampiezza del ripple distribuiti per i  $180^\circ$  di rotazione del rotore. Si può pensare di associare tale vettore a un valore scalare che è possibile considerare come un indice di ripple. A tale scopo si utilizza la norma euclidea:

$$i_{ripple} = \sqrt{\sum (|\Delta T_{ripple}(t)|^2)}$$

L'indice appena definito è un parametro che permette di quantificare le oscillazioni di coppia. Se l'obiettivo fosse stato quello di minimizzare il ripple di coppia sarebbe stato scelto l'indice di valore più basso. Tuttavia, lo scopo di questa trattazione è quello di individuare un magnete resistente alla smagnetizzazione da sovraccarico. Per questo motivo il parametri  $i_{ripple}$  avrà un grado di importanza subordinato alla  $H_{CJ}$  e al PF nella scelta del magnete.

### 9.3. Condizioni di selezione del magnete

La scelta del magnete si basa sulle sue proprietà magnetiche e sulle prestazioni del motore a riluttanza su cui viene utilizzato.

#### 9.3.1. Proprietà magnetiche

Riguardo alle proprietà magnetiche, il parametro caratteristico che indica la resistenza alla smagnetizzazione è la forza coercitiva intrinseca  $H_{CJ}$ . In tal caso questo parametro deve essere il più alto possibile.

Dato che sono stati utilizzati magneti iniettati, compressi e commerciali, si vuole fare un confronto selezionandone almeno uno per ogni categoria.

	<b>Magneti</b>	<b><math>H_{CJ}</math> (KA/m)</b>
<b>Iniezione</b>	<b>CPPA6-10</b>	948,0
	<b>CPPA6-20</b>	910,0
	<b>CPPA6-30</b>	997,0
	<b>CPPA6-40</b>	998,0
<b>Compressione</b>	<b>CPF 3,3</b>	1017,0
	<b>CPF 5</b>	937,0
	<b>CPF 10</b>	923,0
<b>Commerciali</b>	<b>Plastoferrite</b>	230,7
	<b>NdFeB 37</b>	1139,1
	<b>I-CER 1612</b>	233,0
	<b>Plastoren8</b>	755,0
	<b>Ferrite anisotropa</b>	275,0
	<b>MQIP-M260</b>	949,1
	<b>FB23</b>	227,3

Figura 9-4 Forza coercitiva intrinseca

Si osserva più sopra che delle tre categorie quella commerciale ha una maggiore oscillazione tra i valori di  $H_{CJ}$ . È necessario quindi determinare in questo gruppo il valore minimo accettabile. In prima analisi si osserva che il Plastoren8 ha un  $H_{CJ}$  che è all'incirca intermedio tra quelli dei magneti proposti. Quindi è ragionevole considerare accettabili tutti i magneti con valori che soddisfano la seguente condizione:

$$H_{CJ} \geq 755 \text{ kA/m}$$

### 9.3.2. Prestazioni motore

Dalle simulazioni effettuate si possono estrapolare le stime delle prestazioni del motore. Si sono ottenuti i valori di:

- coppia (T);
- fattore di potenza;
- indici di ripple di coppia.

Confrontando in Tabella 9-3 la coppia del PMAsR con la coppia del SynchRel per valori di corrente di alimentazione compresi tra 4A e 20A, si è determinato l'incremento di coppia medio fra tutte le correnti in percentuale  $\Delta T\%$  rispetto al caso senza magneti, per ognuno dei magneti simulati.

	$\Delta T \%$
<b>CPPA6-10</b>	39%
<b>CPPA6-20</b>	20%
<b>CPPA6-30</b>	13%
<b>CPPA6-40</b>	10%
<b>CPF 3,3</b>	52%
<b>CPF 5</b>	48%
<b>CPF 10</b>	33%
<b>Plastoferrite</b>	24%
<b>NdFeB 37</b>	47%
<b>I-CER 1612</b>	26%
<b>Plastoren8</b>	49%
<b>Ferrite anisotropa</b>	35%
<b>MQIP-M260</b>	39%
<b>FB23</b>	11%

Tabella 9-3 Incremento di coppia del PMAsR rispetto al SynchRel

Si è definito come limite inferiore di incremento di coppia il valore medio dei  $\Delta T\%$ :

$$\Delta T\%_{min}^* = \Delta T\%_{medio} = 32\%$$

In modo analogo è stato definito il PF minimo:

$$PF \geq 0,86$$

Riguardo l'indice di ripple si è utilizzato un criterio differente. È noto che i motori assistiti da magneti permanenti con elevato  $H_{CJ}$  sono affetti da un fenomeno di cogging maggiore che corrisponde quindi ad un  $i_{ripple}$  elevato. Per definire il vincolo di  $i_{ripple}$  si sono individuati i valori maggiori nelle tre categorie di magneti fino ad ora considerate (iniezione, compressione e commerciali) e, tra questi, si è scelto il minore. In questo modo si è definito il seguente vincolo:

$$i_{ripple} < 8,98$$

## 9.4. Selezione del magnete

Sono state definite le seguenti condizioni di selezione del magnete:

- $H_{CJ} \geq 755 \text{ kA/m}$
- $\Delta T\% \geq 32\%$
- $PF \geq 0,86$
- $i_{ripple} \leq 8,98$

In Tabella 9-4 sono indicate il verde i valori che rispettano le condizioni desiderate.

	<b>Magneti</b>	$H_{CJ}$ (KA/m)	$\Delta T\%$	PF	$i_{ripple}$
<b>Iniezione</b>	<b>CPPA6-10</b>	948	39%	0,88	9,31
	<b>CPPA6-20</b>	910	20%	0,78	7,26
	<b>CPPA6-30</b>	997	13%	0,75	6,26
	<b>CPPA6-40</b>	998	10%	0,72	5,71
<b>Compressione</b>	<b>CPF 3,3</b>	1017	52%	0,93	8,38
	<b>CPF 5</b>	937	48%	0,92	8,82
	<b>CPF 10</b>	923	33%	0,85	8,98
<b>Commerciali</b>	<b>Plastoferrite</b>	231	24%	0,81	7,94
	<b>NdFeB 37</b>	1139	47%	0,93	9,43
	<b>I-CER 1612</b>	233	26%	0,82	8,58
	<b>Plastoren8</b>	755	49%	0,92	8,83
	<b>Ferrite anisotropa</b>	275	35%	0,87	9,23
<b>Iniezione- Commerciali</b>	<b>MQIP-M260</b>	949	39%	0,89	9,54
	<b>FB23</b>	227	11%	0,74	6,13

Tabella 9-4 Dati salienti in MTPA

I magneti che soddisfano tutti i requisiti sono:

- CPF 3,3;
- CPF5;
- Plastoren8.

Tuttavia, senza considerare il fenomeno del ripple di coppia, per avere un sovraccarico maggiore sarebbero stati idonei anche i magneti CPPA6-10, NdFeB37 e MQIP-M260.

### 9.4.1. Problemi meccanici nella realizzazione dei magneti

Dal punto di vista tecnologico sarebbe possibile effettuare l'iniezione direttamente negli sbarramenti di rotore se si dispone di un opportuno iniettore, rendendo questo metodo il più veloce tra quelli descritti. Tuttavia, la mancanza di alcune strumentazione e le difficoltà legate alla

magnetizzazione direttamente in macchina, obbligano a scartare, in questa fase, i magneti CPPA6 e i MQIP-M260 e a utilizzare i magneti realizzati con il metodo di compressione (CPF) e i magneti commerciali.

Riguardo i magneti commerciali è stato possibile reperire dei campioni di Plastoren8 ma non di NdFeB 37 (magnetite da database FEMM).

I Plastoren8 sono dei magneti flessibili perciò, in prima analisi, si è ritenuto che potessero essere piegati per assumere la forma degli sbarramenti. Tuttavia, si è riscontrato, come raffigurato più sotto, che i raggi di curvatura sono molto stretti, pertanto tali magneti sono soggetti a crepe e rischiano di spezzarsi.



Figura 9-5 Campioni Plastoren8 spezzati

La scelta del magnete ricade quindi sulle miscele CPF3,3 e CPF5. È necessario che il campione abbia le migliori prestazioni meccaniche possibili, oltre che magnetiche, affinché possa essere lavorato con fresa CNC. Dato che le prestazioni meccaniche sono strettamente legate alla quantità di legante presente nella miscela allora si è considerata quella che ne contiene di più, cioè il CPF5. Si è effettuata una pressatura con le seguenti condizioni:

$$P_{es} = 600 \text{ MPa}$$

$$P_{ma} = 10 \text{ bar}$$

$$h_c = 12 \text{ mm}$$

ottenendo un campione di altezza pari a 5,8mm. Dopo il trattamento termico però si è riscontrato che il campione presenta dei rigonfiamenti nella parte centrale. Sezionandolo è stato possibile visionare la sua struttura interna (Figura 9-6).

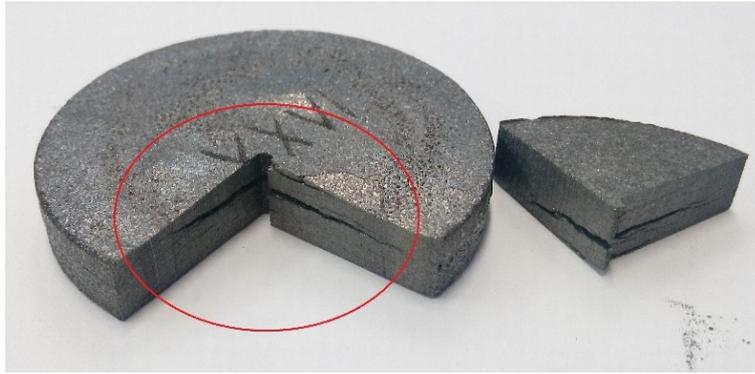


Figura 9-6 dettaglio difetto del campione CPF5

Si è ipotizzato che, essendo la superficie relativamente ampia, il comportamento elastico della miscela abbia provocato le crepe interne. Questo fenomeno può essere attribuito a due cause:

pressione di mantenimento troppo bassa;  
eccessiva quantità di resina fenolica nella miscela.

Perciò, per accertarsi riguardo le cause di tali difetti si sono eseguite delle prove variando la pressione di mantenimento e la percentuale di resina fenolica nella miscela.



#### **Variazione della $P_{ma}$**

Mantenendo il 5% di resina fenolica e variando la  $P_{ma}$  (2-5-6-8-10-12-15-20-25 bar) anche se con lieve riduzione, si sono nuovamente formate delle crepe interne. Ciò non è accettabile.



#### **Riduzione della percentuale di resina fenolica**

Variando la percentuale di resina fenolica dal 5% al 4%, si è ottenuto un campione privo dei difetti riscontrati nel precedente caso. La sezione risulta essere liscia e senza crepe.

Da questa prova si può dedurre che le crepe sono dovute all'eccessiva quantità di resina fenolica e a un'incontrollata reticolazione durante il trattamento termico del campione.

Si è optato quindi per l'utilizzo di una miscela con il 4% di resina fenolica. I campioni sono stati realizzati con  $P_{es} = 600 \text{ MPa}$ ,  $P_{ma} = 15 \text{ bar}$  e  $h_c = 12,5 \text{ MPa}$  ottenendo dischi di un'altezza

media di 5,2 mm. Caratterizzando il campione con il nuovo tipo di miscela si è ottenuta la caratteristica di smagnetizzazione riportata nella Figura 9-7:

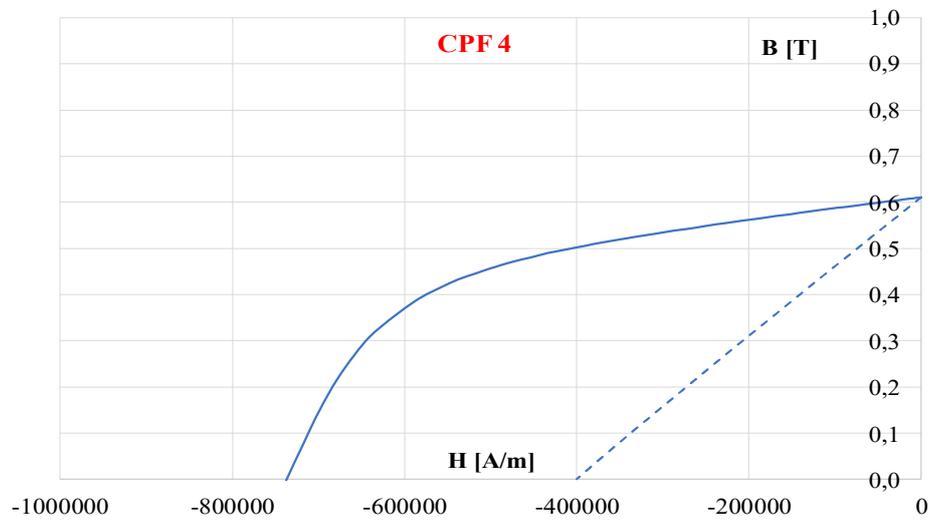


Figura 9-7 Caratteristica di smagnetizzazione CPF4

$$B_r = 0.61 \text{ T}$$

$$H_{CB} = 400.11 \text{ kA/m}$$

$$H_{CJ} = 736.51 \text{ kA/m}$$

## 10. Adattamento geometrie in funzione del processo scelto

### 10.1. Geometrie sbarramenti

La geometria della macchina su cui è stato effettuato lo studio è stata ottimizzata dal professore Nicola Bianchi dell'Università degli Studi di Padova per avere minore ripple di coppia possibile. La forma del lamierino è caratterizzata da una geometria a canali costanti e da sbarramenti che presentano degli angoli convessi (Figura 10-1).

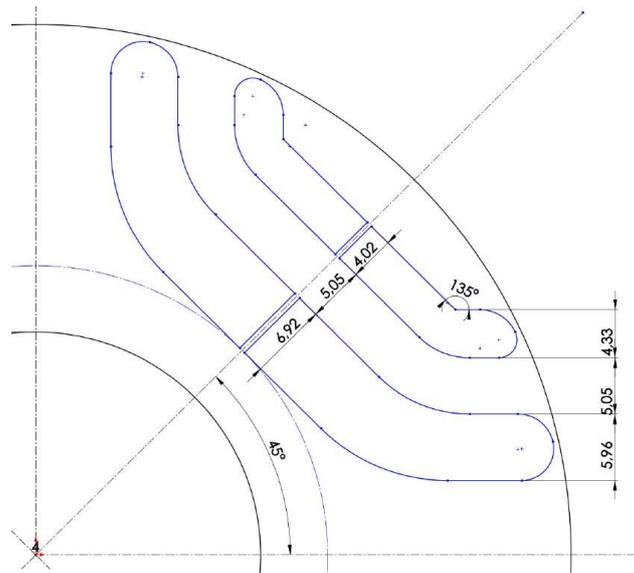


Figura 10-1 Dettagli sbarramenti del motore originale (canali costanti)

I magneti dovranno avere, con opportune tolleranze per garantire l'accoppiamento, stesse geometrie degli sbarramenti. L'ideale sarebbe avere uno stampo ad hoc per semplificare e velocizzare il processo, ma a causa dell'eccessivo costo di realizzazione è stato necessario individuare un metodo alternativo. Si è optato per la lavorazione mediante fresa CNC dei dischi di CPF4 con diametro di 40 mm e altezza di 4,8 mm. Con questo tipo di lavoro però risulta difficile realizzare spigoli e sezioni variabili, perciò si sono modificati lievemente gli sbarramenti, raccordando gli spigoli e rendendo costante la loro sezione, senza però allontanarsi troppo dalla geometria originale (Figura 10-2).

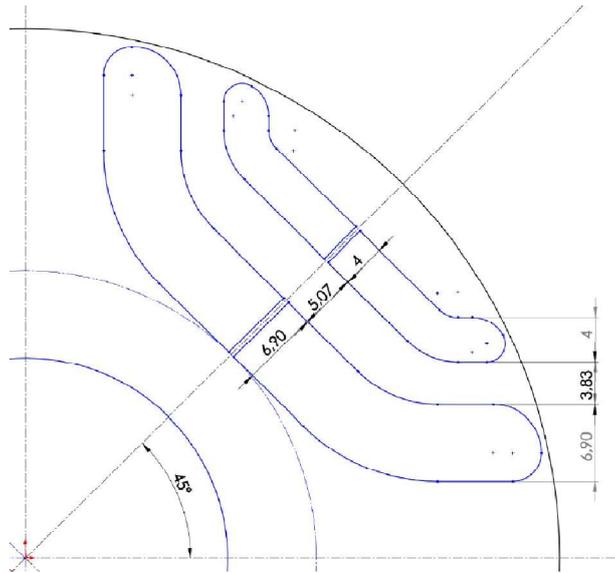


Figura 10-2 Dettagli sbarramenti del motore adattato (sbarramenti costanti)

## 10.2. Linguette per skewing

Deve essere individuata una soluzione che consente di rendere solidali, rispetto alla rotazione lungo l'asse comune, un elemento pieno (albero) e uno forato (mozzo/rotore). Un componente che permette la trasmissione del momento torcente tra albero e mozzo è la “linguetta”. Essa è un elemento prismatico con assenza di forzamento radiale, che non provoca quindi eccentricità e permette lo scorrimento assiale. Secondo la normativa DIN 6885 - UNI 6604, la linguetta deve avere le dimensioni riportate più sotto:

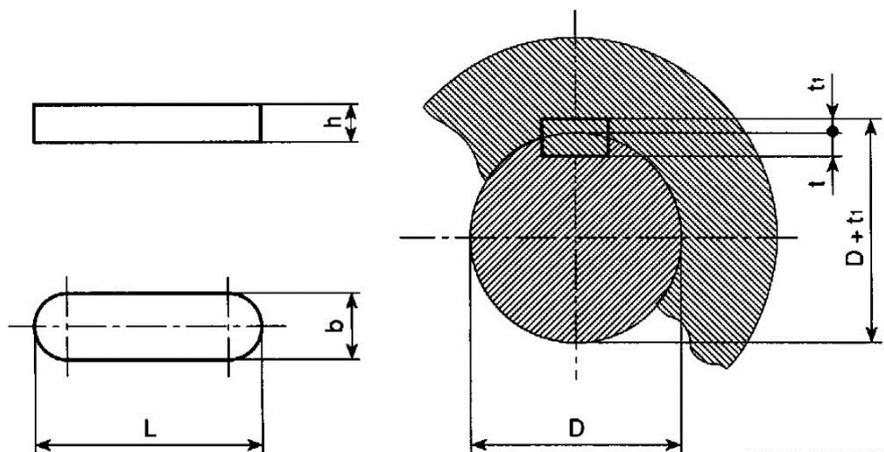


Figura 10-3 Schema da normativa UNI 6604

Sul diametro interno del lamierino deve essere realizzato l'alloggio della linguetta con le dimensioni indicate in Figura 10-4:

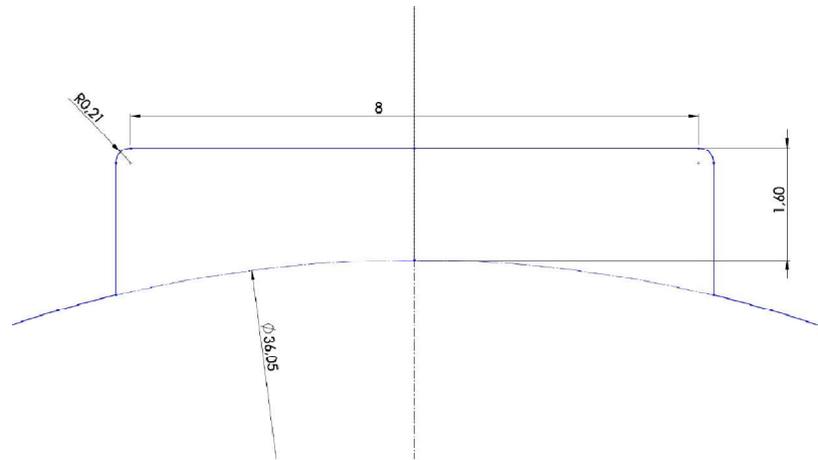


Figura 10-4 Alloggio linguetta su lamierino

È noto che la diversa situazione locale magnetica causata dalle cave di statore provoca il ripple di coppia. Vi sono diversi provvedimenti per attenuare questo problema. L'accorgimento più semplice e usato è lo "skewing" e consiste nell'avvitare la macchina in modo da realizzare una mediazione della situazione locale lungo tutta la lunghezza assiale. La situazione locale da attenuare è principalmente causata dalle cave di statore ( $Q=36$ ), perciò l'angolo di avvitamento, corrisponde a un passo di cava ( $\tau_c$ ):

$$\tau_c = \frac{360^\circ}{Q} = \frac{360^\circ}{36} = 10^\circ$$

Lo "skewing" influisce sulla geometria dei magneti, che deve essere ruotata lungo l'asse di simmetria del motore. Dato che la lavorazione con fresa rende difficile ottenere tali geometrie complesse, si è preferito riprodurre lo "skewing" in maniera discretizzata.

A tale scopo risulta necessario suddividere il rotore in pacchetti di lamierini con spessore di 5 mm per un totale di 8 gruppi per una lunghezza del motore di 40 mm. Ogni gruppo di lamierini dovrà essere ruotato rispetto al precedente di un angolo pari a:

$$\tau_{c,skew} = \frac{10^\circ}{8} = 1.250^\circ$$

Realizzare 8 tipi di lamierini in cui la posizione della linguetta deve essere spostata di  $\tau_{c,skew}$  è poco pratico. L'approccio scelto è stato quello di progettare un unico lamierino fornito di 4 alloggi

per linguette posizionati con una specifica sequenza angolare tale che possa realizzare lo skewing. Considerando l'origine del sistema di riferimento cartesiano posto a metà dell'asse del rotore e assumendo che l'asse di simmetria del motore sia ortogonale alla direzione dell'asse Z uscente dal foglio, si può rappresentare più sotto la sequenza dello spostamento angolare tra gli alloggi delle linguette degli 8 pacchetti rispetto all'asse del motore:

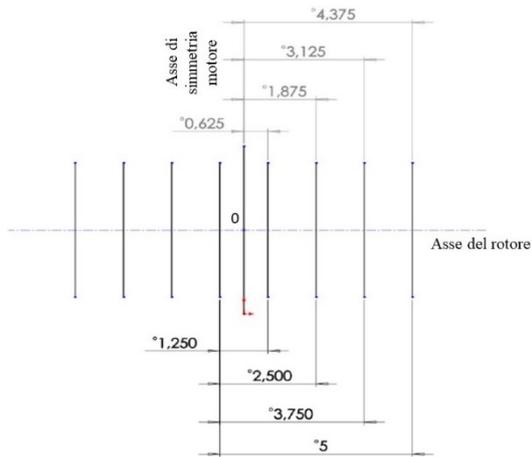


Figura 10-5 Sequenza di skewing delle linguette

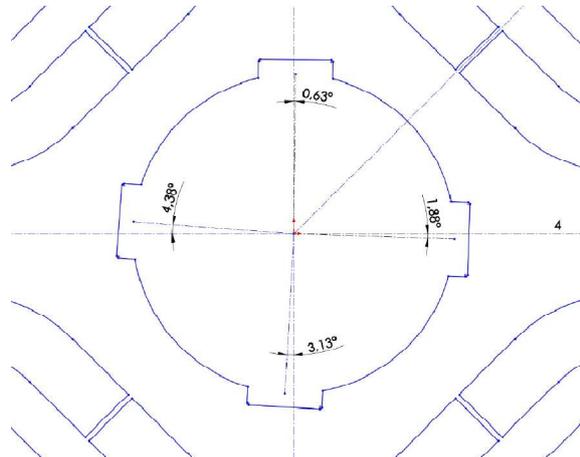


Figura 10-6 Alloggi linguetta per skewing

Da una ricostruzione 3D con SolidWorks (Figura 10-7), è possibile verificare che con questo approccio si è ottenuto lo skewing mediante un'unica geometria del lamierino.

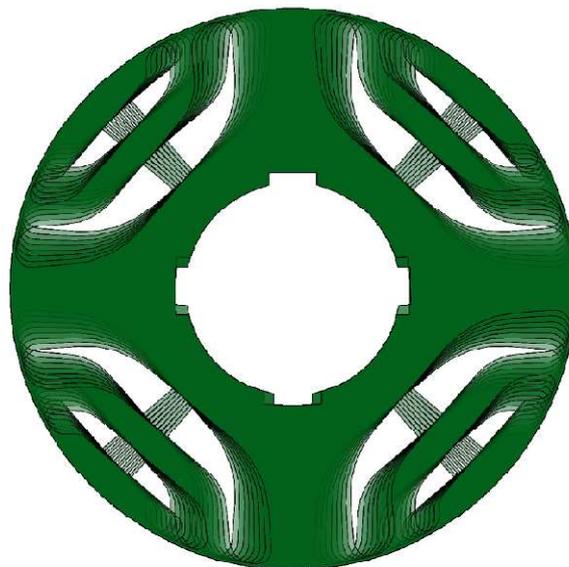


Figura 10-7 Rotore 3D con Skewing

Il lamierino realizzato (Figura 10-8) risulta avere un'altezza di circa 0,5 mm, quindi per realizzare un pacchetto da 5 mm saranno necessari 10 lamierini.



Figura 10-8 Lamierino definitivo

### 10.3. Prestazioni ottenute con nuove geometrie

Si vogliono analizzare separatamente gli effetti delle modifiche geometriche sul range di deflussaggio e sul ripple di coppia. A tale scopo l'analisi del primo fenomeno viene fatta trascurando l'effetto dello "skewing", diversamente dall'analisi del ripple in cui questo accorgimento è fondamentale per la sua riduzione. Per distinguere le due geometrie senza cadere in descrizioni ridondanti si indicheranno da questo momento in poi con "-1" i motori con geometria originale e con "-2" i motori con geometria adattata.

#### 10.3.1. Confronto MTPA fra SynchRel e PMAsR

Modificando la geometria del lamierino sul CAD di FEMM è stata effettuata la simulazione *sim\_var\_alphaie* per ottenere informazioni riguardo la variazione del range di deflussaggio. Confrontando i risultati ottenuti nel progetto originale con quelli del progetto adattato in Figura 10-9, si osserva che la pendenza della MTPA è aumentata. Ciò significa che con il SynchRel-2 aumenta il range di deflussaggio.

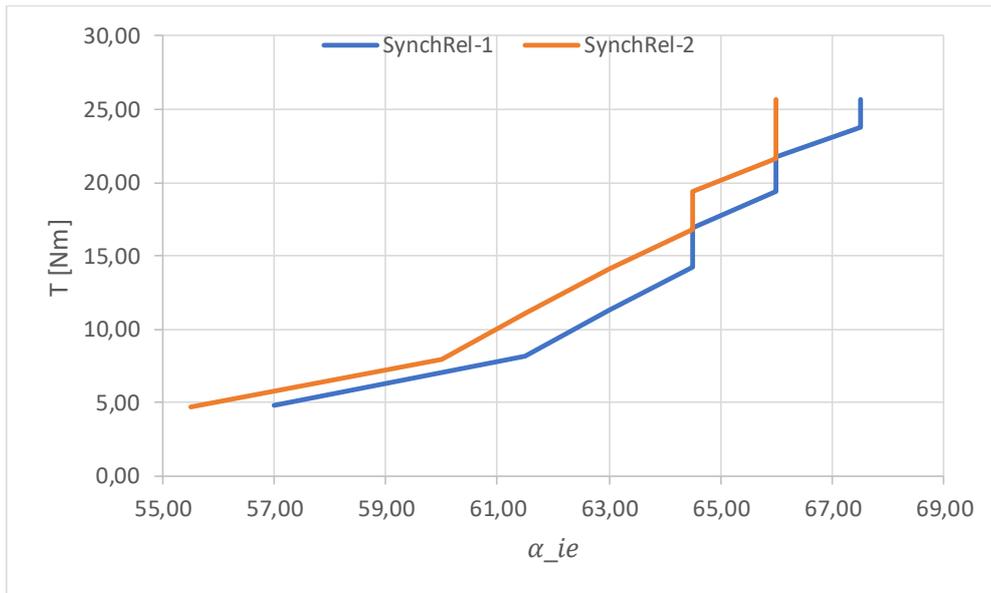


Figura 10-9 confronto MTPA tra SynchRel-1 e SynchRel-2

Analizzando i punti di lavoro in MTPA e riferendo questi dati in un piano d-q come in Figura 2-7 si è potuto constatare che la sua pendenza si è ridotta dell'1,8%. Questo fenomeno è attribuibile all'effetto di "cross-saturation". Alimentando una fase dello statore con una corrente di 1A e osservando le linee di flusso magnetico, si nota da un confronto tra Figura 10-10 e Figura 10-11 che i ponticelli del rotore del SynchRel-2 sono saturati prima rispetto a quelli del SynchRel-1.

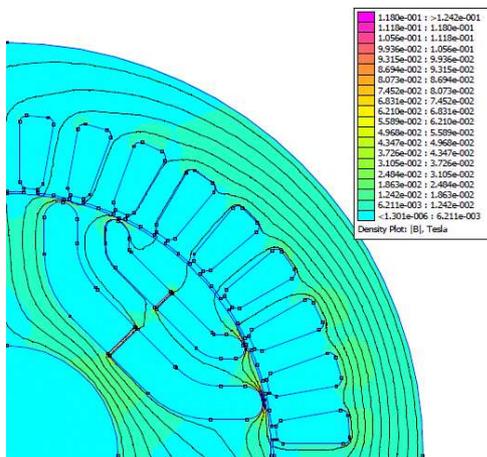


Figura 10-10 Saturazione ponticelli SynchRel-1

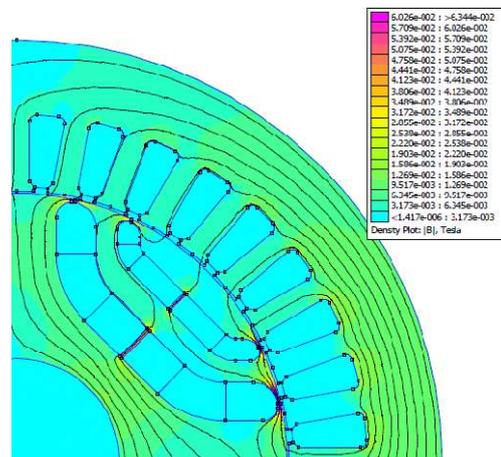


Figura 10-11 Saturazione ponticelli SynchRel-2

Ciò si traduce in uno spostamento della coppia massima nel piano T- $\alpha_{ie}$  verso sinistra. In questo caso la modifica della geometria ha portato un miglioramento sul range di deflussaggio.

Confrontando in Figura 10-12 le simulazioni tra il PMA<sub>s</sub>R-1 e PMA<sub>s</sub>R-2 con CPF4, le MTPA non si discostano molto per valori di corrente prossimi alla nominale (fino a 20 A). Invece, per valori di corrente superiori (fino a 40 A) si ha un distacco delle due curve di circa l'1,4%.

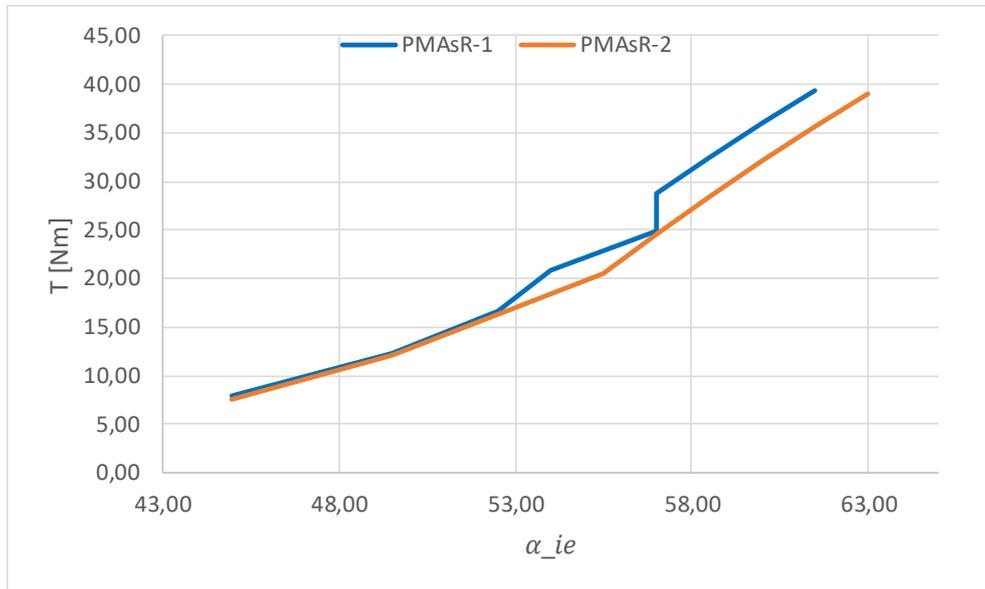


Figura 10-12 confronto MTPA tra PMA<sub>s</sub>R-1 e PMA<sub>s</sub>R-2

La presenza del magnete CPF4 satura i ponticelli, anche per corrente nulla, quindi le due MTPA risultano essere praticamente uguali per valori prossimi alla corrente nominale (fino a 20 A). più sotto si può osservare che, per valori di corrente superiori alla nominale, l'asse di saturazione prima nel motore adattato, a causa della riduzione della sezione dei canali, perciò nel piano T- $\alpha_{ie}$  il tratto di MTPA che converge a una retta (valori alti di corrente) risulta più spostato verso destra nel PMA<sub>s</sub>R-2 rispetto a quello del PMA<sub>s</sub>R-1.

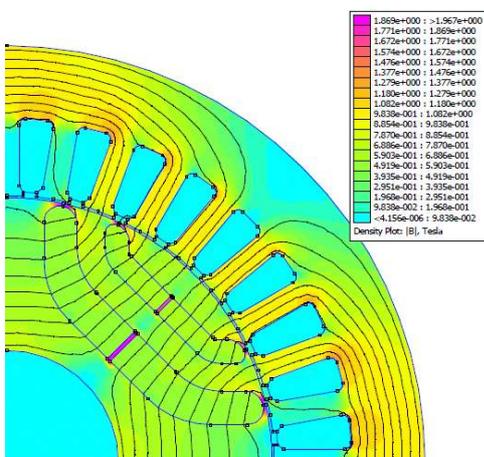


Figura 10-13 Saturazione ponticelli PMA<sub>s</sub>R1

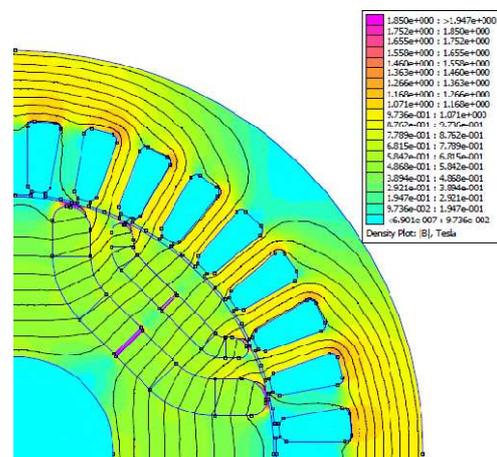


Figura 10-14 Saturazione ponticelli PMA<sub>s</sub>R2

Questa condizione di sovraccarico dovrà durare poco tempo e, a seconda dell'applicazione, dovrebbe essere poco frequente affinché si possano evitare eccessive perdite sullo statore ed eventuali guasti degli avvolgimenti. Perciò la modifica della geometria, nel caso del PMAsR, influisce poco sulla pendenza della MTPA, e quindi sul range di deflussaggio, per condizioni di funzionamento nominali.

### 10.3.2. Ripple con nuova geometria

Si vuole adesso analizzare il fenomeno del ripple confrontando i risultati della simulazione *sim\_var\_thetam* del motore originale con quelli del motore adattato. Come nell'analisi precedente, si confrontano separatamente SynchRel e PMAsR.

Per simulare lo skewing si sono effettuate un numero di simulazioni pari a quello degli step del rotore, scomponendo di fatto il motore in 8 motorini di lunghezza d'asse pari a 5 mm ma ruotati tra loro di un angolo di  $\tau_{c,skew}$ . Variando l'angolo meccanico  $\vartheta_m$  di mezzo giro con un passo di 3deg, si sono ottenute 8 stringhe con 60 valori di coppia. Sommando i valori di coppia degli 8 motorini corrispondenti all'angolo di rotazione, si è ricavato l'effetto medio dello skewing a ogni posizione del rotore. A questo punto è stato possibile ricavare l'indice di ripple con skewing, come illustrato nel paragrafo 9.2.

Si può effettuare quindi un confronto incrociato tra gli indici di ripple dei motori originali con gli indici di ripple dei motori adattati senza e con lo skewing:

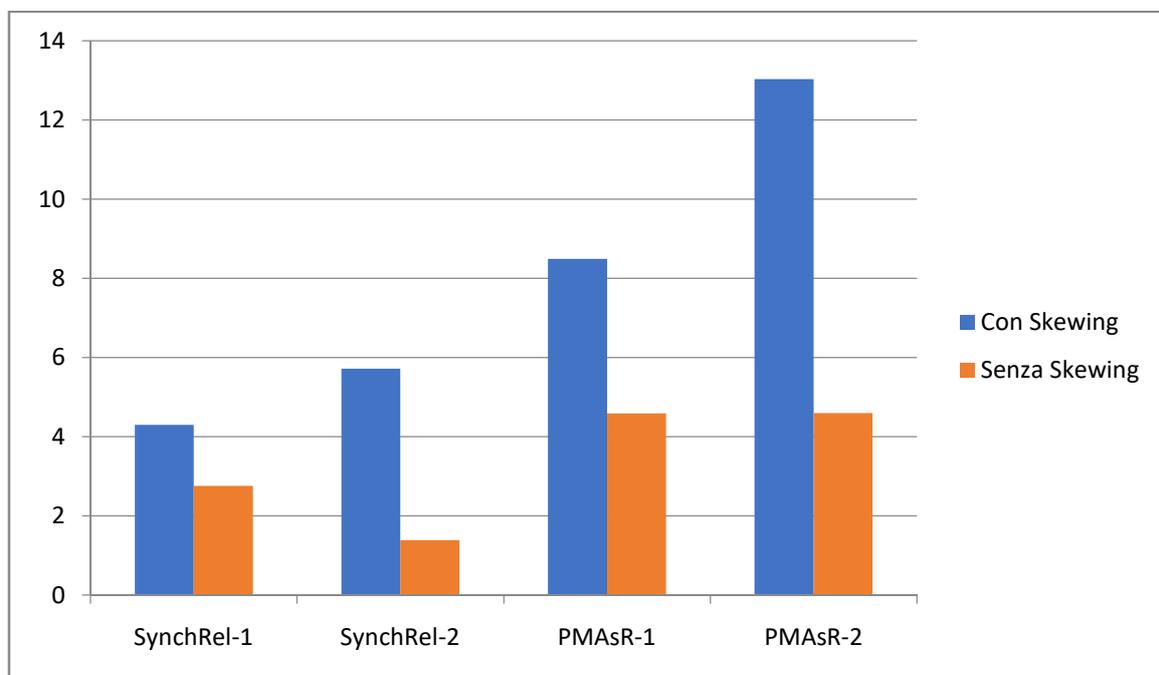


Figura 10-15 Confronto indice di ripple tra SynchRel e PMAsR con e senza skewing

Dai dati ottenuti dalle simulazioni si è riscontrata un aumento dell'indice di ripple a seguito della modifica delle geometrie, tuttavia operando lo skewing del rotore si è ottenuta una sua riduzione in ogni configurazione.

Di seguito vengono fornite delle tabelle con informazioni più dettagliate riguardo all'indice di ripple.

	Senza skewing	Con skewing
<b>SynchRel-1</b>	4,30	2,76
<b>SynchRel-2</b>	5,72	1,39
	24,83	-98,56

Tabella 10-1 Effetto dello skewing sul SynchRel-2

Si osserva in Tabella 10-1 che nel SynchRel-2 si è ottenuto un aumento dell'indice di ripple di coppia rispetto al SynchRel-1, ciò indica un aumento del ripple. Tuttavia, applicando lo skewing si riesce a ridurre tale indice ottenendo un miglioramento del 98% rispetto alla geometria originale.

Stesso confronto è riportato in Tabella 10-2 per il PMAsR con CPF4:

	Senza skewing	Con skewing
<b>PMAsR-1</b>	8,49	4,59
<b>PMAsR-2</b>	13,03	4,60
%	34,84	0,22

Tabella 10-2 Effetto dello skewing sul PMAsR-2

In questo caso le modifiche alla geometria in un motore senza skewing peggiorano il ripple di coppia di circa il 35% rispetto al disegno originale ma applicando lo skewing si ottiene un effetto molto vicino tra PMAsR-1 e PMAsR-2. Le necessità legate al processo di realizzazione dei magneti peggiorano l'ampiezza del ripple, ma permettono una notevole semplificazione su una fase importante della realizzazione del prototipo. Questo peggioramento tuttavia è possibile colmarlo applicando lo skewing come dimostrato dagli indici ottenuti nelle tabelle 10-1 e 10-2.

### 10.3.3. Power Factor

Note le componenti in asse diretto e in quadratura del vettore di flusso magnetico, è possibile ricavare il PF con le stesse modalità esposte nel paragrafo 9.1. Coerentemente con quanto fatto in precedenza si mostrano in Tabella 10-3i valori per una corrente di 10 A:

	<b>T (Nm)</b>	<b>PF</b>
<b>SynchRel-1</b>	14,22	0,661
<b>PMAsR-1</b>	20,88	0,925
<b>SynchRel-2</b>	14,07	0,655
<b>PMAsR-2</b>	20,54	0,920

Tabella 10-3 Coppia e PF di SynchRel e PMAsR-CPF4 adattato per I=10A

Applicando le nuove geometrie, si può riscontrare una lieve riduzione del PF solo alla terza cifra decimale. In questo caso, il vincolo del processo produttivo obbliga ad accettare lievi riduzioni di PF, che comunque risulta essere nel PMAsR-2 di gran lunga superiore del SynchRel-2.

## 11. Lavorazioni ed assemblaggio

In questo capitolo si vogliono descrivere i processi di realizzazione dei magneti ed il loro inserimento all'interno degli sbarramenti. Si possono distinguere due fasi principali:

- lavorazione dei magneti;
- magnetizzazione dei magneti.

### 11.1. Lavorazioni magneti permanenti e soluzioni adottate

Con la miscela CPF4 si sono ottenuti dei campioni con una notevole resistenza meccanica. Per questo motivo è stato deciso di modellare i magneti mediante lavorazione in fresa CNC.

La fresa utilizzata è di tipo a 3 assi con piano scorrevole, la cui posizione varia su un sistema di riferimento di assi ortonormali x, y, z. Il movimento di asse della fresa avviene per interpolazione di punti su tale spazio. La geometria desiderata si è disegnata su piattaforma **SolidWorks** da cui è stato possibile ottenere il formato in .IGES compatibile con il software dedicato della fresa, che permette di ottenere la sequenza di punti da interpolare di una specifica geometria.

Considerando che i campioni ottenuti dalla pressatura della miscela hanno una forma a disco di diametro di 40 mm e altezza di circa 5 mm, si è cercato di ottenere da tale profilo il maggiore numero di magneti per non sprecare eccessivo materiale. Tenendo conto inoltre che in ogni polo ci sono 2 coppie di magneti, si può pensare di ricavarle entrambe dallo stesso campione (Figura 11-1).

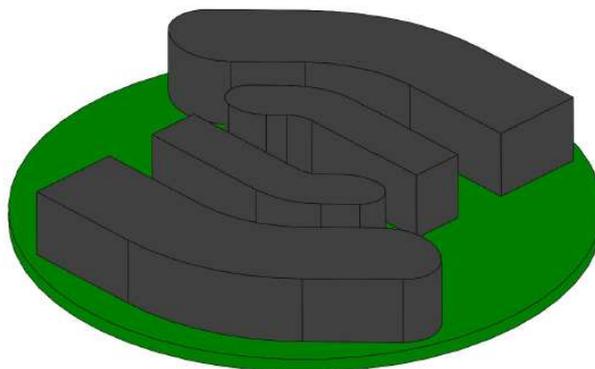


Figura 11-1 Modello SolidWorks dei magneti fresati

Per effettuare un lavoro di fresatura è necessario che il campione sia bloccato mediante una morsa (Figura 11-2) in modo tale che non si muova al passaggio della fresa.



Figura 11-2 Campione in morsa

Considerando che l'origine del piano XY su cui agisce la fresa è posto sulla superficie superiore del disco si può immaginare che raggiunta la quota di -5 mm tutti gli elementi ottenuti risultino liberi di muoversi rendendo vano il lavoro della morsa (Figura 11-3).



Figura 11-3 processo di fresatura

Per questo motivo si è pensato di ricavare dei ponticelli meccanici di altezza di 1 mm (Figura 11-4) per poter mantenere la posizione del campione durante la fresatura, semplificando l'operazione di successivo asporto di materiale in eccesso mediante carta abrasiva.



Figura 11-4 magneti con ponticelli meccanici

Dopo avere ottenuto la sequenza di comandi che permettono la realizzazione del pezzo desiderato, si è effettuata la prima fresatura (Figura 11-5). Si è riscontrato che la durata della lavorazione è superiore alle 3 ore in quanto la generazione automatica del codice prevede una fresatura a strati che obbliga a effettuare il passaggio da un magnete all'altro a velocità di lavoro ridotta.

Si è quindi modificata la sequenza di fresatura riducendo il numero di passaggi a velocità ridotta in modo tale che si possano ottenere le due coppie di magneti in un tempo di circa 50 minuti. Quest'operazione ha permesso di ridurre almeno di 1/3 il tempo di lavorazione dei magneti. Si ricordi, infatti, che il rotore a 4 poli è stato diviso in 8 pacchetti di lamierini per effettuare lo skewing. Ciò significa che è necessario realizzare almeno 32 dischi per ottenere tutti i magneti.



Figura 11-5 Campione fresato

Dal campione si sono ottenute quindi le due coppie di magneti (Figura 11-6) che sono state levigate con carta abrasiva per eliminare i residui dei ponticelli meccanici e trattate con vernice protettiva per evitare l'ossidazione.



Figura 11-6 Magneti realizzati

## 11.2. Supporto per la magnetizzazione dei magneti

Resta solo da magnetizzare i magneti. Il verso del campo magnetico prodotto dai magneti deve essere tale da realizzare 4 poli, come rappresentato in figura 11-7, in modo tale da ottenere una struttura magnetica riconducibile a un motore IPM (Interior Permanent Magnet) dove il polo nord di un magnete è congruente al polo nord del magnete adiacente (Figura 11-7).

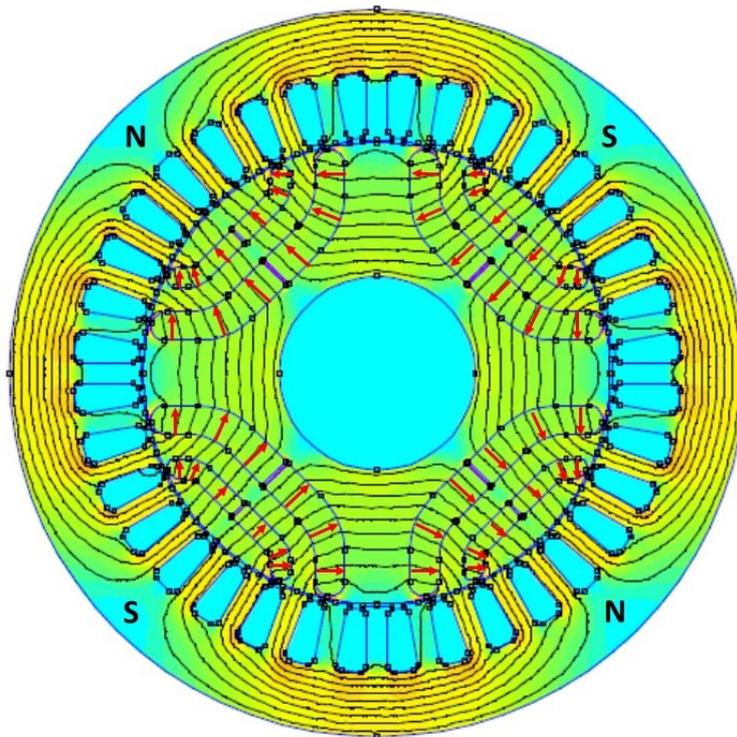


Figura 11-7 Orientamento campo magnetico dei PM

Lo strumento utilizzato per magnetizzare il materiale ferromagnetico genera un flusso con linee di campo parallele, quindi ottenere una magnetizzazione con linee di campo orientate in modo diverso risulta complesso. Pertanto, si è cercato di trovare una direzione media delle linee di campo in modo tale da avvicinarsi alla condizione ideale desiderata. Dato che i due sbarramenti sono molto diversi sia in dimensioni che in forma geometrica, sono stati individuati dei riferimenti differenti per ottenere una posizione che potesse mediare le linee di flusso del campo magnetico.

Il magnete da inserire nello sbarramento di dimensioni maggiori risulta avere una forma quasi simmetrica rispetto all'asse di simmetria dei raccordi centrali. Si è quindi voluta sfruttare questa sua caratteristica tracciando le linee di lunghezza media e ponendole alla stessa inclinazione rispetto all'asse di riferimento (Figura 11-8).

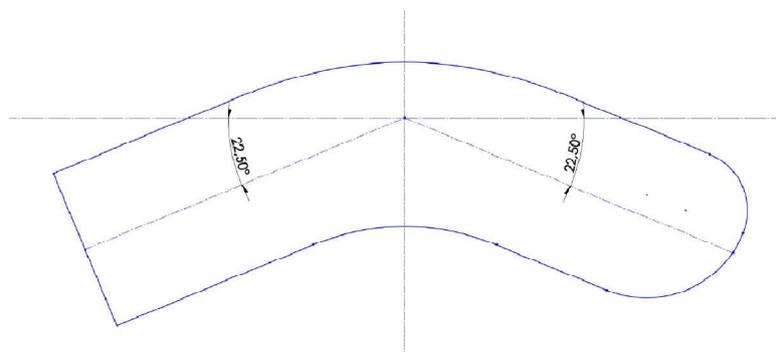


Figura 11-8 Orientamento PM dello sbarramento maggiore per la magnetizzazione

Il campione da inserire nello sbarramento di dimensioni inferiori risulta, invece, essere asimmetrico. Anziché la simmetria si è considerata la sua lunghezza lineare pari a 17,10 mm, che è stata misurata tra il punto della circonferenza di raccordo rivolta verso il traferro e il punto medio del segmento corrispondente al ponticello. Il segmento che unisce questi due punti è stato orientato orizzontalmente (Figura 11-9).

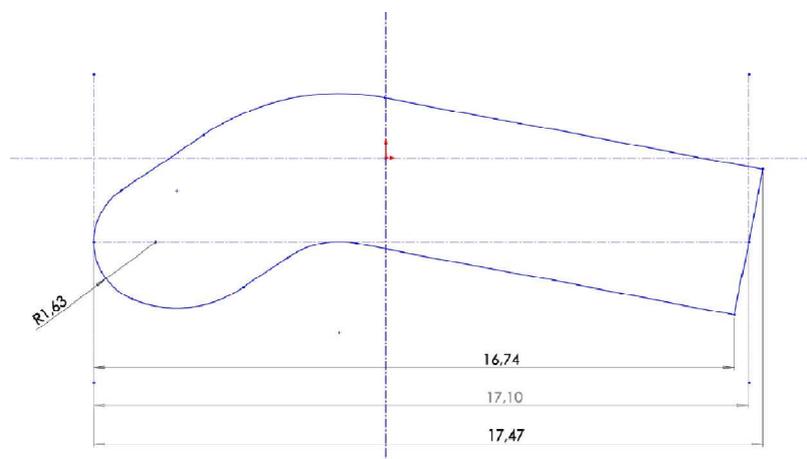


Figura 11-9 Orientamento PM dello sbarramento minore per la magnetizzazione

Definita la posizione dei PM durante la magnetizzazione è necessario realizzare un supporto che la mantenga che è stato realizzato in PVC e lavorato con fresa CNC. Considerando che il compito del supporto è solo quello di mantenere la posizione del PM durante la magnetizzazione si è realizzata una geometria semplificata (Figura 11-10).

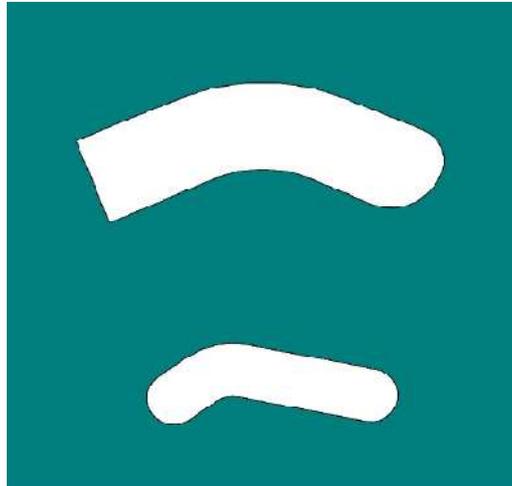


Figura 11-10 Geometria supporto

Il supporto è stato realizzato con un parallelepipedo in PVC in cui è possibile inserire 8 PM contemporaneamente velocizzando così il processo di magnetizzazione. Per eliminare gli spigoli dello sbarramento maggiore, si sono realizzati dei raccordi con una punta da 2 mm (Figura 11-11).



Figura 11-11 Supporto per la magnetizzazione

Da una prima prova si è osservato che durante la magnetizzazione i PM si respingevano e uscivano dalle finestre del supporto urtando la parete esterna della bobina del magnetizzatore con effetti distruttivi. Per questo motivo sono state utilizzate due fascette per impedire che ciò accadesse.

Si è proceduto quindi all'inserimento dei magneti nel supporto (Figura 11-12), 8 nella finestra grande e 8 nella finestra piccola:

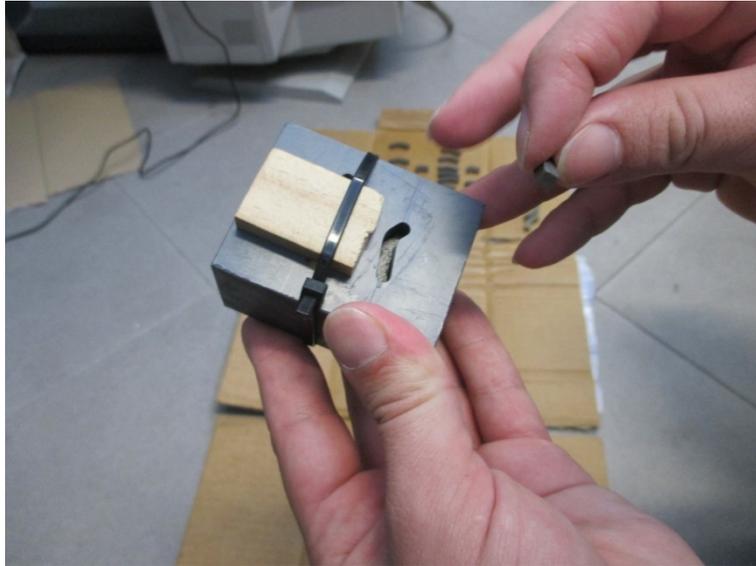


Figura 11-12 Inserimento magneti nel supporto

e alla loro magnetizzazione (Figura 11-13).



Figura 11-13 Magnetizzazione magneti

Dopo essere stati magnetizzati, i magneti presentano una polarizzazione (Figura 11-14, Figura 11-14) che tende a seguire la linea media del profilo del magnete:

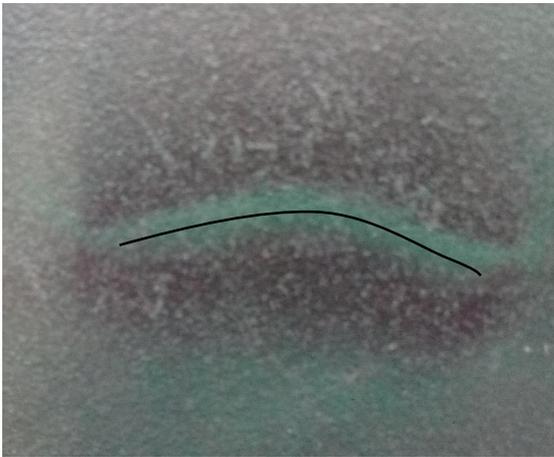


Figura 11-14 Polarizzazione magnete più grande

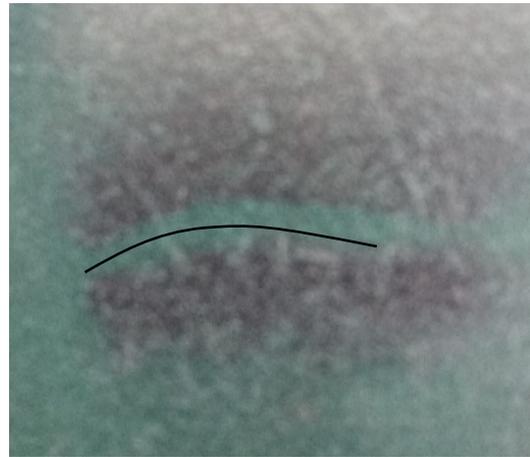


Figura 11-15 Polarizzazione magnete più piccolo

Si presentano tuttavia delle imperfezioni delle linee di flusso magnetico agli estremi dei magneti causate dalla non perfetta canalizzazione del flusso magnetico durante la magnetizzazione. Tuttavia da una prima analisi si può ritenere il risultato accettabile (Figura 11-16).



Figura 11-16 Disposizione magneti

### 11.3. Assemblaggio rotore

Sono stati realizzati l'albero motore, la linguetta, due piastre e un dado autobloccante (Figura 11-17):



Figura 11-17 Albero motore, linguetta, piastre dado autobloccante, lamierini

Si sono assemblati due rotori, uno senza magneti per il motore a riluttanza e l'altro con i magneti per il motore a riluttanza assistito. Il procedimento di assemblaggio è uguale per entrambi con la differenza che nel secondo dovranno essere inseriti anche i magneti.

Si procede con l'inserimento della linguetta (Figura 11-18) necessaria per trasmettere il momento torcente ai lamierini:



Figura 11-18 Inserimento linguetta nell'alloggio dell'albero motore

Si inserisce quindi la piastra di testata del rotore (Figura 11-19):



Figura 11-19 Inserimento piastra di testata anteriore

Si procede con l'inserimento dei pacchetti di lamierini (Figura 11-20).



Figura 11-20 Inserimento lamierini sull'albero motore

In questa fase deve essere seguita la sequenza ADCB BCDA (la sottolineatura indica il ribaltamento dei lamierini) con cui sono indicati gli alloggi della linguetta per poter realizzare un corretto skewing (Figura 11-21).



Figura 11-21 Dettaglio skewing motore a riluttanza

Per l'assemblaggio del rotore per il motore assistito devono essere inseriti anche i magneti (Figura 11-22):



Figura 11-22 Inserimento magneti

L'accoppiamento dei magneti con i lamierini è risultato essere agevole e senza forzamenti tranne che negli ultimi pacchetti di lamierini dove le forze magnetiche di repulsione rendevano difficile il loro inserimento.

Infine, è stata posizionata la piastra di testata posteriore ed è stato avvitato il dado di blocco (Figura 11-23).

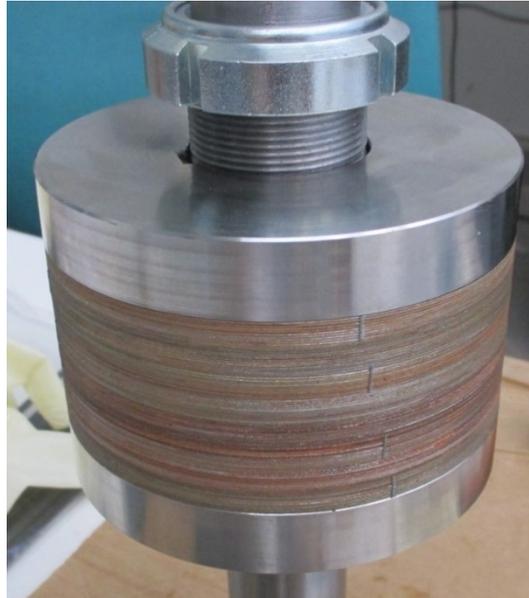


Figura 11-23 Rotore assemblato

Per verificare che lo skewing è stato realizzato in modo corretto si è utilizzata la carta verde magnetizzata sulla superficie laterale del rotore (Figura 11-24):



Figura 11-24 Dettaglio skewing motore a riluttanza assistito

## 12. Risultati Test su banco prova

I test su banco hanno lo scopo di verificare le reali prestazioni del SynchRel-2 e del PMAsR-2 rispetto al modello matematico a seguito delle modifiche geometriche e applicando lo skewing. Inoltre, permettono di analizzare in che modo il magnete permanente CPF4 influisce sulle prestazioni del PMAsR-2 rispetto al SynchRel-2 reali.

### 12.1. MTPA

#### 12.1.1. Confronto tra macchine reali e simulazioni

Sono state effettuate le misure istantanee di coppia per correnti comprese tra 0,5A e 6,0A variando l'angolo di rotazione del vettore di corrente nel primo quadrante del piano d-q.

In figura 12-1 viene fatto un confronto tra le misure e le simulazioni del SynchRel-2.

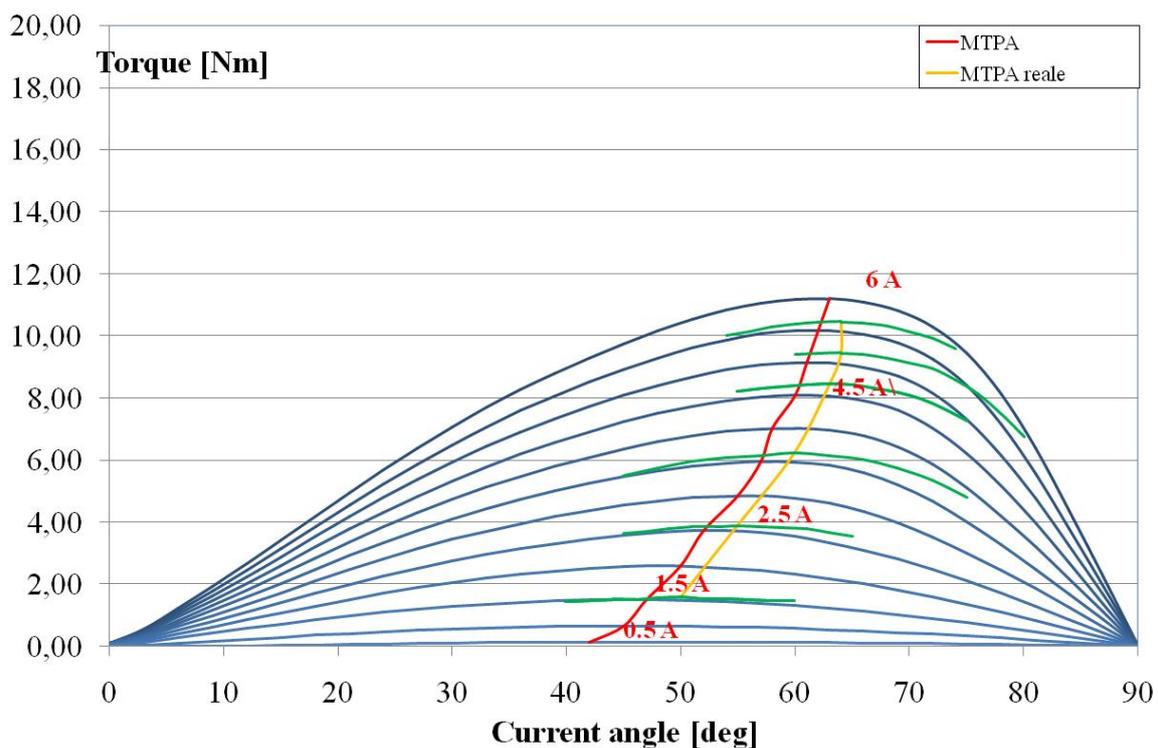


Figura 12-1 Confronto MTPA tra la macchina reale e il modello del SynchRel-2.

Confrontando i dati ottenuti dalle simulazioni (curve in blue) con quelli misurati (curve in verde) è possibile affermare che la macchina reale eroga una coppia fino a circa il 2,9% maggiore rispetto a quella prevista.

Interpolando i punti di massima coppia per corrente impressa, è possibile tracciare la MTPA reale (linea arancione) che risulta traslata verso destra rispetto a quella simulata (linea rossa). Ciò significa che il range di deflussaggio della macchina reale è più stretto di circa il 3% rispetto al modello simulato.

In figura 12-2 viene fatto un confronto tra le misure e le simulazioni del PMA<sub>s</sub>R-2.

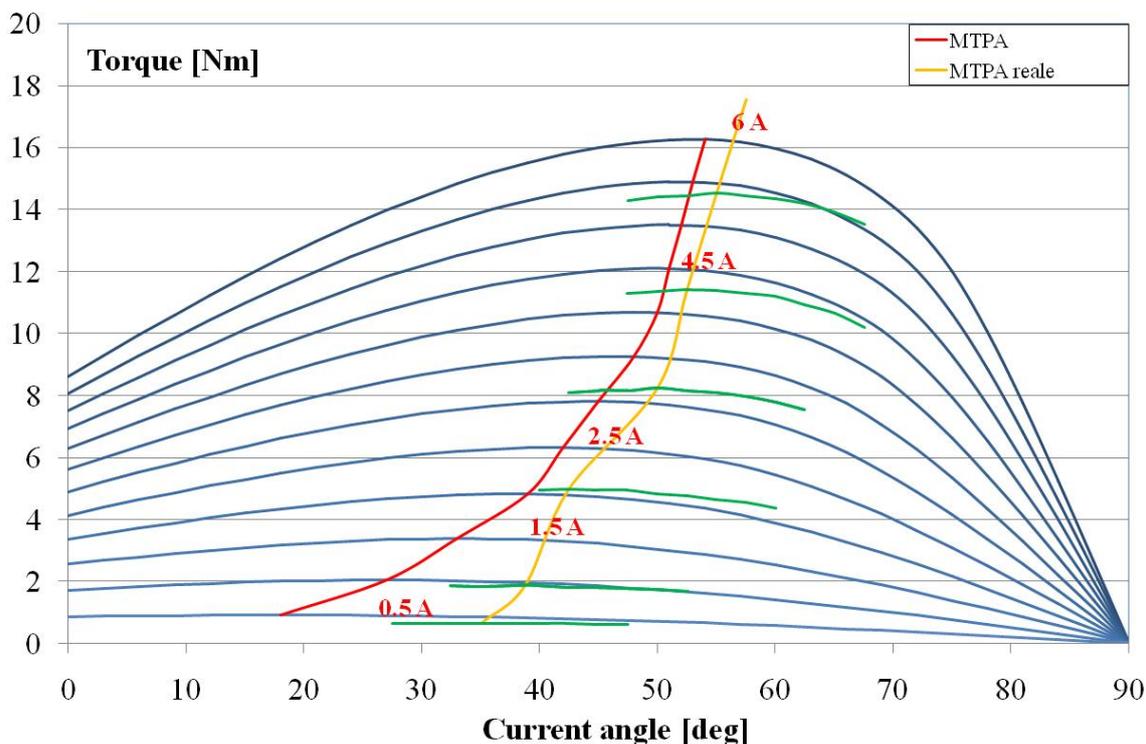


Figura 12-2 Confronto MTPA tra la macchina reale e il modello del PMA<sub>s</sub>R-2.

Operando lo stesso confronto fatto per il SynchRel-2, è possibile affermare che il PMA<sub>s</sub>R-2 reale eroga una coppia fino a circa il 7,9% maggiore rispetto a quella prevista.

Anche in questo caso l'MTPA del PMA<sub>s</sub>R-2 reale (linea arancione) risulta essere traslata verso destra rispetto a quella simulata (linea rossa), quindi il range di deflussaggio della macchina reale è più stretto di circa il 6,5% rispetto al modello simulato.

### 12.1.2. Confronto tra PMA<sub>s</sub>R-2 e SynchRel-2 Reali

Si sono quindi riscontrate delle differenze tra il modello matematico e la macchina reale riguardo al range di deflussaggio che risulta essere più stretto.

Tuttavia, confrontando le MTPA del SynchRel-2 e del PMA<sub>s</sub>R-2 reali si può osservare l'effetto dei magneti permanenti CPF4 sulle prestazioni del PMA<sub>s</sub>R-2.

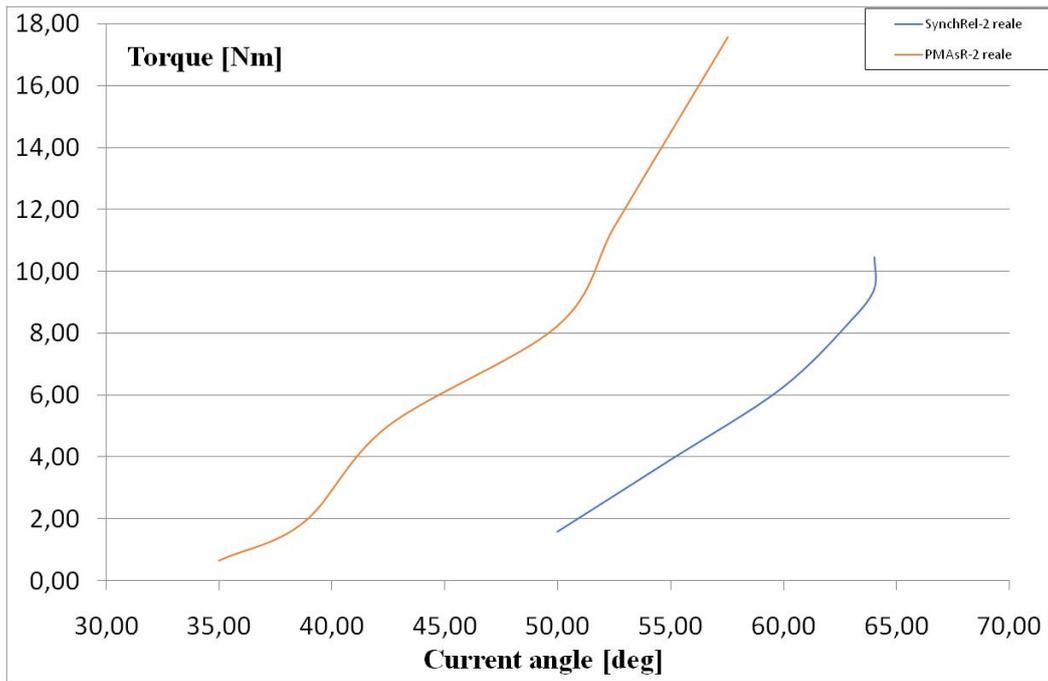


Figura 12-3 Confronto MTPA SynchRel-2 e PMAsR-2 Reali

Analizzando i dati ottenuti si osserva che il range di deflussaggio è aumentato di circa il 14% mentre la coppia erogata ad una corrente di 5 A in MTPA è aumentata di circa il 53.6%

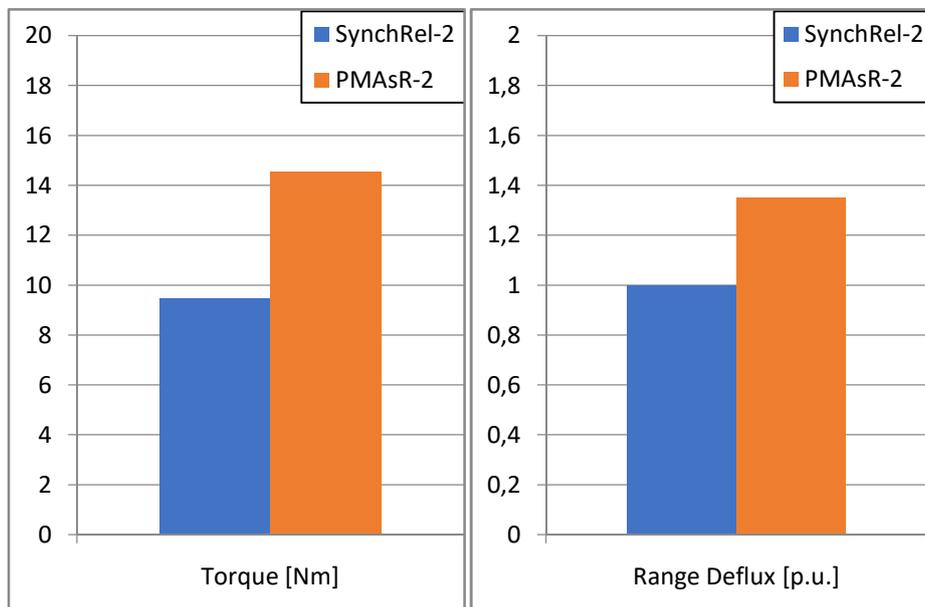


Figura 12-4 Confronto prestazioni tra SynchRel-2 e PMAsR-2 Reali

## 12.2. PF

Dalle prove su banco si sono potute ricavare le curve di magnetizzazione di SynchRel-2 e PMAr-2 in cui è rappresentato il comportamento magnetico reale dei due motori.

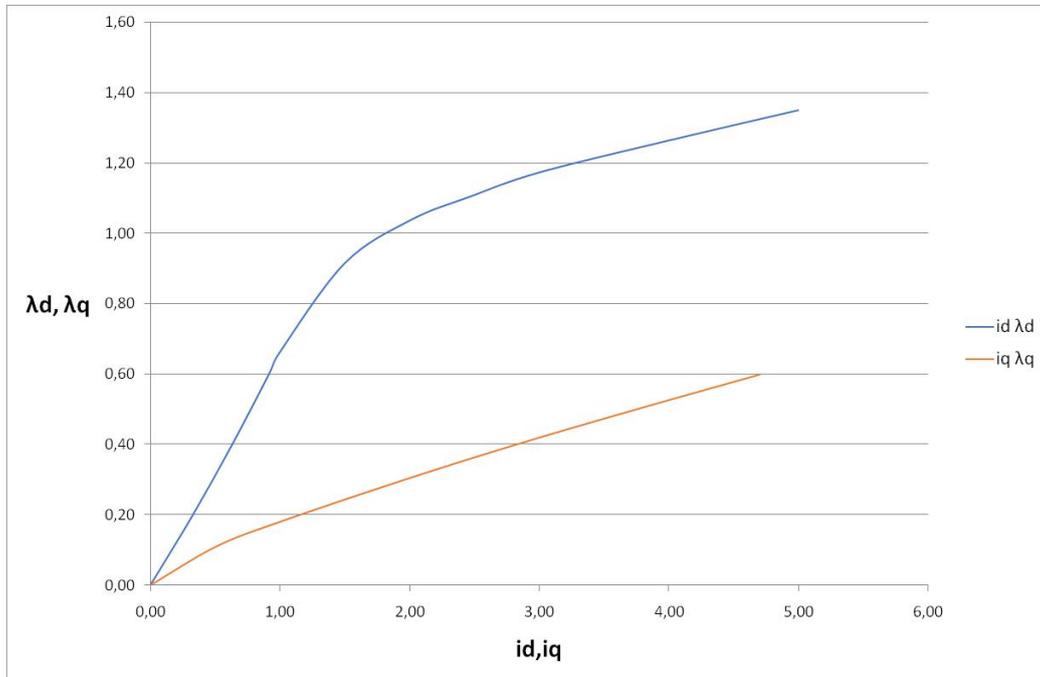


Figura 12-5 Curve di magnetizzazione  $i_d - \lambda_d$  e  $i_q - \lambda_q$  del SynchRel

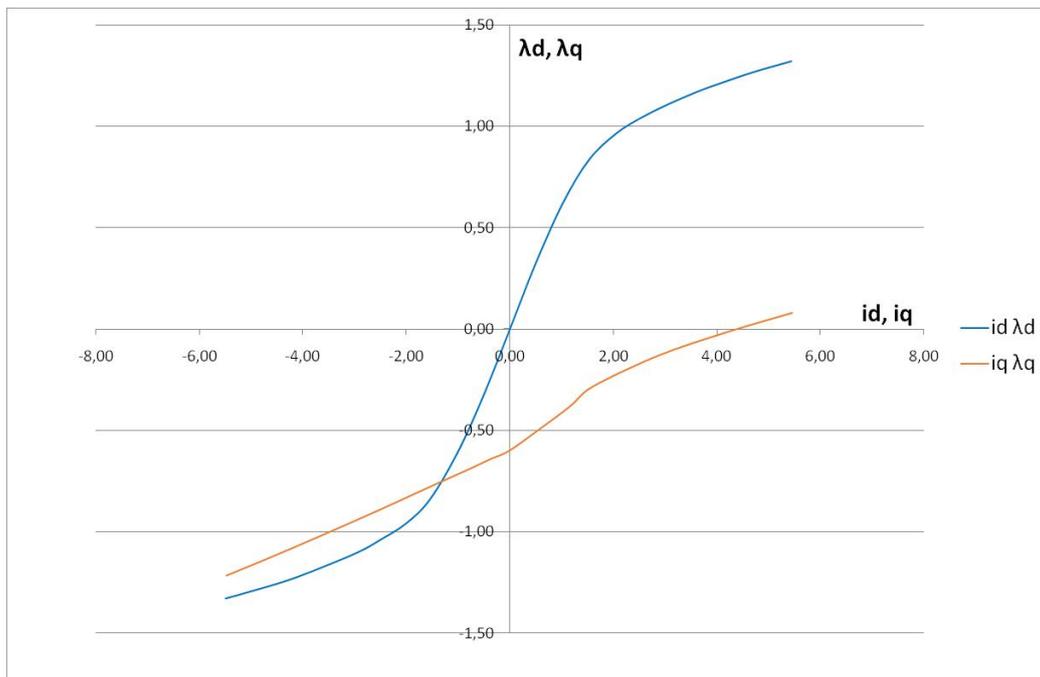


Figura 12-6 Curve di magnetizzazione  $i_d - \lambda_d$  e  $i_q - \lambda_q$  del PMAr

Considerando la corrente con ampiezza di 5 A di MTPA di entrambe le macchine, è possibile ricavare, mediante interpolazione con le curve di magnetizzazione, le componenti del vettore flusso magnetico ( $\lambda_d, \lambda_q$ ).

Facendo riferimento alla figura 9-1 del capitolo 9, riproposta di seguito, note  $\lambda_d$  e  $\lambda_q$ , e sapendo che il vettore di tensione è in quadratura rispetto al vettore di flusso magnetico, è possibile ricavare il PF delle due macchine.

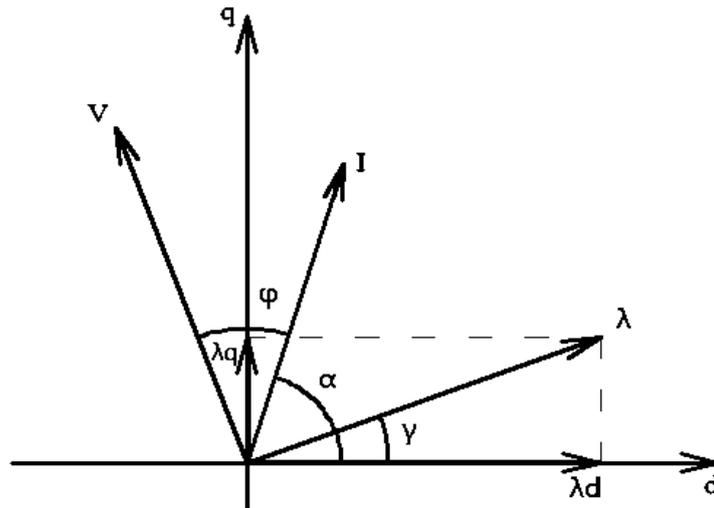


Figura 12-7 Descrizione angoli dei vettori di corrente e flusso

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{\lambda_q}{\lambda_d}$$

quindi:

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - (\alpha - \gamma)$$

Pertanto:

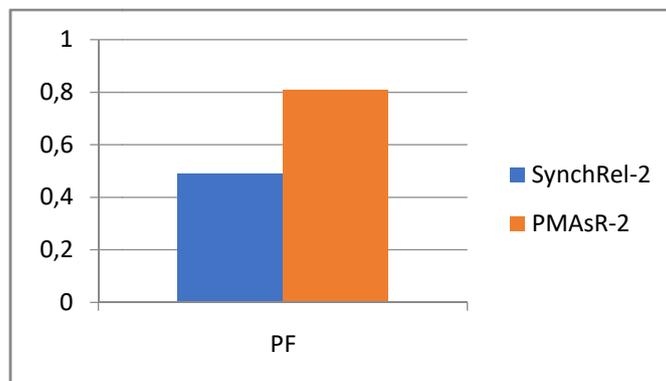


Figura 12-8 PF delle macchine reali

Come si osserva, l'utilizzo del magnete CPF4 permette di migliorare il PF in MTPA di un motore a riluttanza in modo considerevole, passando da un PF di 0,49 per il SynchRel ad un PF di 0,81 per il PMA<sub>s</sub>R. Tuttavia, per ragioni imputabili all'approssimazione del modello matematico della macchina, tale risultato risulta essere inferiore a quello atteso (0,92).

## 13. Conclusioni

### 13.1. Valutazioni di processo

Sono stati individuati dei criteri che hanno permesso di selezionare il magnete per assistere il motore a riluttanza. A tale scelta è seguito un determinato processo di realizzazione che ha influito sulla geometria del lamierino e ha provocato un peggioramento in termini di ripple di coppia. La prima considerazione da fare quindi è quella legata a tali modifiche. Nel caso in cui fosse stato possibile realizzare i magneti della forma degli sbarramenti del motore originale allora si sarebbero potute evitare variazioni al lamierino e quindi preservare la geometria ottimizzata per il minore ripple di coppia. Ciò può essere fatto con uno stampo ad hoc che però, in fase di prototipazione, risulta essere una soluzione molto costosa.

È importante sottolineare che le risorse a disposizione hanno influito sulla scelta del magnete. I magneti di tipo CPPA6 o in granuli hanno delle caratteristiche magnetiche e meccaniche che sono compatibili con l'applicazione. Tuttavia il processo di iniezione, con cui si realizzano, presenta due difficoltà:

- la prima è la mancanza di un apposito sistema di iniezione negli sbarramenti, infatti la realizzazione di una strumentazione idonea risulta avere un costo rilevante per un solo prototipo;
- la seconda è la difficoltà di magnetizzare i magneti una volta iniettati negli sbarramenti. Si potrebbe pensare di utilizzare gli avvolgimenti statorici ma dovranno essere dimensionati in modo adeguato per sostenere le correnti di magnetizzazione necessarie.

La scelta è quindi ricaduta sui magneti di tipo CPF le cui caratteristiche magnetiche sono comunque risultate essere le migliori tra quelle degli altri magneti considerati.

I magneti CPF però hanno presentato dei problemi durante il trattamento termico. Si è infatti riscontrata una reticolazione incontrollata per magneti con percentuali di resina fenolica  $\geq 5\%$  che ha provocato delle imperfezioni sulla struttura del magnete. Per risolvere tale problema si sono ridotte le percentuali di resina in miscela.

Si è data un'attenzione particolare al processo di fresatura in quanto risulta essere la fase più dispendiosa in termini di tempo. Per ottimizzare tale processo è stato necessario intervenire sia sul codice CNC che sulla geometria degli sbarramenti e quindi del magnete. In questo modo si è ridotto il tempo di realizzazione del magnete di  $2/3$ . Si ribadisce che se avessimo avuto uno stampo della forma desiderata del magnete si sarebbe potuta evitare la lavorazione in fresa e quindi abbattere

notevolmente il dispendio di tempo sia di rielaborazione del codice CNC che di realizzazione del magnete, oltre che ridurre il materiale di scarto della fresatura.

### 13.2. Valutazione risultati

Dalle misure effettuate su banco prova, si è riscontrato che l'utilizzo del magnete CPF4 ha causato un miglioramento delle prestazioni del motore a riluttanza in termini di range di deflussaggio e in termini di coppia erogata.

Inoltre, è stato possibile verificare l'effetto benefico del magnete sul PF del PMA<sub>S</sub>R-2.

### 13.3. Sviluppi futuri

La selezione dei magneti può essere estesa considerando miscele con diverse percentuali di polveri di ferro e resine. A tal proposito possono essere considerate anche resine di tipo epossidico. Queste resine sono materiali polimerici che presentano una buona adesione con altri materiali, in particolare con i metalli, e, con l'aiuto di agenti reticolanti, permettono di ottenere dei solidi con buone proprietà meccaniche e di isolamento elettrico.

Nonostante gli sforzi fatti per polarizzare i magneti con una direzione di campo normale alla superficie interna degli sbarramenti, il risultato non rispecchia del tutto l'orientamento desiderato. La magnetizzazione ottenuta è orientata in un'unica direzione, provocando delle imperfezioni nella polarizzazione degli estremi dei magneti (Figura 13-1).



Figura 13-1 Dettaglio imperfezione della polarizzazione dei magneti

Si potrebbe risolvere il problema realizzando un supporto con un canalizzatore di flusso ferromagnetico che possa orientare il flusso magnetico nella direzione desiderata.

Infine, può essere sviluppato in un progetto futuro un metodo più semplice per iniettare e magnetizzare i magneti direttamente negli sbarramenti (come nel caso dei magneti CPPA6 e MQIP-M260) oppure trovare soluzione con stampi più semplici per poi lavorare alla fresa la forma finale. Questo tipo di processo potrebbe essere un primo passo per rendere industrializzabile la realizzazione di questi motori rendendoli ancora più competitivi.

## 14. Bibliografia

Giacomo Bacco and Nicola Bianchi “Geometry Analysis and Optimization of PM-Assisted Reluctance Motors” in IEEE v. 53, n. 5, p. 4338-4347, settembre/ottobre 2017

Alfredo Vagati, Michele Pastorelli, Federico Scapino, Giovanni Franceschini “Impact of Cross Saturation in Synchronous Reluctance Motors of the Transverse-Laminated Type” in IEEE v.36, n. 4, p. 1039-1046 luglio/agosto 2000

Giancarlo Franceschetti “Magneti Permanenti.” [Online] [http://web.mclink.it/MC5690/capitolo1\\_3.html](http://web.mclink.it/MC5690/capitolo1_3.html). (Ultima consultazione 31/07/2018)

## 15. Indice Figure

Figura 2-1 Schizzo di base del SynchRel .....	7
Figura 2-2 Schizzo sbarramenti del SynchRel.....	8
Figura 2-3 Disegno completo del SynchRel .....	9
Figura 2-4 Cross-saturation del SynchRel .....	10
Figura 2-5 Prima fase di accelerazione del SynchRel.....	12
Figura 2-6 Deflussaggio a potenza costante del SynchRel .....	12
Figura 2-7 Deflussaggio su MTPV del SynchRel.....	13
Figura 2-8 Zone di funzionamento del SynchRel .....	14
Figura 3-1 Schematizzazione IPM con 2 poli.....	16
Figura 3-2 Orientamento linee di campo magnetico dei PM.....	17
Figura 3-3 Effetto dei magneti sulla traiettoria dell'estremo del vettore flusso nel PMASR .....	18
Figura 3-4 Disegno completo del PMASR .....	18
Figura 3-5 Deflussaggio PMASR .....	19
Figura 3-6 Diagramma per funzionamento a basso carico.....	22
Figura 3-7 Cross-saturation PMASR: $\lambda_{did}, iq$ .....	23
Figura 3-8 Cross-saturation PMASR: $\lambda_{qid}, iq$ .....	23
Figura 3-9 Passaggio del funzionamento del PMASR da motore a freno.....	24
Figura 4-1 Sezione motore a riluttanza assistito da magneti permanenti.....	25
Figura 5-1 Effetto del campo magnetico esterno su un materiale magnetico .....	27
Figura 5-2 Confronto tra ciclo di isteresi B(H) e ciclo di isteresi intrinseco J(H) .....	28
Figura 5-3 Caratteristica di smagnetizzazione .....	29
Figura 5-4 Isteresigrafo .....	30
Figura 5-5 Visualizzazione grafica caratteristica di smagnetizzazione.....	31
Figura 6-1 Procedimento di miscelatura .....	33
Figura 6-2 Procedimento di macinatura.....	34
Figura 6-3 Forno per trattamento termico a vuoto.....	35
Figura 6-4 Sandwich per pressatura nel processo di iniezione .....	35
Figura 6-5 Pressa con piastre riscaldate .....	36
Figura 6-6 Procedura pressatura per processo di iniezione.....	36
Figura 6-7 Miscela di resina fenolica e NdFeB .....	37
Figura 6-8 Turbula.....	38
Figura 6-9 Pezzo in uscita da pressa .....	39
Figura 6-10 Magnetizzatore.....	40
Figura 6-11 Inserimento magneti nella bobina del magnetizzatore.....	40
Figura 7-1 Caratteristiche di smagnetizzazione serie di magneti CPPA6 e CPF .....	41
Figura 7-2 PMAsR con magneti rettangolari.....	42
Figura 7-3 Caratteristiche magnetiche Ferrite Anisotropa.....	43
Figura 7-4 Caratteristica magnetica I-CER 1612.....	44
Figura 7-5 Caratteristica magnetica Plastoren8 .....	44
Figura 7-6 Granuli MQIP-M260.....	45
Figura 7-7 Caratteristica magnetica MQIP-M260 .....	45
Figura 7-8 FB23.....	46
Figura 7-9 Caratteristica magnetica FB23 .....	46
Figura 8-1 Riferimenti assi fisi ed assi rotanti .....	48
Figura 8-2 $T-\alpha i e$ SynchRel.....	50
Figura 8-3 $B-\vartheta m$ SynchRel .....	51
Figura 8-4 $B$ -ordine_ armonico SynchRel.....	51
Figura 8-5 $\psi-\vartheta m$ SynchRel .....	52
Figura 8-6 $\psi$ -ordine_ armonico SynchRel .....	52
Figura 8-7 $T-\vartheta m$ SynchRel.....	52
Figura 8-8 $T$ -ordine_ armonico SynchRel .....	52
Figura 8-9 $T-w$ SynchRel    Figura 8-10 $P-w$ SynchRel.....	54
Figura 8-11 $I-w$ SynchRel    Figura 8-12 $i q - i d$ SynchRel .....	54
Figura 9-1 Esempio per il calcolo PF .....	72
Figura 9-2 Andamento PF al variare della corrente.....	73
Figura 9-3 Andamento MTPA al variare della corrente .....	74

Figura 9-4 Forza coercitiva intrinseca .....	76
Figura 9-5 Campioni Plastoren8 spezzati .....	79
Figura 9-6 dettaglio difetto del campione CPF5.....	80
Figura 9-7 Caratteristica di smagnetizzazione CPF4.....	81
Figura 10-1 Dettagli sbarramenti del motore originale (canali costanti) .....	82
Figura 10-2 Dettagli sbarramenti del motore adattato (sbarramenti costanti).....	83
Figura 10-3 Schema da normativa UNI 6604.....	83
Figura 10-4 Alloggio linguetta su lamierino.....	84
Figura 10-5 Sequenza di skewing delle linguette      Figura 10-6 Alloggi linguetta per skewing .....	85
Figura 10-7 Rotore 3D con Skewing .....	85
Figura 10-8 Lamierino definitivo .....	86
Figura 10-9 confronto MTPA tra SynchRel-1 e SynchRel-2.....	87
Figura 10-10 Saturazione ponticelli SynchRel-1      Figura 10-11 Saturazione ponticelli SynchRel-2.....	87
Figura 10-12 confronto MTPA tra PMAsR-1 e PMAsR-2.....	88
Figura 10-13 Saturazione ponticelli PMAsR1      Figura 10-14 Saturazione ponticelli PMAsR2 .....	88
Figura 10-15 Confronto indice di ripple tra SynchRel e PMAsR con e senza skewing .....	89
Figura 11-1 Modello SolidWorks dei magneti fresati .....	92
Figura 11-2 Campione in morsa .....	93
Figura 11-3 processo di fresatura.....	93
Figura 11-4 magneti con ponticelli meccanici.....	94
Figura 11-5 Campione fresato .....	94
Figura 11-6 Magneti realizzati.....	95
Figura 11-7 Orientamento campo magnetico dei PM.....	95
Figura 11-8 Orientamento PM dello sbarramento maggiore per la magnetizzazione .....	96
Figura 11-9 Orientamento PM dello sbarramento minore per la magnetizzazione.....	96
Figura 11-10 Geometria supporto.....	97
Figura 11-11 Supporto per la magnetizzazione .....	97
Figura 11-12 Inserimento magneti nel supporto .....	98
Figura 11-13 Magnetizzazione magneti.....	98
Figura 11-14 Polarizzazione magnete più grande      Figura 11-15 Polarizzazione magnete più piccolo .....	99
Figura 11-16 Disposizione magneti.....	99
Figura 11-17 Albero motore, linguetta, piastre dado autobloccante, lamierini.....	100
Figura 11-18 Inserimento linguetta nell'alloggio dell'albero motore .....	101
Figura 11-19 Inserimento piastra di testata anteriore.....	101
Figura 11-20 Inserimento lamierini sull'albero motore.....	101
Figura 11-21 Dettaglio skewing motore a riluttanza .....	102
Figura 11-22 Inserimento magneti.....	102
Figura 11-23 Rotore assemblato .....	103
Figura 11-24 Dettaglio skewing motore a riluttanza assistito.....	103
Figura 12-1 Confronto MTPA tra la macchina reale e il modello del SynchRel-2.....	104
Figura 12-2 Confronto MTPA tra la macchina reale e il modello del PMAsR-2 .....	105
Figura 12-3 Confronto MTPA SynchRel-2 e PMAsR-2 Reali .....	106
Figura 12-4 Confronto prestazioni tra SynchRel-2 e PMAsR-2 Reali.....	106
Figura 12-5 Curve di magnetizzazione $i_d - \lambda_d$ e $i_q - \lambda_q$ del SynchRel .....	107
Figura 12-6 Curve di magnetizzazione $i_d - \lambda_d$ e $i_q - \lambda_q$ del PMAsR .....	107
Figura 12-7 Descrizione angoli dei vettori di corrente e flusso .....	108
Figura 12-8 PF delle macchine reali .....	108
Figura 13-1 Dettaglio imperfezione della polarizzazione dei magneti .....	111

## 16. Indice tabelle

Tabella 6-1 Dimensioni geometriche stampo per processo di iniezione.....	34
Tabella 7-1Dati dei magneti .....	42
Tabella 9-1 componenti di flusso magnetico e di $\gamma$ in funzione della corrente.....	71
Tabella 9-2 Coppia e PF in funzione della corrente.....	73
Tabella 9-3 Incremento di coppia del PMAsR rispetto al SynchRel .....	77
Tabella 9-4 Dati salienti in MTPA.....	78
Tabella 10-1Effetto dello skewing sul SynchRel-2 .....	90
Tabella 10-2Effetto dello skewing sul PMAsR-2 .....	90
Tabella 10-3 Coppia e PF di SynchRel e PMAsR-CPF4 adattato per I=10A.....	91