

# **POLITECNICO DI MILANO**

Facoltà di Ingegneria Industriale e dell'informazione

Corso di Laurea in  
Ingegneria elettrica



Esempi di riprogettazione di macchine in cui i magneti permanenti in terre rare sono  
sostituiti da ferriti

Relatore: Prof. Giovanni Maria Foglia

Tesi di Laurea di:

Dario Broggi

Matr. 804526

**Anno Accademico 2013 - 2014**



<b>Introduzione.....</b>	<b>14</b>
• <b>Analisi e comparazione dei magneti permanenti.....</b>	<b>15</b>
• <b>Analisi del mercato.....</b>	<b>17</b>
• <b>Capitolo 0 - introduzione all'uso dei diversi magneti permanenti: rapporto costo-efficienza.....</b>	<b>19</b>
• <b>0.1 – Introduzione.....</b>	<b>19</b>
• <b>0.2 – Configurazione della trasmissione magnetica coassiale.....</b>	<b>19</b>
• <b>0.3 – Performance elettromagnetiche.....</b>	<b>20</b>
• <b>0.4 – Comparazione tra magneti con terre rare e senza.....</b>	<b>24</b>
• <b>0.5 – Confronto basato sul costo e sull'efficienza.....</b>	<b>24</b>
• <b>Capitolo 1 – Confronto tra le performance di una macchina a magneti permanenti con ferrite ed una con NdFeB.....</b>	<b>26</b>
• <b>1.1 – Introduzione al confronto.....</b>	<b>26</b>
• <b>1.2 – Rischio di smagnetizzazione irreversibile nella macchina con magneti permanenti in ferrite.....</b>	<b>27</b>
• <b>1.3 – Caratteristiche delle macchine.....</b>	<b>29</b>
• <b>1.3.1 – Tensione indotta.....</b>	<b>29</b>
• <b>1.3.2 – Correnti di cortocircuito.....</b>	<b>30</b>
• <b>1.3.3 – Coppia in uscita.....</b>	<b>31</b>
• <b>1.3.4 – Mappe di efficienza.....</b>	<b>32</b>
• <b>1.4 – Conclusioni dello studio.....</b>	<b>33</b>
• <b>Capitolo 2 – Applicazioni industriali – Macchina IPM con ferrite per sostituire una SPM con NdFeB</b>	
• <b>2.1 – Introduzione.....</b>	<b>34</b>
• <b>2.2 – Macchina di riferimento per applicazioni industriali.....</b>	<b>35</b>
• <b>2.3 – Struttura alternativa della macchina IPM.....</b>	<b>36</b>
• <b>2.3.1 – Considerazioni generali e diagrammi vettoriali.....</b>	<b>36</b>
• <b>2.3.2 – Geometrie.....</b>	<b>39</b>
• <b>2.3.3 – Simulazione di un motore PM ideale.....</b>	<b>40</b>
• <b>2.3.4 – Comparazioni di coppia.....</b>	<b>42</b>
• <b>2.3.5 – Impatto del flusso dovuto ai magneti permanenti sulla coppia prodotta.....</b>	<b>43</b>
• <b>2.3.6 – Considerazioni di carattere economico.....</b>	<b>45</b>
• <b>2.4 – Conclusioni.....</b>	<b>45</b>

- **Capitolo 3 – Applicazioni veicolari – Confronto tra motori IPM contenenti diversi tipi di PM: REPM Vs. CFPM.....46**
  - 3.1 – Introduzione.....46
  - 3.2 – Modello della macchina IPM.....47
  - 3.3- Considerazioni sul design delle macchine CFPM.....48
  - 3.4 – Parametri delle macchine.....49
  - 3.5 – Analisi delle performance.....51
  - 3.6 – Conclusioni.....58
- **Capitolo 4 – Applicazioni veicolari – Motore PMSynRM per sostituire il motore IPM di una Toyota Prius.....59**
  - 4.1 – Introduzione.....59
  - 4.2 – Macchina IPM utilizzata per il motore Prius II.....60
    - 4.2.1 – Produzione di coppia.....60
    - 4.2.2 – Distribuzione del campo nella macchina B0.....62
  - 4.3 – Ottimizzazione della SynRM.....63
    - 4.3.1 – Effetto delle barriere di flusso sulla produzione di coppia.....63
    - 4.3.2 – Effetto delle costole sulla produzione di coppia.....64
    - 4.3.3 – Effetto della saturazione sulla produzione di coppia.....65
    - 4.3.4 – Minimizzazione delle oscillazioni di coppia.....66
  - 4.4 – Inserzione dei PM in ferrite nella struttura della SynRM.....67
  - 4.5 – Test sperimentali.....70
  - 4.6 – Conclusioni.....73
- **Capitolo 5 – Applicazioni veicolari - Creazione di un prototipo e test su un motore PMSynRM.....75**
  - 5.1 – Caratteristiche della macchina proposta.....75
    - 5.1.1 - Obiettivi dell'analisi.....75
    - 5.1.2 – PMSynRM con magneti in ferrite.....76
    - 5.1.3 – Risultati dell'analisi: smagnetizzazione irreversibile dei PM.....78
    - 5.1.4 – Risultati dell'analisi: sforzo meccanico sul rotore.....79
  - 5.2 – Test sul prototipo.....80
    - 5.2.1 – Presentazione del prototipo e dell'esperimento.....80
    - 5.2.2 – Caratteristiche di coppia e potenza uscente.....81
    - 5.2.3 – Perdite ed efficienza.....83
  - 5.3 – Stima delle performance ad alta potenza di una PMSynRM...84
    - 5.3.1 – Specifiche della macchina.....84
    - 5.3.2 – Stima delle performance ad alta potenza.....85

- **Capitolo 5B – Struttura di rotore per ridurre il rischio di smagnetizzazione irreversibile in una PMSynRM con ferrite.....87**
  - 5B.1 – Struttura della macchina utilizzata.....87
    - 5B.1.1 – Caratteristiche del modello.....87
    - 5B.1.2 - Valutazione del grado di smagnetizzazione.....89
  - 5B.2 – Struttura di rotore adottata per migliorare la situazione.....90
  - 5B.3 – Risultato delle analisi.....92
  
- **Capitolo 6 – Applicazioni nei controllori – Struttura della VPMSynRM con ferrite.....95**
  - 6.1 – Introduzione.....95
  - 6.2 – Design della macchina proposta.....96
  - 6.3 – Volume dei magneti permanenti in ferrite impiegati.....97
  - 6.4 – Analisi 2D del rotore, induttanza sull'asse d, induttanza sull'asse q.....97
  - 6.5 – Modello della macchina con una barriera di flusso (1V).....98
  - 6.6 – Modello della macchina con due barriere di flusso (2V).....101
  
- **Capitolo 7 – Applicazioni per la mobilità cittadina – In-wheel motors.....105**
  - 7.1 – Introduzione.....105
  - 7.2 – Struttura del motore SPM.....106
  - 7.3 – Risultati della simulazione.....108
    - 7.3.1 – Caratteristiche di coppia.....108
    - 7.3.2 – Potenza in uscita costante e mappa di efficienza.....109
    - 7.3.3 – Smagnetizzazione irreversibile nei magneti in ferrite.....109
    - 7.3.4 – Stress causato dalla rotazione.....111
  - 7.4 – Conclusioni.....112
  
- **Capitolo 8 – Applicazioni per la mobilità cittadina – Motore in-wheel di taglia maggiore (10kW).....113**
  - 8.1 – Introduzione.....113
  - 8.2 – Configurazione iniziale della macchina 16p, 18s.....113
    - 8.2.1 – Struttura di base.....113
    - 8.2.2 – Risultati sperimentali della macchina 16p, 18s.....115
  - 8.3 – Perdite dovute alle correnti parassite.....116
  - 8.4 – Configurazione della macchina 16p, 24s.....120
    - 8.4.1 – Skewing del rotore.....120
    - 8.4.2 – Contromisure per le perdite dovute a correnti parassite.....122

- **Capitolo 9 – Applicazioni eoliche – Differenze tra performance e costo dei magneti permanenti utilizzati nei generatori.....125**
  - 9.1 – Introduzione.....125
  - 9.2 – Macchina sperimentale.....125
  - 9.3 – Magneti studiati.....126
  - 9.4 – Risultati dei test.....127
  - 9.5 – Prezzo dei magneti permanenti utilizzati per il generatore considerato.....129
  - 9.6 Conclusioni.....130
  
- **Capitolo 10 – Applicazioni eoliche – Sostituzione dei magneti NdFeB con la ferrite in un piccolo aerogeneratore da 1,5kW.....131**
  - 10.1 – Introduzione.....131
  - 10.2 – Struttura ed analisi del campo magnetico del generatore con PM in ferrite.....131
    - 10.2.1 – Struttura convenzionale con magneti in ferrite.....131
    - 10.2.2 – Nuovo design della macchina con magneti in ferrite.....132
    - 10.2.3 – Modello matematico per magneti permanenti bread-shaped...133
    - 10.2.4 – Ottimizzazione dei PM per la riduzione dell'oscillazione di coppia.....134
  - 10.3 – Esperimento di verifica.....136
  
- **Capitolo 11 – Uso combinato – Introduzione della ferrite per mitigare la quantità di terre rare impiegata.....139**
  - 11.1 – Introduzione.....139
  - 11.2 – Modello base.....139
  - 11.3 – Nuovo modello.....140
    - 11.3.1 – Modello A.....140
    - 11.3.2 – Modello B.....142
  - 11.4 – Coppia media ed oscillazioni di coppia.....143
  - 11.5 – Analisi della struttura.....144
  - 11.6 – Conclusioni.....146
  
- **Conclusioni.....147**

# Indice delle figure

- **Introduzione**
  - figura 1: curve  $B(H)$  di ferrite e NdFeB
  - figura 2: miglioramento delle performance dei materiali magnetici nel corso degli anni
  - figura 3: andamento del prezzo del neodimio
- **Capitolo 0**
  - figura 0.1: configurazione dell'ingranaggio oggetto di studio
  - figura 0.2: performance di coppia della macchina con Alnico
  - figura 0.3: performance di induzione al traferro della macchina con Alnico
  - figura 0.4: performance di coppia della macchina con ferrite
  - figura 0.5: performance di induzione al traferro della macchina con ferrite
  - figura 0.6: performance di coppia della macchina con SmCo
  - figura 0.7: performance di induzione al traferro della macchina con SmCo
  - figura 0.8: performance di coppia della macchina con NdFeB
  - figura 0.9: performance di induzione al traferro della macchina con NdFeB
- **Capitolo 1**
  - figura 1.1: rotori delle macchine prese in considerazione
  - figura 1.2: confronto tra le due geometrie di rotore
  - figura 1.3: diagramma  $B(H)$  per magneti permanenti in ferrite
  - figura 1.4: distribuzione dell'induzione residua in simulazione con massima corrente di statore
  - figura 1.5: confronto della tensione a vuoto effettuato tramite misure e simulazioni numeriche con una velocità di macchina di 995rpm
  - figura 1.6: corrente di cortocircuito (asse diretto e in quadratura) e corrispondente coppia per macchina con rotore in ferrite
  - figura 1.7: corrente di cortocircuito (asse diretto e in quadratura) e corrispondente coppia per macchina con rotore in neodimio
  - figura 1.8: andamento della coppia in uscita in funzione della corrente di statore
  - figura 1.9: mappa di efficienza per macchina con rotore in ferrite
  - figura 1.10: mappa di efficienza per rotore in NdFeB
- **Capitolo 2**
  - figura 2.1: geometria del rotore di una macchina IPM
  - figura 2.3: macchina SPM con 27 cave e 4 poli
  - figura 2.4: diagramma vettoriale di un motore SPM
  - figura 2.5: diagramma vettoriale di un motore a riluttanza
  - figura 2.6: diagramma vettoriale di un motore IPM
  - figura 2.7: flusso dei PM che va a saturare i ponti in ferro del rotore
  - figura 2.8: geometrie di statore e rotore delle macchine studiate
  - figura 2.9: tre tipologie di rotore scelte in base all'eccitazione di statore
  - figura 2.10: mappa dell'induzione della macchina SPM di base e sulle tre alternative IPM prese in considerazione
- **Capitolo 3**
  - figura 3.1: design dei magneti permanenti nelle macchine considerate

- figura 3.2: flussi trasmessi calcolati tramite FEM
- figura 3.3: risultati dei test per una macchina da 8kW
- figura 3.4: risultati dei test per una macchina da 30kW
- figura 3.5: mappe di efficienza per macchine da 8kW
- figura 3.6: mappe di efficienza per macchine da 30 kW
- figura 3.7: temperatura nelle macchine 8kW
- figura 3.8: temperatura nelle macchine 30kW
- **Capitolo 4**
  - figura 4.1: struttura del motore IPM
  - figura 4.2: struttura della macchina SynRM
  - figura 4.3: andamento della coppia in funzione dell'angolo di fase della corrente
  - figura 4.4: andamento delle oscillazioni di coppia in funzione del tempo
  - figura 4.5: distribuzioni e caratteristiche delle macchine B0 e B1
  - figura 4.6: macchina B2 con ponticelli rimossi
  - figura 4.7: struttura della macchina B3
  - figura 4.8: approcci per ridurre le oscillazioni di coppia
  - figura 4.9: confronto delle oscillazioni di coppia
  - figura 4.10: struttura della PMSynRM
  - figura 4.11: coppia prodotta dalla PMSynRM
  - figura 4.12: risultati della FEM per la produzione di coppia
  - figura 4.13: confronto tra i risultati della FEM (a) e dei test (b) – Forza contro elettromotrice
  - figura 4.14: confronto tra risultati dell'analisi FEM e del test - Coppia prodotta
  - figura 4.15: mappa di efficienza
- **Capitolo 5**
  - figura 5.1: struttura della PMASynRM
  - figura 5.2: mappa di smagnetizzazione irreversibile
  - figura 5.3: distribuzione dello stress alla massima velocità
  - figura 5.4: nuclei di statore (a) e rotore (b)
  - figura 5.5: set up sperimentale
  - figura 5.6: caratteristiche di coppia (fig.6) e di potenza in uscita (fig.7)
  - figura 5.7: coppia e potenza in funzione della velocità
  - figura 5.8: perdite
  - figura 5.9: mappa di efficienza
  - figura 5.10: confronto schematico
  - figura 5.11: perdite nel prototipo e nella macchina ad alta potenza
- **Capitolo 5B**
  - figura 5B.1: struttura base
  - figura 5B.2: prima struttura ottimizzata
  - figura 5B.3: seconda struttura ottimizzata
  - figura 5B.4: curva di smagnetizzazione
  - figura 5B.5: mappa dell'induzione nel rotore
  - figura 5B.6: area smagnetizzata
  - figura 5B.7: distribuzione dell'induzione intorno alle barriere di flusso
  - figura 5B.8: risultati della simulazione
  - figura 5B.9: verifiche sperimentali



- **Capitolo 6**
  - figura 6.1: schema degli avvolgimenti di statore
  - figura 6.2: induttanze sull'asse d e sull'asse q
  - figura 6.3: geometria di rotore macchina 1V
  - figura 6.4: induzione sull'asse diretto e in quadratura
  - figura 6.5: andamento di forza contro elettromotrice e di coppia di cogging;
  - figura 6.6: induttanze sui due assi
  - figura 6.7: variazioni di coppia a 5A
  - figura 6.8: due possibili varianti di rotore nella macchina 2V
  - figura 6.9: forza contro elettromotrice 2V e 2VU
  - figura 6.10: coppia di cogging nei modelli 2V e 2VU
  - figura 6.11: induttanze sull'asse diretto e in quadratura
  - figura 6.12: variazioni di coppia per la macchina 2V
- **Capitolo 7**
  - figura 7.1: struttura del motore
  - figura 7.2: variazioni di coppia istantanea e di cogging
  - figura 7.3: mappa di efficienza
  - figura 7.4: smagnetizzazione irreversibile dei magneti in ferrite
  - figura 7.5: percentuale di smagnetizzazione
  - figura 7.6: mappa dello stress causato dalla rotazione
  - figura 7.7: relazione tra stress massimo e velocità di rotazione
- **Capitolo 8**
  - figura 8.1: struttura inizialmente proposta
  - figura 8.2: aspetto del prototipo
  - figura 8.3: mappa di efficienza macchina 16p18s
  - figura 8.4: paragone tra le perdite per correnti parassite nelle varie configurazioni di motore
  - figura 8.5: disposizione degli avvolgimenti
  - figura 8.6: distribuzione dell'induzione sul nucleo di statore
  - figura 8.7: variazioni di flusso nell'area evidenziata
  - figura 8.8: coppia istantanea e di cogging
  - figura 8.9: skewing del rotore – (a)  $0^\circ$  - (b)  $8^\circ$
  - figura 8.10: andamento della coppia di cogging e delle oscillazioni di coppia in funzione dell'angolo di skew
  - figura 8.11: riduzione di coppia dovuta allo skewing
  - figura 8.12: confronto tra coppia istantanea con e senza skewing
  - figura 8.13: riduzione di coppia di cogging
  - figura 8.14: crescita delle perdite al crescere dello skewing
  - figura 8.15: buchi nella struttura di rotore
  - figura 8.16: situazione prima e dopo l'apertura dei buchi nel rotore
- **Capitolo 9**
  - figura 9.1: connessione diretta all'albero della macchina
  - figura 9.2: modello della macchina studiata
  - figura 9.3: array di Halbach
  - figura 9.4: risultati della prova a vuoto coi diversi materiali
  - figura 9.5: risultati della prova a carico coi diversi materiali

- figura 9.6: andamento della potenza in uscita in funzione della corrente di fase
- **Capitolo 10**
  - figura 10.1: configurazione standard del generatore
  - figura 10.2: diminuzione tensione dovuta all'inserimento della ferrite
  - figura 10.3: rappresentazione schematica della nuova struttura
  - figura 10.4: modello matematico per la struttura dei magneti permanenti
  - figura 10.5: ottimizzazione dei magneti permanenti
  - figura 10.6: performance del nuovo modello, predette col metodo ECM
  - figura 10.7: realizzazione dell'esperimento
  - figura 10.8: risultati dei test
  - figura 10.9: confronto finale
- **Capitolo 11**
  - figura 11.1: struttura base della macchina
  - figura 11.2: struttura di rotore per il "Modello A"
  - figura 11.3: Modello A
  - figura 11.4: struttura del rotore per il Modello B
  - figura 11.5: magnetizzazione dei due nuclei
  - figura 11.6: oscillazioni e coppia media per il Modello A
  - figura 11.7: oscillazioni e coppia media per il Modello B
  - figura 11.8: mappa dell'induzione magnetica
  - figura 11.9: nuova struttura di rotore

# Indice delle tabelle

- **Capitolo 0**
  - tabella 0.1: caratteristiche principali
  - tabella 0.3: caratteristiche dei materiali per i magneti permanenti
  - tabella 0.4: prezzo degli elementi principali
  - tabella 0.5: confronto finale tra i materiali
  - tabella 0.6: confronto finale tra i materiali (seconda parte)
- **Capitolo 2**
  - tabella 2.1: dati principali delle macchine SPM per applicazioni industriali
  - tabella 2.2: caratteristiche delle tre macchine studiate
  - tabella 2.3: risultati dell'analisi agli elementi finiti
  - tabella 2.4: confronto di coppia
  - tabella 2.5: confronto di coppia (parte 2)
- **Capitolo 3**
  - tabella 3.1: caratteristiche delle macchine considerate
  - tabella 3.2: caratteristiche dei materiali magnetici considerati
  - tabella 3.3: parametri delle macchine
  - tabella 3.4: analisi dei materiali
  - tabella 3.5: risultati dei test
- **Capitolo 4**
  - tabella 4.1: dimensioni e specifiche della macchina originale
  - tabella 4.2: comparazione delle macchine B0, B1, B2 e B3
  - tabella 4.4: costi
  - tabella 4.5: comparazione delle performance alla velocità nominale
  - tabella 4.6: confronto finale
- **Capitolo 5**
  - tabella 5.1: caratteristiche della macchina base
  - tabella 5.2: caratteristiche della macchina proposta
  - tabella 5.3: confronto
  - tabella 5.4: confronto dei risultati ottenuti tramite analisi e test sul prototipo
  - tabella 5.5: confronto (2)
- **Capitolo 5B**
  - tabella 5B.1: caratteristiche e performance richieste
- **Capitolo 6**
  - tabella 6.1: risultati delle simulazioni
- **Capitolo 7**
  - tabella 7.1: specifiche del motore
  - tabella 7.2: valori posti come obiettivo e risultati dell'analisi
- **Capitolo 8**
  - tabella 8.1: valori posti come obiettivo per la macchina da 10kW
- **Capitolo 9**
  - tabella 9.1: parametri principali del generatore
  - tabella 9.2: caratteristiche principali dei materiali magnetici

- tabella 9.3: previsione della quantità di materiale magnetico da impiegare
- **Capitolo 10**
  - tabella 10.1: caratteristiche del generatore standard
  - tabella 10.2: comparazione tra il volume dei nuclei di statore e rotore
- **Capitolo 11**
  - tabella 11.1: specifiche del modello base
  - tabella 11.2: caratteristiche dei magneti NdFeB
  - tabella 11.3: caratteristiche dei magneti in ferrite
  - tabella 11.4: volume dei magneti NdFeB impiegati
  - tabella 11.5: costanti dei materiali che compongono lamiera, albero e magneti

# Sommario

Le macchine a magneti permanenti rappresentano, al giorno d'oggi, una soluzione imprescindibile per molte applicazioni. Negli anni la ricerca sui materiali magnetici e sulla struttura delle stesse macchine, ha portato grandissimi miglioramenti in rendimento, efficienza ed affidabilità.

Tra i materiali utilizzati per la produzione dei magneti permanenti i più performanti sono sicuramente quelli contenenti terre rare, in particolare il neodimio-ferro-boro. Purtroppo il prezzo del neodimio è stato oggetto di una crescita preoccupante negli ultimi anni. Inoltre, per via dell'aggressiva politica cinese in merito alle esportazioni, esiste il rischio concreto di veder presto esaurita la disponibilità della materia prima.

Per queste e altre considerazioni negli ultimi tempi si è corso ai ripari, studiando soluzioni alternative. Una delle più interessanti è rappresentata dal ritorno all'uso della ferrite, materiale magnetico più facilmente reperibile e decisamente meno costoso. Purtroppo le performance di questo materiale sono decisamente inferiori e per rendere possibile questa sostituzione si rende necessario studiare strutture di macchina innovative, che permettano di sfruttare al meglio le caratteristiche della ferrite.

In questo lavoro verranno presentate diverse soluzioni studiate nel corso degli ultimi anni, abbracciando diverse applicazioni come il settore dei trasporti, quello dell'eolico e le applicazioni industriali.

L'obiettivo è quello di racchiudere questi studi in una singola sede e mostrare come l'utilizzo di queste nuove soluzioni sia assolutamente da non trascurare per il futuro.

## Parole chiave

Ferrite. Magneti permanenti. Sostituzione. Terre Rare. Neodimio.

# Introduzione

Al giorno d'oggi le macchine a magneti permanenti rappresentano una soluzione molto interessante ed hanno rimpiazzato le altre tipologie di macchine elettriche in molte applicazioni. Questo è stato possibile grazie alle loro proprietà, tra le quali è possibile menzionare la maggiore densità di coppia e l'elevata efficienza.

Negli anni queste macchine sono state studiate ed ottimizzate e gli stessi magneti permanenti sono stati oggetto di vasti studi, volti a migliorare sempre di più la loro efficienza e la loro risposta ad una vasta gamma di applicazioni, ognuna delle quali presenta le proprie esigenze ed i propri vincoli.

Un'ulteriore spinta all'utilizzo di questo genere di macchine è stato dato dall'utilizzo, e dalla conseguente ottimizzazione, dei magneti permanenti in neodimio-ferro-boro.

Il neodimio è un materiale estremamente prezioso, in grado di esaltare al meglio le proprietà delle macchine a magneti permanenti. Esso è parte di un gruppo di materiali chiamato *Terre Rare*, tra cui è possibile trovare anche il samario, utilizzato per produrre i magneti permanenti samario-cobalto. Come verrà mostrato in seguito, grazie alle loro proprietà i magneti in NdFeB hanno rapidamente sbaragliato la concorrenza, imponendosi in pochi anni come materiale di riferimento per la produzione di magneti permanenti. L'uso delle terre rare ha permesso di aumentare ulteriormente l'efficienza e la densità di energia delle macchine a magneti permanenti, rendendo al contempo possibile una diminuzione considerevole delle dimensioni, fattore peraltro determinante in molte applicazioni.

Performance sicuramente più elevate e svantaggi trascurabili hanno dunque permesso ai magneti in NdFeB di imporsi a livello mondiale, schiacciando la concorrenza degli altri materiali magnetici: Alnico, SmCo e soprattutto ferriti.

Queste ultime fino a qualche decennio fa rappresentavano la scelta migliore disponibile sul mercato. La ferrite presenta proprietà decisamente inferiori a quelle dei magneti in terre rare, ha però il vantaggio di una migliore stabilità termica, ma soprattutto di una più comoda reperibilità, di facilità di produzione e di un prezzo decisamente più basso.

Queste qualità hanno permesso, nonostante la schiacciante inferiorità in termini di prestazioni, di tenere viva negli anni la diffusione di questo materiale per applicazioni a basso costo e basse esigenze.

Il loro utilizzo in una più vasta gamma di applicazioni è però tornato in voga negli ultimi anni.

Le condizioni che hanno permesso questo cambio di rotta sono da ricercarsi non nella superiorità di questi materiali, ma in questioni puramente politiche e commerciali. Infatti, negli ultimi decenni, la produzione del neodimio è stata monopolizzata dalla Cina, che detiene il 95% della produzione totale a livello mondiale. Negli ultimi anni il gigante asiatico ha però adottato una controversa ed aggressiva politica commerciale, limitando a livelli d'allarme le esportazioni del materiale in tutto il mondo. Questo ha naturalmente provocato un innalzamento drastico dei prezzi e la conseguente chiusura di numerose aziende produttrici di macchine a magneti permanenti, schiacciate dall'insostenibile concorrenza dei produttori presenti sul suolo cinese.

Le incognite, sicuramente presenti nel futuro dell'uso del neodimio, hanno spinto gli altri paesi a prendere provvedimenti. Tra questi vi è anche la ricerca di soluzioni alternative, incentrate sul ritorno all'uso degli altri materiali magnetici più facilmente reperibili.

La via che si è dimostrata, al momento, più interessante da percorrere è quella della sostituzione dei magneti permanenti in NdFeB con i più economici magneti permanenti in ferrite.

Come detto le prestazioni di quest'ultimo materiale sono drasticamente più basse, se paragonate con quelle dei magneti contenenti terre rare. Nei primi capitoli di questo lavoro verranno presentati dei confronti tra le due tipologie di macchine e di magneti, nei quali verrà messo in evidenza proprio questo fatto.

I ricercatori si sono concentrati sulla ricerca di un'ottimizzazione della struttura di macchina, con l'obiettivo di raggiungere prestazioni paragonabili alla soluzione originale con terre rare, pur

impiegando la ferrite. I risultati sono stati il più delle volte sorprendenti e nei capitoli successivi verranno presentati diversi studi volti a rendere possibile questa sostituzione in diverse applicazioni, tenendo ovviamente conto anche delle particolari esigenze di ognuna di queste.

Verranno presentate soluzioni per applicazioni nel campo industriale, dei controllori, in quello automobilistico, della mobilità cittadina e della produzione di energia eolica.

Per tutti questi temi si partirà da un modello base di macchina contenente i magneti permanenti in terre rare ed in seguito verranno presentate le soluzioni di ottimizzazione della struttura adottate per rendere possibile la sostituzione con la ferrite.

Durante la presentazione verranno incontrati diversi tipi di macchina e sorgeranno diversi problemi da risolvere per mezzo dell'ottimizzazione. Verrà affrontato il discorso del rischio di smagnetizzazione irreversibile dei magneti in ferrite e verranno presentate soluzioni per ovviare a questo problema. Verrà affrontato il problema del maggior volume di ferrite necessario e delle conseguenti dimensioni accresciute della macchina risultante. Verrà studiato lo stress che interesserà il rotore in date applicazioni particolarmente esigenti da questo punto di vista, come i motori in ruota. Verrà affrontato il discorso su motori di diverse taglie e ciò comporterà ulteriori accorgimenti. Verrà inoltre presentato l'utilizzo di una soluzione ibrida come quella della macchina a riluttanza assistita, che si dimostrerà particolarmente interessante per le applicazioni veicolari.

Tutto questo non si limiterà ad un campo puramente teorico, ma i risultati delle analisi in molti casi verranno avvalorati da test ed esempi concreti. Tra questi ultimi potranno essere di particolare interesse i capitoli riguardanti l'ottimizzazione del motore usato per la Toyota Prius e la progettazione di un piccolo aerogeneratore contenente ferrite.

Infine verrà presentata una situazione abbastanza differente, ma sicuramente molto interessante, nella quale la ferrite non verrà usata come semplice materiale sostitutivo, ma sarà utilizzata per mitigare la quantità di terre rare impiegata nella costruzione della macchina presentata. Il risultato sarà quello di avere una macchina ibrida con prestazioni comparabili a quella originale ed un prezzo estremamente ridotto.

Il denominatore comune di questi studi sta proprio in questa ultima considerazione: riuscire a creare soluzioni con prestazioni comparabili a quelle originali, abbattendo il prezzo dei materiali ed il problema dell'approvvigionamento delle terre rare.

Per avvalorare i risultati ottenuti e permettere di seguire in maniera lineare il percorso presentato, verranno aggiunti numerosi grafici, tabelle e mappe di efficienza.

I risultati si dimostreranno soddisfacenti e verrà confermato su ogni campo come l'adozione di magneti permanenti in ferrite in sostituzione al NdFeB possa rappresentare una soluzione efficace e da non trascurare in un futuro anche immediato.

## **Analisi e comparazione dei magneti permanenti**

I materiali usati per la produzione di magneti permanenti sono sostanzialmente i seguenti:

- **AlNiCo** – Trattasi di leghe composte da alluminio (Al), nichel (Ni) e cobalto (Co). Questi materiali sono stati sviluppati negli anni '40 ed hanno rappresentato un grande passo avanti nello sviluppo del settore e nell'impiego delle macchine a magneti permanenti. Attualmente vengono ancora usati in certe applicazioni, soprattutto per la loro discreta stabilità termica alle alte temperature, per gli elevati valori di induzione e per la buona resistenza alla corrosione. In più i materiali di questo tipo rendono disponibile una elevata densità di flusso e presentano costi di fabbricazione ridotti. Tuttavia l'estrema durezza, la fragilità e la bassa forza coercitiva ne stanno sempre più limitando l'utilizzo in applicazioni dove sono richieste alte induzioni residue e costi molto contenuti, mentre per altri scopi si preferisce ripiegare su materiali di maggiore qualità.

- **Ferriti** – Sono dei materiali particolari, soprattutto perchè ceramici e non metalli. Presentano una bassa energia magnetica ed induzioni residue contenute. Inoltre sono fragili e difficili da lavorare. Nonostante questi svantaggi la loro diffusione è stata esponenziale ed attualmente rimangono tra i materiali magnetici più usati, grazie all'alta coercitività, alla grande disponibilità di materia prima e soprattutto ai costi minimi. Inoltre la caratteristica di smagnetizzazione lineare ne agevola l'impiego nelle macchine elettriche ed in molte altre applicazioni.
- **Magneti in terre rare**
  - **SmCo** – Sono ottenuti dalla combinazione di samario e cobalto e la loro scoperta negli anni '60 del secolo scorso permise di combinare i vantaggi dei magneti in AlNiCo e in ferrite, presentando nel contempo un'alta induzione residua ed una forte coercitività. Inoltre hanno una notevole stabilità termica. Lo svantaggio principale sta nel prezzo dei due materiali, che negli anni è cresciuto sempre di più. Lo sviluppo di questi materiali è tutt'oggi ridotto e il loro impiego è limitato a quelle applicazioni dove sia richiesto un certo livello di miniaturizzazione dei componenti.
  - **NdFeB** - i magneti in neodimio, ferro e boro, sono attualmente i più performanti. Le leghe NdFeB sono meccanicamente più resistenti e meno fragili rispetto agli altri magneti. Le materie grezze Nd e Fe sono molto abbondanti in natura e quindi il costo è nettamente inferiore rispetto al SmCo, ma comunque superiore a quello della ferrite. Le elevate prestazioni di queste leghe, unite alla crescente domanda di magneti permanenti, hanno portato ad una diffusione sempre maggiore di magneti NdFeB, soprattutto a discapito della fetta di mercato occupata dalle ferriti. I magneti permanenti in NdFeB tendono perciò a sostituirsi ai tradizionali magneti in ferrite, AlNiCo e SmCo in molti campi di applicazione: motori elettrici, dispositivi elettroacustici, strumenti di misura, equipaggiamenti dell'industria automobilistica e petrolchimica, apparecchiature elettromedicali. Una grossa spinta alla diffusione di questo materiale è stata poi data dal larghissimo uso di apparecchiature elettroniche come computer e telefoni cellulari.

I magneti in NdFeB sono usati in molte applicazioni. Fin dal 1980 essi hanno rappresentato un candidato d'eccezione per rimpiazzare i magneti SmCo, per via soprattutto della maggior disponibilità di materie prime. D'altra parte i magneti più economici, come quelli in ferrite, sono rimasti in uso, nonostante la schiacciante inferiorità di prestazioni rispetto a quelli in terre rare. La figura 1 mostra la curva  $B(H)$  dei magneti permanenti in ferrite e di quelli in NdFeB. Come può essere facilmente notato la curva è assai dipendente dalla temperatura per entrambi i materiali.

I maggiori valori di induzione residua e di campo coercitivo rendono possibile ai magneti NdFeB la produzione di molta più energia, pari ad almeno 10 volte quella resa disponibile dai corrispettivi in ferrite ( $300\text{kJ/m}^3$  contro  $30\text{kJ/m}^3$ ). Il vantaggio dei magneti in ferrite sta, dunque, quasi tutto in una differenza di costo non trascurabile.



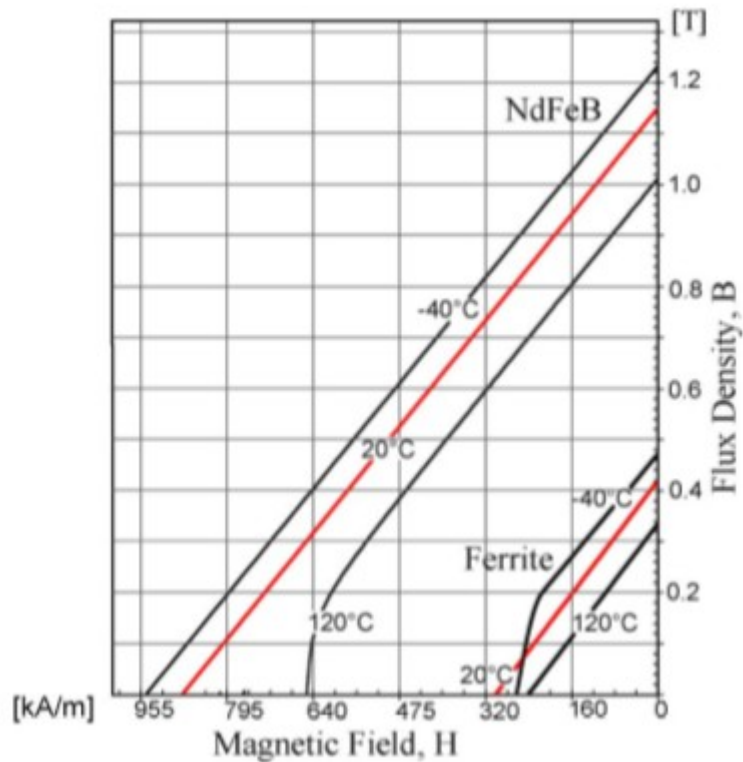


Figura 1: curve  $B(H)$  di ferrite e NdFeB

## Analisi del mercato

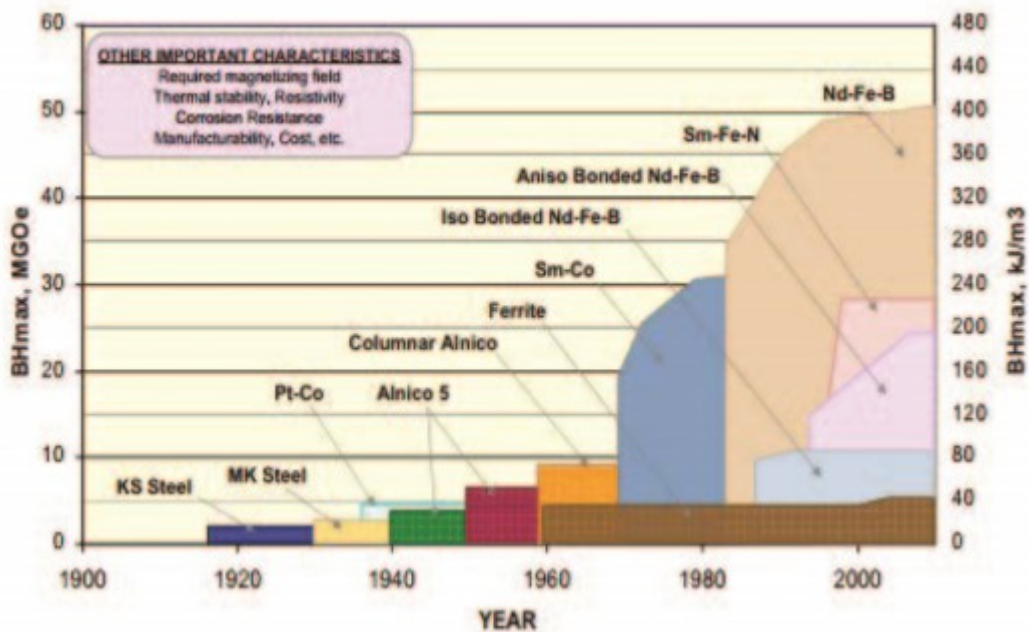


Figura 2: miglioramento delle performance dei materiali magnetici nel corso degli anni

La crescita nell'uso dei materiali magnetici è stata considerevole nell'ultimo decennio. In figura 2 è riportato un riassunto riguardante i miglioramenti di cui sono stati oggetto materiali magnetici più utilizzati negli ultimi decenni.

Nonostante i magneti in ferrite vengano considerati più deboli degli altri materiali disponibili, essi continuano ad essere largamente usati, rappresentando l'80% dei magneti permanenti acquistati nel mondo. Tuttavia, parlando di prestazioni, la ferrite diventa competitiva solamente quando vengono impiegate delle configurazioni particolari e quando le applicazioni non richiedono particolari esigenze di limitazione di peso e di dimensioni.

Negli ultimi anni il mercato delle terre rare non è stato per niente stabile. Per esempio, il prezzo del neodimio è incredibilmente aumentato nel 2011. Questo aumento è stato causato dalle decisioni politiche della Cina, che ha ridotto le esportazioni delle terre rare, delle quali ha praticamente il monopolio. Molte miniere sono state chiuse ed altrettante sono state poste sotto il controllo diretto dello stato, il quale ora può intervenire direttamente sul prezzo e sulle quantità delle esportazioni.

Le variazioni nel prezzo del neodimio sono riportate in figura 3.

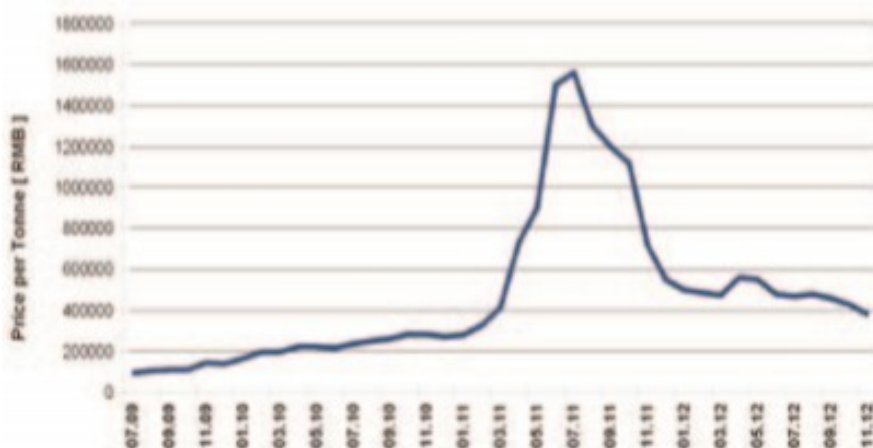


Figura 3: andamento del prezzo del neodimio

La richiesta di neodimio tuttavia continua ad aumentare in tutto il mondo. Questa situazione di incertezza ha permesso la crescita della ricerca legata a soluzioni alternative.

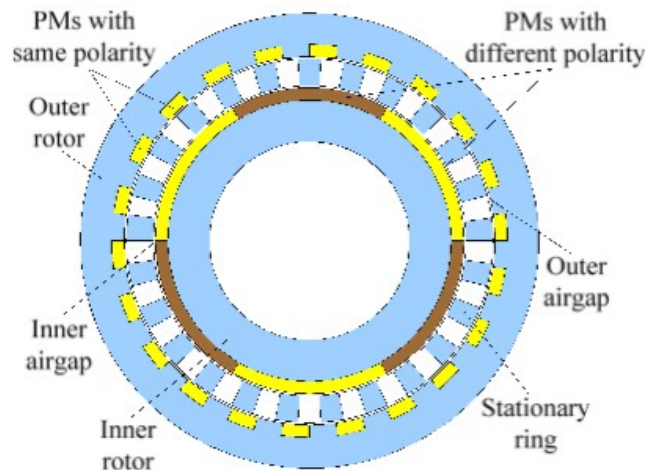
# Capitolo 0 – Introduzione all'uso dei diversi magneti permanenti: rapporto costo-efficienza

## 0.1 - introduzione

Le trasmissioni magnetiche offrono vantaggi come l'assenza di contatto fisico, una grande capacità di sovraccarico, silenziosità ed elevata affidabilità rispetto agli ingranaggi meccanici tradizionali. Essi sono diventati di grande attrattiva per molte applicazioni, come la generazione tramite fonti rinnovabili e la propulsione dei veicoli elettrici. Inoltre possono essere inserite all'interno di una macchina elettrica per aumentare la densità di coppia. I vantaggi sopra esposti sono da attribuire principalmente ai magneti permanenti (in terre rare e “tradizionali”). L'aumento di prezzo e la volubilità del mercato legato alle terre rare negli ultimi anni hanno provocato il crescente interesse verso i materiali magnetici non contenenti terre rare, come l'Alnico e soprattutto la ferrite. Questi materiali presentano infatti basso costo e sono facilmente reperibili. In questo capitolo verrà proposta una comparazione tra un ingranaggio magnetico coassiale contenente terre rare ed uno che invece non le contiene. Naturalmente la comparazione sarà effettuata in termini di prestazioni, ma anche di costo.

## 0.2 - Configurazione della trasmissione magnetica coassiale

In figura 0.1 viene mostrata la configurazione di un ingranaggio magnetico coassiale, il quale consiste in un rotore interno sulla cui superficie sono montati magneti permanenti, in un anello stazionario ed in un rotore esterno in cui sono incorporati i magneti permanenti. L'anello stazionario posto fra i due rotori serve per modulare il flusso dei magneti permanenti tra un rotore e l'altro.



*Figura 0.1 Configurazione dell'ingranaggio oggetto di studio*

I parametri della macchina sono riportati in tabella 0.1.

**TABLE I**  
**KEY DATA OF COAXIAL MAGNETIC GEAR**

No. of pole-pairs in outer rotor	22
No. of pole-pairs in inner rotor	3
No. of iron segments in stationary ring	25
Thickness of PMs in both rotors [mm]	6
Length of outer airgap [mm]	1.0
Length of inner airgap [mm]	1.0
Outside radius of outer rotor [mm]	110
Inside radius of outer rotor [mm]	89
Outside radius of inner rotor [mm]	74
Inside radius of inner rotor [mm]	48
Thickness of stationary ring [mm]	13

*Tabella 0.1: caratteristiche principali*

Per via dell'effetto di amplificazione di coppia, il rotore esterno deve resistere ad una quantità di coppia maggiore. Seppellendo i magneti permanenti all'interno del nucleo di rotore esterno è possibile migliorare l'integrità meccanica. In più con questa struttura il volume di materiale utilizzato per i magneti permanenti può essere diminuito rispetto alla configurazione convenzionale della macchina. In questo capitolo verranno confrontate tipologie di macchina contenenti PM in Alnico, ferrite, NdFeB e SmCo. Per rendere veritiero questo confronto le macchine dovranno adottare gli stessi criteri di progettazione e di struttura (stessa velocità di rotazione, stesse dimensioni, stesso anello centrale, stesso rapporto di trasmissione, stesso materiale ferromagnetico usato e stesso volume dei PM).

### **0.3 - Performance elettromagnetiche**

Le performance elettromagnetiche delle macchine con i quattro diversi materiali sono state valutate tramite FEM ed in seguito messe in comparazione.

Nelle figure seguenti sono mostrate le performance di coppia e di induzione nel caso di differenti magneti:

In figura 0.3 e 0.4 le performance dell'Alnico.

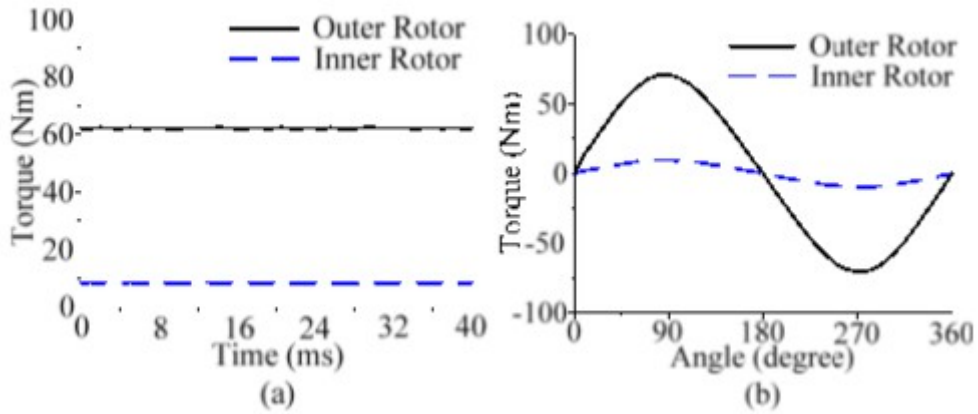


Figura 0.2: Performance di coppia della macchina con Alnico

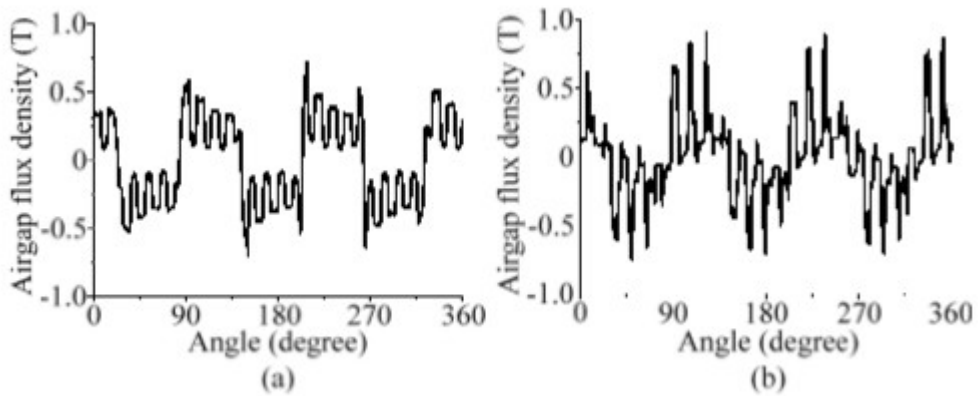


Figura 0.3: Performance di induzione al traferro della macchina con Alnico

In figura 0.4 e figura 0.5 le performance per la macchina contenente ferrite.

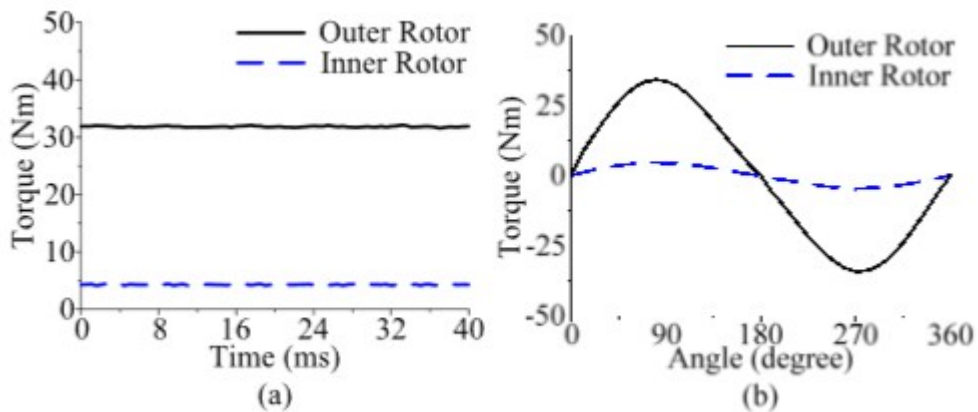


Figura 0.4: Performance di coppia della macchina con ferrite

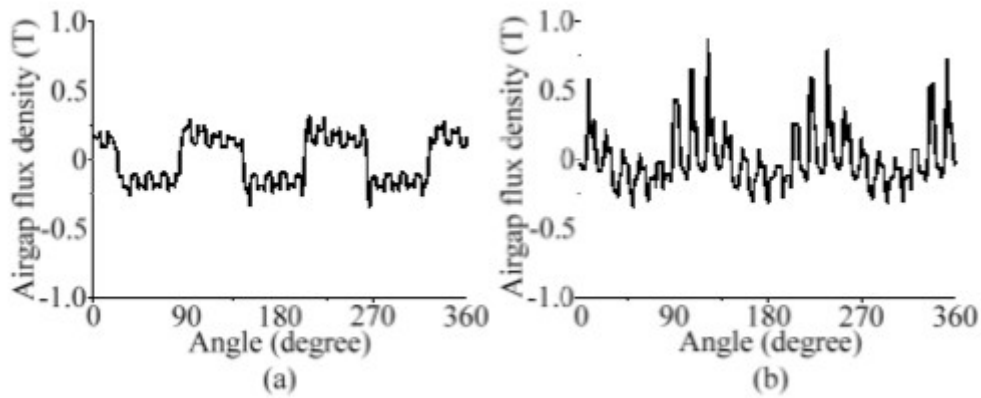


Figura 0.5: Performance di induzione al traferro della macchina con ferrite

In figura 0.6 e figura 0.7 si hanno quelle del NdFeB.

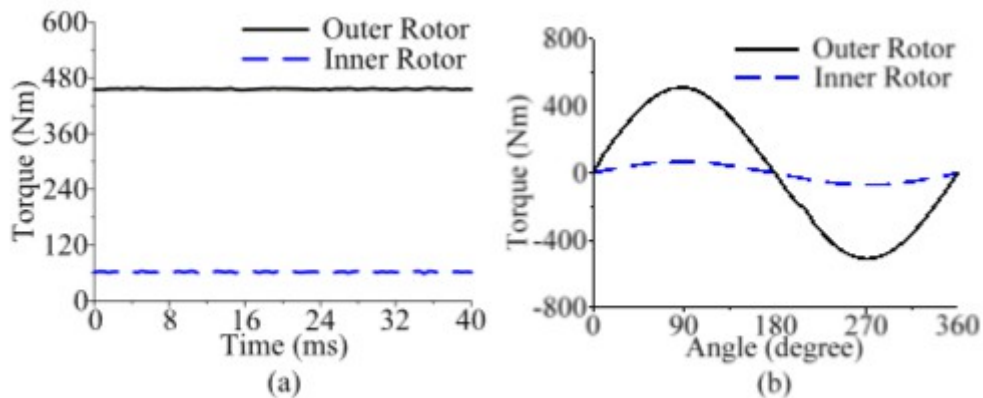


Figura 0.6: Performance di coppia della macchina con NdFeB

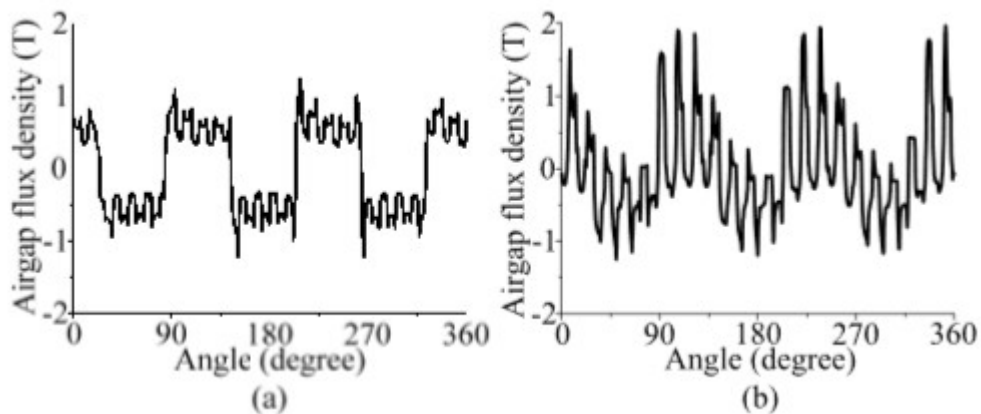


Figura 0.7: Performance di induzione al traferro della macchina con NdFeB

In figura 0.8 e 0.9 si hanno infine quelle del SmCo.

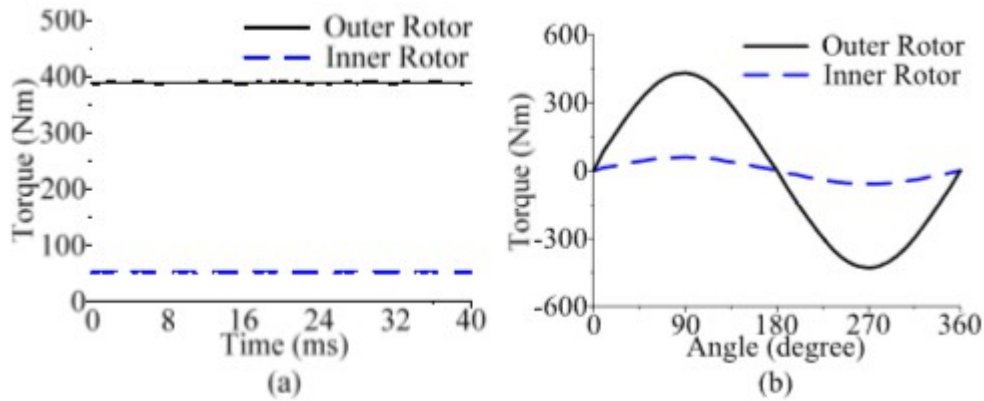


Figura 0.8: Performance di coppia della macchina con SmCo

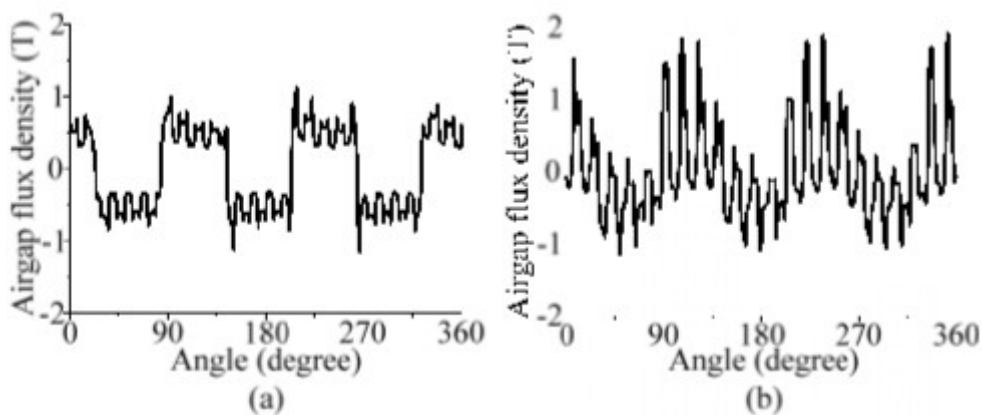


Figura 0.9: Performance di induzione al traferro della macchina con SmCo

Può essere osservato che la trasmissione con magneti permanenti in terre rare presenta migliori performance. L'induzione al traferro è sicuramente più elevata. La coppia prodotta nella configurazione con Alnico è sette volte minore di quella espressa nella configurazione con NdFeB (sia per il rotore esterno che per quello interno). La ferrite presenta performance addirittura peggiori:

Coppia prodotta [Nm]	Alnico	Ferrite	NdFeB	SmCo
Rotore interno	62,15	31,85	456	389
Rotore esterno	8,45	4,35	62	53

La densità di coppia raggiunge questi valori:

- Alnico: 9,23kN/m<sup>3</sup>
- NdFeB: 67kN/m<sup>3</sup>
- SmCo: 56kN/m<sup>3</sup>
- Ferrite: 4,49kn/m<sup>3</sup>

## 0.4 - Comparazione tra materiali con terre rare e senza

I magneti permanenti in terre rare, sviluppati tra il 1970 ed il 1980, possono produrre un campo magnetico significativamente più grande dei corrispettivi in Alnico e ferrite. In particolare il NdFeB offre la maggiore induzione residua, la massima energia resa disponibile, nonostante la loro bassa temperatura di Curie li renda più facili da smagnetizzare durante il funzionamento ad alte temperature. Il SmCo presenta meno attrattiva rispetto al NdFeB a causa di performance leggermente inferiori e di un costo più elevato.

TABLE III  
COMPARISON OF PM MATERIALS

	$H_c$ (kA/m)	$B_r$ (T)	$BH_{max}$ (kJ/m <sup>3</sup> )	$T_c$ (°C)
Alnico	40-140	0.6-1.4	10-88	700-860
Ferrite	120-300	0.2-0.4	10-40	450
NdFeB	750-2000	1.0-1.4	200-400	310-400
SmCo	600-2000	0.8-1.1	150-240	720

Tabella 0.3: caratteristiche dei materiali per i magneti permanenti

I vantaggi derivati dall'uso di Alnico e della ferrite sono soprattutto l'economicità e la loro elevata disponibilità. La ferrite (Ferrite-Bario o Ferrite-Stronzio) in particolare è stata largamente usata per le applicazioni industriali. Le performance dell'Alnico sarebbero paragonabili con quelle delle terre rare, ma la sua debole resistenza alla smagnetizzazione, dovuta alla bassa coercitività, lo rende impossibile da usare per queste applicazioni. In tabella 0.3 sono riportate le principali caratteristiche dei quattro materiali.

## 0.5 - Confronto basato sul costo e sull'efficienza

Per svolgere questo confronto sono stati presi in considerazione i prezzi del materiale sul mercato ad aprile 2013. Questi sono mostrati in tabella 0.4.

TABLE IV  
PRICE OF MAIN ELEMENT

Element	Price (USD/kg)	Element	Price (USD/kg)
Ba	138.6	Sr	7.9
Al	3.26	Ni	22.01
Co	40.76	Sm	211.97
Nd	228.28	B	4.08
Cu	8.64	Fe	0.49
Re	2282.77		

Tabella 0.4: prezzo degli elementi principali

In tabella 0.5 e tabella 0.6 sono riportate le caratteristiche di costo ed efficienza per le quattro macchine considerate.



Tutte le macchine adottano lo stesso volume di magneti permanenti (978cm<sup>3</sup>). Può essere notato come il rapporto costo-efficienza delle macchine contenenti terre rare sia superiore a quello delle macchine che utilizzano materiali magnetici semplici.

Da questi risultati è lampante come la soluzione con Alnico sia quella con il rapporto più basso, ma come già detto questo materiale non si adatta alle applicazioni prese in considerazione. La ferrite presenta rapporto leggermente inferiore a quello del NdFeB e rappresenterà nel seguito l'alternativa da prendere in considerazione. Il SmCo, come già detto, può essere accantonato per prestazioni non così elevate a fronte di un prezzo alto.

TABLE V  
COST-EFFECTIVENESS COMPARISON (NONRARE-EARTH PMs)

Non-rare-earth PMs	Alnico	Ferrite
Volume [cm <sup>3</sup> ]	978	978
Density [g/cm <sup>3</sup> ]	6.7	5
Composition	8%-12% Al; 15%-26% Ni; 5%-24% Co; Up to 6% Cu Fe (balance)	BaO·6Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> or SrO·6Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Remnant flux density [T]	1.05	0.3
Outer-rotor steady torque [Nm]	62.15	31.85
Torque density [kN/m <sup>3</sup> ]	9.29	4.49
Cost-effectiveness [USD/Nm]	1.197	1.415

TABLE VI  
COST-EFFECTIVENESS COMPARISON (RARE-EARTH PMs)

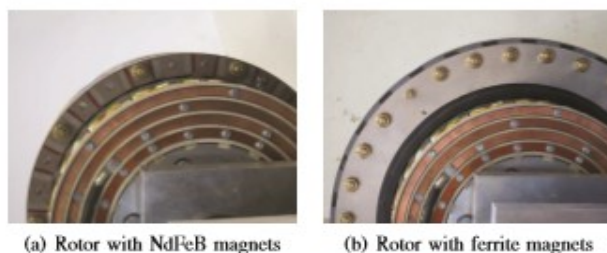
Non-rare-earth PMs	SmCo	NdFeB
Volume [cm <sup>3</sup> ]	978	978
Density [g/cm <sup>3</sup> ]	8.4	7.5
Composition	35% Sm; 60% Co; 2.5% Fe; 2.5% Cu	29%-32.5% Nd 63.9%-68.6% Fe 1.1%-1.2% B 0.6%-1.2% Re
Remnant flux density [T]	1.0	1.1
Outer-rotor steady torque [Nm]	389	456
Torque density [kN/m <sup>3</sup> ]	56	67
Cost-effectiveness [USD/Nm]	2.09	1.5

Table 0.5 e 0.6: confronto finale tra i materiali

# Capitolo 1 – Confronto tra le performance di una macchina a magneti permanenti con ferrite ed una con neodimio-ferro-boro

## 1.1 – Introduzione al confronto

Le macchine sincrone a magneti permanenti possono essere realizzate utilizzando diverse tipologie di materiali magnetici. In questo studio viene proposto un confronto tra due macchine con lo stesso statore, ma diverso rotore: uno con magneti al neodimio e l'altro con magneti in ferrite.



*Figura 1.1: rotori delle macchine prese in considerazione*

L'uso del neodimio-ferro-boro (NdFeB) offre una densità di energia molto elevata, tuttavia i costi risultano essere sempre più insostenibili per via dell'aumento del prezzo delle terre rare degli ultimi anni. I magneti in ferrite possono perciò rappresentare un'alternativa a basso costo per applicazioni che non richiedano performance troppo elevate. Il loro uso, a causa della minore energia magnetica a disposizione, mette di fronte a problemi quali flusso magnetico inferiore e maggior volume necessario. Inoltre i magneti in ferrite presentano, in determinati punti di lavoro, il rischio di una smagnetizzazione irreversibile. Questo studio si pone l'obiettivo di valutare la possibilità di sostituire i costosi magneti NdFeB con dei più economici magneti in ferrite, analizzando e confrontando le performance delle due diverse tipologie di macchina. Il progetto della macchina con magneti al neodimio si basa su una già esistente configurazione utilizzata per la trazione. Entrambe le macchine hanno lo stesso fattore di passo ed usano magneti interni, ovvero magneti posti all'interno del rotore che provocano anisotropia.

Calcoli analitici hanno determinato le dimensioni dei rotori in figura 1.1. Il rotore con ferrite risulta avere diametro esterno aumentato del 26% ed un volume di materiale magnetico circa 5/7 volte più grande di quello che si ha nella soluzione NdFeB, che si presenta quindi molto più compatta.

La figura 1.2 mette a confronto una sezione di rotore e permette di notare le differenze tra una e l'altra tipologia.

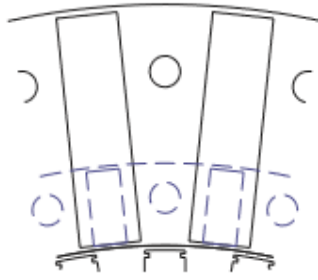


Figura 1.2: confronto tra le due geometrie di rotore

Le linee tratteggiate in figura 1.2 sono riferite al rotore con NdFeB, mentre quelle continue si riferiscono alla configurazione con ferrite.

## 1.2 – Rischio di smagnetizzazione irreversibile nella macchina con magneti permanenti in ferrite

Quando la macchina si trova a lavorare in zone basse della curva  $B(H)$  il risultato può essere quello della smagnetizzazione irreversibile. In figura 1.3 è riportato il diagramma  $B(H)$  per quanto riguarda i magneti permanenti in ferrite e sono evidenziate le zone di rischio inesistente, esistente e critico.

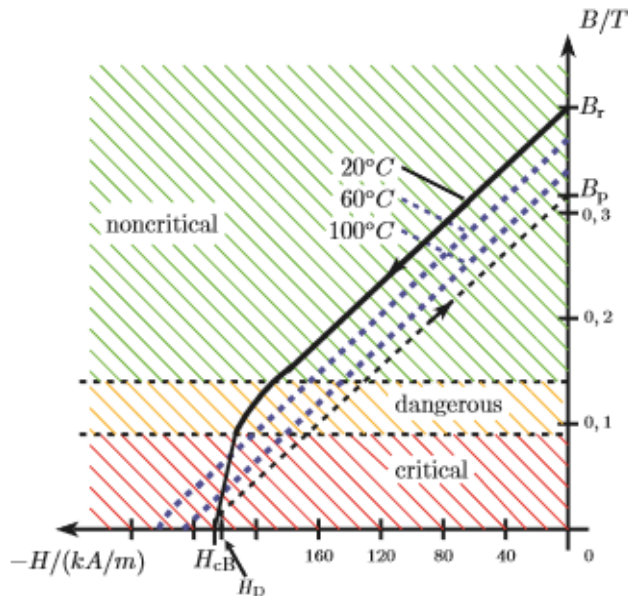


Figura 1.3 - diagramma  $B(H)$  per magneti permanenti in ferrite

La figura riporta la riduzione dell'induzione residua  $B_r$  dovuta ad un campo di grandezza  $H_D$ . Il funzionamento con campo  $H_D$  fa calare irreversibilmente l'induzione residua da  $B_r$  a  $B_p$  e ciò si traduce in una riduzione del flusso magnetico.

La quantità di questa riduzione dipende dalla curva  $B(H)$  (che è caratteristica del materiale usato per i magneti permanenti), dalla temperatura e dal punto di funzionamento della macchina.

In figura sono evidenziate tre sezioni ottenute da un funzionamento a  $20^\circ\text{C}$ :

- Al di sopra del punto ( $H=-180\text{kA/m}$ ;  $B=0,13\text{T}$ ) non c'è il rischio di smagnetizzazione irreversibile.
- La seconda zona presenta invece un'alta probabilità di una piccola smagnetizzazione irreversibile.
- La terza zona infine, che si pone al di sotto di  $0,09\text{T}$ , è marcata come “critica” poiché punti di lavoro posti al di sotto di questa soglia provocano una smagnetizzazione irreversibile considerevole dei magneti in ferrite.

Con delle simulazioni numeriche son stati calcolati i valori dell'induzione residua nei vari punti di lavoro dei magneti in ferrite. La direzione negativa della corrente (e quindi l'effetto deflussante) inducono le situazioni più critiche.



*Figura 1.4: distribuzione dell'induzione residua in simulazione con massima corrente di statore*

In figura 1.4 sono riportati i risultati della simulazione con massima corrente di statore ( $-280\text{A}$ , limitata dalla classe termica), evidenziando la distribuzione dell'induzione residua. L'etichettatura delle diverse aree in figura 1.3 corrisponde alle zone evidenziate in figura 1.4.

L'alta corrente negativa provoca una elevata smagnetizzazione irreversibile, visibile soprattutto nel secondo magnete da sinistra. Ne consegue che il funzionamento ad alta corrente negativa dovrà essere vietato per le macchine che utilizzano magneti in ferrite, onde evitare perdite in termini di prestazioni della macchina stessa.

La curva  $B(H)$  inoltre, come detto, è fortemente dipendente dalla temperatura ed il ginocchio della stessa si sposta verso sinistra all'aumentare dei  $^{\circ}\text{C}$ . Questo significa che una temperatura più elevata riduce il rischio di smagnetizzazione irreversibile. D'altra parte il problema peggiora con temperature decrescenti.

Questo inconveniente non si ha con le macchine che usano magneti al neodimio, dato che il ginocchio della curva si va a situare nel terzo quadrante, impedendo di fatto la smagnetizzazione irreversibile.

## 1.3 – Caratteristiche delle macchine

### 1.3.1 – Tensione indotta

La tensione indotta a vuoto dipende fortemente dall'induzione al traferro.

In figura 1.5 è riportato un confronto della tensione a vuoto effettuato tramite misure e simulazioni numeriche con una velocità di macchina di 995rpm.

Il valore più alto ottenuto tramite le simulazioni effettuate sulla macchina con ferrite corrisponde ad un valore di flusso residuo pari a 0,4T, corrispondente ai dati del materiale utilizzato (ferrite F30). Il valore ottenuto tramite misure sullo stesso materiale è del 61% più basso. Essendo questi valori registrati prima della messa in moto se ne deduce che i magneti sono irreversibilmente smagnetizzati fin dall'inizio.

Una seconda simulazione è stata effettuata con induzione residua pari a 0,3 T.

Diversamente dai magneti in ferrite, i magneti in NdFeB non mostrano smagnetizzazione irreversibile in condizioni di funzionamento normali. I due grafici riferiti alla misura ed alla simulazione effettuate sulla macchina con NdFeB differenziano del 22% a causa della mancata considerazione della dispersione magnetica.

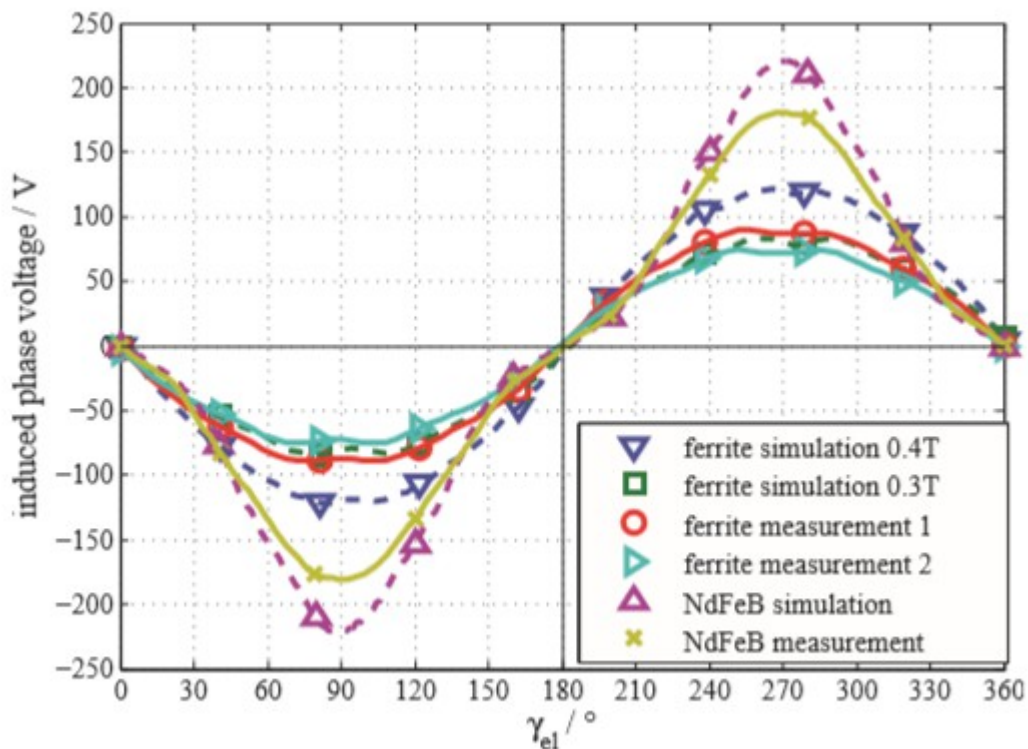


Figura 1.5: confronto della tensione a vuoto effettuato tramite misure e simulazioni numeriche con una velocità di macchina di 995rpm

Inoltre l'ampiezza della tensione a vuoto del rotore con magneti NdFeB è 2,35 volte maggiore di quella del rotore con magneti in ferrite, nonostante il volume 5-7 volte minore di materiale magnetico utilizzato.

### 1.3.2 – Correnti di cortocircuito

La macchina in ferrite produce, in presenza di cortocircuito, una coppia massima di 28,6Nm e la sua massima corrente di cortocircuito è 46A

La coppia massima per una macchina con NdFeB è di 105Nm, con un aumento di 3,67 volte rispetto al corrispettivo in ferrite. La corrente massima di cortocircuito è pari a 95 A e cioè il 111% in più rispetto all'altro caso.

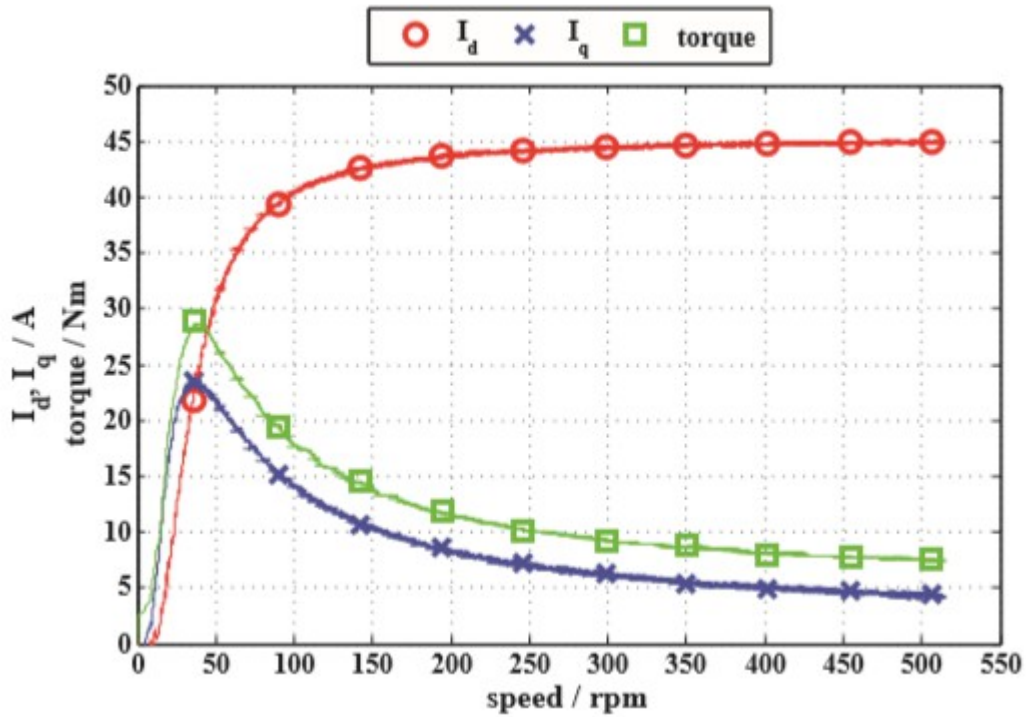


Figura 1.6: corrente di cortocircuito (asse diretto e in quadratura) e corrispondente coppia per macchina con rotore in ferrite

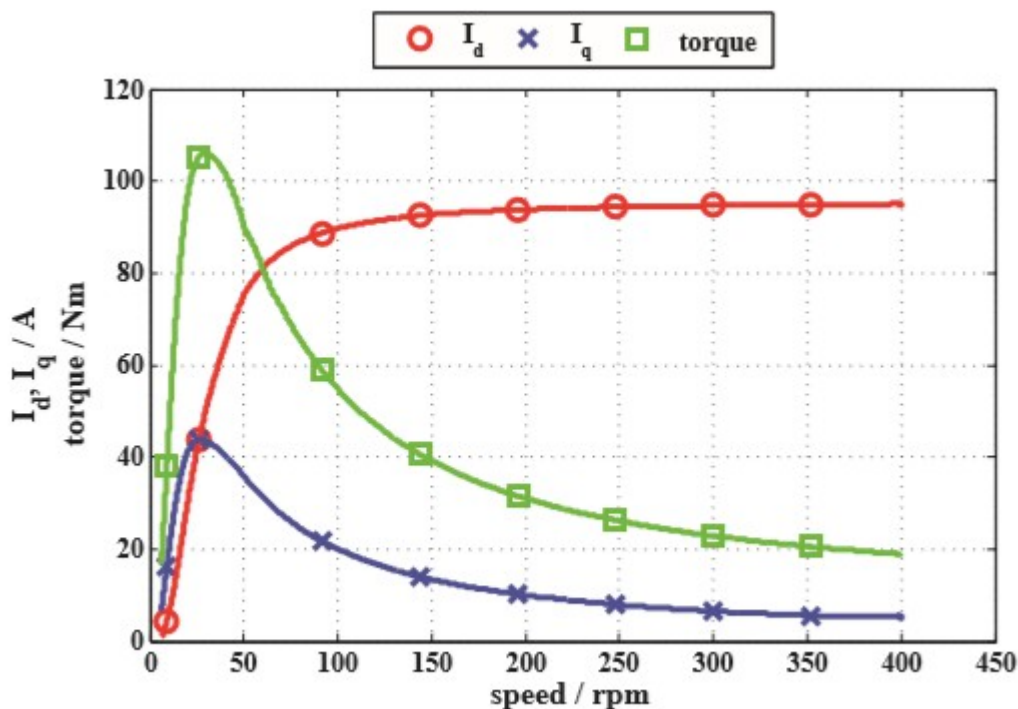


Figura 1.7: corrente di cortocircuito (asse diretto e in quadratura) e corrispondente coppia per macchina con rotore in neodimio

### 1.3.3 – Coppia in uscita

In figura 1.8 viene riportato il confronto dell'andamento della coppia uscente in funzione della corrente di statore misurata nelle due tipologie di macchina.

La macchina NdFeB produce una coppia 1,55-2 volte superiore rispetto alla sua omologa in ferrite, a parità di corrente di statore.

Considerando quindi il diverso volume di materiale magnetico nei due rotori, la macchina in ferrite necessiterebbe del doppio della lunghezza di pacco lamiera della macchina NdFeB per raggiungere una coppia di uscita uguale.

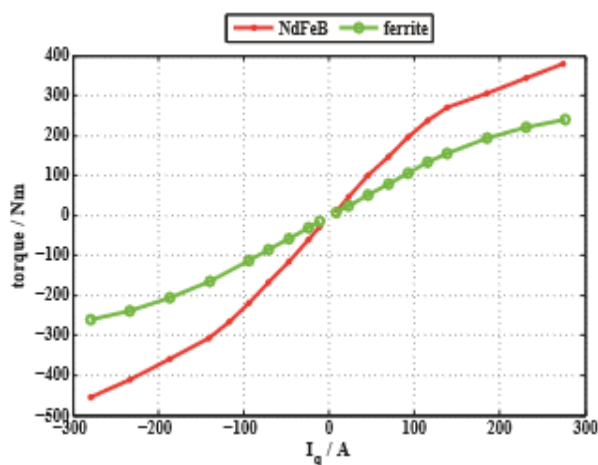


Figura 1.8: Andamento della coppia in uscita in funzione della corrente di statore

### 1.3.4 – Mappe di efficienza

Le mappe in figura 1.9 e 1.10 mostrano l'efficienza nel piano coppia/velocità della macchina. Le linee di potenza meccanica costante sono tracciate in un intervallo tra  $\pm 1\text{kW}$  e  $\pm 35\text{kW}$ . Ogni misura viene effettuata in condizioni di regime.

L'efficienza massima misurata raggiunge il 94% per la macchina NdFeB e un valore leggermente inferiore (92%) per la macchina in ferrite.

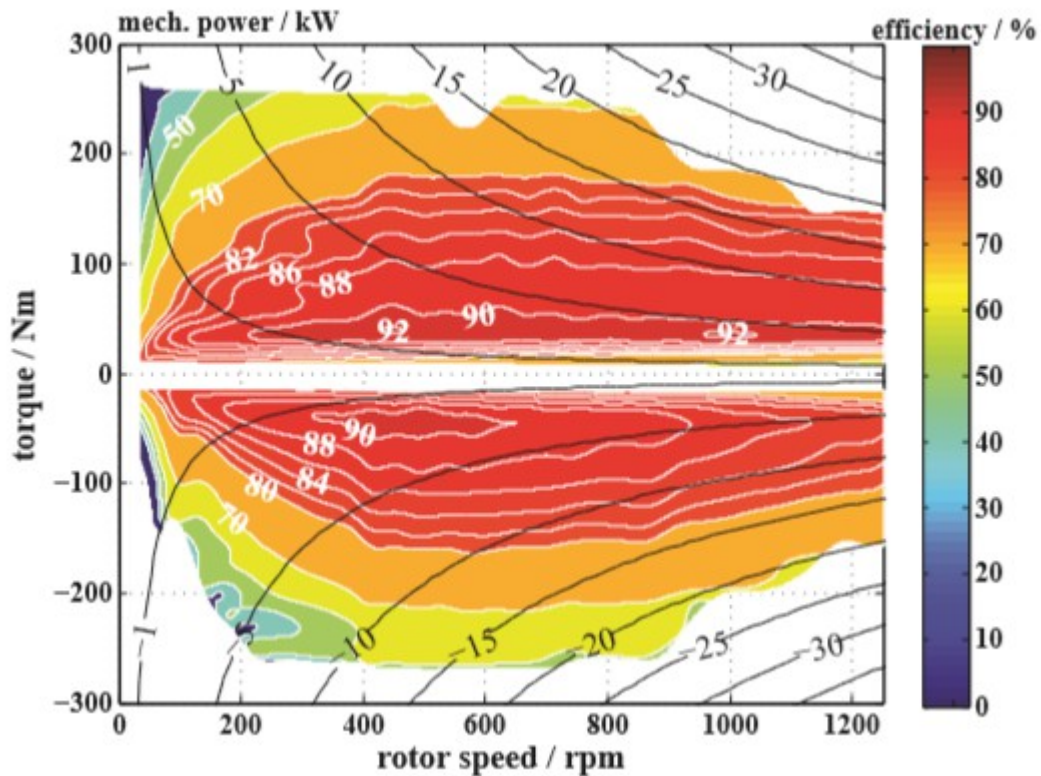


Figura 1.9: mappa di efficienza per macchina con rotore in ferrite



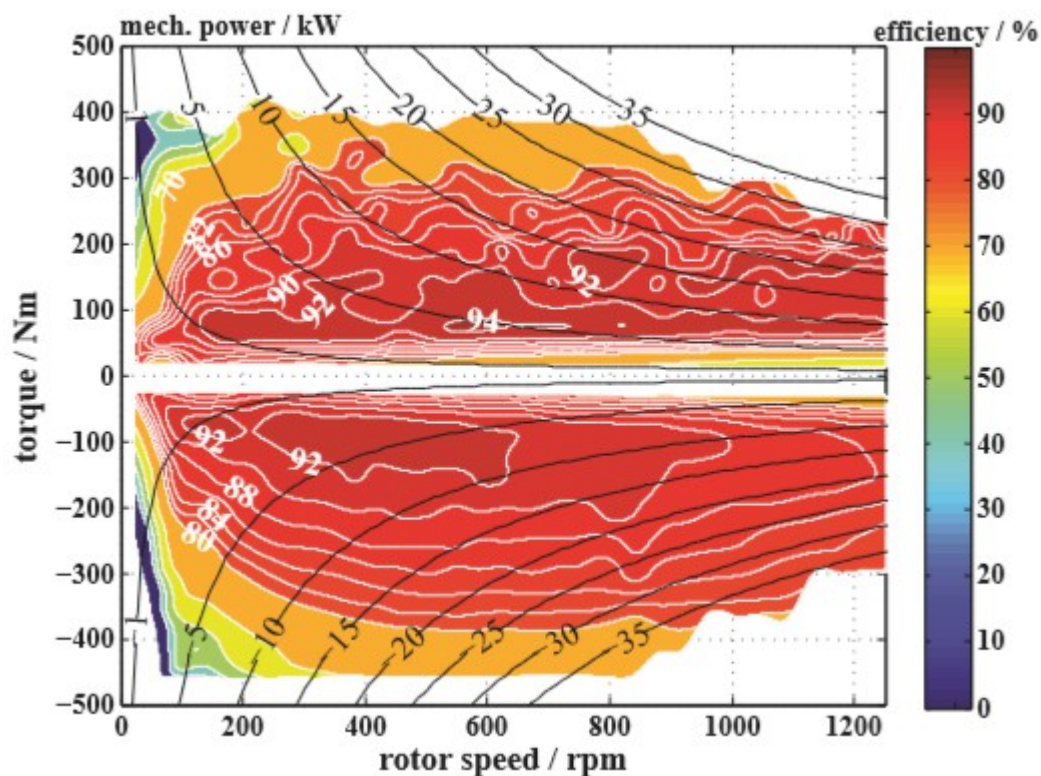


Figura 1.10: mappa di efficienza per rotore in NdFeB

Inoltre la macchina NdFeB offre prestazioni superiori al crescere del carico.

## 1.4 – Conclusioni dello studio

L'inserimento della ferrite al posto del NdFeB influenza in modo significativo diverse proprietà della macchina. Il rischio di smagnetizzazione irreversibile limita fortemente il campo di funzionamento raccomandato per la nuova tipologia di macchina, inoltre quest'ultima necessita di molto più spazio rispetto all'omologa, molto più compatta. D'altra parte le applicazioni in ferrite forniscono un'alternativa valida ed economica per applicazioni che non abbiano particolari problemi di spazio, essendo la massima efficienza ridotta di un valore non eccessivo.

# Capitolo 2 – Applicazioni industriali – Macchina IPM con ferrite per sostituire una SPM con NdFeB

## 2.1 – Introduzione allo studio

Le macchine a magneti permanenti sono comunemente usate in molte applicazioni, nelle quali hanno rimpiazzato gli altri tipi di macchina a causa della maggiore densità di coppia e della più elevata efficienza. L'uso di magneti permanenti in terre rare, come il NdFeB, ha aumentato ancor di più questi valori di efficienza e di densità di energia, rendendo pure possibile ridurre le dimensioni delle macchine utilizzate. Negli scorsi anni però, il costo dei magneti permanenti contenenti terre rare è aumentato considerevolmente ed i produttori di motori hanno considerato la possibilità di fare un passo indietro, tornando ad usare materiali come la ferrite.

Le macchine IPM rappresentano una possibilità di evoluzione molto concreta per gli azionamenti a velocità variabile, a causa dei loro vantaggi come l'alta efficienza, la potenza costante a diversi valori di velocità (CPSR), l'alto rapporto coppia/volume, il controllo sensorless, la robustezza e l'affidabilità. Usualmente, per raggiungere queste peculiarità, viene adottato un rotore a poli salienti, ottenendo un motore sincrono a riluttanza assistita (PMASR).

La PMASR e la IPM sono entrambe caratterizzate da una struttura di rotore complessa, che rende possibili diversi gradi di libertà nella progettazione.

Per ottenere il livello di anisotropia desiderato, è necessario adottare una struttura con barriere di flusso. In figura 2.1 è mostrato uno schizzo del rotore di una macchina a 4 poli.

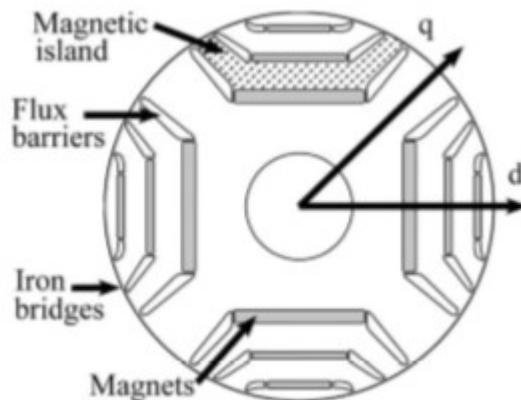


Figura 2.1: geometria del rotore di una macchina IPM

Le barriere di flusso limitano il flusso sull'asse  $d$  dovuto alla reazione di armatura, senza ostruire il flusso sull'asse  $q$ . I magneti permanenti sono inseriti all'interno delle barriere. Il numero di queste ultime determina il livello di anisotropia: più barriere vengono utilizzate, più sarà alta la componente di coppia dovuta alla salienza. La macchina risultante sarà quindi caratterizzata dalla presenza plurima di barriere di flusso nel rotore.

Usualmente è inevitabile una riduzione della coppia quando vengono impiegati magneti in ferrite, poiché essi presentano un'induzione residua pari ad un terzo di quella dei magneti NdFeB.

Riferendosi alle macchine IPM, questa riduzione può essere parzialmente compensata tramite l'adozione di una struttura anisotropa ed aumentando la componente di coppia dovuta alla riluttanza. Comunque sia, la densità di coppia iniziale non potrà venire completamente raggiunta e potrebbe essere richiesto un lieve aumento della lunghezza di rotore, che comunque verrebbe

economicamente compensata dall'ampio risparmio nei materiali utilizzati.

## 2.2 – Macchina di riferimento per applicazioni industriali

La geometria delle attuali macchine industriali SPM verrà presa come riferimento nel proseguo di questo studio. Il proposito è quello di rimpiazzare il loro rotore con un corrispettivo anisotropo IPM contenente ferrite, il quale presenti gli stessi valori di coppia media.

In figura 2.3 è riportata la geometria di una macchina SPM con 27 cave e 6 poli.

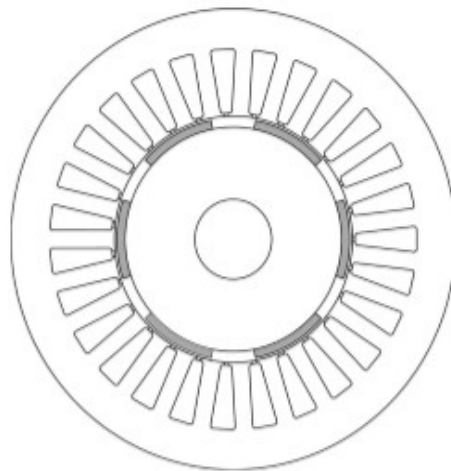


Fig. 4. Geometry of the reference SPM motor.

Figura 2.3: macchina SPM con 27 cave e 4 poli

Questa combinazione nel numero di cave e poli è stata scelta specificatamente per ridurre le oscillazioni di coppia. I magneti permanenti NdFeB utilizzati hanno caratteristica di magnetizzazione lineare e presentano un'induzione residua  $B_r=1,15\text{T}$  a  $20^\circ\text{C}$ .

La tabella 2.1 mostra le dimensioni principali della SPM in oggetto ed ognuno di questi valori rappresenterà il riferimento per la seguente analisi.

TABLE I  
MAIN GEOMETRIC DATA AND NOMINAL PERFORMANCE OF THE  
INDUSTRIAL SPM MACHINE

Stack length	$L_{stk}$	110 mm
Stator external diameter	$D_e$	160 mm
Stator inner diameter	$D_i$	86 mm
Air-gap	$g$	1 mm
Conductor current density	$J_n$	$5 \text{ A/mm}^2$
Average torque	$T_n$	18 Nm
Winding temperature rise	$\theta$	105 K

Tabella 2.1: dati principali delle macchine SPM per applicazioni industriali

Vengono riportati anche la coppia nominale media, la densità di corrente e la sovratemperatura. In un primo tempo questi valori verranno tenuti costanti, poi la lunghezza della macchina IPM verrà aumentata per ricreare la stessa coppia media. La densità di corrente nei conduttori è fissata con lo scopo di soddisfare i limiti dati dalle classi di temperatura dei materiali.

## 2.3 – Struttura alternativa della macchina IPM

### 2.3.1 – Considerazioni generali e diagrammi vettoriali

In Figura 2.4 è riportato il diagramma vettoriale di un motore SPM.

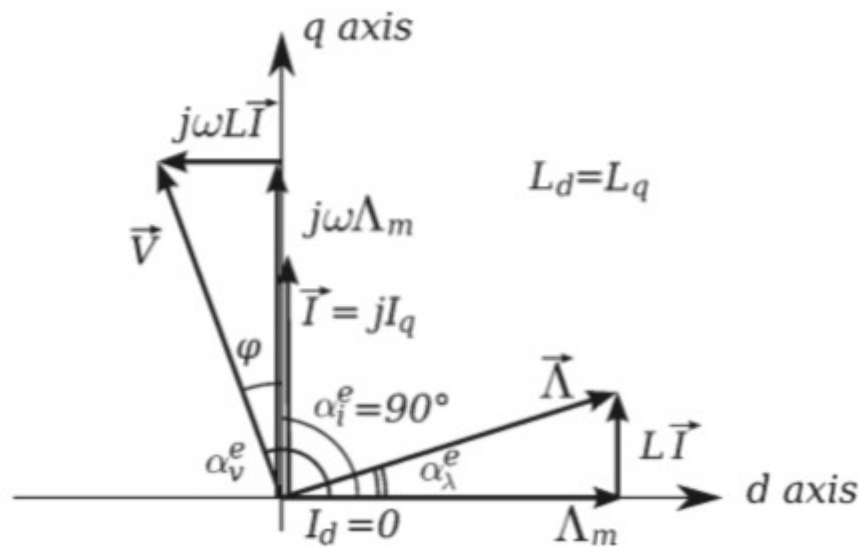


Figura 2.4: diagramma vettoriale di un motore SPM

Il flusso dovuto ai PM è posto sull'asse d. Con l'obiettivo di avere massimo rapporto coppia-corrente, il motore è alimentato solo con corrente in quadratura, con un angolo di fase di  $90^\circ$  rispetto al flusso dei PM. La coppia del motore è direttamente proporzionale al prodotto tra la corrente ed il flusso dei magneti permanenti. Perciò, considerando la corrente nominale, l'unica strada per aumentare la coppia del motore è aumentare il flusso dei magneti. Questo vuol dire selezionare magneti permanenti con alto livello di energia.

L'induttanza del motore  $L$  è generalmente bassa, così il vettore tensione risulta essere vicino al vettore della corrente e per questo il fattore di potenza  $\cos\phi$  è alto.

Similmente, la figura 2.5 mostra il diagramma vettoriale di un motore sincrono a riluttanza.

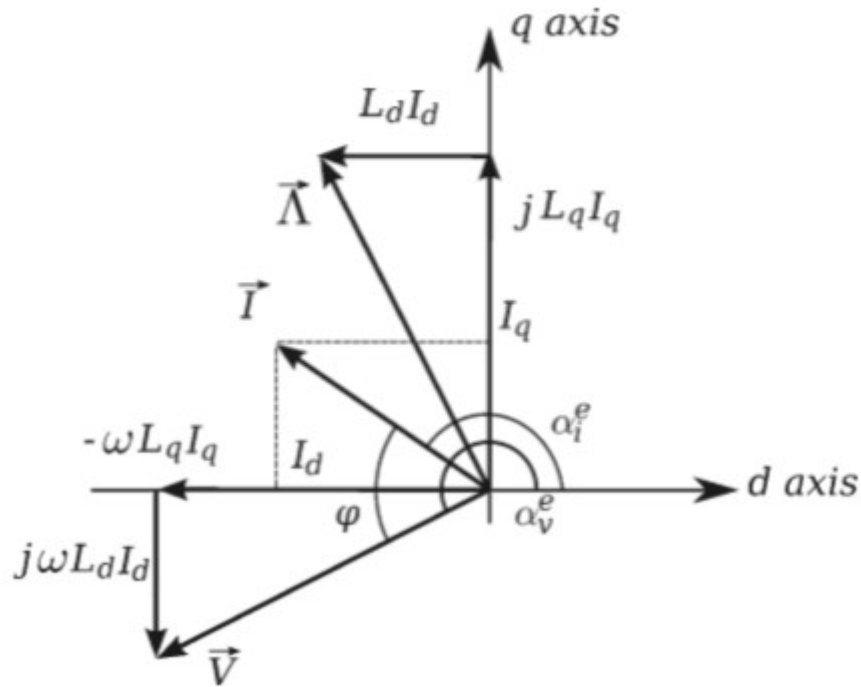


Figura 2.5: diagramma vettoriale di un motore a riluttanza

Poiché non ci sono magneti permanenti nel rotore, non c'è nemmeno il termine di flusso ad essi legato. Nella figura 2.5 il sistema di assi d-q è stato scelto in modo che l'induttanza sull'asse d risulti minore di quella sull'asse q. Per questo il rapporto massimo coppia/corrente è raggiunto con un vettore corrente nel secondo quadrante ( $135^\circ$  in assenza di saturazione). La coppia è dovuta all'anisotropia del rotore ed alla differenza tra le induttanze  $L_d$  e  $L_q$ . L'induttanza  $L_q$  è collegata al flusso principale della macchina e rimane all'incirca costante e uguale all'induttanza di magnetizzazione. Al contrario  $L_d$  deve avere il valore più basso possibile, proprio per aumentare la coppia. Perciò nel rotore vengono predisposte delle barriere di flusso per ostacolare quello diretto lungo l'asse d, come mostrato in figura 2.1. Una porzione del flusso dell'asse d passa attraverso i ponti in ferro del rotore, andando a ridurre la coppia prodotta. Dalla figura 2.5 si vede che il vettore di tensione presenta un angolo di fase piuttosto largo rispetto al vettore corrente. Ciò significa che il fattore di potenza di un motore a riluttanza risulterà piuttosto basso.

Figura 2.6 infine, mostra il diagramma vettoriale di una macchina sincrona IPM.

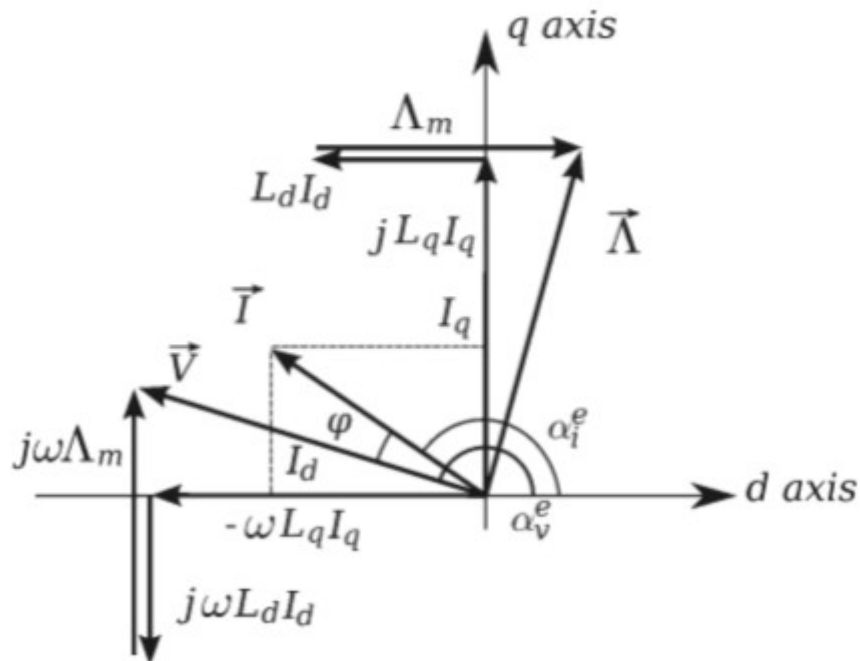


Figura 2.6: diagramma vettoriale di un motore IPM

Rispetto al motore a riluttanza precedentemente presentato, i PM sono posizionati lungo l'asse d. Il loro flusso va quindi a compensare il flusso negativo  $L_d I_d$ . L'effetto è quello di portare il vettore del flusso totale fuori fase rispetto al vettore corrente, con un angolo di  $90^\circ$ .

Questo produce due vantaggi:

- per prima cosa il vettore tensione viene ruotato verso il vettore corrente, facendo crescere il fattore di potenza. Questo significa che il motore IPM richiede bassi valori di voltampere per erogare la potenza meccanica nominale.
- Inoltre, la coppia elettromagnetica del motore cresce. Ciò è evidente, poiché un termine di coppia dovuto ai magneti permanenti è aggiunto a quello di riluttanza. In più una parte del flusso dei PM tende a saturare i ponti in ferro del rotore, come mostrato in figura 2.7.

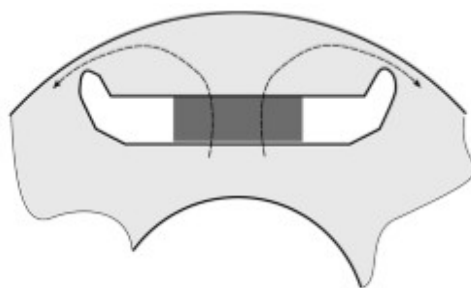


Fig. 8. Part of the PM flux flows into the iron bridges.

Figura 2.7: flusso dei PM che va a saturare i ponti in ferro del rotore

Visto che la saturazione implica una riduzione di  $L_d$  si ha un deciso aumento di coppia e un fattore di potenza più elevato.

Figura 2.6 ci mostra che un angolo di fase adatto tra la corrente ed il flusso totale, può essere

raggiunto con differenti combinazioni di  $L_d$  e  $A_m$ . Per esempio la stessa coppia può essere ottenuta nei due seguenti modi:

1. Con  $A_m$  alto può essere usata una singola barriera di flusso per polo, utilizzando PM in terre rare.
2. Con  $A_m$  basso posso equipaggiare il rotore con più barriere per polo.

Quest'ultima configurazione è adatta per far rendere al meglio i magneti in ferrite, capaci per natura di produrre una densità di energia non troppo elevata.

### 2.3.2 - Geometrie

Adottando la stessa geometria di statore, possono essere considerate diverse combinazioni tra cave e poli di rotore. Nel seguito verranno analizzate tre macchine. La tabella 2.2 riporta il numero di cave  $Q$ , il numero di poli  $2p$ , la periodicità della macchina  $t$ , il numero di cave per poli e per fase  $q$  e il fattore di potenza  $k_w$ . Si può notare che tutti gli avvolgimenti sono distribuiti, nonostante siano presi in considerazione sia  $q$  interi ( $q=2$ ) che frazionari ( $q=1,25$  e  $q=2,25$ ).

**TABLE II**  
**WINDING PROPERTIES OF THE PROPOSED IPM MACHINES**

$Q$	$2p$	$t$	$q$	$k_w$
27	6	3	1.5	0.945
27	4	1	2.25	0.941
24	4	2	2	0.966

*Tabella 2.2: Caratteristiche delle tre macchine studiate*

Partendo dalla struttura iniziale di statore con 27 cave e 6 poli, il numero di questi ultimi è stato ridotto a quattro per incrementare la componente di riluttanza della coppia. Comunque la componente armonica della FMM di questa configurazione risulterà più elevata di quella iniziale, per via del valore di  $q$  non intero. Per questo verrà considerata una struttura con 24 cave. Quest'ultima viene progettata per raggiungere all'incirca lo stesso livello di saturazione della macchina 27 cave e 4 poli.

Come risultato, l'area occupata dalle cave risulterà aumentata del 30% e questo significa avere più del doppio dell'aumento inizialmente preventivato.

La figura 2.8 mostra le geometrie di statore e rotore delle tre macchine studiate.

Per tutti i motori, i poli del rotore sono provvisti di PM in ferrite ( $B_r=0,39T$ ) e di tre barriere di flusso per polo. La lunghezza dei magneti permanenti è pari a 8 e 10 mm rispettivamente per le macchine a sei e quattro poli. Viceversa lo spessore dei magneti è sempre fissato: 3mm per la prima barriera, 4mm per la seconda e 5 mm per la terza barriera.

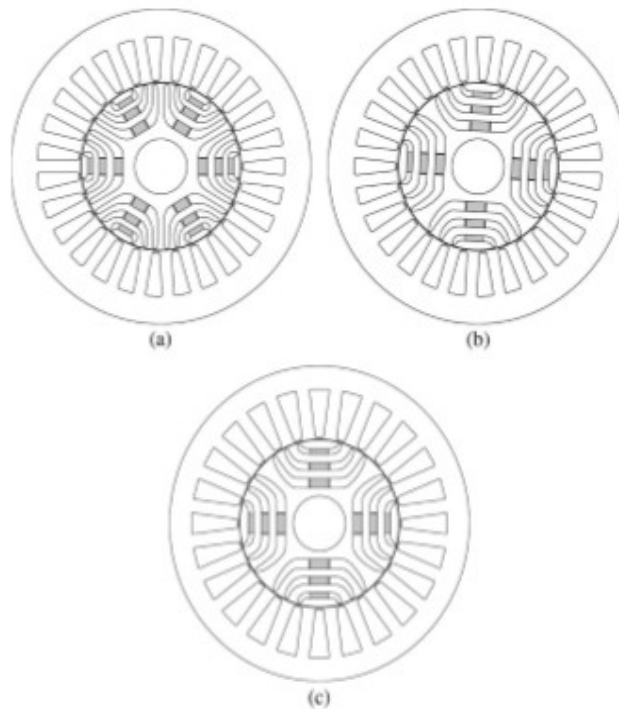


Fig. 9. Stator and rotor geometries of the IPM machines. (a) Twenty-seven-slot six-pole machine. (b) Twenty-seven-slot four-pole machine. (c) Twenty-four-slot four-pole machine.

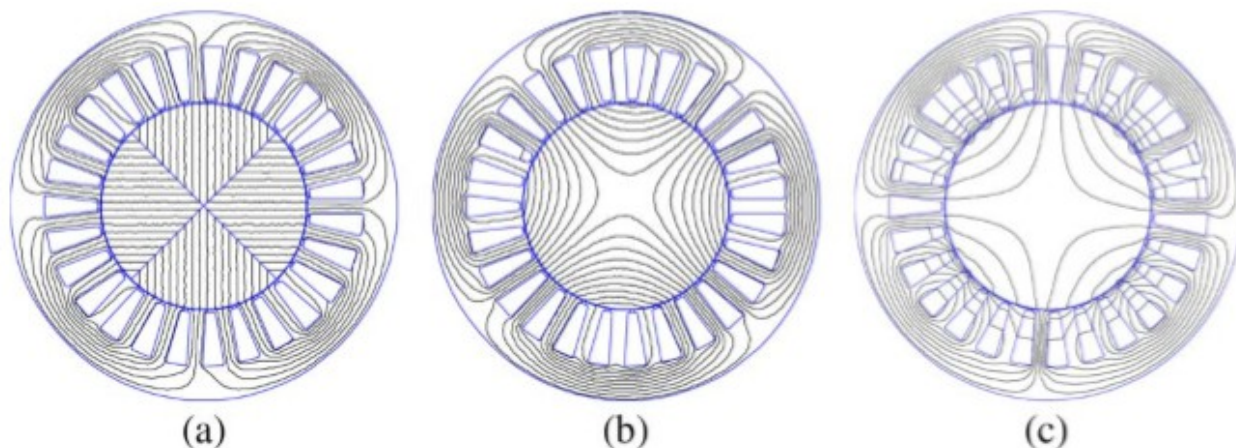
*Figura 2.8: geometrie di statore e rotore delle macchine studiate*

Poiché i magneti permanenti in ferrite presentano costi contenuti, il loro spessore è stato fissato per essere uguale a quello delle barriere di flusso, in modo da massimizzare l'anisotropia del rotore. La larghezza del traferro è fissata a 0,4mm.

### 2.3.3– Simulazione di un motore PM ideale

Dapprima viene stabilito il limite delle performance di un motore PM grazie allo studio dei componenti di coppia di una macchina ideale con 27 cave e 4 poli. Lo statore è lo stesso del motore iniziale, ma il rotore viene modificato dipendentemente all'eccitazione di statore, come mostrato in figura 2.9.





**Ideal PM motor: (a) PM rotor, (b) iron rotor, and (c) air rotor.**

*Figura 2.9: tre tipologie di rotore scelte in base all'eccitazione di statore*

1. La prima analisi è riferita al punto di lavoro a vuoto. Il rotore è completamente riempito dai PM e questo significa che viene raggiunto il massimo flusso ad essi dovuto.
2. La seconda analisi si occupa di trovare l'induttanza della macchina ideale. In questo caso viene considerato un rotore in ferro, con la rimozione di tutte le barriere di flusso. In questo modo non ci sono ostacoli per il flusso. La corrente viene alimentata solo lungo l'asse q.
3. La terza analisi si occupa di trovare la minore induttanza della macchina ideale. In questo caso la permeabilità del rotore viene assunta pari a quella dell'aria e tutti i materiali vengono rimossi dal nucleo. In questo modo non esiste più una direzione preferenziale del flusso. La corrente viene alimentata solo lungo l'asse d

Questo motore ideale risulta avere i seguenti parametri magnetici:

- Flusso a vuoto:  $\Lambda_m 0.213 V \cdot s$
- Induttanza sull'asse q:  $L_q 65.6 mH$
- Induttanza sull'asse d:  $L_d 3.13 mH$

Dove il 49% di  $L_d$  è dovuta al flusso che attraversa le cave e la salienza del motore ideale ( $L_q/L_d$ ) risulta pari a 21. E' interessante comparare questi parametri con quelli dell'attuale macchina IPM con 27 cave e 4 poli, i cui parametri sono i seguenti:

- Flusso a vuoto:  $\Lambda_m 0.026 V \cdot s$
- Induttanza sull'asse q:  $L_q 64.2 mH$
- Induttanza sull'asse d:  $L_d 16.0 mH$

Il flusso dei magneti permanenti è minore che nella macchina ideale. Questo è dovuto alla riduzione del volume dei PM che sono stati usati e all'effetto dei ponti in ferro, che rappresentano un cortocircuito magnetico fino a che non vengono saturati. I PM devono essere quindi disegnati per saturare i ponti. L'induzione al traferro dovuta ai PM è limitata a 0,1T di fronte alla barriera di flusso più piccola. L'induttanza sull'asse q rimane pressoché uguale e l'induttanza sull'asse d si alza di circa 5 volte a causa del flusso più elevato.

### 2.3.4 – Confronti di coppia

La figura 2.10 mostra la mappa dell'induzione sulla macchina SPM di riferimento e sulle tre alternative di IPM, con densità di corrente uguale a  $J_n=5A/mm^2$ .

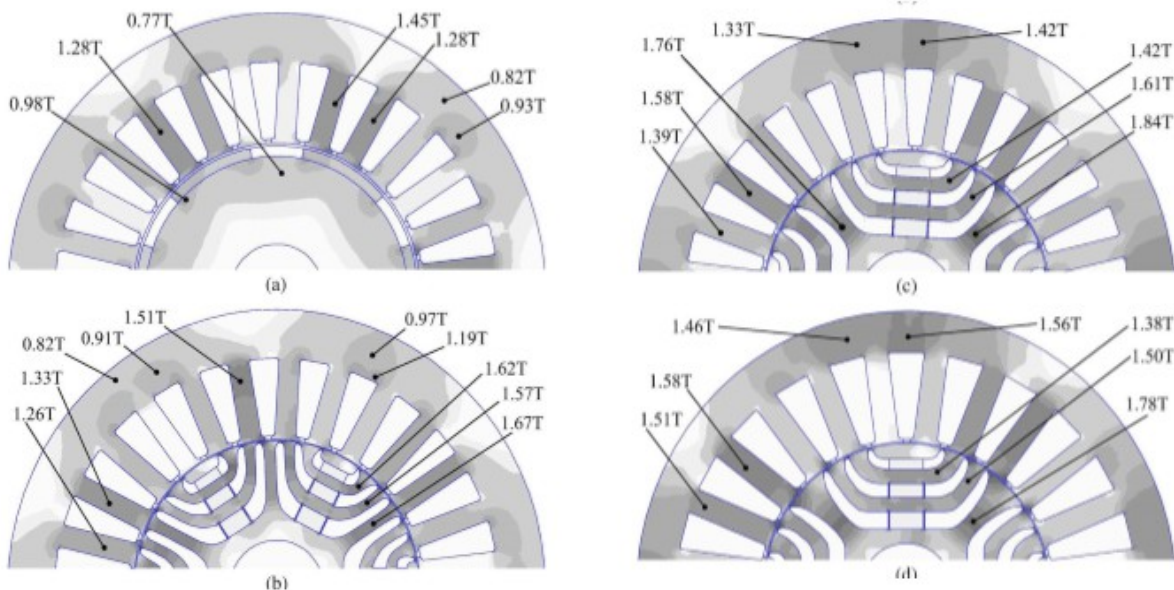


Fig. 11. PM machine geometries and flux density maps. (a) Twenty-seven-slot six-pole SPM machine. (b) Twenty-seven-slot six-pole IPM machine. (c) Twenty-seven-slot four-pole IPM machine. (d) Twenty-four-slot four-pole IPM machine.

Figura 2.10: mappa dell'induzione della macchina SPM di base e sulle tre alternative IPM prese in considerazione

Può essere notato come entrambe le macchine a 6 poli non presentino saturazione (l'induzione è minore di 1T). Nella macchina a 4 poli invece l'induzione è più alta. Comunque non si supera il ginocchio della curva B(H) anche quando la macchina è sovraccaricata. La massima induzione sui denti è circa la stessa che nelle macchine IPM.

La tabella 2.3 riassume i risultati dell'analisi agli elementi finiti, considerando una lunghezza di pacco lamiera costante.

TABLE III  
TORQUE COMPARISON WITH  
 $V_{PM, ferrite} \approx V_{PM, NdFeB}$  ( $L_{stk} = 110$  mm)

Rotor structure principle	Q	2p	$J_n$ (A/mm <sup>2</sup> )	$T_n$ (Nm)	PM	$V_{PM}$ (cm <sup>3</sup> )
SPM mach.	27	6	5	18	NdFeB	51.5
IPM mach.	27	6	5	13.8	Ferrite	63.4
	27	4	5	15.0	Ferrite	52.8
	24	4	5	16.1	Ferrite	52.8
	24	4	4.7	15.1	Ferrite	52.8

Tabella 2.3: Risultati dell'analisi agli elementi finiti

Il volume dei PM (nell'ultima colonna) è circa lo stesso per le quattro macchine.

Riferendosi alle macchine IPM si può notare che:

- La macchina a 6 poli mostra minore coppia media, mentre la macchina con 24 cave e 4 poli esprime quella maggiore. Nella macchina 4 poli deve essere quindi aggiunta una quarta barriera di flusso per incrementare la copia di riluttanza.
- Entrambe le macchine a 6 e 4 poli devono essere allungate per raggiungere i requisiti richiesti. Comunque l'incremento nella lunghezza di pacco lamiera risulta inferiore al 30%. In più questo costo aggiuntivo non influisce troppo sulla scelta, perché la ferrite costa molto meno dei magneti NdFeB.
- Le oscillazioni di coppia delle tre macchine IPM sono alte. Per ridurle bisogna posizionare in modo corretto le barriere e limitare la saturazione sulle vie di flusso tra le barriere, come mostrato in figura 2.10.

Come discusso precedentemente, la macchina con 24 cave e 4 poli mostra un'area di cava del 30% maggiore della geometria con 27 cave di statore. Questo significa che, operando con la stessa densità di corrente, il carico elettrico equivalente sarà maggiore nel caso a 24 cave. I limiti di temperatura sono, inoltre, soddisfatti.

Considero ora le perdite per effetto joule, che possono essere valutate in questa maniera:

$$P_{Cu} = \rho_{Cu} V_{Cu} J_n^2 = \rho_{Cu} k_{fill} Q S_{slot} L_{stk} k_{ew} J_n^2 \quad (1)$$

dove  $\rho_{Cu}$  è la resistività del rame,  $V_{Cu}$  il volume e  $k_{fill}$  è il fattore di riempimento delle cave.  $k_{ew}$  è un fattore introdotto per tenere conto della variazione della lunghezza delle teste di matasse dovuta al differente numero di cave. Per ottenere le stesse perdite nel rame fra le due macchine, la densità di corrente nei conduttori dovrà essere ridotta fino a  $4,7 A/mm^2$ . In questo caso la macchina erogherebbe una coppia media pari a 15,1 Nm (vedi tabella 2.3).

### 2.3.5 – Impatto del flusso dovuto ai magneti permanenti sulla coppia prodotta

Come fatto notare in precedenza, le macchine IPM presenta all'incirca lo stesso volume di PM della macchina SPM. Quindi esse sono caratterizzate da un flusso piuttosto ridotto, a causa dell'uso dei PM in ferrite, meno efficienti. Il flusso dei PM dovrà risultare essere leggermente superiore al necessario in modo da saturare i ponti in ferro. Ad ogni modo la struttura del rotore è adatta a ricevere un significativo aumento del volume dei PM, che significherebbe un aumento del flusso trasmesso e del componente di coppia ad esso legato. Tale modifica comporta un aumento della densità di coppia e della lunghezza di pacco lamiera. La tabella 2.4 riporta il paragone tra la macchina SPM e la corrispettiva IPM con una quantità significativa di ferrite inserita nelle barriere di flusso.

TABLE IV  
TORQUE COMPARISON WITH  
 $V_{PM, ferrite} \approx 2 \cdot V_{PM, NdFeB}$  ( $L_{stk} = 110$  mm)

Rotor structure principle	Q	2p	$J_n$ (A/mm <sup>2</sup> )	$T_n$ (Nm)	PM	$V_{PM}$ (cm <sup>3</sup> )
SPM mach.	27	6	5	19	NdFeB	64.9
	27	6	5	15.6	Ferrite	116.2
IPM mach.	27	4	5	17.3	Ferrite	102.1
	24	4	4.7	17.6	Ferrite	102.1

Tabella 2.4: confronto di coppia

Il volume dei magneti permanenti è all'incirca raddoppiato. La coppia media è cresciuta considerevolmente, limitando la riduzione di coppia al 18% per la macchina a 27 cave e appena al 9% per quella a 24 cave. Partendo da questi accorgimenti di design, un ulteriore confronto è stato effettuato partendo da valori costanti di coppia nominale e di sovraccarico, riferiti ad una fissata lunghezza di pacco lamiera della macchina. Inoltre sono stati considerati PM allungati. Come riportato in tabella 2.5, la coppia nominale è uguale a 19Nm, e le condizioni di sovraccarico portano ad una coppia 1,5 volte più grande di quella nominale.

TABLE V  
TORQUE COMPARISON OF LENGTHENED MOTORS BASED ON THE  
VERSIONS WITH  $V_{PM, ferrite} \approx 2 \cdot V_{PM, NdFeB}$ . THE COMPARISON  
REFERS TO TWO FIXED TORQUE VALUES

Principle Structure	$T_{avg}$ (Nm)	$L_{stk}$ (mm)	$J$ (A/mm <sup>2</sup> )	$\eta_b$	$\cos \varphi$	CPSR
SPM 27/06	19	110	5.0	0.93	0.95	1.3
IPM 27/06	19	135	5.0	0.92	0.73	3.4
IPM 27/04	19	124	5.0	0.92	0.78	3.0
IPM 24/04	19	119	4.7	0.89	0.80	2.5
SPM 27/06	30	110	8.1	0.90	0.88	1.4
IPM 27/06	30	135	6.5	0.90	0.74	2.4
IPM 27/04	30	124	7.5	0.91	0.78	1.9
IPM 24/04	30	119	7.2	0.87	0.79	1.8

Tabella 2.5: confronto di coppia

Il confronto sottolinea i seguenti fatti:

- La macchina IPM ha, in generale, maggiore CPSR e questo può essere un vantaggio. In tabella 2.5 i valori vengono acquisiti alla velocità massima e normalizzati rispetto alla velocità di base.
- In condizioni nominali e di sovraccarico le macchine a 27 cave mostrano all'incirca la stessa

- efficienza. Però il fattore di potenza è minore per le macchine contenenti PM in ferrite.
- Le perdite maggiori nelle macchine a 24 cave sono causate dai valori più alti di induzione.
  - In condizioni di sovraccarico le macchine IPM sono in grado di fornire un rapporto coppia-corrente maggiore, a causa della componente della coppia di riluttanza.

### **2.3.6 – Considerazioni di carattere economico**

Nonostante la macchina coi magneti NdFeB mostri una maggiore densità di coppia, risulta economicamente conveniente rimpiazzare questi materiali con la ferrite. Come detto precedentemente e rimarcato in tabella 2.4, la macchina IPM con ferrite proposta è stata progettata con l'obiettivo di raggiungere gli stessi valori di coppia, indipendentemente dalle combinazioni cave-poli.

Per quanto riguarda il costo dei materiali ci si è basato sui seguenti prezzi:

- Rame: 8,5 USD/kg
- Lamierini: 1,1 USD/kg
- NdFeB: 150 USD/kg
- Ferrite: 5 USD/kg

(valori risalenti a novembre 2012)

Il volume di ferro richiesto è lo stesso per i due tipi di macchina, il volume del rame cambia a seconda del numero di cave utilizzato. Le differenze tra il prezzo delle due tipologie di PM sono però ben evidenti. Inoltre la scelta della ferrite metterebbe al riparo da variazioni incontrollabili del prezzo delle terre rare nei prossimi anni.

### **2.4 – Conclusioni dello studio**

La diminuzione di coppia disponibile è stata compensata tramite l'aumento di coppia di riluttanza e del volume dei PM. Il principale risultato conseguito è che il calo di prestazioni può essere efficacemente contrastato con un piccolo aumento di dimensioni della macchina (15%), per ognuna delle tre alternative di IPM considerate. Il prezzo finale della macchina in questa maniera risulterà comunque più che dimezzato, anche considerate le differenze di volume e lunghezza.

# Capitolo 3 – Applicazioni veicolari – Confronto tra motori IPM contenenti diversi tipi di materiale magnetico: REPM Vs. CFPM

## 3.1 – Introduzione

Le macchine sincrone a magneti permanenti interni (IPM) risultano essere particolarmente adatte per applicazioni veicolari, soprattutto come mezzo di propulsione dei veicoli elettrici ibridi.

In questo capitolo verranno analizzate, confrontate e valutate due tipologie di macchine IPM. La prima prevede l'uso di magneti permanenti in terre rare (REPM), la seconda invece si avvale di magneti permanenti ceramici in ferrite (CFPM), appositamente progettati con una struttura di rotore più robusta ed adatta all'applicazione veicolare.

Verranno presi in considerazione, come parametri di confronto, le capacità di coppia, l'efficienza, la risposta della macchina a situazioni di sovraccarico, le caratteristiche del campo di deflussaggio ed i campi di funzionamento raccomandabili.

Il confronto si pone come obiettivo di dimostrare come le macchine IPM con magneti permanenti ceramici in ferrite possano essere considerate un'alternativa a basso costo per applicazioni veicolari, mantenendo comunque prestazioni paragonabili a quelle ottenibili coi magneti in terre rare.

Le macchine IPM combinano i vantaggi delle macchine a magneti permanenti con quelli delle macchine a riluttanza, con le caratteristiche di alta induzione residua, grande coercitività ed elevato prodotto massimo BH, l'uso delle terre rare migliora ulteriormente le prestazioni della macchina, in particolare se si parla di efficienza e di capacità di coppia.

Al giorno d'oggi le macchine IPM trovano sempre più applicazioni, in particolare nei sistemi di azionamento a velocità variabile in veicoli elettrici ed ibridi e tutt'ora questo argomento è oggetto di studio e di nuovi approcci sperimentali.

Tuttavia, come più volte detto, il costo delle terre rare è in costante e rapido aumento negli ultimi anni. Conseguentemente in alcuni casi il costo dei REPM può arrivare a superare il 30-40% del costo totale del materiale necessario per costruire la macchina.

Per questo l'interrogativo *“come è possibile ridurre il costo delle macchine IPM?”* ha riconquistato interessi di ricerca.

Una risposta può arrivare guardando al passato, con il ritorno all'uso dei magneti permanenti in ferrite, essendo le caratteristiche degli stessi notevolmente migliorate grazie alle tecnologie moderne. I materiali CFPM presentano molti vantaggi come il minor costo, la semplicità del processo di costruzione, migliore stabilità alle alte temperature e miglior resistenza alla corrosione. Dunque, a patto di rendere le prestazioni quantomeno simili, essi potrebbero rappresentare una soluzione a basso costo da tenere assolutamente in considerazione.

### 3.2 – Modello della macchina IPM

Le equazioni da (1) a (5) riassumono un modello convenzionale di macchina IPM. Per semplificare l'analisi, l'accoppiamento fra gli assi d e q, causato dalla saturazione, è normalmente ignorato.

$$u_d = \frac{d\psi_d}{dt} - \omega\psi_q + R_1 i_d \quad (1)$$

$$u_q = \frac{d\psi_q}{dt} + \omega\psi_d + R_1 i_q \quad (2)$$

$$\psi_d = L_d i_d + \psi_f \quad (3)$$

$$\psi_q = L_q i_q \quad (4)$$

$$T_{em} = P[\psi_d i_q + (\xi - 1)L_q i_d i_q] \quad (5)$$

- $\omega$  è la velocità angolare del campo magnetico.
- $u_d$ ,  $i_d$ ,  $\psi_d$ , e  $L_d$  rappresentano tensione, corrente, flusso concatenato e induttanza per l'asse d, così come  $u_q$ ,  $i_q$ ,  $\psi_q$  e  $L_q$  lo sono per l'asse q.
- $\psi_f$  rappresenta invece il flusso dei magneti permanenti.
- $R_1$  la resistenza di fase.
- $T_{em}$  la coppia elettromagnetica.
- $P$  è il numero di coppie polari della macchina.
- $\xi$  è il rapporto di salienza  $L_q/L_d$ .

Dall'equazione (5) si può osservare come la coppia elettromagnetica di una macchina IPM sia determinata dal flusso generato dai magneti e dal rapporto di salienza  $L_d/L_q$ .

Al fine di ottenere una coppia comparabile, una macchina CFPM dovrà essere progettata deliberatamente con un alto rapporto di salienza per compensare la perdita di flusso dovuta ai magneti meno pregiati. Nel seguito verranno prese in considerazione due macchine: una REPM di 8kW ed una CFPM di 30kW.

Nella tabella 3.1 vengono riportate alcune loro caratteristiche, mentre nella tabella 3.2 vengono riportate le caratteristiche dei materiali usati per realizzare i magneti permanenti.

TABLE I. MAIN DESIGN PARAMETERS OF IPM MACHINES

Item	8kw motors	30kw motors
No. of Slots	36	36
No. of poles	6	6
Stator Outer diameter	175mm	210mm
Length of airgap	0.8mm	0.8mm
Lamination(BAO steel)	B35A270	B35A270
Cooling	Natural air	Water

Tabella 3.1: caratteristiche delle macchine considerate

TABLE II. PROPERTY OF PM MATERIALS

	Material Grade	Residual Flux Density (T)	Coercive Force (KA/m)	Intrinsic Coercive Force (KA/m)	BHmax (KJ/m <sup>3</sup> )
REPM	N40UH	1.27	939	2000	302
CFPM	DM4350	0.42	294	386	33.4

Tabella 3.2: caratteristiche dei materiali magnetici utilizzati

### 3.3 – Considerazioni sul design delle macchine CFPM

L'induzione residua nei magneti delle macchine CFPM è solamente un terzo di quella delle macchine REPM. Bisogna dunque agire sulla disposizione dei magneti per tentare di compensare l'irrimediabile povertà magnetica del materiale.

Nelle figure 3.1(a) e 3.1(c) viene riportata la disposizione dei magneti in una macchina REPM a 8kW ed a 30kW. Nelle figure 3.1(b) e 3.1(d) vengono invece riportati gli schemi per le due macchine CFPM della stessa taglia.

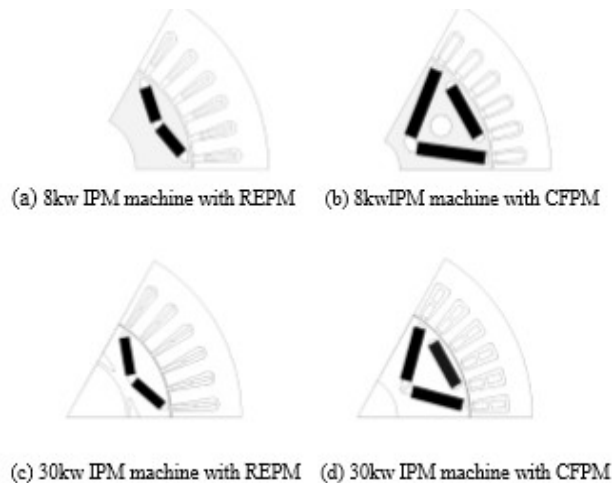


Figura 3.1: Design dei magneti permanenti nelle macchine considerate

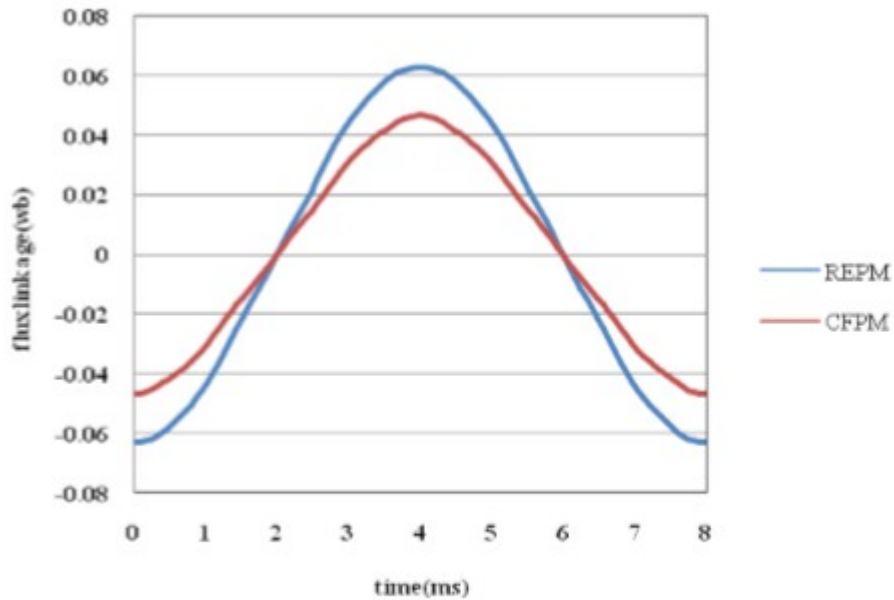
Per recuperare il calo di prestazioni nelle macchine CFPM è possibile procedere nei seguenti modi:

- **Aumentare la concentrazione di flusso ed il rapporto di salienza** con una “V” più profonda. Magnet più lunghi e più spessi potranno essere così collocati nella struttura e la forma a delta potrà essere utilizzata per aumentare flusso e rapporto di salienza.
- **Aumentare flusso magnetico.** In questa direzione si può agire aumentando il diametro del rotore per avere un flusso totale maggiore, oppure si può aumentare la lunghezza dei denti di statore per ospitare cave più grandi, oppure ancora le due soluzioni potrebbero essere prese in considerazione contemporaneamente. Il flusso concatenato può essere anche aumentato tramite spire extra di bobine di statore. L'ultima opzione può essere quella di aumentare il pacco lamiera della macchina, che però aumenterà considerevolmente anche dimensioni e peso della stessa.
- **Altri metodi:** aggiunta di alcuni buchi vuoti nel rotore per aumentare il rapporto di salienza e diminuire il peso complessivo.

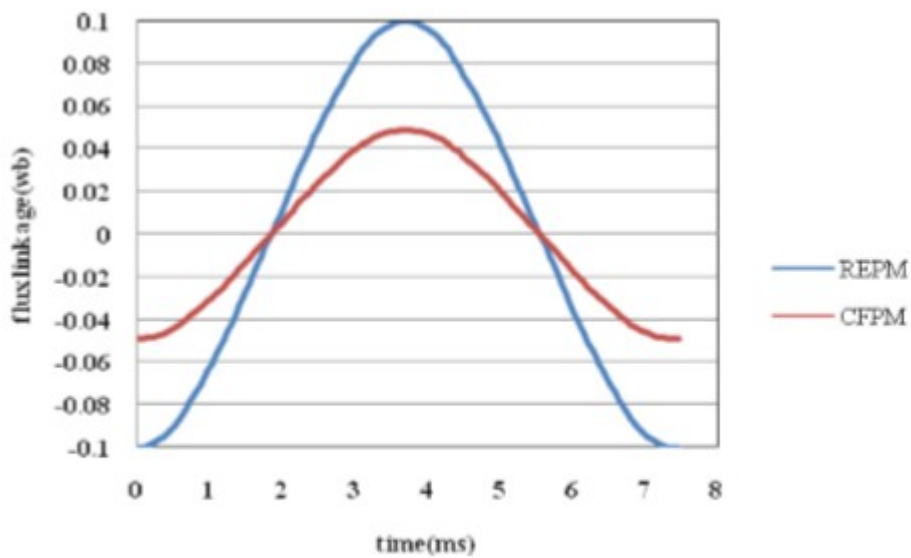


### 3.4 – Parametri delle macchine

I flussi trasmessi dalle macchine vengono calcolati con l'analisi agli elementi finiti (FEA) ed i risultati vengono riportati in figura 3.2:



(a) 8kw IPM machines



(b) 30kw IPM machines

Figura 3.2: Flussi trasmessi calcolati tramite FEM

Si può notare come i flussi siano ancora più piccoli per le macchine CFPM rispetto alle corrispondenti macchine REPM, nonostante tutte le tecniche di design e di miglioramento discusse nella sezione precedente.

D'altra parte il rapporto di salienza della macchina CFPM è significativamente più grande, come indicato in tabella 3.3.

TABLE III. THE DESIGN PARAMETERS OF MACHINES

	8kw IPM machines		30Kw IPM machines	
	REPM	CFPM	REPM	CFPM
Turns per coil	5	6	4	5
Effective stack length(mm)	160	170	115	150
Flux linkage (Web)	0.063	0.045	0.099	0.049
$d$ -axis induct. $L_d$ (mH)	0.14	0.21	0.28	0.44
$q$ -axis induct. $L_q$ (mH)	0.36	0.70	0.72	1.48
Saliency ratio ( $L_q / L_d$ )	2.53	3.37	2.62	3.36
Resist. (m $\Omega$ )	11.1	16.3	12.4	19.1
Rotor inertia (kg.m <sup>2</sup> )	0.019	0.023	0.021	0.032

Tabella 3.3: Parametri delle macchine

Questo principalmente è dovuto ai magneti più spessi, i quali aumentano la riluttanza sull'asse d. Si può notare inoltre che le resistenze di statore sono aumentate a causa delle spire in più e che l'inerzia del motore è anch'essa aumentata a causa della maggiore lunghezza del pacco lamiera.

TABLE IV. COSTS ANALYSIS

	Stator stack weight (Kg) /cost (RMB)	Rotor stack weight (Kg) /cost (RMB)	Winding weight (Kg) /cost (RMB)	Magnet weight (Kg) /cost (RMB)	Total
REPM	14.4 /172	5.0 /60	5.3 /371	1.4 /1440	26.1 /2043
CFPM	15.6 /187	9.2 /111	6.9 /483	2.7 /252	34.6 /1033
Weight (CFPM-REPM)	1.2	4.2	1.6	1.3	+8.3
Cost (CFPM-REPM)	15	51	112	-1188	-1010 (49%)

Figura 3.4: Analisi dei materiali

La tabella 3.4 presenta un confronto tra il peso ed il costo dei materiali effettivamente usati nella macchina da 30kW. Poiché il costo della CFPM è molto minore di quello della REPM, il costo dei materiali può essere ridotto fino al 49%, nonostante su esso incidano la laminazione e la maggior quantità di rame utilizzata per la maggiore lunghezza del pacco lamiera.

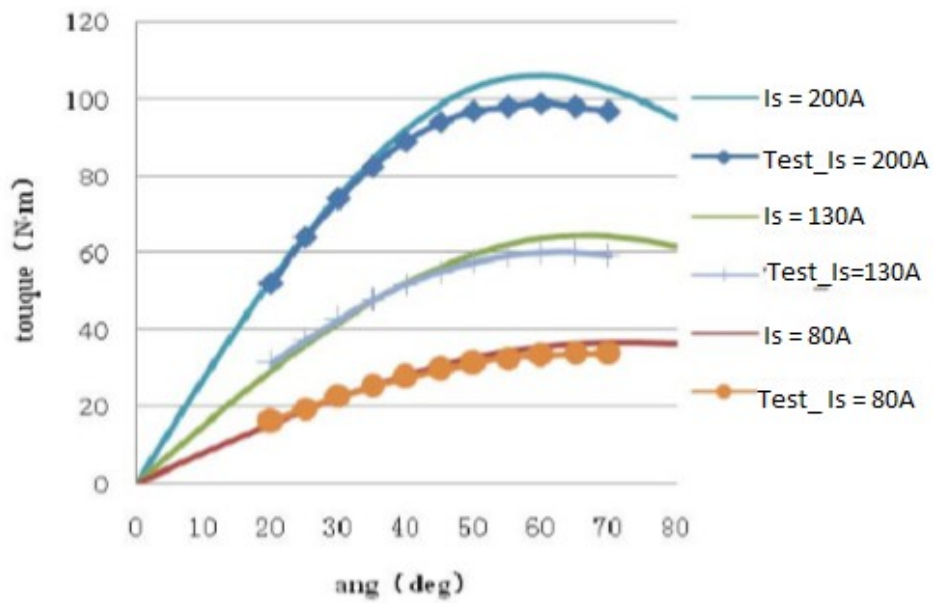
### 3.5 – Analisi delle performance

Tutte le macchine sono state testate con gli stessi dispositivi.

Alle macchine sono state applicate diverse correnti sotto diverso MTPA. Con MTPA si intende l'angolo tra corrente di statore e l'asse d. Un MTPA più piccolo indica una coppia di riluttanza grande. Successivamente i risultati delle prove sono stati riportati in tabella e confrontati con i risultati precedentemente ottenuti tramite FEA.

Sebbene il flusso dovuto ai magneti permanenti delle macchine CFPM sia inferiore a quello delle macchine REPM (il che implicherebbe che la coppia PM sia più piccola), la coppia del CFPM può ancora raggiungere lo stesso livello di quella del REPM con correnti comparabili e con un MTPA minore.

In figura 3.4 e 3.5 si può vedere come la coppia massima di REPM disponga di MTPA più grande e cioè contributo di coppia dovuto ai magneti permanenti più grande. Inoltre l'MTPA corrispondente alla coppia massima a 30kW CFPM è minore di quello del CFPM a 8kW, il che implica che, in una macchina CFPM grande, la coppia di riluttanza dovrà svolgere un ruolo di maggiore importanza, poiché il flusso proveniente dalla CFPM sarà molto più piccolo di quello proveniente da una REPM.



(a) The 8Kw REPM machine

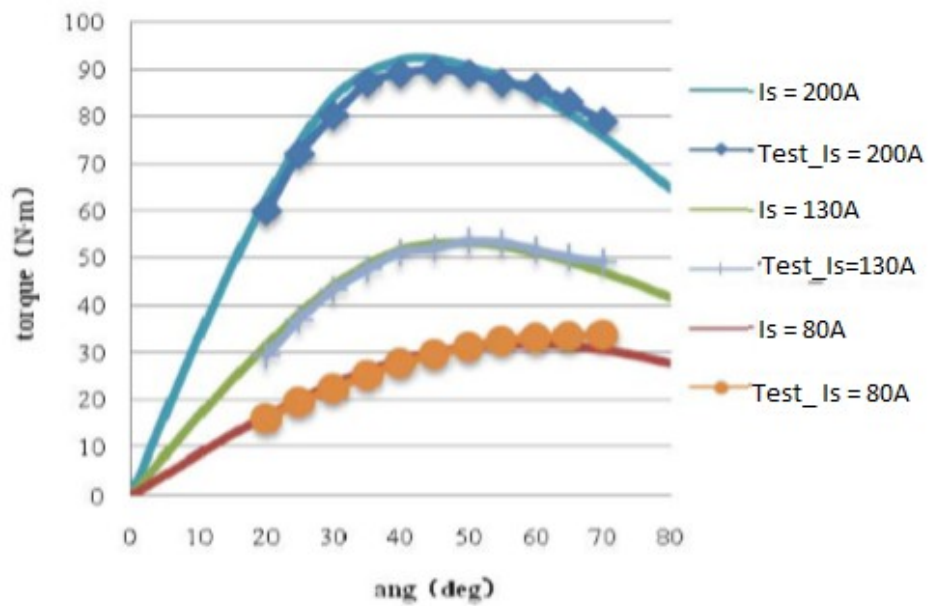
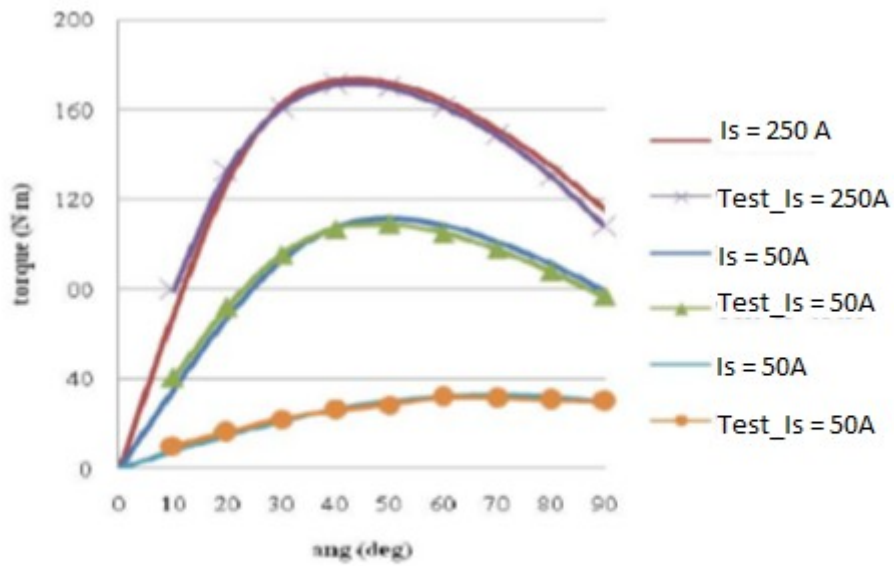
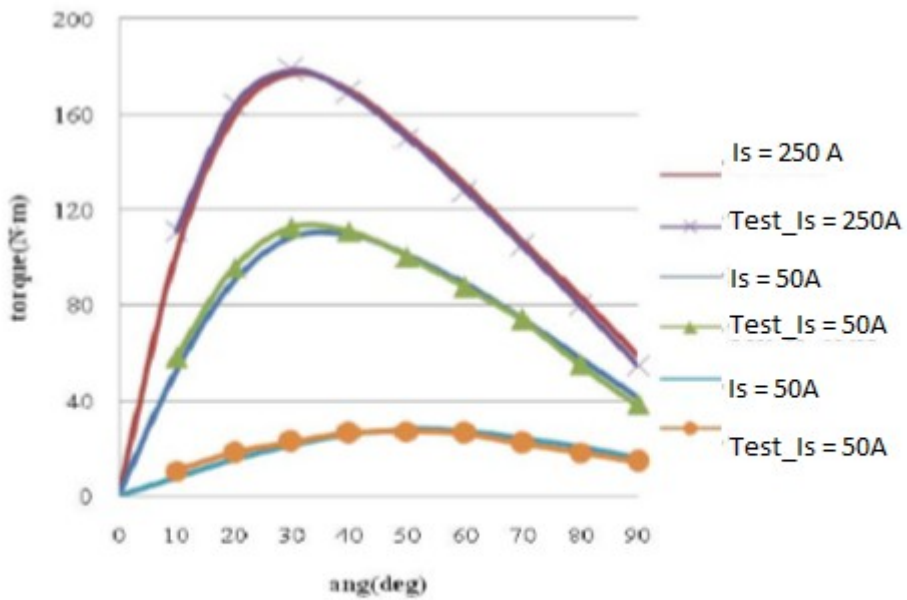


Figura 3.4: risultati dei test per una macchina da 8kW



(c) The 30Kw REPM machine



(d) The 30Kw CFPM machine

Figura 3.5: risultati dei test per una macchina da 30kW

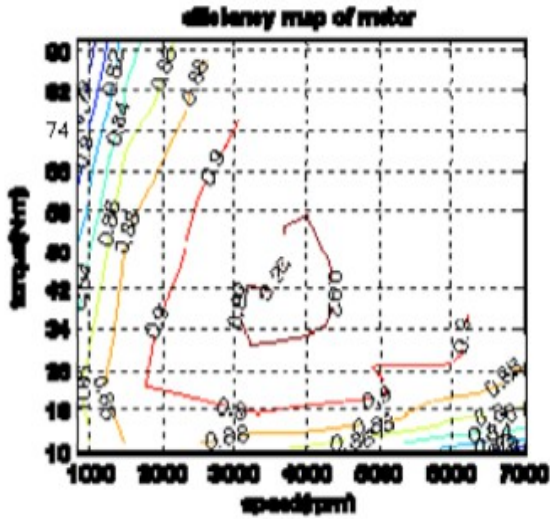
I risultati dei test per condizioni di funzionamento nominali e di picco sono riportati nella tabella 3.5.

TABLE V. THE RATED AND PEAK TORQUE AT RATED AND PEAK SPEED OPERATING CONDITIONS

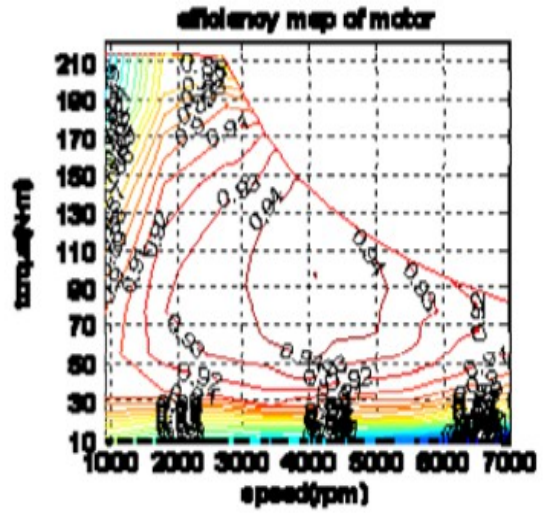
			Speed (rpm)	Torque (Nm)	Current (A, rms)	Eff. (%)
8kw IPM machine	Rated torque rated speed	REPM	2500	31.5	75.6	91.5
		CFPM	2500	31.0	86.5	91.0
	Peak torque rated speed	REPM	2500	91.8	193.7	89.8
		CFPM	2500	92.1	212.3	88.7
	Rated torque peak speed	REPM	7000	12.5	94.4	83.0
		CFPM	7000	11.2	65.1	82.7
Peak torque peak speed	REPM	7000	32.5	194.0	83.0	
	CFPM	7000	28.0	187.2	84.8	
30kw IPM machine	Rated torque rated speed	REPM	2700	106.5	151.3	93.8
		CFPM	2700	106.7	143.1	93.4
	Peak torque rated speed	REPM	2700	212.2	327.0	89.5
		CFPM	2700	201.8	307.9	86.4
	Rated torque peak speed	REPM	7000	41.5	103.6	89.1
		CFPM	7000	34.5	89.0	92.5
Peak torque peak speed	REPM	7000	82.9	195.9	91.7	
	CFPM	7000	34.5	89.0	92.5	

Tabella 3.5: risultati dei test

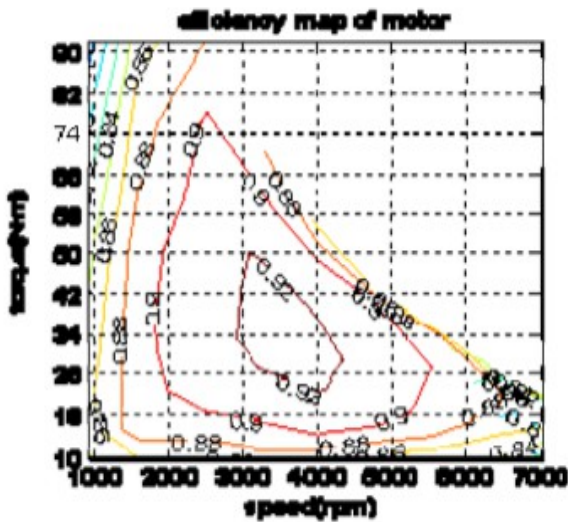
Le mappe di efficienza (ottenuti sul piano della coppia in funzione della velocità) per le macchine da 8kW e 30kW sono riportate in figura 3.6 e 3.7. (Sulla sinistra 8kW, sulla destra 30kW).



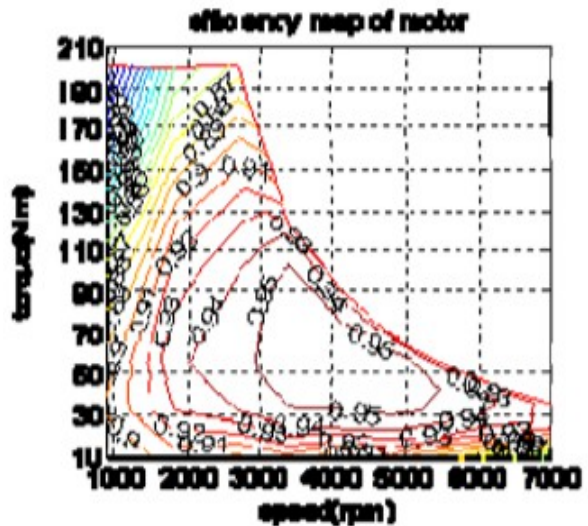
(a) The REPM machine



(a) The REPM machine



(b) The CFPM machine



(b) The CFPM machine

Figura 3.6: mappe di efficienza per macchine da 8kW

Figura 3.7: mappe di efficienza per macchine da 30kW

Presso la velocità nominale e al di sotto di essa la macchina CFPM 8kW è in grado di generare la stessa coppia massima del suo corrispettivo REPM. Tuttavia la macchina a 30kW CFPM può raggiungere al massimo il 95% della coppia massima raggiunta dalla sua controparte REPM.

Come discusso in precedenza, con il livello di potenza e la coppia crescenti, anche con la migliore struttura possibile il CFPM non potrà fornire abbastanza flusso magnetico e la macchina dovrà utilizzare una coppia di riluttanza maggiore per offrire la coppia massima, esaurendo così la capacità di sovraccarico della macchina ed aumentando il livello di saturazione nel rotore. Con più spire e con un pacco lamiera più lungo aumenterebbero le resistenze delle macchine CFPM, causando minore efficienza, specialmente a basso regime.

D'altra parte, essendo l'induzione nelle CFPM bassa, anche le perdite nel ferro saranno basse.

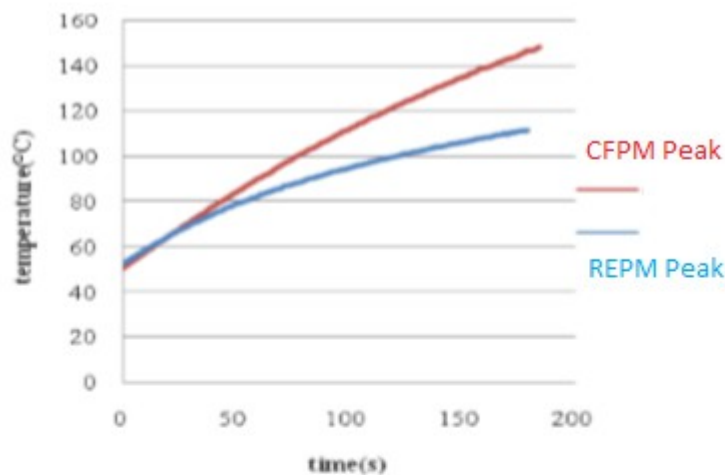
Inoltre ad alte velocità la macchina REPM richiede una grande corrente di asse d per effettuare la smagnetizzazione riducendo il flusso PM. La CFPM offre dunque un miglior livello di efficienza a velocità e carichi leggermente più elevati. Tuttavia la lunghezza del pacco lamiera accresciuta

provoca inevitabilmente un accrescimento delle induttanze. La coppia di riluttanza maggiore richiede una grande corrente sull'asse d, che causa una grande caduta di tensione. Questo fattore limita quindi la capacità di coppia delle CFPM ad alta velocità con la stessa tensione del DC bus. La macchina CFPM a 8kW può offrire solo l'86% della coppia massima della corrispettiva macchina REPM.

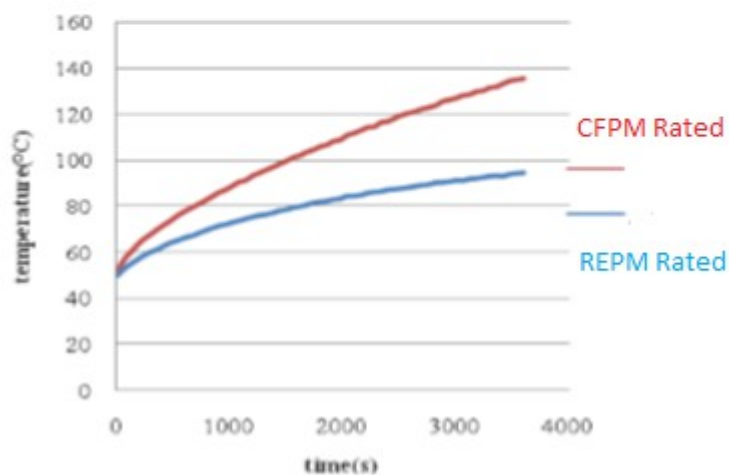
Nel caso 30kW la situazione peggiora a causa di una più grande differenza fra le induttanze. La macchina CFPM può raggiungere appena il 42% della coppia massima raggiungibile dalla REPM a velocità di punta.

Per tentare di risolvere questo problema in futuro la macchina CFPM a 30kW dovrebbe essere ottimizzata.

Tramite delle termocoppie poste alle estremità degli avvolgimenti di statore viene anche misurata la temperatura nei regimi diversi. I risultati sono riportati nei grafici successivi.



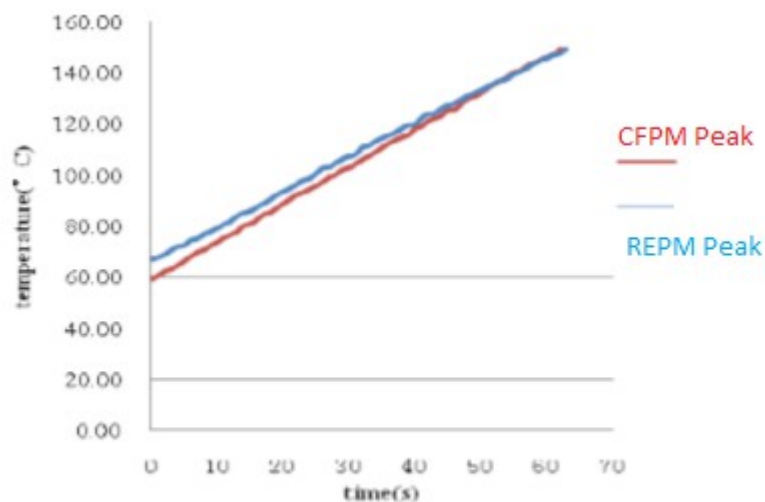
(a) Peak torque at rated speed.



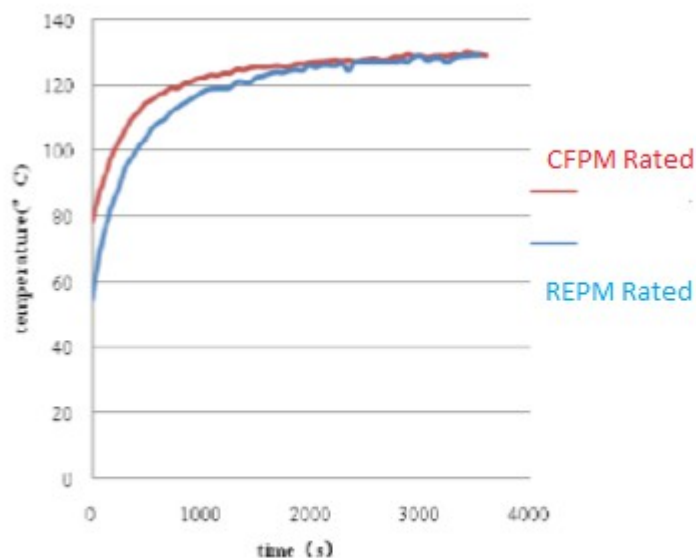
(b) Rated torque at rated speed.

Figura 3.9: temperatura nelle macchine 8kW





(a) Peak torque at rated speed.



(b) Rated torque at rated speed.

Figura 3.10: temperatura nelle macchine 30kW

Poiché le perdite nel rame nelle macchine CFPM sono sempre maggiori di quelle nelle macchine REPM, la temperatura misurata nell'avvolgimento sarà ovviamente maggiore, specialmente per la configurazione a 8kW con raffreddamento ad aria. D'altra parte la dissipazione di calore complessivo è simile per le due tipologie di macchina da 30kW, poiché le dimensioni e le efficienze sono simili.

### 3.6 – Conclusioni del confronto

Sono state analizzate macchine IPM impiegate per la trazione con magneti a terre rare e macchine con una configurazione simile, ma con l'impiego di magneti permanenti in ferrite. Sono stati successivamente costruiti ed analizzati prototipi con diversi livelli di potenza.

I risultati mostrano che, anche usando le CFPM a costo inferiore, una macchina appositamente progettata potrebbe corrispondere alla maggior parte delle prestazioni ottenute dalla sua omologa più costosa in REPM.

Le capacità di coppia delle macchine con ferriti sono leggermente inferiori quando la velocità è bassa, a causa della saturazione causata dall'utilizzo di più coppia di riluttanza.

Tuttavia, a velocità più sostenuta, questo problema è notevolmente ridotto, specialmente per le macchine di taglia maggiore, a causa della maggiore induttanza.

L'efficienza delle CFPM è leggermente più bassa alle basse velocità con grande coppia a causa delle perdite nel rame maggiori, ma diventa maggiore quando la velocità si fa più sostenuta e la coppia più piccola, a causa della minore corrente di smagnetizzazione e delle minori perdite nel ferro.

Le macchine CFPM offrono maggiore rendimento con carichi più leggeri e più prossimi al valore nominale, quando la coppia PM svolge ruoli più importanti. Esse si riservano anche la possibilità di raggiungere la coppia massima a basso numero di giri con una combinazione di coppia PM e di riluttanza.

Queste performance rendono queste macchine una potenziale alternativa alle costose REPM,offrendo una soluzione a basso costo per alcune applicazioni di trazione veicolari, dove è richiesto che la macchina possa offrire coppia massima a velocità limitata, ma per la maggior parte del tempo essa operi a potenza e coppia inferiori ai valori nominali.

# Capitolo 4 – Applicazioni veicolari – Motore PMSynRM per sostituire il motore IPM della Toyota Prius

## 4.1 - Introduzione

Come visto, le prestazioni delle macchine a magneti permanenti interni (IPM) contenenti terre rare, rendono queste macchine ideali per i sistemi di trazione in veicoli elettrici ed ibridi. Tuttavia, la scarsità e l'elevato costo dei magneti permanenti in terre rare possono rappresentare un problema serio e preoccupante, per il quale sarebbe interessante valutare soluzioni alternative. Si stima infatti che il costo dei magneti permanenti in terre rare superi il 65% del costo totale del materiale utilizzato per la costruzione di una tipica macchina IPM.

Per questo motivo negli ultimi anni sono state studiate diverse soluzioni per superare il problema.

Nel capitolo precedente è stata presentata una semplice sostituzione dei magneti permanenti in un motore IPM, lasciando pressoché inalterati i criteri di funzionamento. In questo capitolo si cercherà di percorrere una strada diversa.

Una macchina sincrona a riluttanza (SynRM), progettata in modo ottimale, potrebbe rappresentare una valida soluzione al problema.

Comparandola con una IPM in terre rare, i vantaggi principali della SynRM stanno proprio nel basso costo e nella facilità di produzione. Infatti, poiché nessun magnete permanente viene usato nel rotore, il costo base risulta significativamente ridotto. Inoltre una SynRM può essere facilmente realizzata con metodi simili a quelli usati per le macchine ad induzione convenzionali, poiché il rotore è fatto semplicemente di lamierini in ferro.

Questa tipologia di macchina presenta però due grossi inconvenienti:

1. Scarsa densità di coppia
2. Elevate oscillazioni di coppia

Grandi sforzi sono stati fatti per risolvere questi due problemi, lavorando per migliorare la struttura magnetica del rotore. Le prestazioni di tale macchina sono quindi molto migliorate negli ultimi due decenni ed ora, se opportunamente progettata, le sue prestazioni risultano persino paragonabili a quelle di una macchina ad induzione.

La produzione di coppia di una SynRM può essere aumentata integrando dei magneti nel rotore.

Come anticipato, se il problema delle terre rare si porterà avanti nei prossimi anni, la SynRM integrata con magneti permanenti in ferrite potrebbe rappresentare un'alternativa da prendere in considerazione, specialmente per le applicazioni veicolari, che richiedono grandi performance e sono particolarmente sensibili ai problemi di costo, che tutt'ora contribuiscono a limitarne la diffusione su larga scala.

In questo studio verrà presa come parametro di riferimento una tipica macchina IPM (il motore Toyota Prius II), per verificare l'effettivo miglioramento di prestazioni di un PMSynRM.

Si inizierà con la valutazione del contributo di coppia di riluttanza dovuto alla salienza del rotore nel motore Prius II. Così facendo ci si potrà accorgere che la macchina IPM sia sostanzialmente un ibrido tra una macchina PM ed una SynRM.

Nel motore Prius II il contributo della coppia di riluttanza alla produzione di coppia totale è notevole e raggiunge circa il 50%.

Uno studio approfondito della distribuzione del flusso magnetico nel motore Prius II può aiutare a trovare possibili soluzioni per incrementare la coppia di riluttanza, senza però ricorrere all'utilizzo delle terre rare. Successivamente la struttura magnetica del rotore di una SynRM verrà modificata per perseguire quanto dichiarato.

Dopo l'ottimizzazione del SynRM verrà studiata la possibilità di inserire nel rotore dei magneti permanenti in ferrite a basso costo, con lo scopo di incrementare ulteriormente la produzione di coppia (PMSynRM).

I due obiettivi principali, come detto, sono quelli di aumentare la coppia resa disponibile ed al contempo diminuirne le oscillazioni.

Per analizzare il comportamento altamente non lineare del SynRM e del PMSynRM viene usato il metodo agli elementi finiti (FEA).

In seguito, l'analisi ed il confronto delle prestazioni e dei costi della IPM e della PMSynRM, saranno usati per una discussione riguardante la possibile sostituzione di una tipologia con l'altra.

## 4.2 – Macchina IPM utilizzata per il motore Prius II

Come anticipato il punto di riferimento per questo studio sarà rappresentato dal motore utilizzato per la seconda generazione delle Toyota Prius ibride (Prius II).

### 4.2.1 - Produzione di coppia

La struttura del motore Prius II è mostrata in figura 4.1.

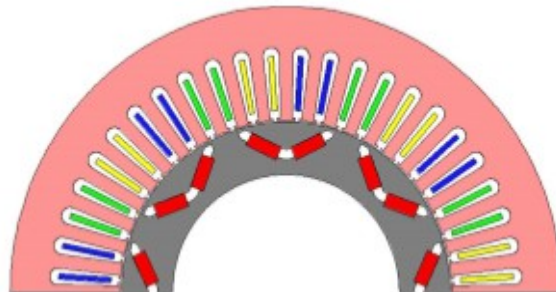


Figura 4.1: Struttura del motore IPM

Il rotore è costituito da un pacco lamierini in ferro, con magneti permanenti in terre rare inseriti all'interno. La coppia prodotta da una macchina IPM di questo tipo può essere espressa da:

$$T_e = \frac{3P}{2} [(L_{ds} - L_{qs})i_{qs}i_{ds} + \lambda_{pm}i_{qs}]$$

In questa equazione l'asse d è allineato con l'asse dei PM.

La produzione di coppia di una macchina IPM consiste dunque in due componenti: uno è dovuto all'interazione tra i magneti permanenti e le correnti di statore, l'altro è dovuto alla salienza del rotore ( $L_{ds}-L_{qs}$ ). Tuttavia va notato come i due componenti non abbiano un angolo di fase comune nel quale possano raggiungere i loro valori nominali.

Rimuovendo i PM dalla macchina di riferimento, quest'ultima è ridotta ad una SynRM, chiamata *Macchina B0*, come è possibile vedere in figura 4.2:

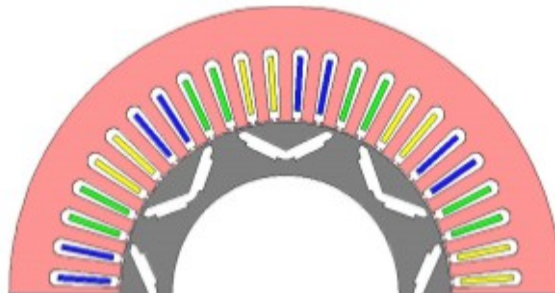


Figura 4.2: struttura della macchina SynRM

Nella macchina B0 ovviamente cambia la quantità di coppia erogata, che ora è uguale a:

$$T_e = \frac{3P}{2} (L_{ds} - L_{qs}) i_{qs} i_{ds}$$

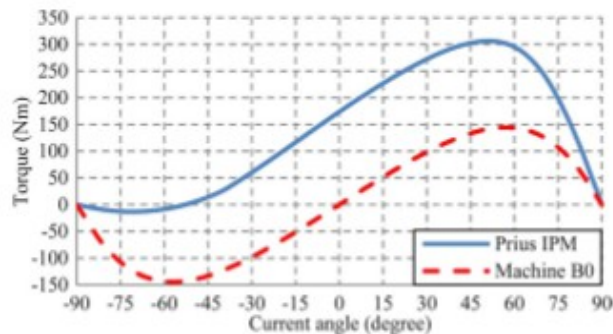
In tabella 4.1 vengono elencate le dimensioni e le condizioni operative fisiche del motore Prius II e della macchina B0:

**TABLE I**  
**DIMENSIONS AND SPECIFICATION OF BENCHMARK PRIUS IPM MACHINE**

Machine	Prius IPM	B0
Stator outer/ inner diameter (mm)	269.2/161.9	269.2/161.9
Rotor outer diameter (mm)	160.4	160.4
Stack length (mm)	83.8	83.8
Rated phase current RMS value (A)	177	177
Rated rotor speed (rpm)	1500	1500
Rare earth magnet mass (kg)	1.23	0
Rated torque (Nm)	305	144
Torque ripple at rated torque (%)	26.2	36.1

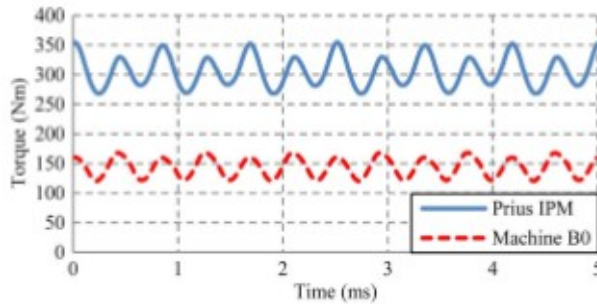
*Tabella 4.1: dimensioni e specifiche della macchina originale*

La quantità di coppia erogata da ogni macchina viene valutata tramite FEM, utilizzando la corrente specificata in tabella, mentre il legame tra la coppia calcolata e l'angolo di fase della corrente di statore è riportato nel grafico in figura 4.3:



*Figura 4.3: andamento della coppia in funzione dell'angolo di fase della corrente*

Il grafico in figura 4.4 mostra invece l'oscillazione di coppia quando si è in condizioni nominali:



*Figura 4.4: andamento delle oscillazioni di coppia in funzione del tempo*

Dai risultati della FEM possono essere fatte delle osservazioni interessanti:

- La macchina IPM ha una coppia nominale di 305 Nm, che si verifica con angolo di  $53^\circ$
- La coppia nominale della macchina B0 vale 144 Nm e si verifica con angolo di  $57^\circ$
- La coppia di riluttanza prodotta dalla IPM contribuisce per quasi il 50% alla coppia totale.
- L'oscillazione della coppia dovuta alla riluttanza è significativa e raggiunge il 36% della coppia di riluttanza nominale.
- L'oscillazione della coppia della macchina IPM deriva prevalentemente dai componenti di ripple associati alla coppia di riluttanza.

Ottimizzando la macchina è possibile aumentare il valore della coppia di riluttanza prodotta, ma questo potrebbe risultare in contrasto con l'esigenza di limitare le oscillazioni. La vera sfida per questo studio sarà proprio andare a trovare una soluzione che limiti entrambi i problemi.

#### **4.2.2 - Distribuzione del campo nella macchina B0**

La distribuzione del campo e la densità del flusso per la macchina B0 vengono calcolati dal FEM e sono mostrati in figura 4.5, che mostra i risultati per i casi in cui la FMM di statore sia allineata rispettivamente con l'asse q del rotore (minor riluttanza) e con l'asse d (maggior riluttanza).

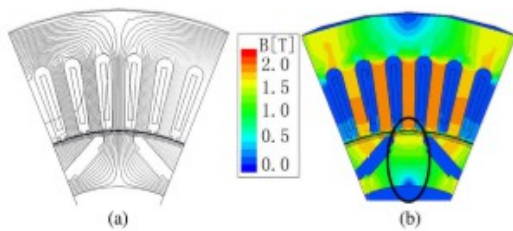


Fig. 5. Field distribution in the  $q$ -axis ( $0^\circ$ ) of Machine B0. (a) Flux lines. (b) Flux density.

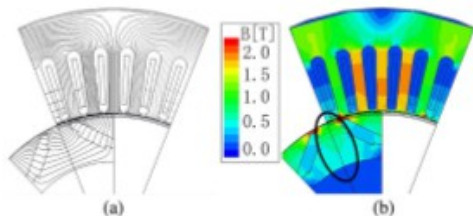


Fig. 6. Field distribution in the  $d$ -axis ( $90^\circ$ ) of Machine B0. (a) Flux lines. (b) Flux density.

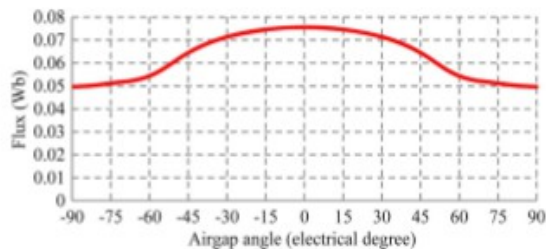


Fig. 7. Flux lines per pole of Machine B0.

#### Figura 4.5

Esaminando le figure 5b e 6b all'interno della figura 4.5, si può notare come la densità di flusso nel rotore sia molto bassa in entrambi i casi, in particolar modo nella zona cerchiata. Da questa osservazione si può pensare di sostituire questa zona a bassissima densità di flusso con un materiale non magnetico (ad esempio aria) senza alterare la densità di flusso nell'asse  $q$ . Nel frattempo le linee di flusso sull'asse  $d$  decresceranno significativamente.

Pertanto la distribuzione del campo magnetico desiderata per aumentare la salienza e quindi la coppia di riluttanza, può essere raggiunta nel modo descritto.

In figura 5 e 6 all'interno di figura 4.5 vengono mostrati i due casi limite provocati dal movimento dello statore. La differenza tra flusso sull'asse  $d$  e flusso sull'asse  $q$  risulta circa  $0,028\text{Wb}$ .

### 4.3 - Ottimizzazione della SynRM

I risultati raccolti nella sezione precedente verranno ora utilizzati per ottimizzare il campo magnetico della SynRM. Per aumentare la coppia prodotta da quest'ultima, secondo l'equazione di coppia vista in precedenza, la struttura magnetica deve essere progettata in modo tale per cui la differenza tra  $L_d$  ed  $L_q$  sia il più grande possibile. Dal momento che la somma delle linee di flusso per polo è direttamente proporzionale alla relativa induttanza, nel seguente calcolo vengono utilizzate le linee di flusso al traferro invece che l'induttanza.

#### 4.3.1 - Effetto delle barriere per il flusso sulla produzione di coppia

Come già detto precedentemente, l'area cerchiata in figura 6b contenuta in figura 4.5 potrebbe

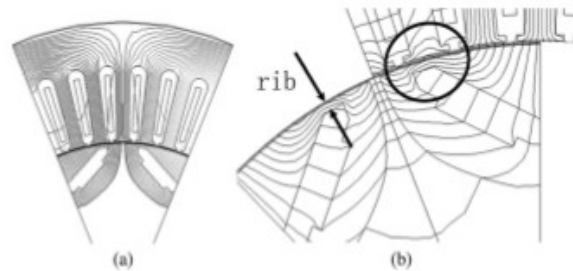


Fig. 8. Flux-line distribution of Machine B1 in the (a)  $q$ -axis and the (b)  $d$ -axis.

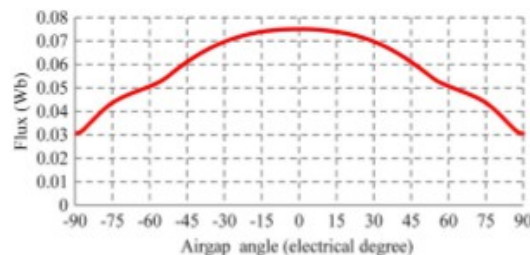


Fig. 9. Flux lines per pole of Machine B1.

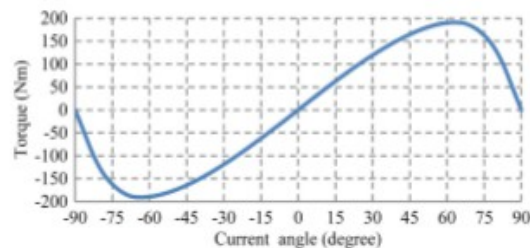
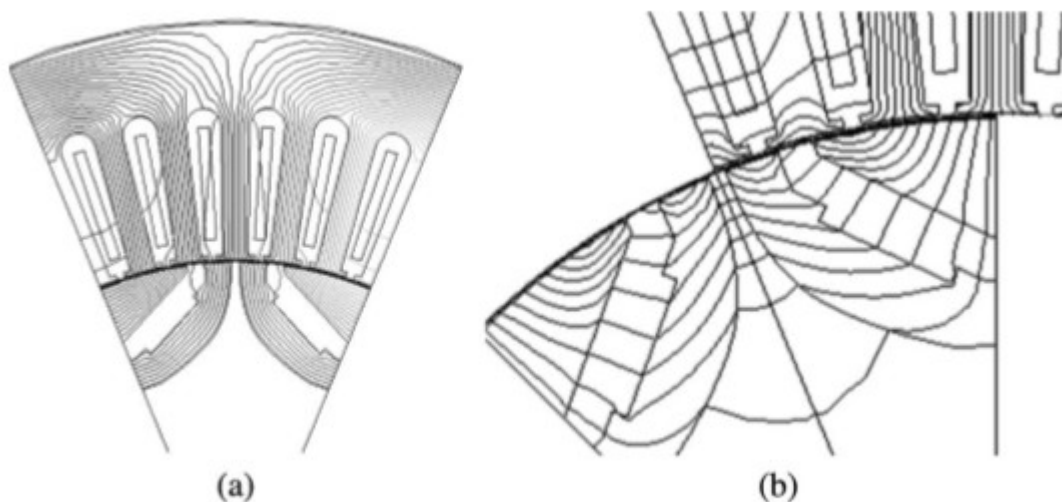


Fig. 10. Torque production of Machine B1.

essere sostituita da aria, che si comporterebbe come una barriera magnetica in quella posizione. Le modifiche vengono mostrate in figura 8 contenuta in figura 4.5 ed ora la macchina prende il nome di *Macchina B1*. Vengono quindi calcolate le linee di flusso alle varie posizioni angolari ed i risultati sono riportati nel grafico in figura 9 contenuta in figura 4.5 e vanno da 0,3 a 0,75Wb per polo. Analizzando i risultati in figura 7 e 9 contenute in figura 4.5 è possibile estrarre la componente fondamentale delle linee di flusso del traferro. Questa sull'asse q presenta un aumento del 1,3%, mentre sull'asse d le linee di flusso diminuiscono del 18,4%. La differenza fra i flussi dei due assi quindi aumenta del 35,7%, vale a dire che raggiunge un valore compreso tra 0,028e 0,038Wb. Di conseguenza la coppia di riluttanza ha un aumento previsto del 35,7%. Questo aumento è verificato nella curva di produzione della coppia in figura 10 contenuta in figura 4.5. Confrontando questi ultimi risultati con quelli iniziali senza modifiche si può vedere come la coppia di riluttanza sia aumentata da 144 Nm (macchina B0) a 194Nm (macchina B1), il che si traduce in un aumento del 34,7%. Questo risultato è dunque vicino al valore 37,5 previsto. Inoltre l'angolo di fase per il quale si raggiunge la coppia di riluttanza nominale si è spostato da 57° a 65°.

#### 4.3.2 - Effetto dei ponticelli sulla produzione di coppia

Poiché i ponticelli (*rib*, che vengono evidenziate in figura 8b contenuta in figura 4.5) forniscono un percorso a minore riluttanza per le linee di flusso sull'asse d, è ragionevole pensare di progettare ponticelli più sottili per produrre coppia di riluttanza superiore. Come mostrato in figura 8b, alcune di queste linee attraversano i ponticelli e tornano nello statore senza penetrare a fondo nel nucleo del rotore. Si può dunque pensare che la rimozione dei ponticelli possa creare una piccola crescita della coppia di riluttanza prodotta. E' stato dunque creato un nuovo modello chiamato *Macchina B2*, nella quale i ponticelli sono stati rimossi, come si può vedere in figura 4.6.



Flux-line distribution of Machine B2 in the (a) q-axis and the (b) d-axis.

Figura 4.6: macchina B2 con ponticelli rimossi

Viene verificato che la nuova struttura produce un aumento del 8% per quanto riguarda la quantità di coppia erogata, cioè da 194 a 210Nm.

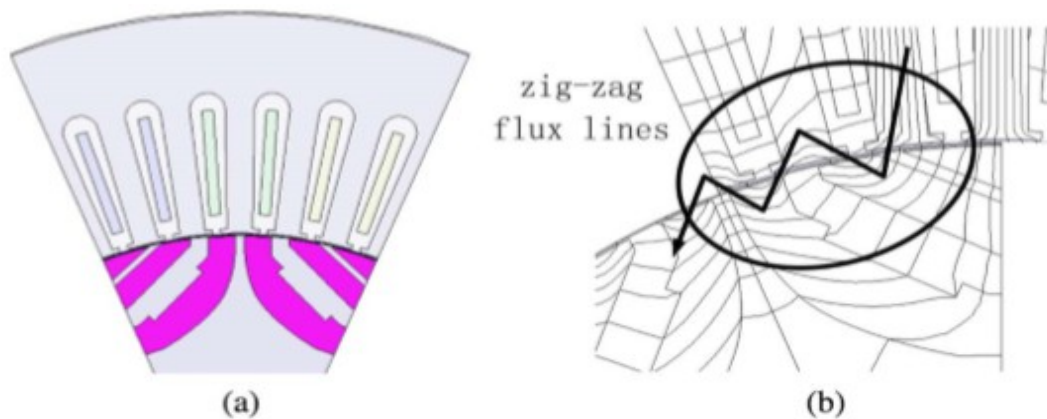


### 4.3.3 - Effetto della saturazione sulla produzione di coppia

Come discusso in precedenza, l'aggiunta di barriere al rotore provoca una sostanziale riduzione del flusso sull'asse d. Tuttavia anche il flusso sull'asse q potrebbe calare nello stesso momento. Questo sarebbe ovviamente controproducente nei confronti dell'aumento di salienza del rotore.

Una soluzione potrebbe essere quella di continuare a ridurre la quantità del ferro nella laminazione del rotore, fino a quando le linee di flusso sull'asse q non risultino significativamente influenzate.

In figura 4.7 è mostrata la struttura di rotore (*Macchina B3*) utilizzata per perseguire questo obiettivo.



(a) Machine B3 structure. (b) Details of the flux-line distribution in the d-axis.

Figura 4.7: struttura della macchina B3

La tabella 4.2 riassume i risultati ottenuti con le modifiche delle macchine B0, B1, B2 e B3.

TABLE II  
COMPARISON BETWEEN MACHINES B0, B1, B2, AND B3

Machine	B0	B1	B2	B3
$\lambda_q$ (Wb)	0.077	0.078	0.078	0.075
$\lambda_d$ (Wb)	0.049	0.040	0.036	0.035
$(\lambda_q - \lambda_d)$ (Wb)	0.028	0.038	0.042	0.040
$T_{rated}$ (Nm)	144	194	211	225

$\lambda_q$ : q-axis flux lines;

$\lambda_d$ : d-axis flux lines;

$T_{rated}$ : rated torque production.

Tabella 4.2: comparazione delle macchine B0, B1, B2 e B3

Si può notare una caduta del 5% del flusso sull'asse q passando da B2 a B3. Questo perché è stato tolto troppo materiale dal rotore in ferro e questo è andato in saturazione, rendendo quindi non valide le previsioni fatte in ipotesi di linearità.

#### 4.3.4 - Minimizzazione delle oscillazioni di coppia

L'elevata ondulazione di coppia è un problema serio per le SynRM e l'oscillazione è associata all'interazione tra i denti e le cave di statore e rotore. I risultati di queste interazioni sono variabili a seconda della posizione relativa tra statore e rotore della macchina.

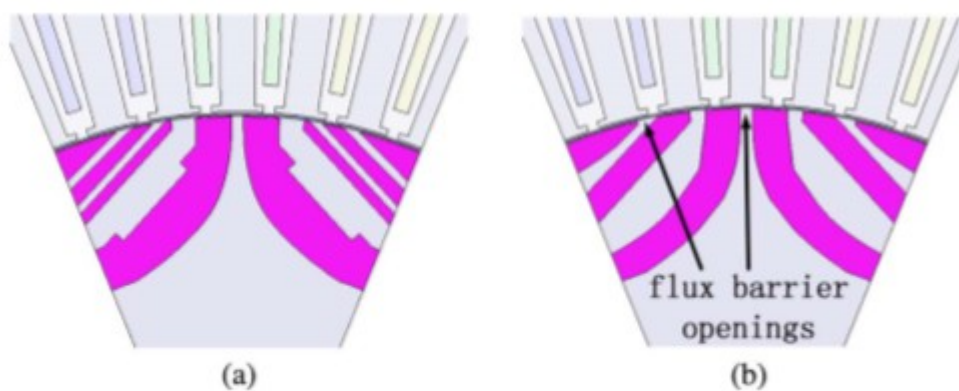
Per minimizzare le oscillazioni di coppia è importante mantenere la stessa quantità di linee di flusso per polo durante il funzionamento stazionario, mentre il rotore è in rotazione.

E' verificato come le aperture di rotore abbiano una significativa influenza sulle oscillazioni di coppia. Come mostrato dalla *Macchina B3*, specificatamente nell'area cerchiata di figura 4.7, il flusso a zig-zag introduce oscillazioni di coppia.

Per ridurre queste oscillazioni sono stati studiati due approcci:

1. Aggiungere ulteriori barriere di flusso nel nucleo del rotore.
2. Regolazione delle barriere di flusso già esistenti.

Questi due metodi vengono mostrati in figura 4.8 e la macchina di figura 4.8b prenderà il nome di *macchina B4*.



Approaches to suppressing SynRM torque ripple. (a) Additional flux barrier. (b) Flux barrier opening adjustment (Machine B4).

Figura 4.8: approcci per ridurre le oscillazioni di coppia

Il primo approccio però potrebbe abbassare il flusso lungo l'asse  $q$ , poiché le ulteriori barriere ridurrebbero il percorso del flusso e quindi saturerebbero il rotore.

Per questo è stata scelta la seconda strada. Infatti, regolando la larghezza delle aperture delle barriere di flusso (figura 4.8b), la variazione delle linee a zig-zag viene minimizzata quando il rotore ruota. La forma d'onda della coppia nominale di *B3* viene quindi confrontata con quella della *Macchina B4* nella figura 4.9.

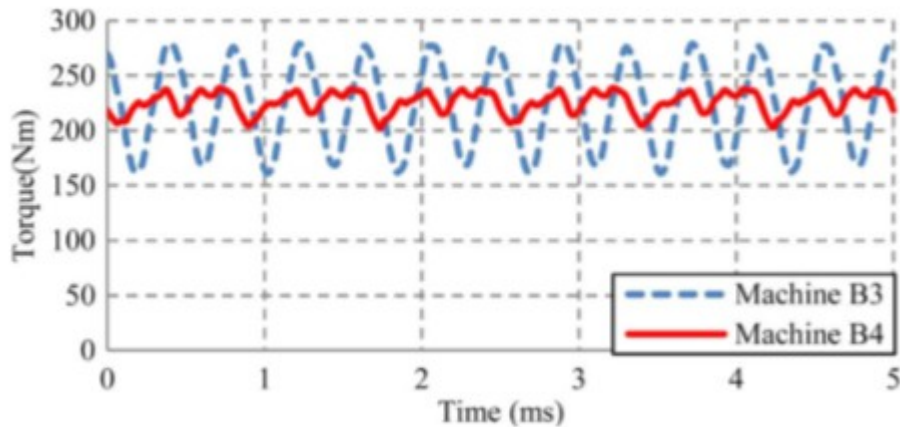


Figura 4.9: confronto delle oscillazioni di coppia

Risulta evidente come la quantità di oscillazioni di coppia sia stata efficacemente diminuita, passando dal 51,8% al 15,7%. Va notato che la *Macchina B4*, come mostrato in figura 13b, è solo una delle tante possibili soluzioni che possono essere utilizzate. Fermo restando il soddisfare i principali requisiti di progettazione precedentemente descritti, è possibile modificare il design della macchina secondo determinate esigenze.

#### 4.4 - Inserzione dei magneti permanenti in ferrite nella struttura della SynRM

Per migliorare ulteriormente la produzione di coppia, come già anticipato, si procede all'inserzione di magneti permanenti in ferrite all'interno del rotore della SynRM, i quali andranno a prendere il posto dei magneti permanenti in terre rare che erano presenti nella IPM iniziale.

La struttura magnetica del rotore, al fine di poter ospitare i PM in ferrite, è stata modificata coi passaggi descritti in precedenza e la struttura è riportata in figura 4.10.

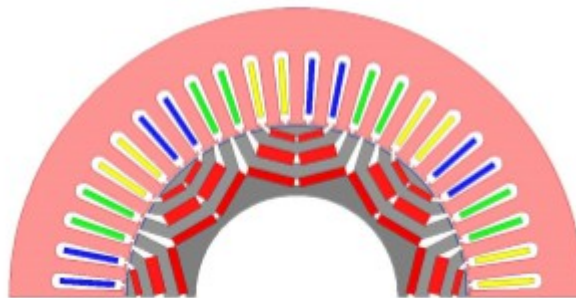


Fig. 15. Ferrite PM-assisted SynRM.

Figura 4.10: struttura della PMSynRM

I costi approssimativi delle materie prime per il motore Prius IPM e per il loro corrispettivo in PMSynRM con ferrite vengono riportati in tabella 4.4.

TABLE IV  
APPROXIMATE RAW MATERIAL COSTS COMPARISON

	Prius IPM	PMaSynRM
Copper (\$/kg)*(kg)	$8*7 = 56$	$8*7 = 56$
Silicon steel (\$/kg)*(kg)	$1*29 = 29$	$1*29 = 29$
Magnets (\$/kg)*(kg)	$100*1.23=123$	$7*2= 14$
Total cost (\$)	208	99
Magnets (% of Total cost)	59	14
Total cost (%)	100	48

Tabella 4.4: costi

Come si può notare, il NdFeB per i PM in terre rare del motore Prius IPM contribuisce a circa il 60% del costo totale. L'uso di ferrite per i magneti ridurrà questo costo totale di almeno il 50% per una macchina equivalente.

La quantità di coppia erogata dal PMSynRM proposto è valutata utilizzando il FEM. La curva risultante è riportata in figura 4.11.

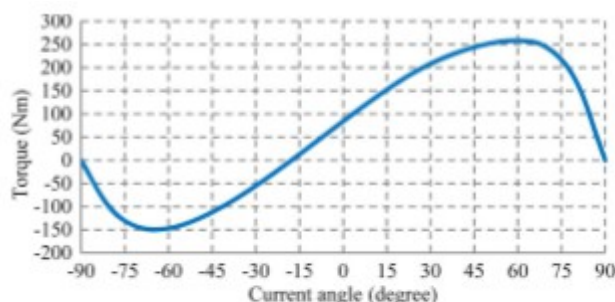


Fig. 16. Torque production of PMSynRM.

Figura 4.11: coppia prodotta dalla PMSynRM

I risultati ottenuti dimostrano che il valore della coppia nominale è aumentato a 258Nm, che rappresenta circa l'85% della coppia nominale del motore Prius IPM per la stessa corrente di fase (177Arms). La coppia di riluttanza (218Nm) contribuisce all'84% della coppia totale prodotta.

Finora, avendo tenuto il motore Prius IPM come punto di riferimento, la competitività della PMSynRM, ottenuta tramite un processo ottimale di progettazione, è stata dimostrata.

La tabella 4.5 riassume e confronta le prestazioni della macchina originale IPM e della PMSynRM progettata in modo ottimale.

**TABLE V**  
**RATED SPEED PERFORMANCE COMPARISON**

	Prius IPM	PMSynRM
Rated phase current RMS value (A)	177	177
Rated torque (Nm)	305	258
Torque ripple at rated torque (%)	26	13
Copper loss (kW)	3	3
Power at 1500rpm (kW)	48	41
Efficiency (%)	89	87

*Tabella 4.5: comparazione delle performance alla velocità nominale*

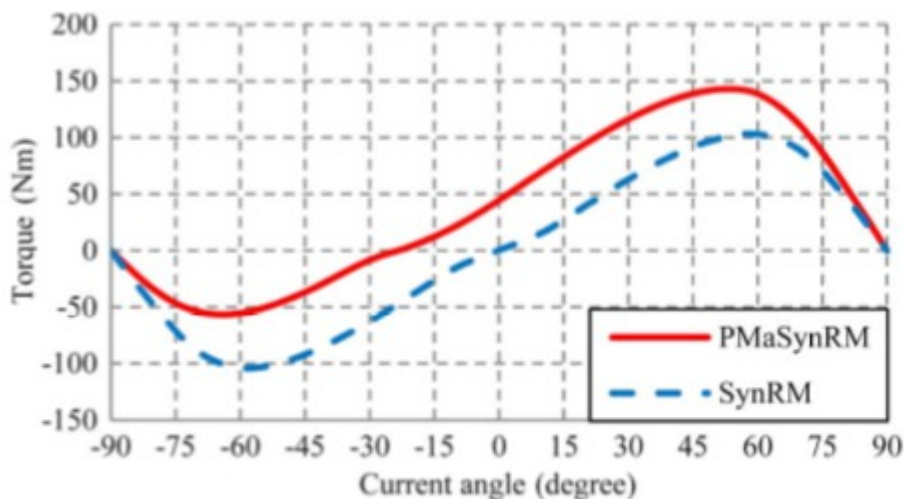
Nella tabella 4.5 si presume che tutte le perdite siano uguali alle perdite nel rame. Su base di questo presupposto è stata quindi calcolata l'efficienza delle due macchine.

La coppia nominale della PMSynRM è circa 85% di quella del motore di riferimento, con una riduzione delle oscillazioni del 50%.

Come già detto, il costo dei materiali in seguito alla eliminazione delle terre rare si è all'incirca dimezzato.

Inoltre è sicuramente degno di nota il fatto che la nuova configurazione con ferrite renderà meglio alle temperature più elevate, dato che i PM in ferrite hanno tolleranza di temperatura più alta (300°C) rispetto a quella dei PM in terre rare (80-130°C).

I risultati FEM della produzione di coppia alla corrente di fase nominale sono riportati in figura 4.12, dalla quale può vedere che il 73% della coppia totale (142Nm) è contribuito della corrispettiva coppia di riluttanza (104Nm).

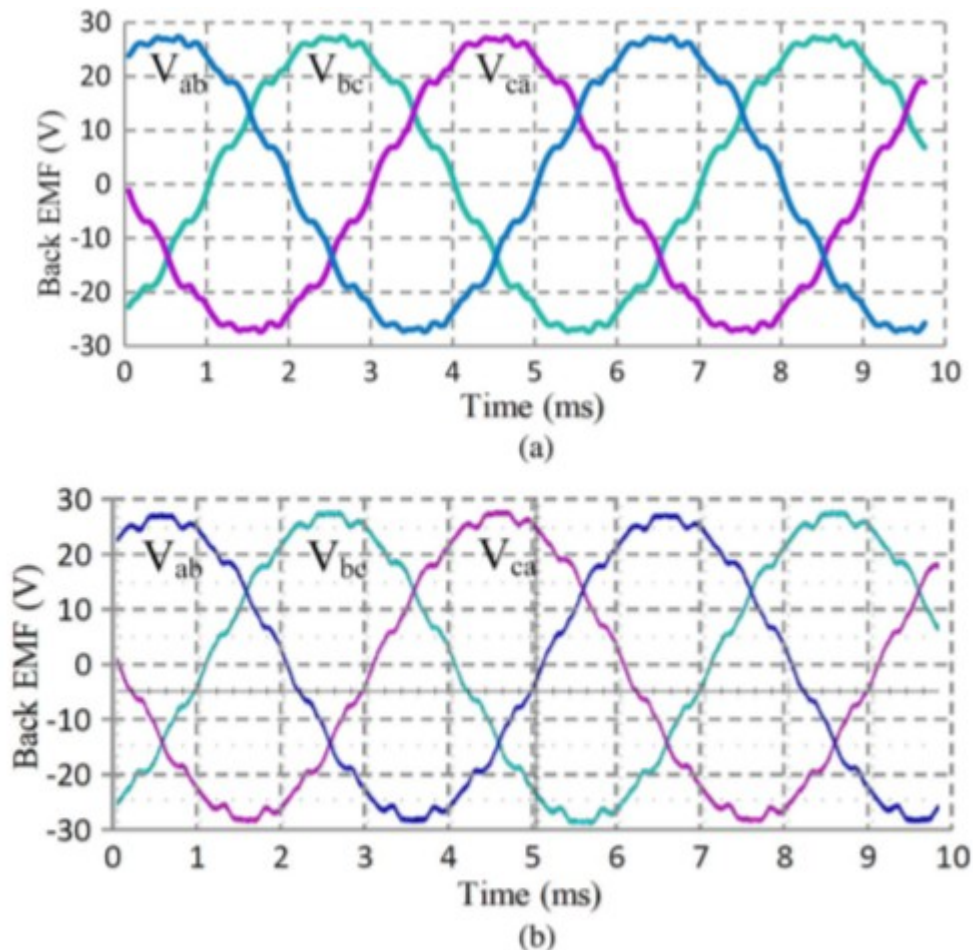


*Figura 4.12: Risultati della FEM per la produzione di coppia*

## 4.5 - Test Sperimentali

Il prototipo di macchina è stato costruito secondo le modalità sopra esposte e successivamente è stato testato per verificare nella pratica i risultati precedentemente predetti.

In figura 4.13 sono messi a confronto i risultati, in termini di forza contro elettromotrice indotta, del test a 2500 giri/min. con quelli ottenuti con FEM nelle medesime condizioni.



Back-EMF (line-to-line) waveform of the prototype at 2500 r/min.  
(a) FEM result. (b) Test result.

Figura 4.13: confronto tra i risultati della FEM (a) e dei test (b) – Forza contro elettromotrice

I risultati del test corrispondono a quelli previsti tramite FEM e si può notare il basso contenuto armonico delle onde.

In figura 4.14 vengono confrontati i valori previsti da FEM con i risultati del test per quanto riguarda la coppia prodotta come funzione della corrente di fase.

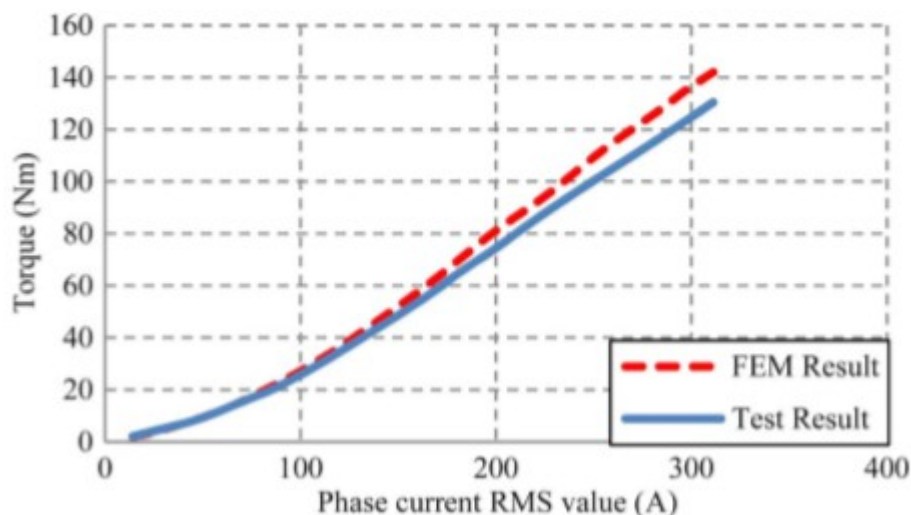


Figura 4.14: Confronto tra risultati dell'analisi FEM e del test - Coppia prodotta

Anche in questo caso i risultati del test coincidono piuttosto bene con quelli previsti da FEM. Come si vede i risultati dei test sono in perfetto accordo con quelli FEM quando la corrente è al di sotto di 85A. Oltre questo valore la produzione effettiva di coppia è leggermente inferiore a quanto preventivato, con valori di riduzione che vanno dal 4% al 7%.

Ciò è dovuto a:

1. lavorazioni meccaniche per le modifiche del rotore
2. effetti 3D non considerati dal modello 2D FEM.
3. Errori di misura nel test

Nonostante ciò la distanza tra previsioni e risultati è sufficientemente piccola da essere accettabile. E' stato effettuato anche un test di efficienza sul prototipo e ne è risultato che a velocità nominale l'efficienza della macchina è del 95%. Questo test indica anche come, in presenza di un adeguato controllo, la macchina possa operare ad alta efficienza in un ampio intervallo di velocità.

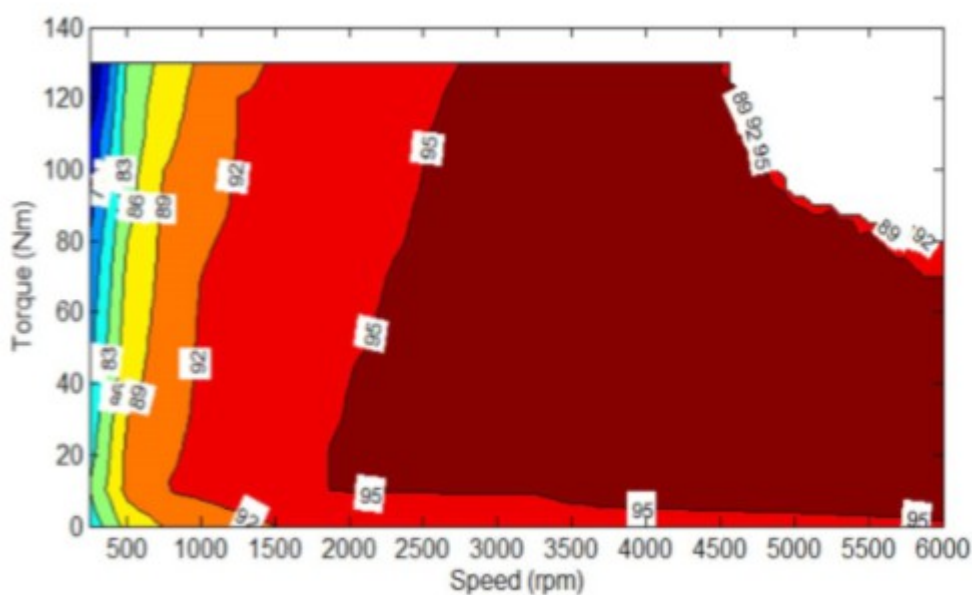


Figura 4.15: mappa di efficienza

Al fine di confrontare meglio il prototipo con la macchina originale e di verificare il metodo di ottimizzazione proposto, le dimensioni e le condizioni operative della nuova macchina, i risultati sono stati ottimizzati in un sistema unitario con il motore Prius come riferimento. I dati sono riportati nella tabella successiva:

**TABLE VI**  
**COMPARISON BETWEEN PRIUS IPM AND PROTOTYPE PMASYNRM**

Dimension and Performance in p.u.	Prius IPM	Prototype
Machine size	1	1.27
Rated phase current	1	1
DC bus voltage	1	1
Rated torque	1	1
Rated speed	1	1.11
Rated Power	1	1.11
Torque density	1	0.80
Efficiency at rated speed rated torque	89%	90%

*Tabella 6: confronto finale*

La densità di coppia del prototipo è circa pari all'80% di quella della macchina IPM di riferimento. Tuttavia è evidente come l'efficienza della macchina prototipo sia leggermente superiore. Questo accade perché rispetto alla macchina di figura 4.10 nel prototipo sono state aggiunte le seguenti modifiche per avere un migliore funzionamento ad alta velocità (6000 giri/min):

- Sono state aggiunte nervature alla laminazione del rotore
- Il traferro è stato ampliato a 0,8mm per evitare il contatto tra statore e rotore alle alte velocità
- Si adotta un passo più piccolo per minimizzare le armoniche di tensione e le perdite ad alta frequenza.

Tutti questi compromessi si tradurranno però in una coppia lievemente più bassa.



## 4.6 – Conclusioni

Questo studio ha presentato la fattibilità della sostituzione di una macchina IPM con una meno costosa macchina PMSynRM, adattata per soddisfare in maniera ottimale le esigenze dell'applicazione veicolare.

L'approccio è stato soprattutto di tipo teorico con il FEM, ma non è mancata una verifica in laboratorio.

I due aspetti più critici per la macchina PMSynRM (ovvero la densità di coppia relativamente bassa e le alte oscillazioni di coppia) sono state mitigate attraverso delle soluzioni di ottimizzazione.

Questo studio ha rivelato che il contributo di riluttanza alla produzione della coppia totale è elevato (50%) anche nella macchina IPM usata come riferimento. L'esame dettagliato del campo magnetico per la macchina di riferimento ha quindi rivelato che la coppia di riluttanza della macchina PMSynRM può essere significativamente aumentata.

Le modifiche hanno permesso di migliorare questo parametro, aumentando fino al 56% la coppia di riluttanza prodotta (da 144 a 225Nm) rispetto al parametro di riferimento.

Inoltre, con l'aiuto di poco costosi magneti permanenti in ferrite la produzione di coppia è salita fino a 285Nm, cioè l'85% della coppia nominale della macchina IPM di riferimento.

Questo studio ha anche dimostrato che le oscillazioni di coppia possono essere minimizzate sopprimendo i flussi zig-zag interni al SynRM, tramite un'efficace regolazione delle barriere di flusso interne.

Nonostante la capacità di coppia della macchina progettata sia effettivamente inferiore del 15% rispetto a quella contenente terre rare, il costo totale del materiale risulta dimezzato e la stabilità termica alle alte temperature è senza dubbio migliorata (da 80-180 °C a 300 °C).

Il PMSynRM è quindi in grado di fornire una valida alternativa alla macchina contenente terre rare nelle applicazioni riguardanti veicoli elettrici ed ibridi, ora si tratta di studiare quali materiali in ferrite si adattino di più a questa sostituzione e questo verrà fatto in breve tempo con altri studi.



# Capitolo 5 – Creazione di un prototipo e test su un motore PMSynRM usato per applicazioni automobilistiche

## 5.1 – Caratteristiche della macchina proposta

### 5.1.1 – Obiettivi dell'analisi

La tabella I mostra le specifiche di un motore sincrono a magneti permanenti interni (IPMSM) usato nella Toyota Prius 2003, che utilizza magneti permanenti in terre rare (NdFeB) e già incontrato nel capitolo precedente.

TABLE I  
HEV IPMSM AND TARGET

Item [Unit]	Value
Stator outer diameter [mm]	269
Stack length [mm]	83.6
Air gap length [mm]	0.8 *
Winding type	Distributed
Slot fill factor [%]	57
Max. DC side voltage [V]	500
Max. current [Arms]	180-200 *
Max. current density [Arms/mm <sup>2</sup> ]	18-20 *
Max. torque [Nm]	400
Max. output power [kW]	50
Base speed [r/min]	1200
Max. speed [r/min]	6000
Power density [kW/L]	10.5
Max. efficiency [%]	95*

\* estimated value [16]-[18]

Tabella 5.1: caratteristiche della macchina base

La potenza massima in uscita è 50kW. La velocità base e quella massima sono rispettivamente 1200 e 6000 giri al minuto. Il volume del nucleo di motore è 4,75dm<sup>3</sup>. La densità di potenza è 10,5kW/dm<sup>3</sup>. L'efficienza massima di questo motore è stimata con un valore del 95%.

Il proposito di questa analisi è la sostituzione dei magneti permanenti in NdFeB con quelli in ferrite. Come visto nel capitolo precedente, questa sostituzione risulta essere possibile per l'applicazione considerata, a patto di un'ottimizzazione della macchina.

L'obiettivo dichiarato è quello di raggiungere una densità di potenza pari a 10 kW/dm<sup>3</sup> ed una efficienza massima del 95%.

### 5.1.2 - PMASynRM con magneti in ferrite proposta

Le specifiche della macchina proposta sono elencate in tabella 5.2.

TABLE II  
SPECIFICATIONS OF THE PROPOSED PMASynRM

Item [Unit]	Analysis model	Prototype model
Number of poles	8	
Stator outer diameter [mm]	250	
Rotor outer diameter [mm]	169.1	
Stack length [mm]	40	20
Air gap length [mm]	0.9	
Winding type	Distributed	
Slot fill factor [%]	46.6	46.1
Max./rated stator current [Arms]	100 / 50	50 / 25
Max./rated current density [Arms/mm <sup>2</sup> ]	15 / 7.5	
Number of turns per slot	11	22
Iron lamination	35H300	
PM material	Ferrite (NMF12G)	
Coercive force of PM [kA/m]	342(20°C)	
Max. speed [r/min]	10000	

Tabella 5.2: caratteristiche della macchina proposta.

TABLE III  
COMPARISON OF HEV IPMSM AND THE PROPOSED PMASynRM

Item [Unit]	HEV IPMSM	Proposed PMASynRM
PM material	NdFeB	Ferrite (NMF12G)
PM volume per core volume [%]	3.44	9.23
Maximum stator current [Arms]	180-200	100
Maximum stator voltage [Vrms]	390 <sup>*1</sup>	306 <sup>*2</sup>
Maximum apparent power [kVA]	121-135	53
Maximum output power [kW]	50	20 (target)
Maximum output power per maximum apparent power	0.413-0.370	0.377

\*1 square-wave operation, \*2 triangle-comparison-based PWM

Tabella 5.3: confronto

La forza coercitiva della ferrite è pari a 342kA/m a 20°C. Questo valore è circa pari ad 1/3 di quella di un magnete contenente terre rare. Considerando la fattibilità, il traferro è settato ad una lunghezza pari a 0,9mm, rimanendo quindi più largo che nella configurazione IPMSM. Considerando il raffreddamento della macchina, la massima densità di corrente è fissata ad un valore di 15Arms/mm<sup>2</sup>, che è minore rispetto al caso standard. A causa di una progettazione prudente, la caratteristica di coppia della macchina proposta diventerebbe svantaggiosa se comparata con quella

del modello IPMSM.

D'altro canto sembrerebbe che le perdite nel ferro di questo nuovo modello siano più contenute, poiché l'induzione dovuta alla ferrite è più bassa.

La velocità massima della PMASynRM è settata ad un valore di 10000 giri al minuto, maggiore di quello della IPMSM.

Il volume del nucleo è pari a  $1,96\text{dm}^3$ , la potenza in uscita è fissata ad un valore di 20kW per ottenere una densità di potenza paragonabile a quella del caso base.

In tabella 5.2 il prototipo risulta diverso dal modello ottenuto dall'analisi in qualche punto.

La lunghezza di stack del prototipo è pari a 20mm, che è la metà del modello di analisi. Questo valore è stato scelto perché la massima potenza in uscita diventa minore di 10kW, che è il massimo valore che può essere sperimentato in queste condizioni di test. Così, per rimanere sugli stessi valori di densità di corrente, il numero di avvolgimenti per slot e la corrente nominale sono portati rispettivamente a 22 e 25A. Ne consegue che la potenza nominale e quella massima diventano rispettivamente 5 e 10kW.

La tabella 5.3 mostra un paragone tra la macchina IPMSM e la macchina PMASynRM proposta, per quanto riguarda i magneti utilizzati e la capacità di potenza.

Il volume dei PM utilizzati nel caso in ferrite è pari a 2,7 volte quello del caso in NdFeB. Comunque il costo della ferrite è estremamente più basso.

La massima tensione di statore della PMSM è pari a 390Vrms, perché la macchina è alimentata tramite un'onda quadra. La PMASynRM è alimentata da un'onda triangolare e la tensione massima di statore è pari a 306Vrms.

Dalla tabella 5.3 è possibile notare come la massima potenza in uscita per massima potenza apparente sia simile per le due configurazioni.

In figura 5.1 viene mostrata la struttura della PMASynRM con otto poli e magneti in ferrite.

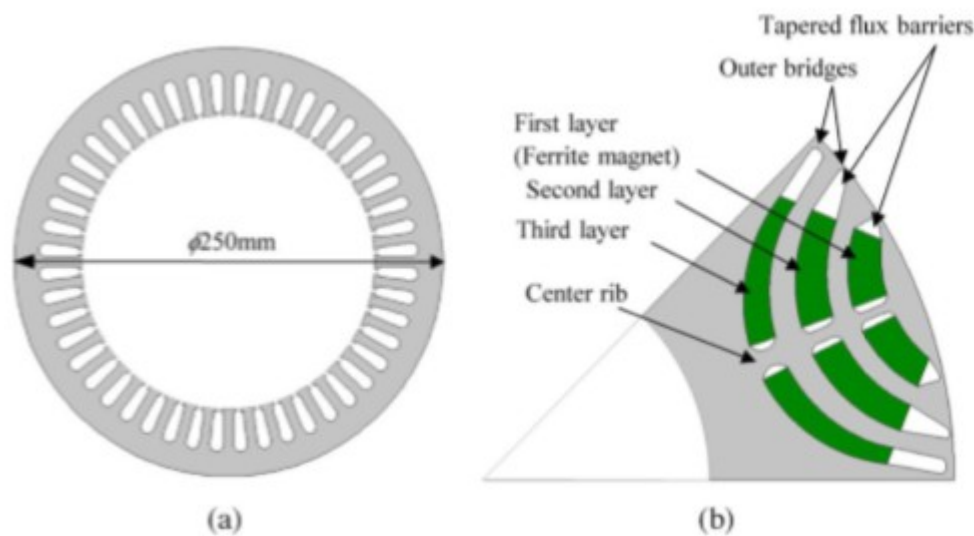


Figura 5.1: Struttura della PMASynRM

Lo statore ha 48 cave. Il rotore presenta barriere di flusso rastremate per ridurre l'effetto della reazione di armatura sui PM e prevenire una smagnetizzazione irreversibile. La struttura di rotore è stata disegnata appunto per evitare il presentarsi di quest'ultimo problema e per garantire sforzi meccanici non troppo pesanti.

### 5.1.3 - Risultati dell'analisi: smagnetizzazione irreversibile sui magneti permanenti

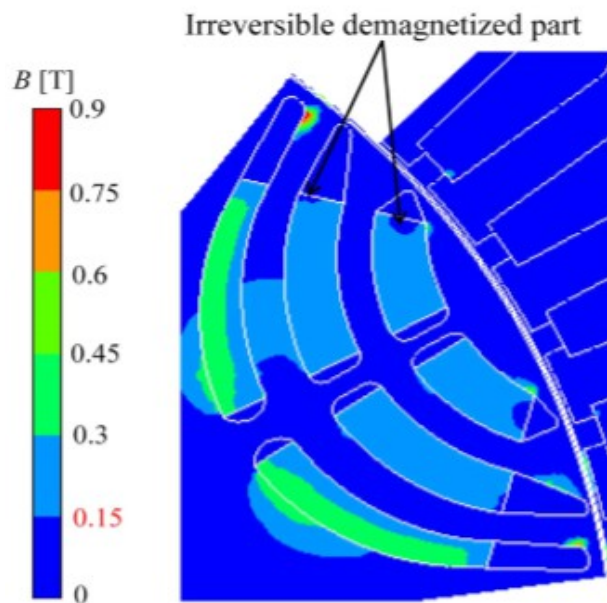


Fig. 2. Contour plots of flux density at 150 A.

*Figura 5.2: mappa di smagnetizzazione irreversibile*

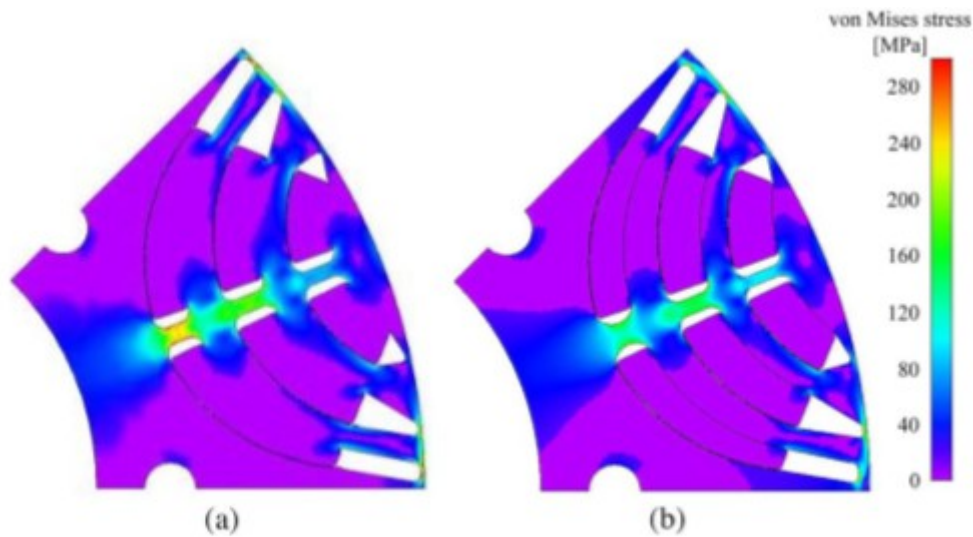
La smagnetizzazione irreversibile dei magneti in ferrite viene esaminata basandosi sul grado di smagnetizzazione, definito come l'ammontare dei magneti affetti da smagnetizzazione irreversibile rispetto al totale. Per assumere le condizioni più gravose la temperatura viene settata a  $-40^{\circ}\text{C}$ . La corrente è assunta pari a 150A, valore corrispondente a 1,5 volte la massima corrente. L'induzione critica per la smagnetizzazione irreversibile viene assunta, a  $-40^{\circ}\text{C}$ , pari a 0,15T.

La costruzione del rotore è stata pensata appunto per evitare questo fenomeno, come riportato in figura 2, che mostra la distribuzione dell'induzione a 150A.

Si può notare come parte dei magneti della prima e seconda fila sia interessata da questo fenomeno, ma che il grado di smagnetizzazione si attesta a valori minori del 10%. Viene quindi confermato che la smagnetizzazione irreversibile non avviene nelle condizioni di esercizio più gravose.

#### 5.1.4 - Risultati dell'analisi: sforzo meccanico sul rotore

Gli sforzi meccanici sul rotore sono esaminati con un programma FEM. La figura 5.3 mostra la distribuzione dello stress alla massima velocità di 10000 giri al minuto.



Distribution of von Mises stresses at 10000 r/min. (a) Rotor\_A.  
(b) Rotor\_B (proposed rotor structure).

Figura 5.3: distribuzione dello stress alla massima velocità

Cambiando l'ampiezza dei ponti esterni e delle costole centrali si può passare dalla configurazione *Rotore A* a quella *Rotore B*, con un decadimento del valore dello stress del 58%. Per questo la struttura *Rotore B* sarà d'ora in poi quella proposta.

Inoltre, la coppia massima espressa da *Rotore B* è pari al 97% di quella della configurazione con *Rotore A* in caso di massima corrente (100A).

E' stato confermato che la struttura proposta di rotore (B) resiste alla forza centrifuga alla massima velocità di 10000 giri al minuto.

L'analisi della struttura proposta è stata effettuata tramite FEM 2D e sono stati ottenuti i seguenti risultati:

1. La potenza massima esprimibile è di 35kW a 100 A e supera i 20kW alla velocità massima
2. La densità di potenza è simile a quella del modello IPMSM
3. L'efficienza della macchina si attesta su valori superiori al 90%, con una efficienza massima di 97,2% e questo valore è addirittura superiore al corrispettivo IPMSM.

## 5.2 - Test sul prototipo

### 5.2.1 – Presentazione del prototipo e dell'esperimento

Un prototipo di PMASynRM è stato poi realizzato e le sue performance sono state analizzate e discusse. Le fotografie dei nuclei di statore e rotore sono riportate in figura 5.4.

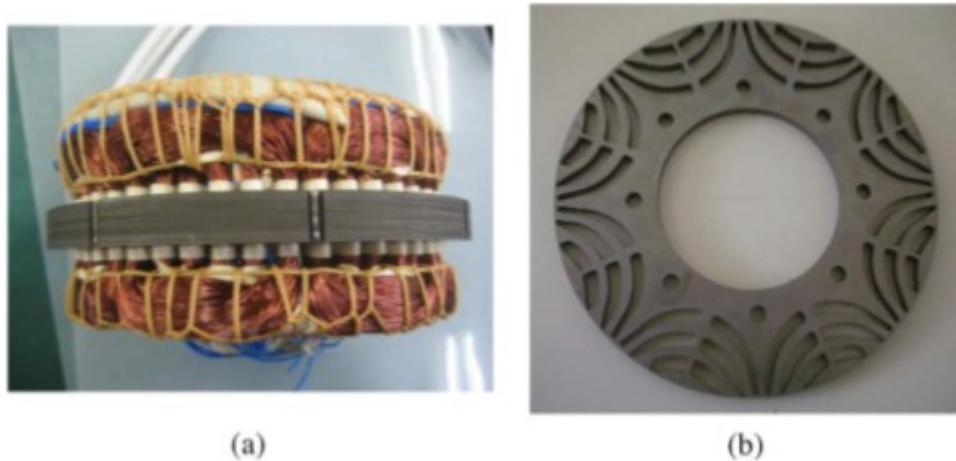


Figura 5.4: nuclei di statore (a) e rotore (b)

I magneti in ferrite sono stati inseriti nel nucleo di rotore e magnetizzati in direzione radiale. In figura 5.5 è mostrato invece il setup per l'esperimento, che prevede l'utilizzo di un trasduttore di coppia e di un motore ad induzione come carico.

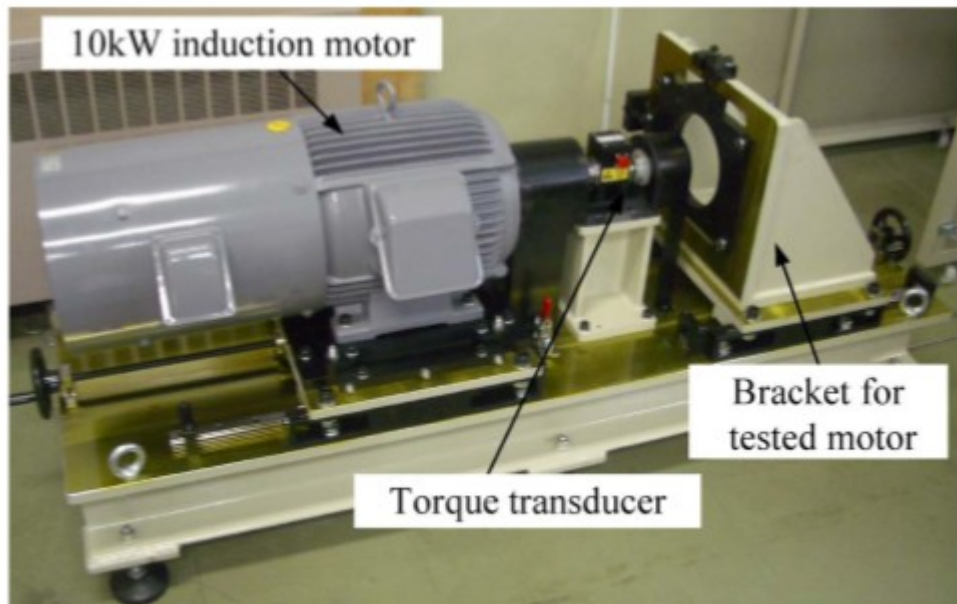


Figura 5.5: set up sperimentale

Il motore è alimentato da un inverter PWM con frequenza portante di 10kHz ed una tensione sul lato in continua di 500V. La velocità massima è stata limitata a 6000 giri al minuto a causa delle restrizioni meccaniche dell'esperimento.

Siccome la macchina di prova non è dotata di un adeguato sistema di raffreddamento, la corrente di



statore sarà limitata al valore nominale.

In tabella 5.4 sono messi a confronto i risultati ottenuti tramite analisi e quelli dell'esperimento.

TABLE IV  
MACHINE PARAMETERS OF PROTOTYPE PMA<sub>Syn</sub>RM AND ANALYSIS

Item [Unit]	Prototype	Analysis
Flux-linkage due to PM $\Psi_a$ [Wb]	0.0263	0.0293
$d$ -axis inductance $L_d$ [mH]	3.05	1.38
$q$ -axis inductance $L_q$ [mH]	7.09	6.31
Winding resistance $R_a$ [ $\Omega$ ]	0.262	0.203

Tabella 5.4: confronto dei risultati ottenuti tramite analisi e test sul prototipo

Il flusso dovuto ai magneti permanenti è stato misurato a partire dalla forza elettromotrice indotta a vuoto. Le induttanze sui due assi sono state misurate con corrente nominale di 25A ed angolo di fase  $55^\circ$ , che rappresenta l'angolo di produzione della massima coppia, come verrà mostrato in seguito.

$\Psi_a$  misurato è approssimativamente più piccolo del 10% rispetto a quello ottenuto analiticamente. Questo sembrerebbe essere causato dall'incompleta magnetizzazione dei magneti in ferrite e dal flusso passante dai bordi del nucleo di rotore. L'influenza dei bordi della macchina non può essere trascurata, perché la lunghezza del pacco lamiera del prototipo (20mm) è piccola comparata al diametro dello statore (250mm). Questo può provocare la crescita delle induttanze  $L_d$  e  $L_q$ , che in effetti è ben visibile in tabella 5.4.

Infine la crescita delle perdite nel rame produce una crescita della resistenza degli avvolgimenti.

### 5.2.2 – Caratteristiche di coppia e di potenza uscente

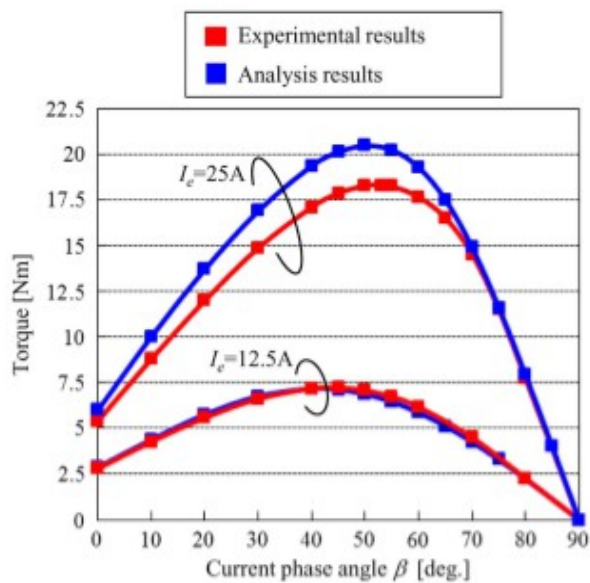


Fig. 6. Torque versus current phase angle characteristics.

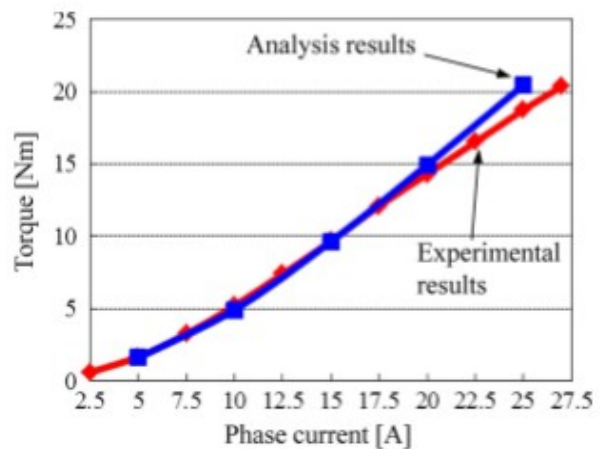


Fig. 7. Maximum torque versus current characteristics.

Figura 5.6: caratteristiche di coppia (fig.6) e di potenza in uscita (fig.7)

L'andamento della coppia in funzione dell'angolo caratteristico di fase della corrente viene riportato in figura 5.6.6. La Figura 5.6.7 invece mostra l'andamento della coppia massima rispetto alla corrente di fase. In queste figure sono anche riportati i risultati ottenuti in maniera analitica delle stesse caratteristiche.

La differenza tra la coppia misurata e stimata aumenta all'aumentare della corrente e la coppia nominale del prototipo finisce per essere il 10% più piccola di quella risultante dalla stima analitica. Questa differenza è causata dalla diminuzione del flusso dei magneti permanenti  $\Psi_a$  e dalla diminuzione della differenza tra  $L_q$  ed  $L_d$  nella macchina prototipo.

La figura 5.7 mostra i risultati sperimentali di coppia e la potenza in funzione della velocità di esperimento. L'obiettivo di potenza 5kW non può essere ottenuto a 2400 giri al minuto, ma lo si raggiunge intorno a 2500, mentre la potenza massima di 6,7kW viene raggiunta a 3600giri al minuto.

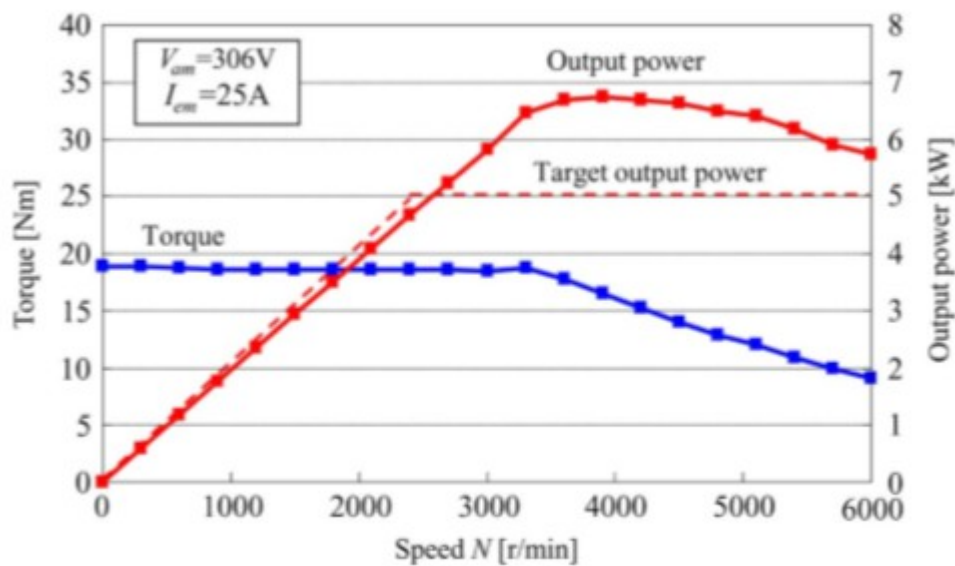


Figura 5.7: coppia e potenza in funzione della velocità

### 5.2.3 - Perdite ed efficienza

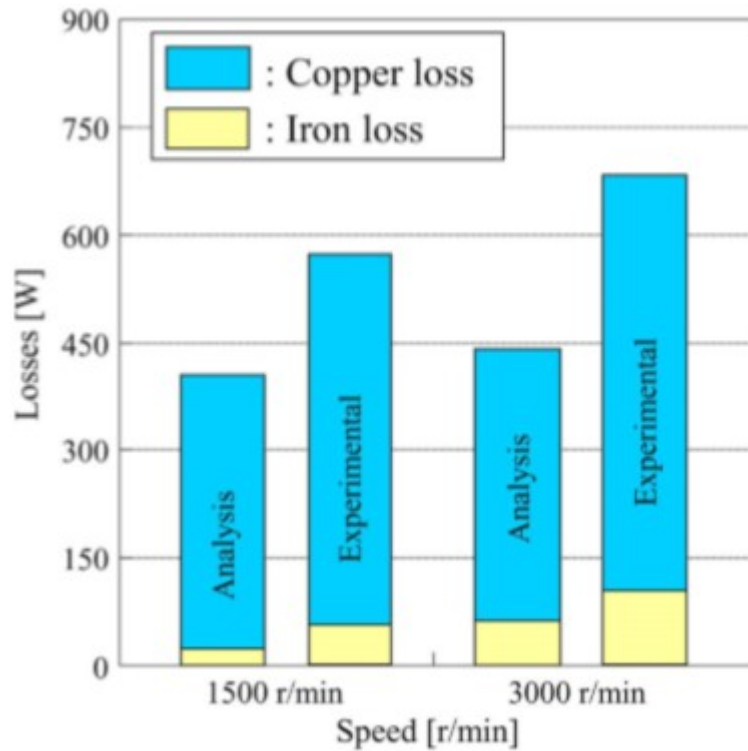


Figura 5.8: perdite

La stima analitica e la misurazione delle perdite a corrente nominale è mostrata in figura 5.8. Le perdite nel ferro nei risultati dell'analisi sono calcolate considerando anche il contenuto armonico. La resistenza degli avvolgimenti nel prototipo è maggiore rispetto al valore analitico e quindi le perdite nel rame risultano più elevate. Anche le perdite nel ferro risultano maggiori e questo è dovuto alla frequenza di PWM, che non era stata inclusa nei risultati analitici. La figura 5.8 mostra che le perdite nel rame risultano essere dominanti nel prototipo, perché la lunghezza del pacco lamiera è molto contenuta e l'influenza degli avvolgimenti è molto elevata. La mappa di efficienza è mostrata in figura 5.9.

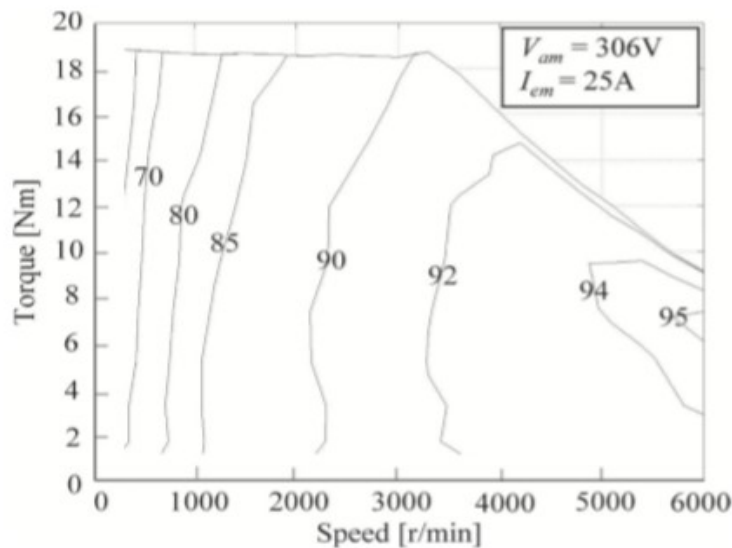


Figura 5.9: mappa di efficienza

Si può notare come, con l'utilizzo della ferrite, l'efficienza si alzi al crescere delle velocità, a causa del minore impatto delle perdite nel ferro.

In generale l'efficienza della macchina a magneti con terre rare tende a calare in caso di alte velocità e basso carico. In altre parole per questa nuova configurazione, alle alte velocità e con carico leggero, l'efficienza è nettamente migliore rispetto al modello base di IPMSM contenente terre rare.

### 5.3 - Stima delle performance ad alta potenza di una PMASynRM

#### 5.3.1 - Specifiche

La lunghezza del pacco lamiere nel prototipo è stata settata a 20mm per via delle restrizioni nello svolgimento dell'esperimento. Ora si assume che la lunghezza del pacco lamiere sia pari a 110mm e basandosi sui risultati precedenti, si cercheranno di stimare le performance di questo motore ad alta potenza, usato nelle attuali applicazioni automobilistiche.

Un confronto schematico tra la versione a 20mm e quella a 110mm è mostrata in figura 5.10.

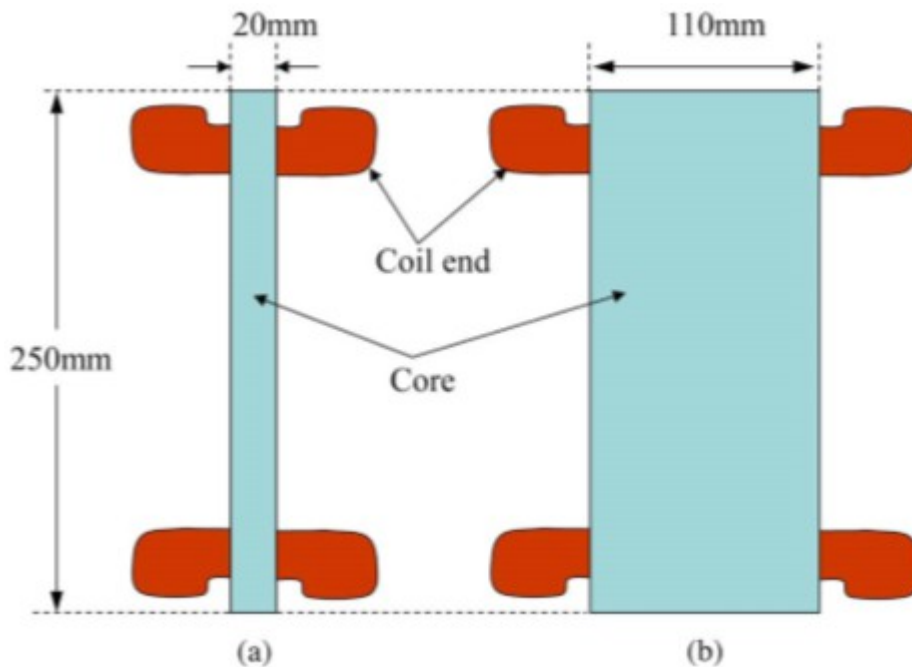


Figura 5.10: confronto schematico

Dato che la lunghezza del pacco lamiere è stata incrementata di 5,5 volte, la potenza alla corrente nominale diventa 27,5kW ( $5 \times 5,5$ ) e la massima potenza diventa 55kW, che è all'incirca la stessa della macchina IPMSM utilizzata per l'applicazione considerata.

La tabella 5.5 mostra le specifiche del prototipo a confronto con quelle della macchina ad alta potenza. Il numero di spire cala di 5,5 volte e la corrente nominale è aumentata di tale valore.

TABLE V  
SPECIFICATIONS OF PROTOTYPE AND HIGH-POWER PMASynRMs

Item [Unit]	Prototype	High-power
Stack length [mm]	20	110
Stator outer diameter [mm]	250	
Air gap length [mm]	0.9	
Rated current density [A/mm <sup>2</sup> ]	7.5	
Rated current [A]	25	137.5
Number of turns per slot	22	4
Winding resistance [ $\Omega$ ]	0.262	0.0143

Tabella 5.5: confronto

### 5.3.2 - Stima delle performance della macchina ad alta potenza

Ci si aspetterebbe che anche la coppia e la potenza crescano di 5,5 volte. Dai risultati degli esperimenti la potenza nominale in uscita della macchina ad alta potenza sembrerebbe essere 37kW alla corrente nominale. La figura 5.11 mostra le perdite ad alcune velocità di funzionamento.

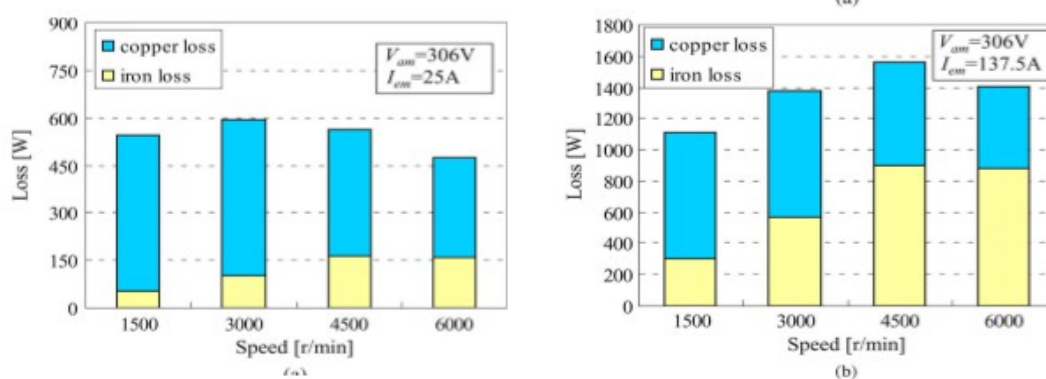


Fig. 12. Loss separation results. (a) Prototype PMASynRM. (b) High-power PMASynRM.

Figura 5.11: perdite nel prototipo e nella macchina ad alta potenza

La figura 5.11a mostra gli stessi risultati visti precedentemente. Figura 5.11b mostra invece i risultati per la macchina ad alta potenza. Le perdite nel ferro diventano 5,5 volte più grandi. Però le perdite nel rame crescono solo 1,65 volte. Questo avviene perché la lunghezza degli avvolgimenti cresce solo all'interno dello statore e rimane costante nelle bobine, come mostrato in figura 5.9.11. La figura 5.11 mostra che il bilanciamento tra perdite nel rame e nel ferro è maggiore nella macchina ad alta potenza. Le perdite nel rame decrescono in importanza quando si passa al caso da 110mm e quindi la caratteristica di efficienza è migliorata in tutta l'area di operatività. Come risultato viene ottenuta un'efficienza massima di 96,8%.



# Capitolo 5B - Struttura di rotore per ridurre il rischio di smagnetizzazione irreversibile in una PMSynRM con ferrite

In questo capitolo verrà presentata una struttura di PMSynRM che abbia la capacità di ridurre in maniera significativa il grado di smagnetizzazione irreversibile a cui vengono sottoposti i magneti permanenti in ferriti utilizzati. L'analisi è condotta tramite analisi FEM ed esperimenti su un prototipo. Come già mostrato nel capitolo precedente la macchina proposta sarà in grado di raggiungere performance simili a quelle del modello originale contenente magneti permanenti in terre rare.

## 5B.1 - Struttura della PMSynRM con ferrite utilizzata

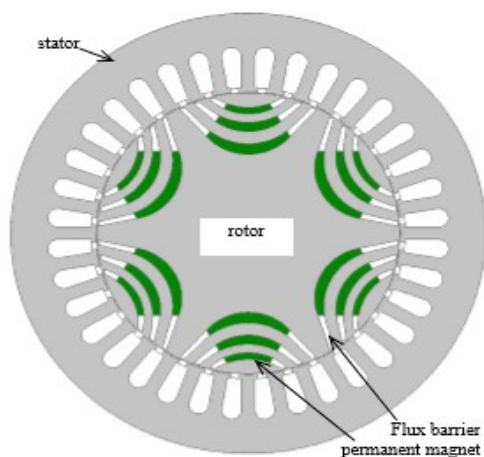
### 5B.1.1 - Caratteristiche del modello

Le caratteristiche principali del modello preso in considerazione sono elencate in tabella 5B.1.

TABLE I. SPECIFICATIONS AND DEMANDED PERFORMANCE.	
Item	Value (Unit)
Stator outer diameter	145 mm
Rotor outer diameter	92.54 mm
Stack length	30 mm
Air gap length	0.3 mm
PM material	Ferrite (NMF12G)
Coercive force of PM	342 kA/m (20°C)
Turns of armature winding	192 turns/phase
Winding space factor	60 %
Rated current (continuous)	10 A
Maximum current (peak)	20 A
Current density (continuous)	7.5 A/mm <sup>2</sup>
Current density (peak)	15 A/mm <sup>2</sup>
Base speed	2,400 min <sup>-1</sup>
Rated power (continuous)	2,500 W (at 2,400 min <sup>-1</sup> )
Maximum power (peak)	5,000 W (at 2,400 min <sup>-1</sup> )
Expected maximum efficiency	94 %

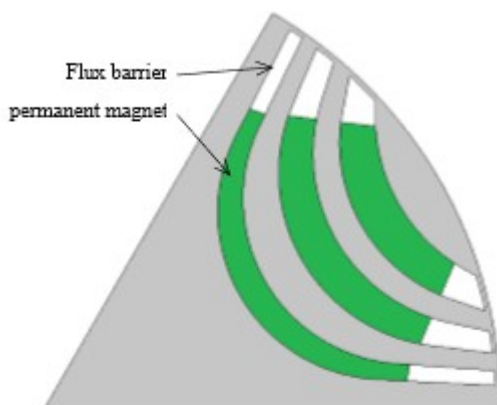
Tabella 5B.1: caratteristiche e performance richieste

In figura 1 viene mostrato uno schema di macchina (Tipo A) la cui struttura è progettata senza tener conto della smagnetizzazione.



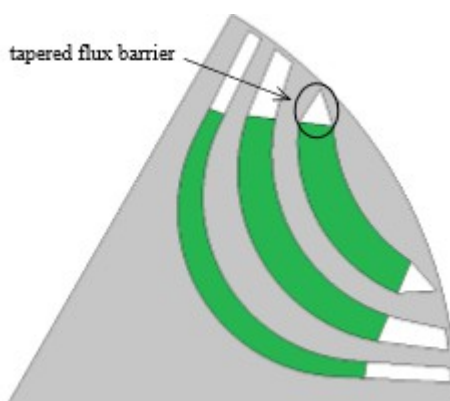
*Figura 5B.1: struttura base*

In figura 5B.2 viene mostrata una prima struttura ottimizzata di rotore (Tipo B)



*Figura 5B.2: prima struttura ottimizzata*

In figura 5B.3 viene infine mostrata una seconda struttura ottimizzata di rotore (Tipo C)



*Figura 5B.3: seconda struttura ottimizzata*

Le strutture di Tipo B e Tipo C sono state ottimizzate appunto per contrastare il problema della smagnetizzazione irreversibile. Successivamente verranno descritti i dettagli di queste strutture. Le barriere di flusso della prima linea nel Tipo C sono rastremate, come mostrato in figura 3. La



struttura di statore è invece uguale per tutte e tre le tipologie presentate. Esso presenta avvolgimenti distribuiti in una struttura a 6 poli e 36 cave. Il campo coercitivo dei magneti permanenti impiegati è supposto pari a 342kA/m alla temperatura di 20°C.

### 5B.1.2 - Valutazione del grado di smagnetizzazione

In figura 5B.4 viene riportato un esempio di curva di smagnetizzazione dei magneti permanenti.

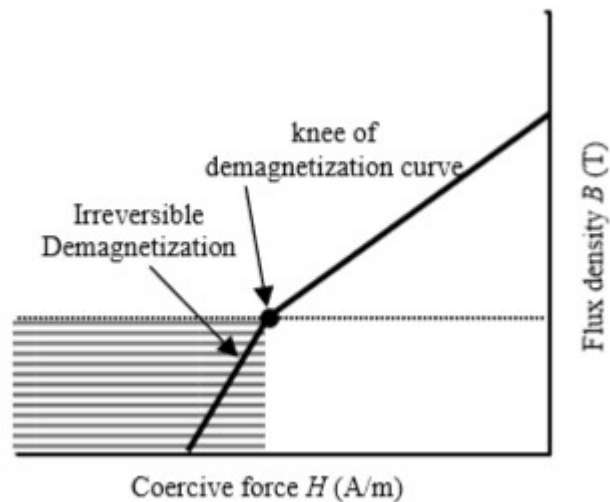


Figura 5B.4: Curva di smagnetizzazione

Quando l'induzione dei magneti permanenti è minore del valore di ginocchio della curva, questi soffrono del fenomeno della magnetizzazione irreversibile.

Con l'obiettivo di valutare questa smagnetizzazione, viene calcolata l'induzione dei magneti. Il grado di smagnetizzazione viene quindi calcolato come il l'ammontare dei magneti affetti dal fenomeno rispetto al totale dei magneti permanenti utilizzati.

Per i magneti in ferrite presi in considerazione il ginocchio della curva appare a basse temperature e viene scelto il valore di -20°C come temperatura critica del materiale. Il limite della smagnetizzazione irreversibile è dunque assunto a 0,15T alla temperatura di -20°C. Per assumere le condizioni di funzionamento più gravose, l'angolo di fase della corrente è settato a 90°.

## 5B.2 - Struttura di rotore adottata per migliorare la situazione di smagnetizzazione

La figura 5B.5 mostra la mappa dell'induzione nel rotore del Tipo A rispettivamente con corrente 10A e 20A.

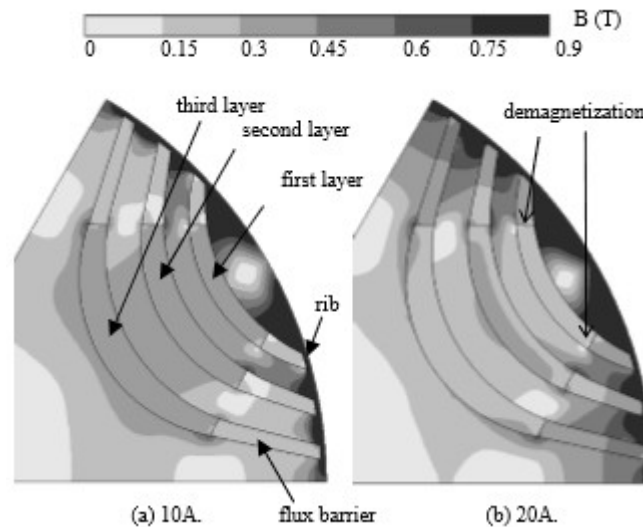


Figura 5B.5: mappa dell'induzione nel rotore

Come mostrato in figura 5 l'induzione nel rotore è minore quando la corrente è più grande. Lungo il bordo dei magneti l'induzione può presentare valori minori di 0,15T, ma la smagnetizzazione affligge effettivamente solamente lo strato di magneti più superficiale.

In figura 5B.6 viene evidenziata l'area di smagnetizzazione nel Tipo A a 20A. Si osserva che la smagnetizzazione interessa il bordo del magnete più esterno.

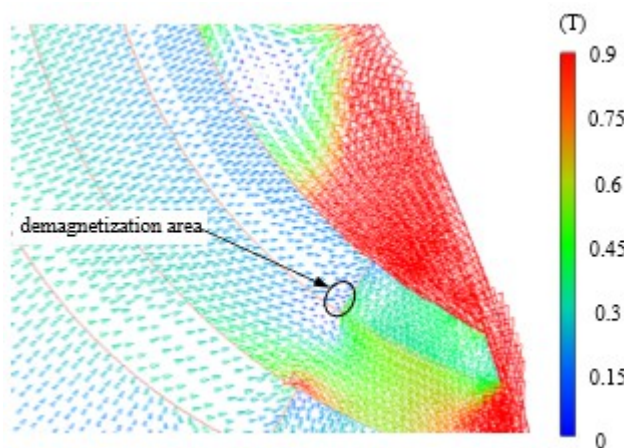
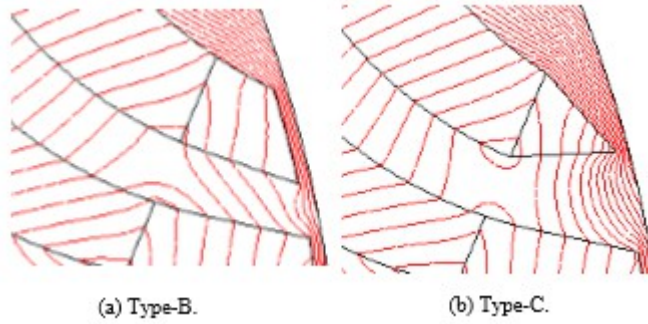


Figura 5B.6: area di smagnetizzazione

Per prevenire questo fenomeno vengono adottate le configurazioni di rotore Tipo C e Tipo B.

Il Tipo B usa magneti permanenti con ampiezza maggiore nel primo strato. Il Tipo C presenta un profilo rastremato per le barriere di flusso del primo strato. Il volume di ferrite utilizzato in queste due configurazioni è superiore del 60% rispetto a quello del Tipo A.

La distribuzione dell'induzione intorno alle barriere di flusso nelle due tipologie di rotore ottimizzato è mostrata in figura 5B.7.



*Figura 5B.7: distribuzione dell'induzione intorno alle barriere di flusso*

Il flusso del Tipo C scorre più facilmente lungo i ponticelli delle barriere di flusso se comparato con quello del Tipo B. Poiché le estremità delle barriere sono rastremate la riluttanza è minore. Come risultato la smagnetizzazione nel primo strato di magneti permanenti può essere ridotta.

### 5B.3 - Risultato delle analisi

I risultati della simulazione sono riportati in figura 5B.8.

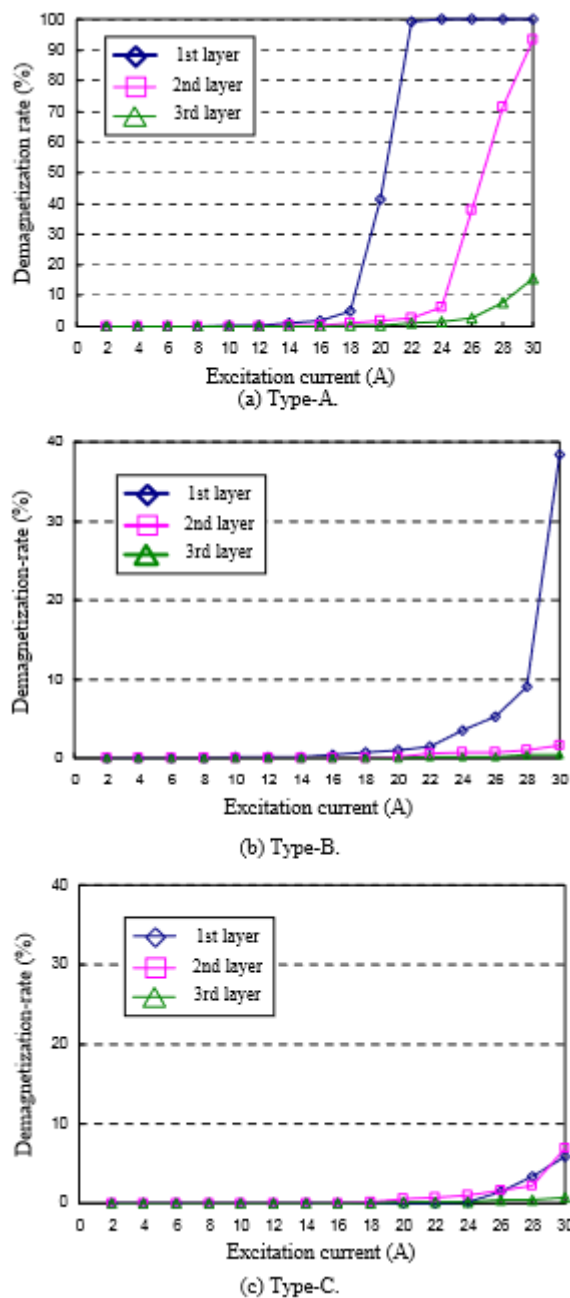
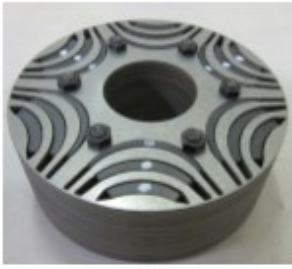


Figura 5B.8: risultati della simulazione

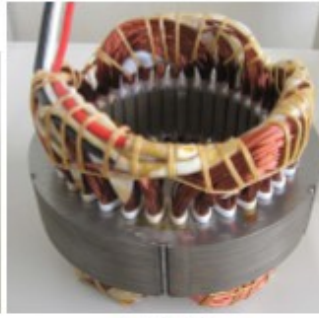
Nel tipo A è evidente come il rischio di smagnetizzazione irreversibile sia elevato ad alti valori di corrente. Già nella soluzione di Tipo B si può notare un miglioramento della situazione, ma non sufficiente, poiché i valori di smagnetizzazione nel primo strato sono ancora consistenti.

Nel Tipo C il flusso di smagnetizzazione scorre più facilmente lungo i bordi delle barriere di flusso, come già visto nella sezione precedente. Questo provoca una diminuzione considerevole e finalmente accettabile del grado di smagnetizzazione.

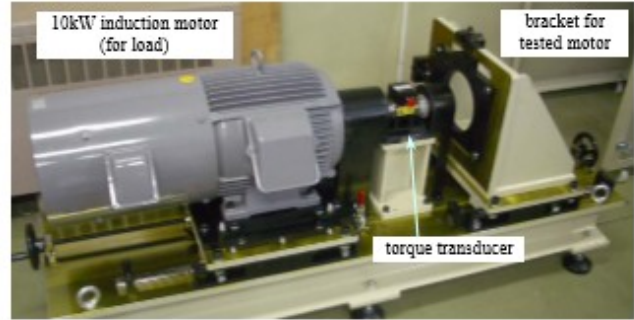
Questi risultati sono stati successivamente verificati tramite esperimenti su un prototipo appositamente realizzato e mostrato in figura 5B.9.



(a) Rotor (Type-C).



(b) Stator.



*Figura 5B.9: verifiche sperimentali*



# Capitolo 6 – Struttura VPMSynRM con ferrite per applicazioni nei controllori

## 6.1 - Introduzione

L'espansione nell'uso dei microcontrollori ( $\mu$ Cs), dei processori di segnale digitali (DSPs) e dei controllori di segnale digitali (DSCs) ha fatto aumentare l'interesse per gli azionamenti elettrici con velocità variabile. Di conseguenza, molte società del settore hanno fatto importanti sforzi per migliorare tali azionamenti in efficienza e costo.

L'uso di azionamenti elettrici con velocità variabile in questo campo di applicazioni è dato principalmente dai seguenti elementi:

- Possibilità di ottenere alti livelli di efficienza
- Capacità di controllo della coppia, della velocità e della posizione.
- Miglioramento del comportamento in situazione di transitorio
- Possibilità di perseguire precise richieste in applicazioni specifiche.

I motori sincroni a magneti permanenti (PMSM) possono operare a carico nominale con fattore di potenza unitario e sono caratterizzati da alta efficienza se paragonati alle altre macchine in AC.

I progettisti delle PMSM scelgono il particolare tipo di magneti permanenti da utilizzare a seconda dei parametri imposti dalla macchina, delle performance del materiale magnetico e, non per ultimo, dal costo.

I magneti permanenti in ferrite sono ampiamente usati nella costruzione di queste macchine, per via del loro prezzo basso e della facilità di produzione. La ferrite presenta una curva di magnetizzazione lineare, una buona temperatura massima di operatività (circa  $350^{\circ}\text{C}$ ), ma un'induzione residua  $B_r$  piuttosto bassa.

Per questo le PMSM che prevedono l'uso di ferrite risulteranno più grosse e pesanti.

I magneti permanenti in samario-cobalto (SmCo) hanno come vantaggi un alto valore di  $B_r$ , un'alta densità di energia, una curva di magnetizzazione lineare ed una stabilità termica molto buona. Purtroppo però presentano lo svantaggio di una minore temperatura massima di utilizzo (circa  $250^{\circ}\text{C}$ ) e soprattutto di un prezzo molto maggiore.

I magneti permanenti in Neodimio-Ferro-Boro (NdFeB) presentano un alto valore di  $B_r$ , la maggior densità di energia possibile ed un alto campo coercitivo  $H_c$ . Tra gli svantaggi possono essere menzionati una bassa temperatura massima di utilizzo (circa  $150^{\circ}\text{C}$ ) e la possibilità di ossidazione, ma soprattutto essi sono estremamente più costosi di quelli in ferrite. Tuttavia, grazie al loro impiego è possibile realizzare PMSM piccole e leggere, con grande densità di energia.

I magneti in terre rare rappresentano dunque la soluzione migliore per le PMSM, ma anche in queste applicazioni, il continuo aumento dei prezzi del materiale ha dato inizio alla ricerca di soluzioni alternative, quali la sostituzione del NdFeB con la più economica ferrite.

I motori sincroni a riluttanza (SynRM) sono apparentemente delle macchine sincrone con un alto rapporto di salienza. Questa elevata salienza può essere raggiunta tramite una struttura di rotore laminata assialmente e trasversalmente. Il processo di produzione di coppia elettromagnetica in queste tipologie di macchine è legato alla loro configurazione anisotropa. Negli ultimi tempi è preferita una struttura di rotore laminata trasversalmente, poiché la laminazione assiale presenta qualche inconveniente dal punto di vista meccanico.

I vantaggi di questi motori sono dati soprattutto dalla semplicità, dal basso costo, dalla silenziosità e dalla struttura robusta. Gli svantaggi sono collegati al basso valore di coppia elettromagnetica sviluppata, al basso fattore di potenza e alla scarsa efficienza.

Aggiungendo dei magneti permanenti al nucleo del rotore di queste macchine è però possibile aumentare le caratteristiche elettromagnetiche. Il motore così ottenuto risulta simile ad un IPM

(magneti permanenti interni), ma il numero di magneti necessari sarà minore di quest'ultima configurazione. Questi nuovi motori vengono chiamati PMSynRM (motore sincrono a riluttanza assistita dai magneti permanenti) e del loro processo di ottimizzazione e del loro uso per applicazioni automobilistiche si è già parlato nei due capitoli precedenti. Come visto, con il loro impiego, è possibile ottenere un incremento delle performance e dell'efficienza, a patto che venga effettuata un'ottimizzazione della struttura.

In questo studio viene proposta una configurazione contenente due magneti economici di ferrite disposti a V, per una macchina che verrà chiamata (VPMSynRM). La prima geometrica di rotore proposta avrà una barriera di flusso (1V), mentre la seconda avrà due barriere di flusso (2V). In queste barriere di flusso verrà inoltre aggiunta della ferrite per aumentare ulteriormente le performance del motore. Nel caso estremo queste barriere saranno completamente costituite da ferrite.

## 6.2 – Design della macchina proposta

Il principale scopo di questo capitolo è di studiare le performance del nuovo motore ottenuto combinando lo statore della configurazione originale ed un rotore dal design totalmente nuovo.

La struttura del rotore dovrà essere progettata perseguendo l'obiettivo di raggiungere le stesse performance in termini di coppia prodotta della macchina originale (PMSM con NdFeB).

Il maggior problema sarà rappresentato dal minor spazio disponibile per i magneti permanenti e le barriere di flusso, poiché nella nuova configurazione, per mantenere il livello di efficienza alto, sarà necessario un volume più elevato di magneti permanenti e la macchina perderà in compattezza.

Il nuovo design di rotore sarà basato su uno statore esistente a 12 cave, con avvolgimenti concentrati e diametro interno di 50mm. Lo statore è lungo 37mm e lo schema degli avvolgimenti è riportato in figura 6.1.

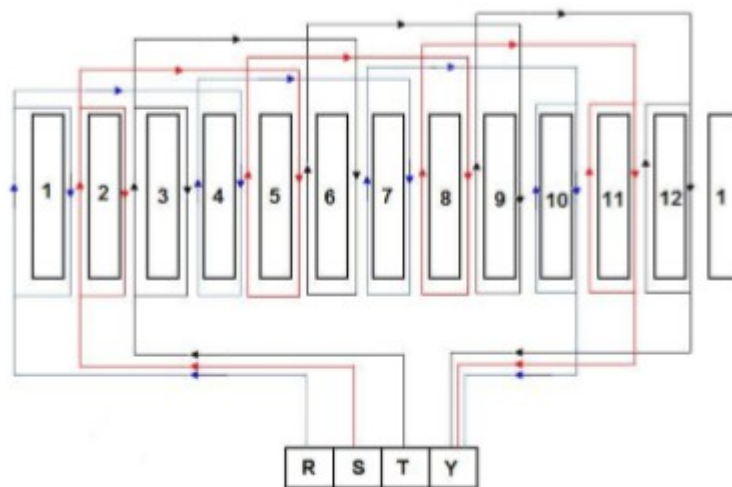


Figura 6.1: schema degli avvolgimenti di statore

Il nuovo rotore avrà lo stesso numero di poli e lo stesso diametro interno (49,3mm) del rotore iniziale. I magneti permanenti usati per la nuova configurazione sono composti di Stonzio-ferrite (FS-4) con le seguenti proprietà magnetiche:

- $B_{rmin} = 0,4T$
- $H_c \geq 223kA/m$
- $Bh_{max} = 27,2kJ/m^3$



### 6.3 - Volume dei magneti permanenti in ferrite impiegati

Il volume dei magneti permanenti va calcolato tramite la seguente relazione:

$$V_{PM} = \frac{2}{\pi^2} \cdot \frac{k_\phi \cdot k_{ad}(1+\varepsilon)}{f_s \cdot k_{um} \cdot k_{zm} \cdot B_r \cdot H_c \cdot \eta_m \cdot \cos \varphi_m} \cdot k_m \cdot T_{mN} \cdot \Omega_N \quad (1)$$

Dove:

- $k_\Phi$  è il coefficiente dovuto alla forma del campo magnetico dei magneti permanenti.
- $K_{ad,q}$  è il coefficiente della reazione magnetica nel traferro.
- $\varepsilon$  è il grado di eccitazione del motore.
- $f_s$  è la frequenza di statore.
- $K_{um}$  è il coefficiente di utilizzo dei magneti permanenti.
- $\eta_m$  e  $\cos\varphi_m$  sono l'efficienza ed il fattore di potenza del motore.
- $T_{mN}$  è la coppia nominale.
- $\Omega_N$  è la velocità meccanica.
- $K_m$  è il fattore di sovraccarico del motore e può essere calcolato dalla seguente relazione

$$k_m = \sqrt{1 + \frac{1}{\varepsilon^2} \cdot \left( \frac{k_{ad}}{k_{aq}} \right)^2} \quad (2)$$

### 6.4 – Analisi 2D del rotore, induttanza sull'asse d, induttanza sull'asse q

Il design del rotore proposto è studiato tramite un'analisi FEM 2D, in cui può essere considerato anche il comportamento non lineare dei materiali, che gioca un ruolo decisivo nelle previsioni delle performance del motore.

Con il movimento del rotore rispetto alle cave di statore vengono prese in considerazione la coppia resistente e le oscillazioni di coppia causate dalla variazione della permeabilità.

Tramite il software FEM si simulano le induttanza agli assi diretti ed in quadratura, che, per un materiale magnetico non lineare, dipendono dal livello di corrente.

In figura 6.2 vengono mostrate le variazioni del flusso magnetico sugli assi d e q in corrispondenza dei valori di corrente sugli assi d e q.

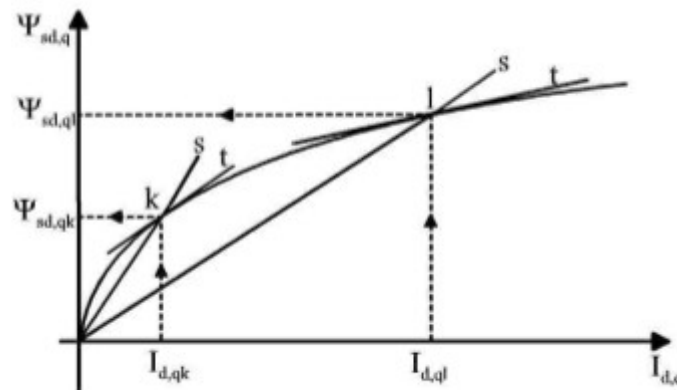


Fig. 2. Nonlinearity of d- and q-axis inductances

Figura 6.2: Induttanze sull'asse d e sull'asse q

L'induttanza nel punto K può essere calcolata tramite la seguente relazione:

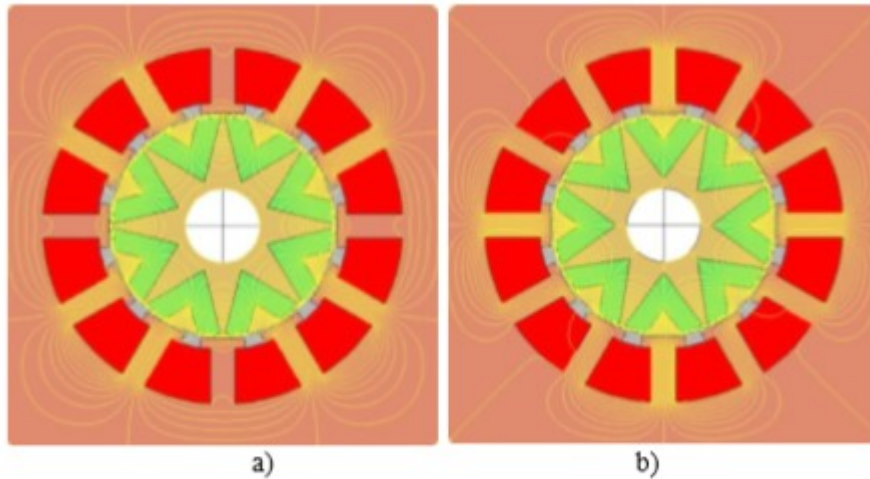
$$L_{d,qk}(I_{d,qk}) = \frac{d\Psi_{sd,qk}}{dI_{d,qk}}$$

Mentre i flussi di statore sugli assi d e q possono essere calcolati in questo modo:

$$\Psi_{sd,qk} = \int_0^{t_k} (U_{sd,q} - R^* i_{d,q}(t)) dt$$

## 6.5 - Modello della macchina con una barriera di flusso (VPMSynRM-1V)

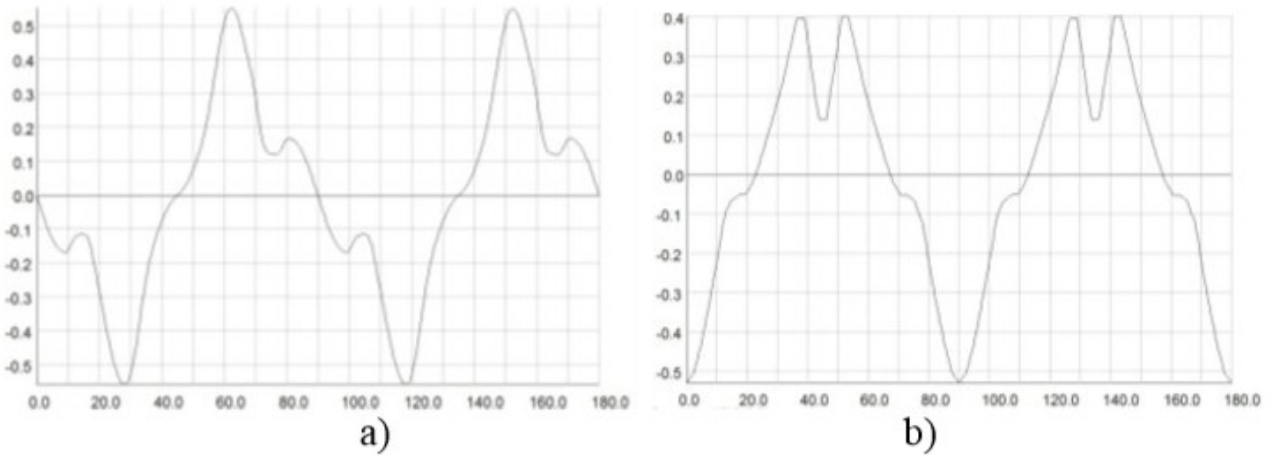
Il primo modello proposto è il VPMSynRM-1V, la cui geometria di rotore è mostrata in figura 6.3.



One V flux barrier rotor geometry: d-axis PM flux plots, b. q-axis PM flux plots.

Figura 6.3: geometria di rotore macchina 1V

Il volume dei magneti permanenti è pari a  $39587,37\text{mm}^3$  ed è calcolato tramite le relazioni presentate in precedenza. Come si può vedere dalla figura 6.3 il volume richiesto di ferrite è alto, perciò la barriera di flusso è adattata al volume magnetico. In questo caso non esistono molte possibilità di ottimizzazione delle barriere. L'ampiezza della barriera di flusso è quindi di 5,7mm. In figura 6.3 può essere quindi visto il flusso dei magneti permanenti sugli assi d e q, mentre la simulazione dell'induzione dei PM è mostrata in figura 6.4.

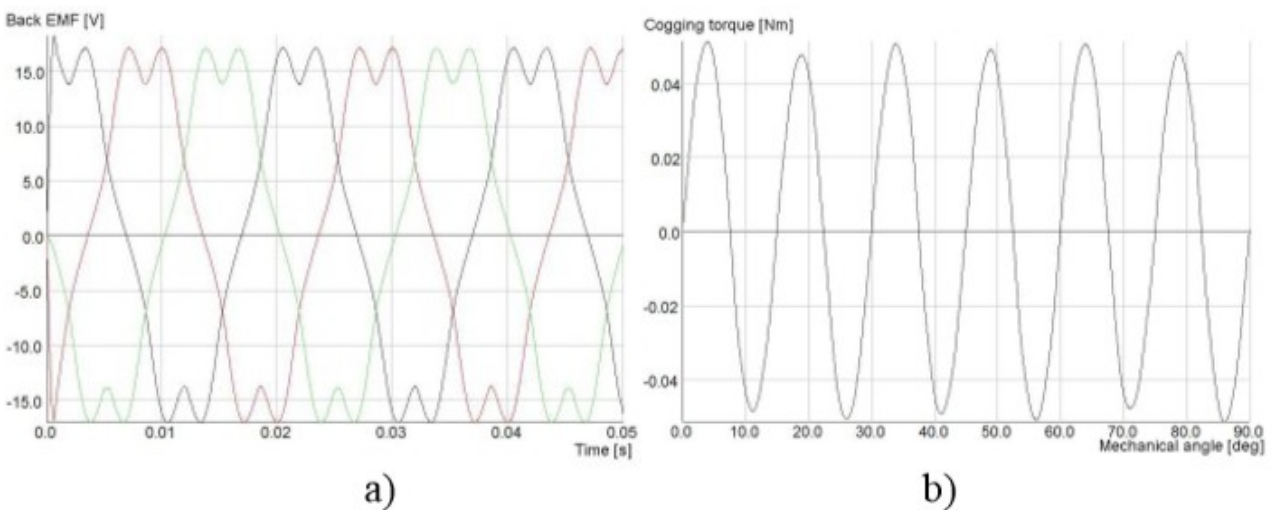


Flux density distribution: a d-axis, b q-axis

Figura 6.4: induzione sull'asse diretto e in quadratura

I valori di picco ottenuti dalla simulazione sono 0,55T sull'asse diretto e 0,4T sull'asse in quadratura.

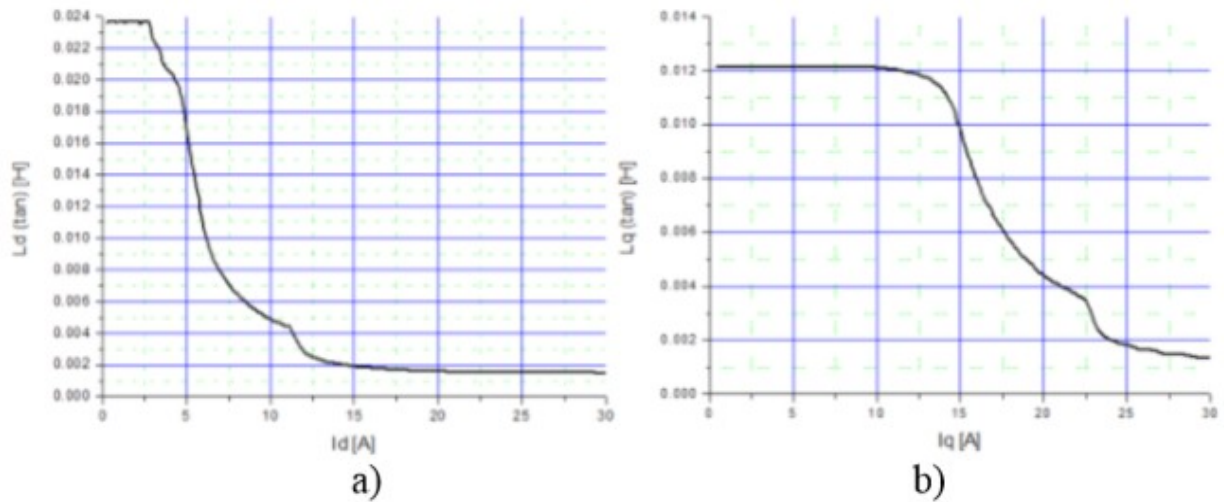
La Figura 6.5 mostra invece l'andamento della forza contro elettromotrice e della coppia di cogging alla velocità di 750rpm. Da queste è possibile determinare il valore di picco della forza contro elettromotrice (16V) e della coppia di cogging (0,045Nm). Il flusso dovuto ai magneti permanenti ha un valore di  $\psi_{PM}=0.051$  Wb.



a. Back-EMF, b. Cogging torque.

Figura 6.5: andamento di forza contro elettromotrice e di coppia di cogging

In figura 6.6 sono riportate le curve simulate dell'induttanza  $L_d$  ed  $L_q$  in funzione delle correnti  $I_d$  e  $I_q$ . Vengono ottenuti questi valori:  $L_d(3A)=23,8mH$ ,  $L_q(3A)=12,1mH$  ed il rapporto di salienza è pari a 1,96.



a.  $L_d$  and b.  $L_q$  inductivities curves vs. currents

Figura 6.6: induttanze sui due assi

La Figura 6.7 riporta l'ondulazione di coppia causata dalla variazione di permeabilità. In questo caso a 5A la coppia media è di 2,3Nm e le oscillazioni di coppia si attestano sul 26%.

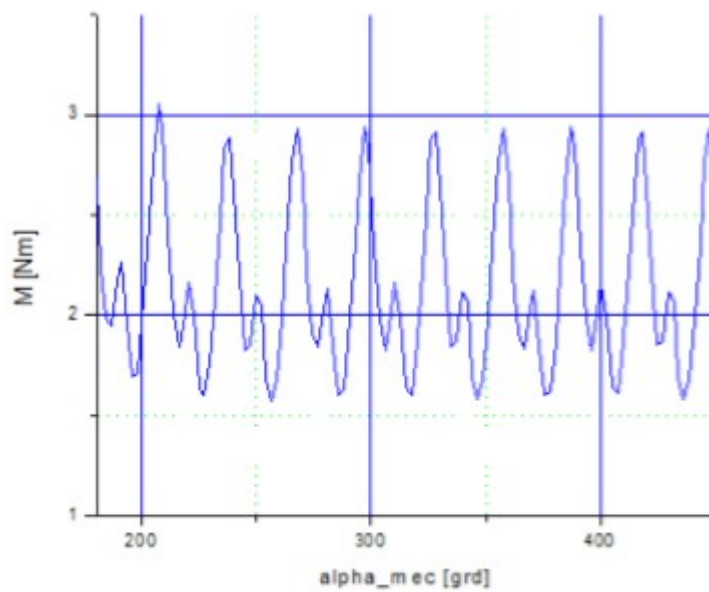
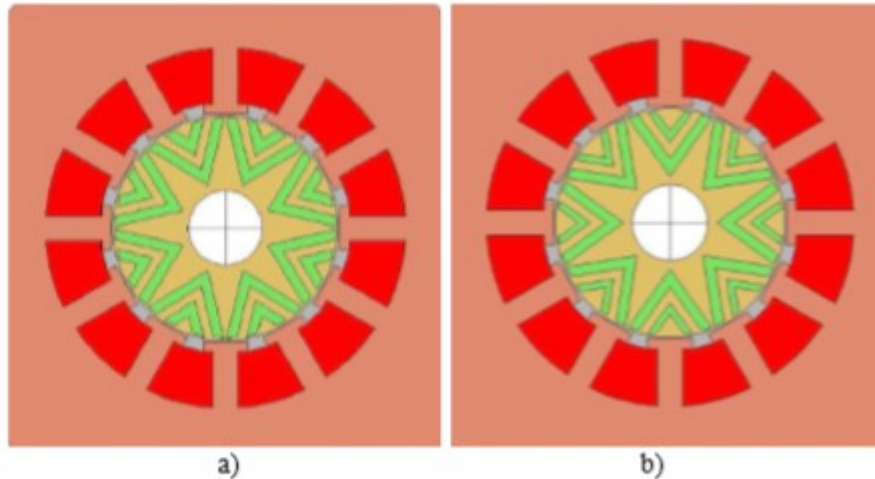


Figura 6.7: variazioni di coppia a 5A

## 6.6 – Modello della macchina con due barriere di flusso (VPMSynRM-2V)

La seconda configurazione proposta presenta due barriere a V di flusso costituite da ferrite. La tipologia di statore rimane invariata, così come le dimensioni geometriche e le caratteristiche del materiale usato.

In questo caso il rotore 2V ha due possibili varianti, che vengono mostrate in figura 6.8a ed 6.8b.



Two V flux barriers rotor geometry: a. with same width of flux barriers 2V; b. with different widths of the flux barriers 2VU.

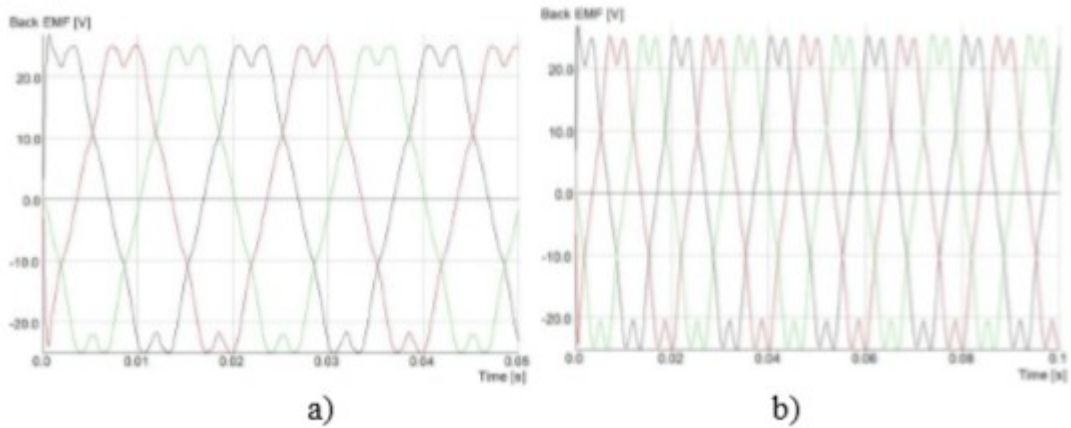
Figura 6.8: due possibili varianti di rotore nel modello 2V

- La prima variante ha due barriere di flusso della stessa ampiezza (2mm) ed il volume dei magneti permanenti è pari a  $29325\text{mm}^3$ .
- La seconda variante presenta anch'essa due barriere di flusso, ma di diversa ampiezza (2,2mm e 1,27mm) ed il volume di magneti permanenti è pari a  $24339\text{mm}^3$  (17% in meno della variante precedente).

In entrambe le varianti si ha comunque una riduzione nel volume dei magneti permanenti utilizzati di almeno il 26% rispetto alla prima versione 1V.

In questo caso la simulazione dell'induzione al traferro non è mostrata, ma la forma è la stessa del caso precedente. Il valore dei picchi di induzione è però pari al 25% in più rispetto al caso del rotore 1V.

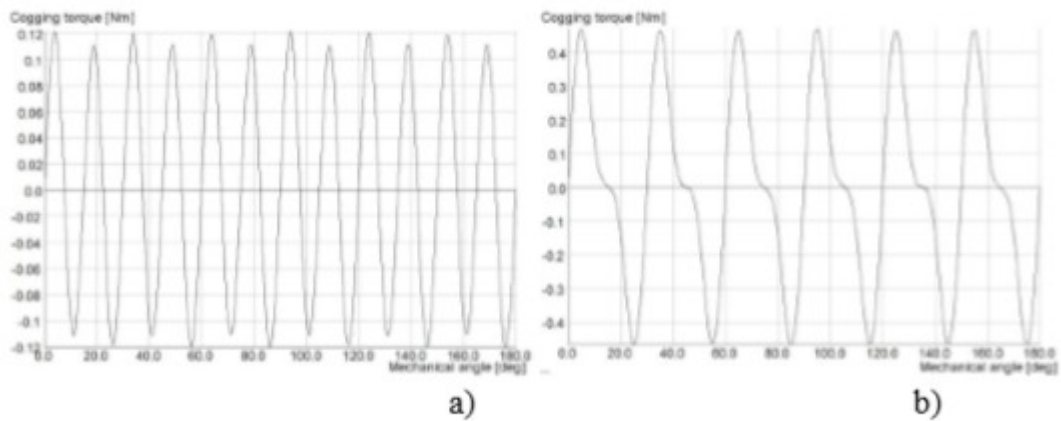
Le curve della forza contro elettromotrice e della coppia resistente, ottenute dalla simulazione, vengono mostrate in figura 6.9 e 6.10.



Back-EMF a. 2V; b. 2VU.

Figura 6.9: forza contro elettromotrice 2V e 2VU

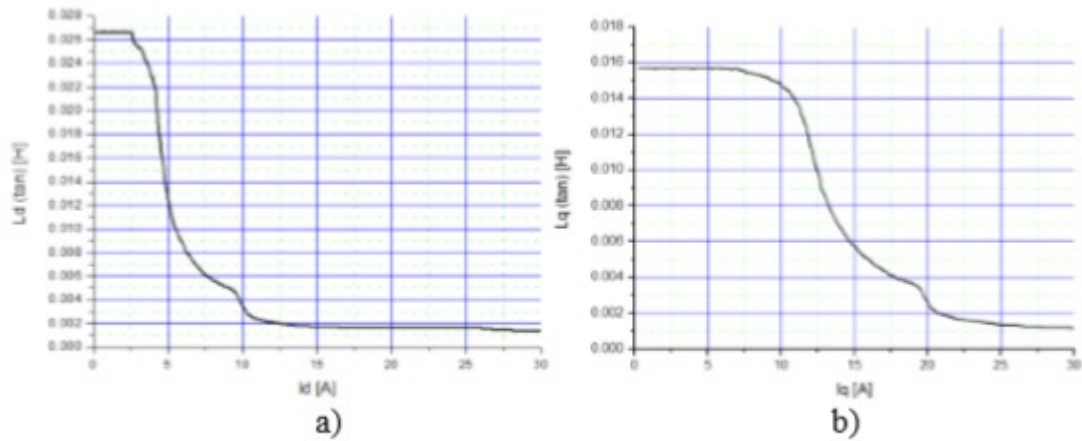
La variante con due barriere di uguale misura è caratterizzata da un picco di 24V e quindi la forza contro elettromotrice è aumentata del 33% rispetto alla variante precedente. La variante 2VU con ampiezza diversa delle barriere ha invece picco pari a 22V.



Cogging torque 2V; b. 2VU

Figura 6.10: coppia di cogging nei modelli 2V e 2VU

Il flusso dei magneti permanenti vale rispettivamente  $\psi_{PM2v}=0.076$  Wb e  $\psi_{PM2vu}=0.070$  Wb. Il valore di picco della coppia di cogging vale rispettivamente 0,012Nm e 0,045Nm. Figura 6.11 presenta le curve di induttanza  $L_d$  ed  $L_q$  in funzione delle rispettive correnti di asse.



The a.  $L_d$  and b.  $L_q$  inductivities curves vs. current for varian 2V.

Figura 6.11: induttanze sull'asse diretto e in quadratura

Le curve di induttanza per la variante 2VU non sono riportate, ma sono all'incirca uguali. Per l'asse d e q l'induttanza segue questi valori:  $L_d(3A)=23.75mH$ ,  $L_q(3A)=15.8mH$  ed il rapporto di salienza risulta pari a 1.5.

Figura 6.12 presenta l'ondulazione di coppia causata dalle variazioni di permeabilità a 3,6A per la variante 2V. In questo caso la coppia media è pari a 1,9Nm e le oscillazioni di coppia si attestano sul 26,3%.

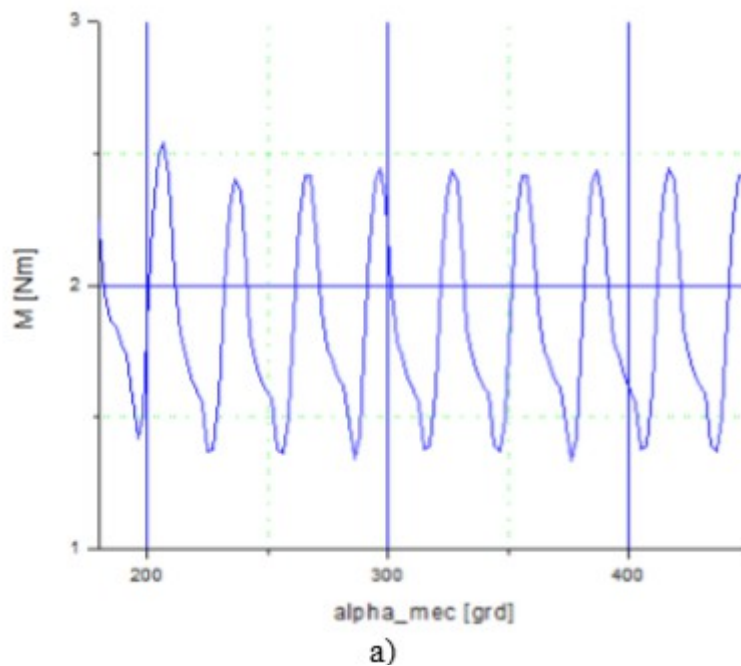


Figura 6.12: variazioni di coppia per la variante 2V

In tabella 6.1 sono raccolti i risultati per la varie simulazioni:

TABLE I.

	<b>Rotor Type</b>		
	<i>1V</i>	<i>2V</i>	<i>2VU</i>
$V_{PM}[mm^3]$	39587.37	29325.04	24339.78
$L_d(3A)[mH]$	23.80	23.75	~23.75
$L_q(3A)[mH]$	12.1	15.8	~15.8
$L_d/L_q$	1.96	1.50	~1.50
$\Psi_{PM}[Wb]$	0.051	0.076	0.070
$T_{av}/I[Nm/ Apk]$	2.3/5	1.9/3.45	~1.9/3.45
$T_{ripple}[\%]$	26	26.3	~26.3

Tabella 6.1: risultati delle simulazioni



# Capitolo 7 – Applicazioni per la mobilità cittadina – motori in ruota (in whell motors)

## 7.1 – Introduzione

Negli ultimi anni sono state studiate varie soluzioni per mitigare il riscaldamento globale ed i problemi di energia. In particolare i veicoli elettrici (Evs) rappresentano una speranza concreta di evoluzione futura. Purtroppo essi sono ancora inadatti a percorrere lunghe distanze (per problemi di carica limitata e tempi di ricarica) e questo è uno dei problemi che ne hanno limitato la diffusione. Al contrario i mezzi elettrici utilizzati per spostarsi all'interno delle città o per collegare il centro alla periferia hanno avuto un'enorme aumento di diffusione negli ultimi anni. Questi veicoli, dovendo compiere spostamenti su distanze relativamente corte, necessitano di una batteria più piccola ed economica.

Lo spazio all'interno di una vettura elettrica è però limitato e l'uso di motori in-wheel (interni alla ruota) può diventare fondamentale per questo tipo di applicazioni. In aggiunta, questa tipologia di applicazioni richiede alte performance, alta potenza in uscita ed alta efficienza. Per questi motivi è andato diffondendosi l'uso di motori a magneti permanenti in-whell contenenti terre rare, teoricamente perfetti per venire incontro ai requisiti richiesti.

Come già detto, purtroppo più del 90% della produzione di questi materiali è nelle mani della Cina e di conseguenza il prezzo di questi elementi è in costante aumento, così come il rischio di restrizioni nelle esportazioni dovute a questioni politiche.

In questo articolo si vuole studiare la fattibilità di un motore in-whell a magneti permanenti che al posto delle terre rare impieghi della più economica e reperibile ferrite.

L'induzione residua e la forza coercitiva di questi magneti, come visto, sono basse e raggiungono il 30% dei valori dei magneti a terre rare. Questo rappresenta un problema che si manifesta in pratica con una considerevole riduzione della coppia.

Si adotterà una macchina con magneti disposti in superficie (SPM), la quale permetterà di avere una densità di coppia comunque alta ed una lunghezza di motore contenuta in direzione assiale.

La struttura dei motori in-whell presenta un rotore senza nucleo e verrà descritta ed analizzata tramite l'analisi agli elementi finiti in 3D. Inoltre un prototipo della macchina in oggetto verrà realizzato e testato.

Con questo si dimostrerà che la nuova configurazione di motore, con qualche ottimizzazione e modifica, potrà raggiungere le prestazioni che esigono le applicazioni per la mobilità cittadina.

## 7.2 – Struttura del motore SPM

La figura 7.1 mostra uno schema della struttura del motore.

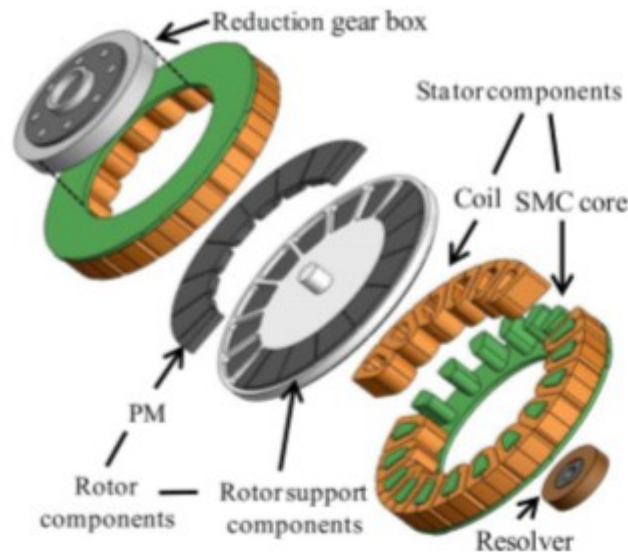


Figura 7.1: struttura del motore

Poiché le dimensioni devono forzatamente essere contenute, a causa delle restrizioni dovute alle dimensioni della ruota dei veicoli, la generazione di coppia di riluttanza è complicata.

La coppia magnetica, in questa tipologia di motore, viene dunque massimizzata attraverso una struttura di rotore SPM, costruita inserendo solamente magneti permanenti in ferrite in un rotore composto da acciaio inox non magnetico. Inoltre il motore ha una struttura di rotore senza nucleo, che può utilizzare solo il contributo di coppia magnetica, poiché la macchina non è a poli salienti (il rapporto di salienza contribuisce alla coppia totale generata, come visto nei capitoli precedenti).

In aggiunta, per ottenere la caratteristica di coppia richiesta per le applicazioni cittadine, deve essere inserito un riduttore di velocità, con un rapporto di cambio 5:1, da inserire ad una estremità dello statore. All'altra estremità, viene inserito un resolver.

Il motore in questo modo può sfruttare al meglio il poco spazio a disposizione nella ruota.

La forma del motore ed il numero di poli e cave sono determinati dal valore di coppia massimizzata per queste dimensioni così ridotte.

TABLE I  
SPECIFICATIONS OF DESIGNED MOTOR

Outer diameter of motor	200 mm
Outer diameter of rotor	202 mm
Total motor axial length	71.7 mm
PM thickness	14.3 mm
Arc angle of PM	22.5°
Number of poles	16
Number of slots	18
Slot fill factor of coil	48.7%
Air gap	1.2 mm

Tabella 7.1: specifiche del motore

Le tabelle 7.1 e 7.2 (della quale per ora verrà presa in considerazione solo la prima colonna) elencano rispettivamente le specifiche dei motori ed i valori richiesti in queste applicazioni di mobilità cittadina.

**TABLE II**  
**TARGET VALUE AND ANALYSIS RESULTS OF DESIGNED MOTOR**

	Target value	Analysis results
Maximum torque	30 Nm	32.36 Nm
Volume	1.43 L	1.43 L
Maximum power	5 kW	5.41 kW
Maximum torque density	20.97 Nm/L	22.59 Nm/L
Rated speed	1600	1600
Maximum speed	5000	5000

*Tabella 7.2: valori posti come obiettivo e risultati dell'analisi*

Questi valori saranno usati per l'analisi agli elementi finiti in 3D. Il traferro è settato a 1,2mm di ampiezza. I risultati dell'analisi sono riportati nella seconda colonna di tabella 7.2 e verranno discussi nella sezione successiva.

Questa tipologia di motore può realizzare un ampio range di velocità mantenendo la potenza di uscita costante tramite il controllo di campo, nonostante la struttura SPM.

I magneti in terre rare sono stati sempre utilizzati come materiali chiave, tuttavia l'utilizzo della ferrite dà comunque sufficienti garanzie di performance per permettere l'utilizzo della struttura di rotore senza nucleo e per inserire il riduttore di velocità nello statore.

La struttura di rotore, senza nucleo e senza giogo posteriore in materiale magnetico, è inoltre efficace per la soppressione della smagnetizzazione irreversibile, che, come già per altro analizzato, può diventare un problema per i magneti permanenti in ferrite. In più la struttura senza nucleo dovrebbe presentare perdite nel ferro minori e quindi miglior efficienza.

### 7.3 - Risultati della simulazione

In questa sezione vengono discussi i risultati delle simulazioni riguardanti le caratteristiche di coppia e la resistenza alla smagnetizzazione irreversibile. Inoltre verrà investigata la resistenza del motore allo stress causato dalla continua rotazione della ruota.

#### 7.3.1 - Caratteristiche di coppia

La figura 7.2 mostra le variazioni della coppia istantanea e della coppia di cogging in funzione dell'angolo di rotazione, trovate tramite la 3DFEA.

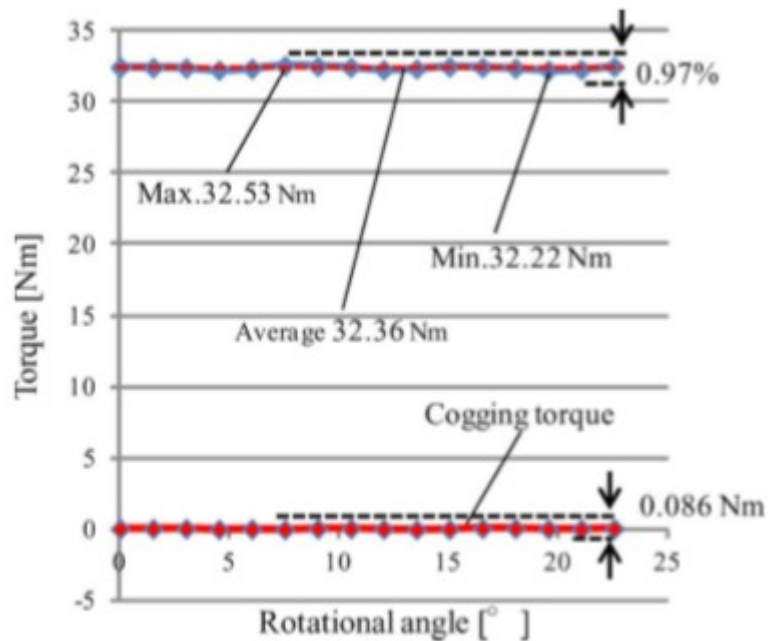


Figura 7.2: variazioni di coppia istantanea e di cogging

I risultati della simulazione sono riportati nella seconda colonna della tabella 7.2.

La temperatura della ferrite è costante e pari a 75°C. La massima coppia media è pari a 32.36Nm e soddisfa i valori posti come obiettivo alla massima densità di corrente di 11,2Arms/mm<sup>2</sup>. L'ampiezza picco-picco delle oscillazioni di coppia è sufficientemente contenuta allo 0,97%. In più l'ampiezza picco-picco della coppia di cogging è molto piccola e pari a 0,086Nm, cioè il 0,27% della massima coppia media.

### 7.3.2 - Potenza in uscita costante e mappa di efficienza

La figura 7.3 mostra la mappa di efficienza per il motore considerato, funzionante con coppia e potenza in uscita costanti. Le linee continue mostrano le coppie realizzate con potenza di uscita costante pari a 5,41kW in un range di velocità di rotazione compreso tra 1600 e 5000 giri al minuto. Durante l'analisi la tensione Vdc dell'inverter è posta costante a 200V.

I risultati stabiliscono che il motore considerato può raggiungere una potenza di uscita costante migliore del valore preventivato di 5kW. L'efficienza del motore è calcolata dalla coppia, dalle perdite nel ferro e da quelle nel rame. Le perdite nel ferro derivano dalla somma delle perdite per isteresi e da quelle per correnti parassite nel nucleo di statore e dalle perdite per correnti parassite nel rotore. Queste perdite nel ferro, nel caso della ferrite, sono molto minori e quindi vengono trascurate nell'analisi. La figura 7.3 mostra la massima efficienza alle varie velocità di rotazione. Come si può vedere l'efficienza è massima per le alte velocità e la massima efficienza è pari a 95,01 ed è raggiunta a 3200 giri al minuto.

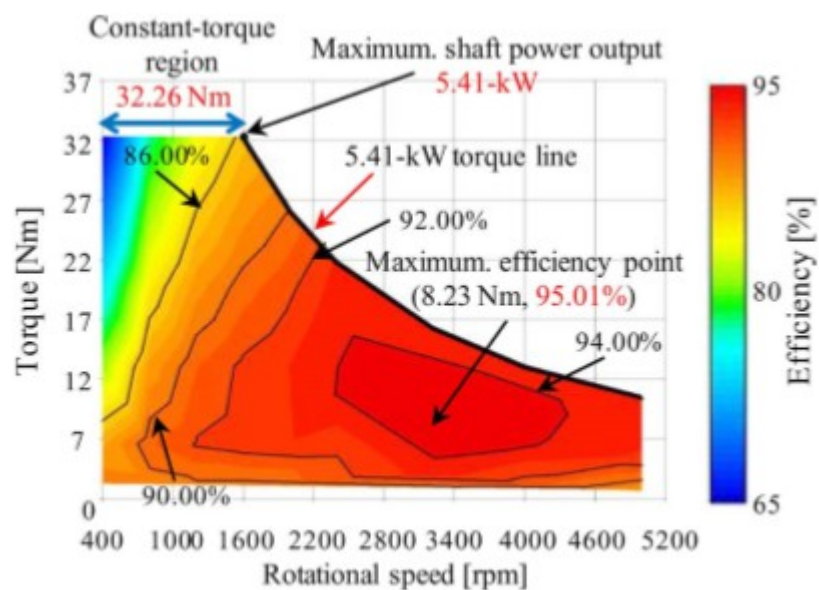
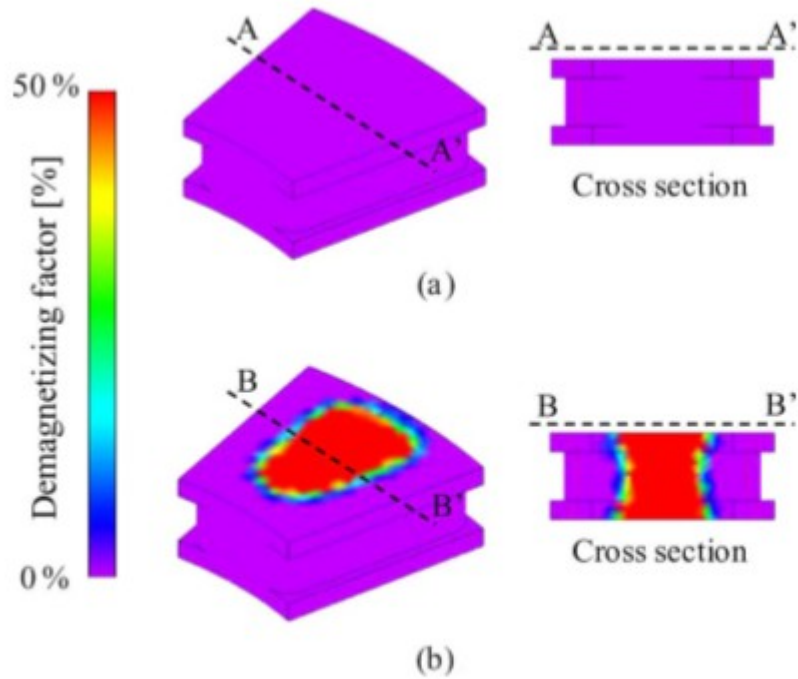


Figura 7.3: mappa di efficienza

### 7.3.3 - Smagnetizzazione irreversibile nei magneti in ferrite

E' importante verificare che nel motore in oggetto non si verifichi la smagnetizzazione definitiva dei magneti permanenti. Per investigare sul fenomeno verrà usata ancora una volta l'analisi FEM sotto condizione di angolo di fase della corrente costante a 90° e temperatura della ferrite -40°C (condizioni più gravose di esercizio).

Il flusso in queste condizioni è direttamente opposto alla direzione di magnetizzazione dei magneti permanenti. In aggiunta la magnetizzazione irreversibile tende a manifestarsi maggiormente alle basse temperature. In figura 7.4 sono mostrati i risultati della simulazione.



FEA results of irreversible demagnetization of ferrite PM at the maximum current density of 11.2 Arms/mm<sup>2</sup> and 3-fold the maximum current density. (a) At maximum current density of 11.2 Arms/mm<sup>2</sup>. (b) At 3-fold maximum current density.

Figura 7.4: smagnetizzazione irreversibile dei magneti in ferrite

Alla massima densità di corrente (11,2Arms/mm) la smagnetizzazione permanente non si verifica. Però si manifesta ad un valore di 3 volte più grande di questa corrente.

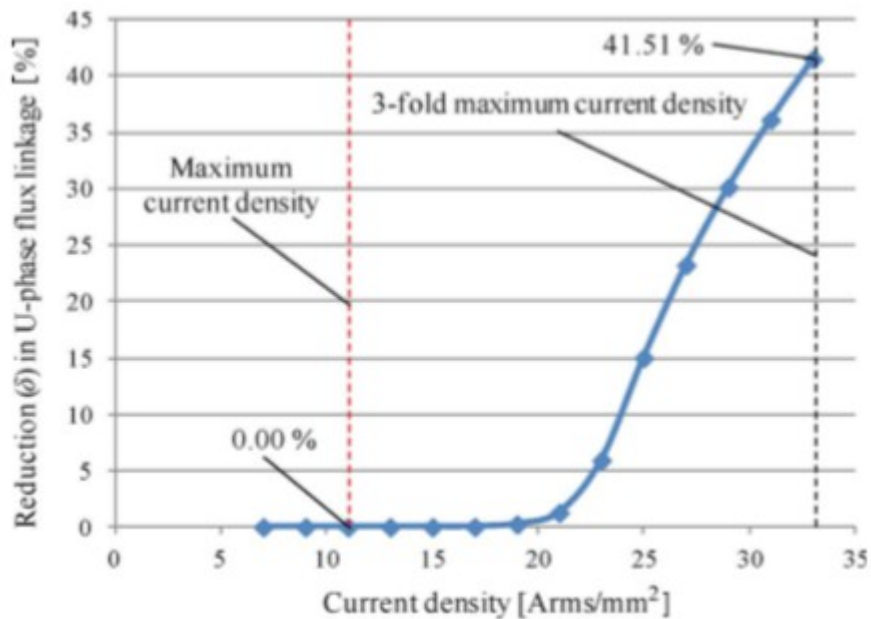


Figura 7.5: percentuale di smagnetizzazione

La figura 7.5 mostra la percentuale di smagnetizzazione in funzione di un valore che rappresenta l'indice di smagnetizzazione e che si calcola come:

$$\delta = \frac{\psi_{mb} - \psi_{ma}}{\psi_{mb}} \times 100 [\%].$$

I due flussi che compaiono sono quelli che vengono generati dai magneti permanenti in ferrite prima e dopo la conduzione di corrente. Alla massima densità di corrente l'indice di smagnetizzazione è stabile sullo 0,00%, quindi il motore è a tutti gli effetti in grado di resistere a questo fenomeno anche con massima densità di corrente.

### 7.3.4 - Stress causato dalla rotazione

Lo stress che interessa il rotore cresce proporzionalmente al quadrato della velocità di rotazione. Siccome la velocità massima del motore in oggetto è pari a 5000 giri al minuto l'analisi è condotta usando tale velocità. La figura 7.6 mostra i risultati dell'analisi.

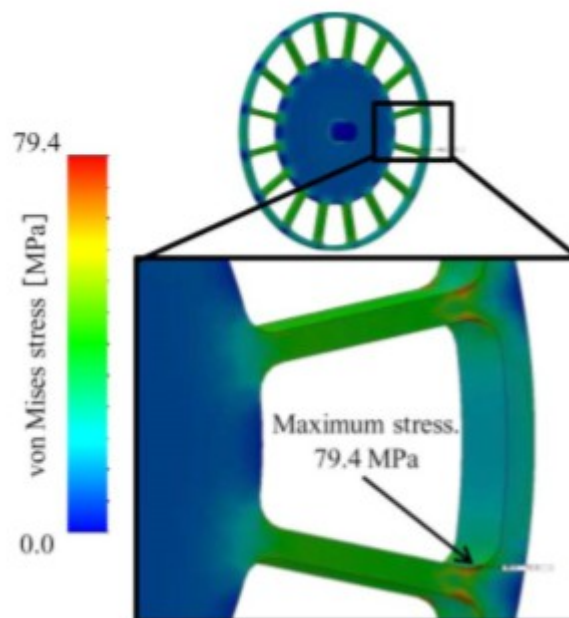


Figura 7.6: mappa dello stress causato dalla rotazione

Un massimo valore dello stress pari a 79,4MPa è localizzato nel punto indicato dalla freccia. Il punto di rottura del materiale impiegato per il rotore è pari a 206MPa.

La figura 7.7 mostra la relazione tra lo stress massimo e la velocità di rotazione.

Quando la velocità di rotazione è pari a 8056 giri al minuto lo stress raggiunge 206MPa e quindi il punto di rottura.

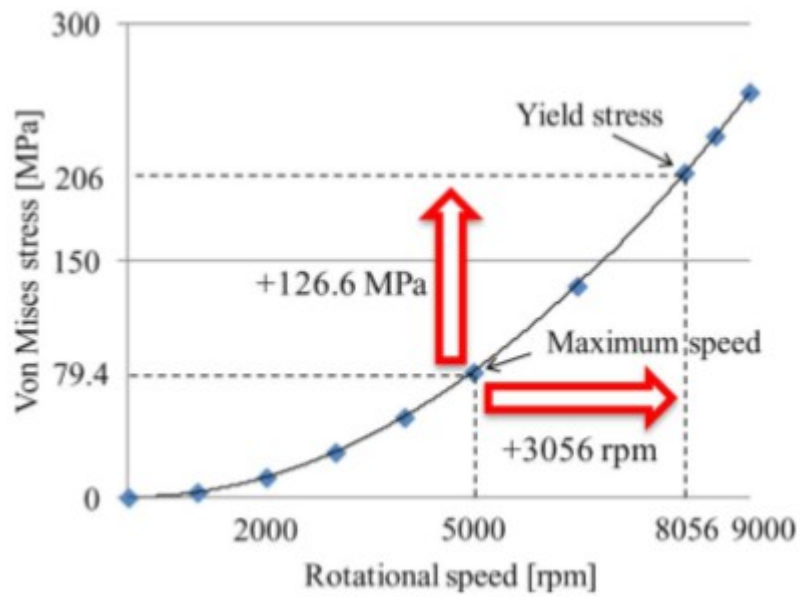


Figura 7.7: relazione tra stress massimo e velocità di rotazione

## 7.4 - Conclusioni

Il motore configurato rispetta appieno le caratteristiche richieste dalle applicazioni in-wheel per la mobilità elettrica cittadina, perciò la sostituzione dei magneti in terre rare con la ferrite rappresenta una strada economica e percorribile anche per questo genere di applicazioni.



# Capitolo 8 - Motore a magneti permanenti da 10kW con ferrite per applicazioni in-wheel

## 8.1 - Introduzione

Nel capitolo precedente è stata dimostrata la fattibilità della sostituzione dei magneti permanenti in terre rare con della più economica ferrite per quanto riguarda un motore in-wheel da 5kW per applicazioni nell'ambito della mobilità cittadina. Come visto la nuova tipologia di motore, nonostante l'utilizzo della ferrite, è stata in grado di soddisfare tutti i requisiti richiesti per questa particolare applicazione, in particolar modo le esigenze di spazio, produzione di coppia e resistenza allo stress causato dalla rotazione.

In questo capitolo, con l'obiettivo di aumentare la potenza in uscita, verrà considerato un motore da 10 kW.

Inizialmente la sua configurazione sarà simile a quella del suo omologo da 5kW (16 poli e 18 cave), poi, con l'aiuto dell'analisi FEM 3D e dei test su un prototipo, la struttura verrà modificata per garantire la riduzione delle perdite dovute alle correnti parassite.

La struttura risultante sarà caratterizzata da 16 poli e 24 cave e sarà in grado di soddisfare i requisiti richiesti dall'applicazione in-wheel per la mobilità cittadina.

## 8.2 - Configurazione iniziale: macchina a 16 poli e 18 cave

### 8.2.1 - Struttura di base

Figura 8.1 mostra un' veduta generale del motore da 10kW proposto nella sua configurazione iniziale da 16 poli e 18 cave simile a quella già vista per il motore da 5kW.

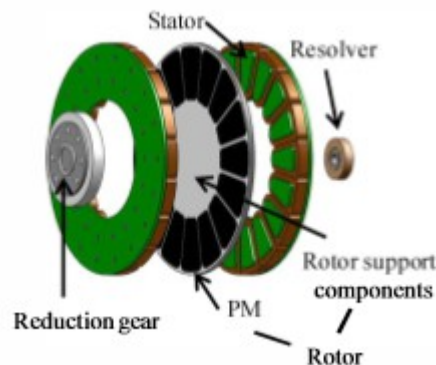


Figura 8.1: struttura inizialmente proposta

Il motore proposto presenta una struttura con rotore interno e statore esterno, nel quale il rotore è posto nel mezzo tra due statori. La struttura di rotore è costruita solamente con magneti permanenti in ferrite, posti all'interno di una struttura in acciaio, in modo da massimizzare la coppia magnetica. Questa struttura è chiamata *Rotore senza nucleo* e presenta i seguenti vantaggi:

- Possibilità di prevenire la smagnetizzazione irreversibile dei magneti permanenti in ferrite;
- Quando il rotore è eccentrico alla direzione assiale, le forze elettromagnetiche non bilanciate agenti sul rotore possono essere ridotte;
- Le perdite nel ferro possono essere trascurate, soprattutto nel funzionamento ad alte velocità.

Per questo dal motore in oggetto è lecito aspettarsi un'alta efficienza.

In aggiunta, per soddisfare i requisiti della mobilità cittadina, viene inserito un riduttore di giri con rapporto 5:1, come mostrato in figura 8.1. Dalla parte opposta è invece installato un resolver.

Il motore proposto in questa maniera riesce ad ottimizzare alla perfezione il poco spazio effettivamente disponibile all'interno della ruota.

In tabella 8.1 vengono riportati i valori posti come obiettivo per il motore da 10kW proposto.

**TABLE I**  
**TARGET VALUE OF THE PROPOSED MOTOR**

Maximum torque	73 Nm
Maximum power output	10 kW
Maximum phase voltage amplitude	Less than 110 V
Maximum current density	11.9 Arms/mm <sup>2</sup>
Cogging torque	Less than 3% of average torque
Base speed	1300 rpm
Maximum speed	5000 rpm
Outer diameter	294 mm
Total motor axial length	Less than 66 mm
Slot fill factor of coil	Less than 55 %
Air gap	1.5 mm

*Tabella 8.1: valori posti come obiettivo per la macchina da 10kW*

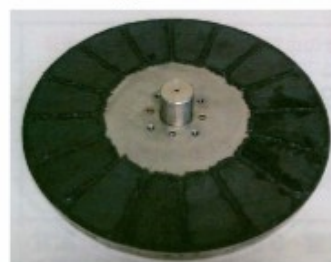
Le dimensioni di ogni parte della macchina sono state ottimizzate per raggiungere questi valori grazie all'analisi 3DFEA. Le figure 8.2a e 8.2b mostrano l'aspetto esterno del prototipo, ponendolo a confronto con l'omologo di taglia minore.



(a) Front view



(b) Side view



(c) Rotor

*Figura 8.2: aspetto del prototipo*

Il diametro esterno della macchina da 10kW è aumentato rispetto a quello della macchina da 5kW, ma la lunghezza assiale è diminuita. La figura 8.2c mostra il rotore del prototipo, in cui è ben visibile la struttura senza nucleo. I magneti in ferrite vengono fissati sul supporto tramite un materiale adesivo.

### 8.2.2 - Risultati sperimentali della macchina da 16 poli e 18 cave

In figura 8.3 è riportata la mappa di efficienza del prototipo da 10kW con la configurazione 16p,18s lungo tutto il campo di operatività.

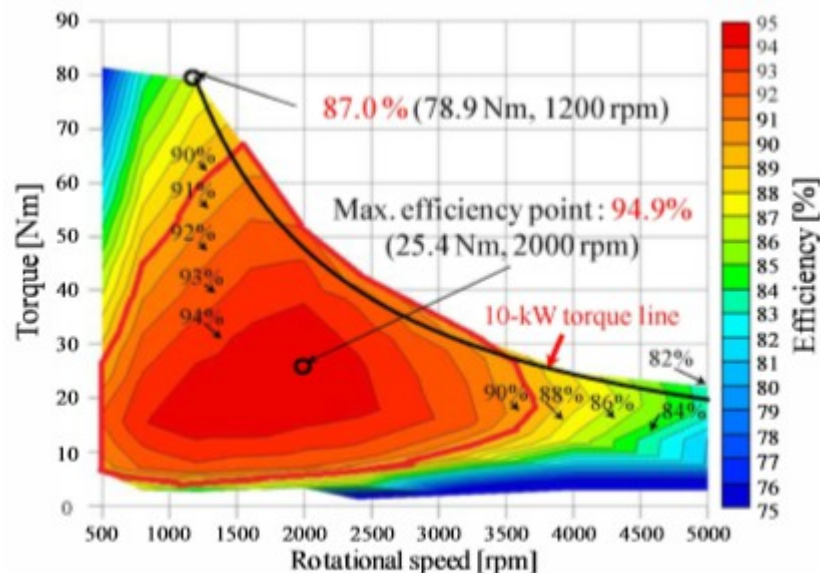


Figura 8.3: mappa di efficienza macchina 16p18s

E' stato effettuato un test a carico con varie densità di corrente e velocità di rotazione ed inoltre sono state eliminate le perdite dei cuscinetti. La linea continua in figura 8.3 mostra la curva di coppia realizzata con potenza di uscita costante pari a 10kW nel range di velocità compreso tra 1200 e 5000rpm. Durante i test la tensione sul lato in continua dell'inverter è stata tenuta costante alla tensione di batteria (200V). I risultati mostrano che il motore proposto può effettivamente erogare una potenza in uscita costante di 10kW. L'area cerchiata di rosso è quella in cui l'efficienza si mantiene sopra l'80%, mentre il valore massimo è raggiunto a 2000rpm ed è pari al 94,9%. Il prototipo da 10kW presenta buone caratteristiche nella regione di velocità al di sotto di 3500rpm. Le correnti parassite vengono però generate in gran misura ed influiscono pesantemente sulle zone ad alta coppia ed alta velocità. Diventa dunque essenziale sopprimere la maggior parte di queste correnti localizzate nel supporto di rotore, con l'obiettivo di rendere possibile l'uso del motore da 10kW nella pratica. Questo problema verrà affrontato nella prossima sezione.

### 8.3 – Perdite dovute alle correnti parassite

In questa sezione verranno analizzate, tramite analisi 3DFEA, le perdite per correnti parassite all'interno del supporto di rotore. Figura 8.4 mostra un paragone tra le perdite per correnti parassite nel supporto di rotore, alla massima potenza in uscita, in ogni taglia di motore, rispettivamente alla velocità base e massima.

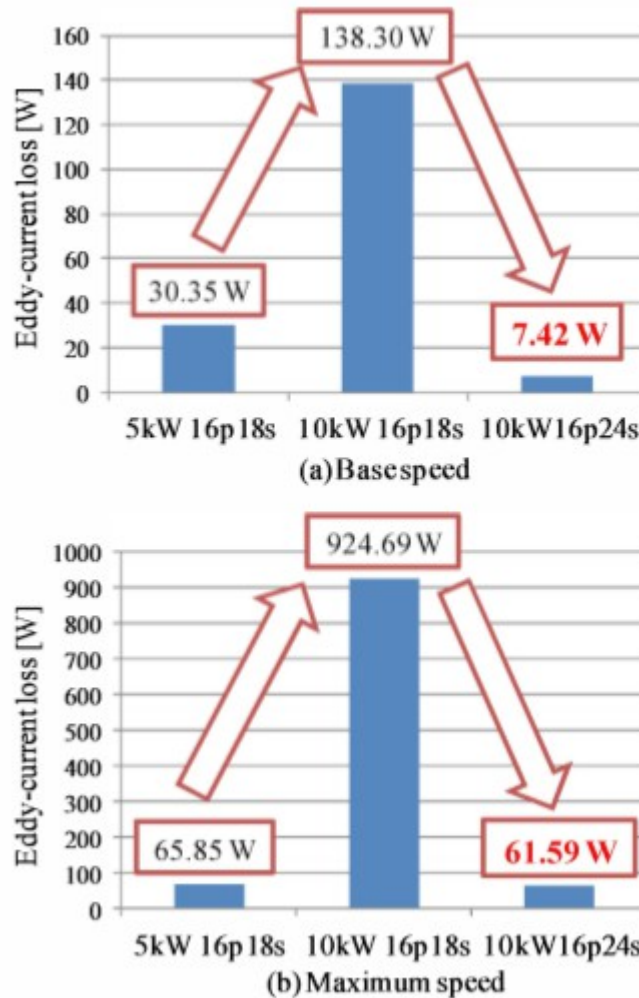


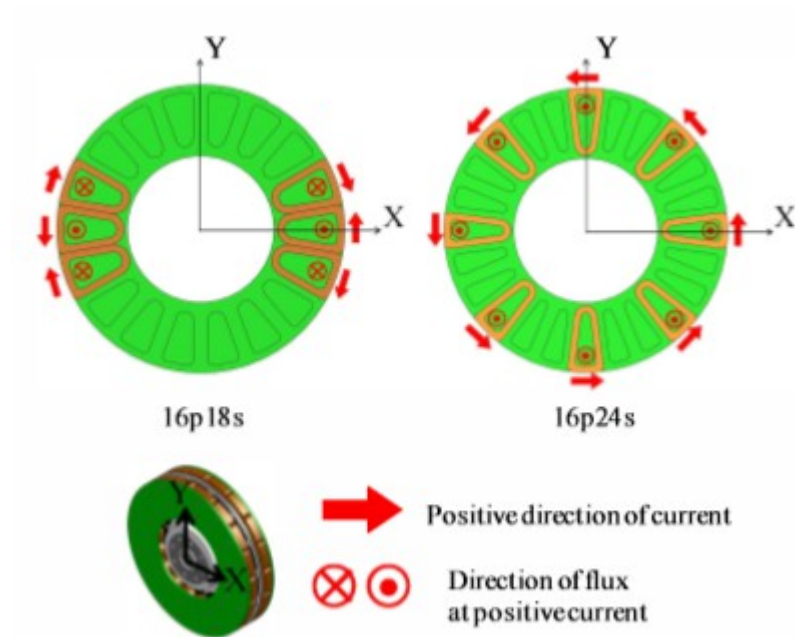
Figura 8.4: paragone tra le perdite per correnti parassite nelle varie configurazioni di motore

Le perdite causate dalle correnti parassite nella macchina da 10kW aumentano in maniera significativa e non trascurabile rispetto al caso da 5kW. Alla velocità base queste sono pari a 138.3W (il quadruplo rispetto a quelle del caso con taglia minore) e addirittura raggiungono 924.69W a velocità massima (14 volte quelle della macchina a 5kW). Questo causa inevitabilmente un declino di efficienza alle alte velocità e con alta coppia prodotta, come mostrato in figura 8.3.

Queste perdite diventano inoltre un serio problema in termini di generazione di calore nel rotore, che peraltro è difficile da raffreddare a causa della sua posizione interna.

Per questo è stata studiata una configurazione alternativa 16p24s, capace di sopprimere gran parte delle correnti parassite.

In figura 8.5 vengono messe a confronto le configurazioni di avvolgimento per le due strutture.

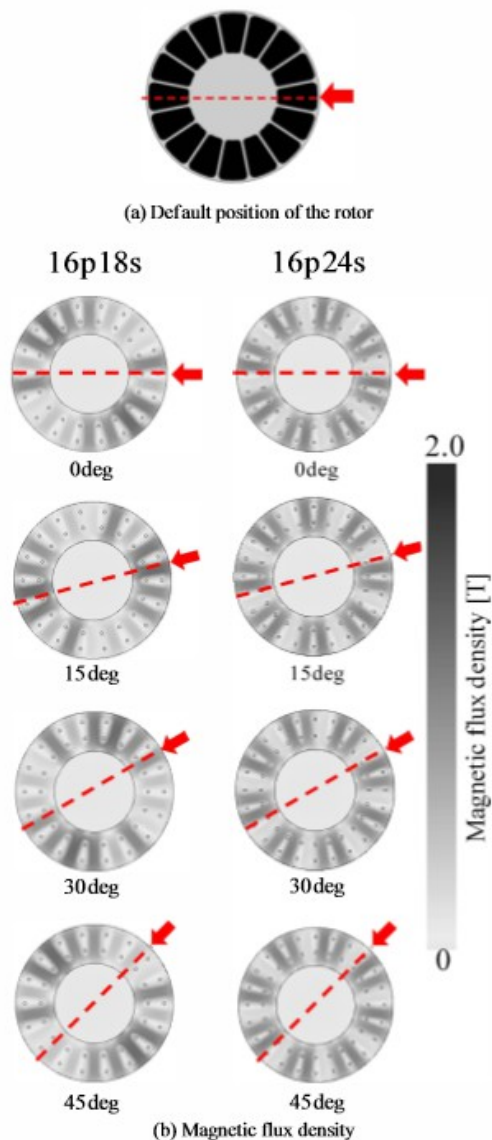


*Figura 8.5: disposizione degli avvolgimenti*

Come mostrato in figura 8.4, le perdite per correnti parassite nel supporto di rotore vengono ridotte ad appena 7.52W alla velocità base e 61.59W a velocità massima: una riduzione veramente significativa.

La figura 8.6 mostra la distribuzione di induzione nel nucleo di statore dei due tipi di macchina sotto condizione di massima densità di corrente, a diversi angoli di rotazione del rotore.

La figura 8.6a mostra la posizione iniziale del rotore, mentre la freccia rossa in figura 8.6b mostra l'inclinazione raggiunta dal rotore in movimento.



*Figura 8.6: distribuzione dell'induzione sul nucleo di statore*

Come si può notare in quest'ultima figura, la distribuzione dell'induzione nella macchina 16p24s varia in maniera sincronizzata con la posizione del rotore. La distribuzione di induzione corrispondente alla posizione di rotore iniziale è quindi la stessa in corrispondenza di ogni angolo di rotazione. Questo indica che le variazioni di induzione sono basse. D'altra parte la distribuzione dell'induzione nel modello 16p18s non varia sincrona alla rotazione del rotore. Quindi in questo caso la variazione di induzione è consistente.

La figura 8.7 mostra chiaramente questo fenomeno, mostrando il flusso in una specifica area del supporto di rotore sotto la massima densità di corrente ad ogni angolo di rotazione.

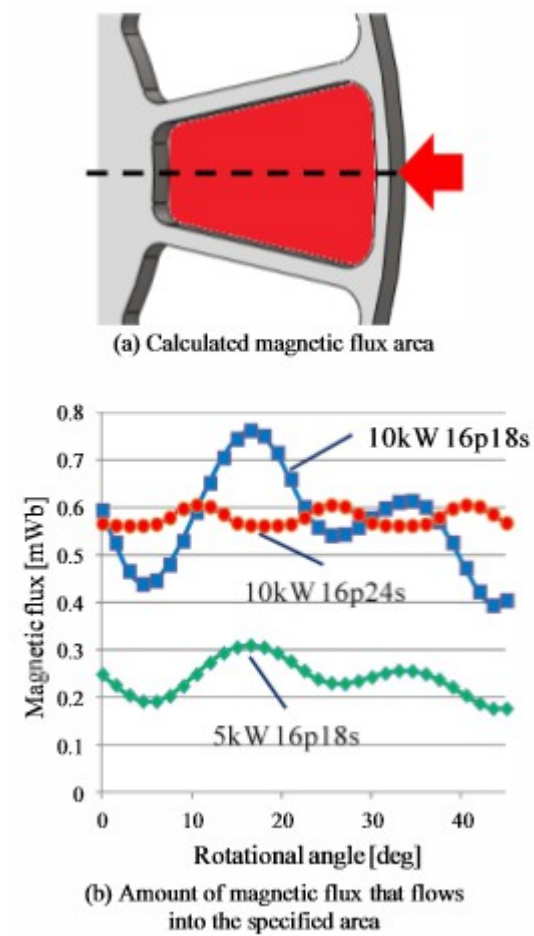


Figura 8.7: variazioni di flusso nell'area evidenziata

In figura 8.7b si ha un paragone tra il flusso che scorre nell'area evidenziata in figura 8.7a tra i tre tipi di macchina fin qui considerati in questo capitolo.

Le variazioni di flusso sono dunque molto minori nella configurazione a 16 poli e 24 cave e questo è il motivo che sta alla base della minor quantità di perdite per correnti parassite in quest'ultimo modello.

## 8.4 - Configurazione della macchina 16p24s

### 8.4.1 - Skewing del rotore

La figura 8.8 mostra la forma d'onda della coppia istantanea alla massima corrente di 11,9 Arms/mm<sup>2</sup> e la forma d'onda della coppia di cogging a vuoto.

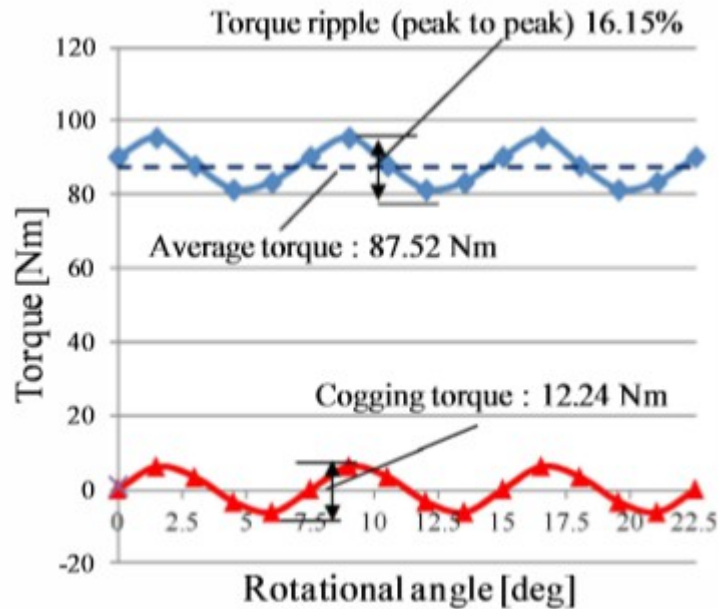


Figura 8.8: coppia istantanea e di cogging

Con l'adozione della struttura 16p24s è stato possibile ridurre le perdite per correnti parassite, ma l'oscillazione di coppia e la coppia di cogging hanno raggiunto valori considerevoli. Per ridurre queste ultime viene dunque adottato lo skewing del rotore.

In figura 8.9 vengono mostrate le strutture di rotore con angolo di skew rispettivamente pari a 0° e 8°.

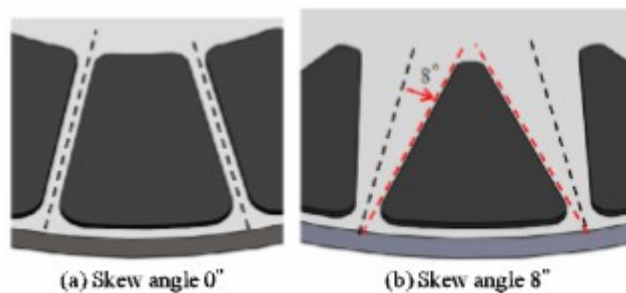


Figura 8.9: skewing del rotore – (a) 0° - (b) 8°

Figura 8.10 mostra l'andamento dell'oscillazione della coppia istantanea e della coppia di cogging in funzione dell'angolo di skew.



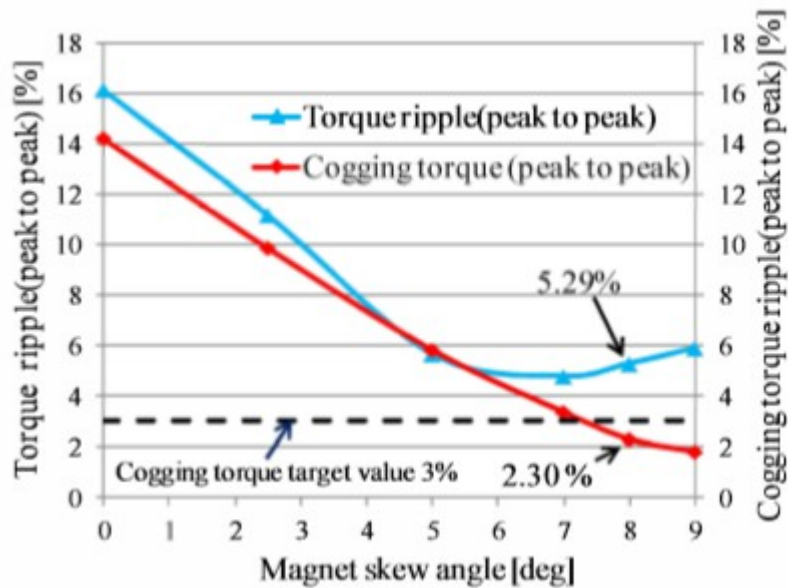


Figura 8.10: andamento della coppia di cogging e delle oscillazioni di coppia in funzione dell'angolo di skew

Entrambi i valori sono rapportati alla massima coppia media in ogni singolo angolo di skew. Con un angolo pari a  $8^\circ$  è stato verificato che la percentuale di coppia di cogging rispetto al valore massimo della coppia media è pari al 2,3%, un valore minore dell'obiettivo (posto al 3%) e dunque accettabile. Quando l'angolo di skew supera i  $7^\circ$ , le oscillazioni di coppia istantanea cominciano lentamente a salire. Ad ogni modo si è optato per un angolo di  $8^\circ$ , dando la precedenza alla minimizzazione della coppia di cogging. Può essere notato come l'applicazione dello skewing causi la diminuzione del volume di materiale magnetico e questo porta inevitabilmente ad una decrescita della coppia prodotta. La figura 8.11 mostra questa diminuzione in funzione dell'angolo di skew.

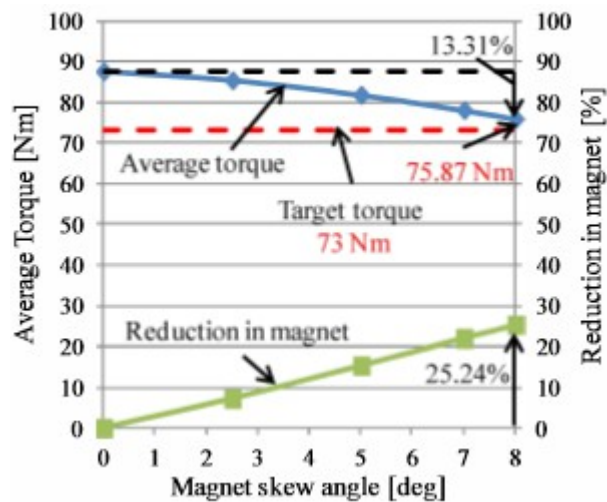


Figura 8.11: riduzione di coppia dovuta allo skewing

Con angolo di skew pari ad  $8^\circ$  la coppia prodotta risulta comunque pari a 75.87Nm, che è un valore comunque superiore all'obiettivo di 73Nm e quindi accettabile. La decrescita nel valore di coppia è pari al 13.31%, mentre la diminuzione di materiale magnetico utilizzato è pari a 25.24%. In questo modo la coppia per unità di volume prodotta dai magneti risulta aumentata. La figura 8.12 mostra

un paragone tra i valori di coppia istantanea con angolo di  $0^\circ$  e  $8^\circ$ .

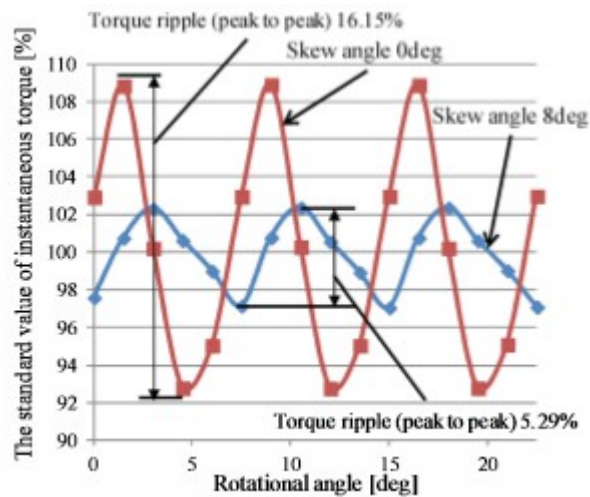


Figura 8.12: confronto tra coppia istantanea con e senza skewing

Le oscillazioni con angolo  $0^\circ$  e  $8^\circ$  sono pari rispettivamente a 16,15% e 5,29%. E' dunque evidente che le oscillazioni di coppia possano essere ridotte tramite lo skewing del rotore.

In figura 8.13 viene mostrato il rapporto della coppia di cogging con la massima coppia media, con angolo di skew pari a  $0^\circ$  e  $8^\circ$ . La coppia di cogging decresce dal 14,22% al 2,30%.

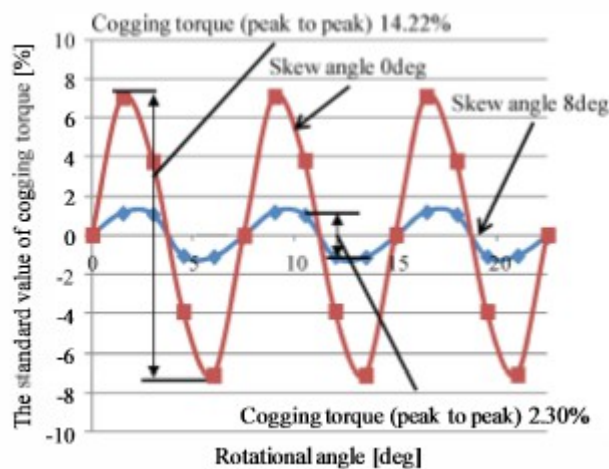


Figura 8.13: riduzione di coppia di cogging

#### 8.4.2 - Contromisure per le perdite dovute a correnti parassite

Nella sezione precedente ci si era occupati con successo della diminuzione delle perdite dovute alle correnti parassite, adottando la configurazione di macchina con 16 poli e 24 cave. Con l'adozione dello skewing di rotore però, l'area occupata dal materiale di supporto del rotore, in cui hanno sede le perdite, è aumentata (come si può ben vedere in figura 8.9). Questo si traduce inevitabilmente in una crescita delle perdite dovute alle correnti parassite.

Figura 8.14 mostra l'andamento delle perdite per correnti parassite in funzione dell'angolo di skew.

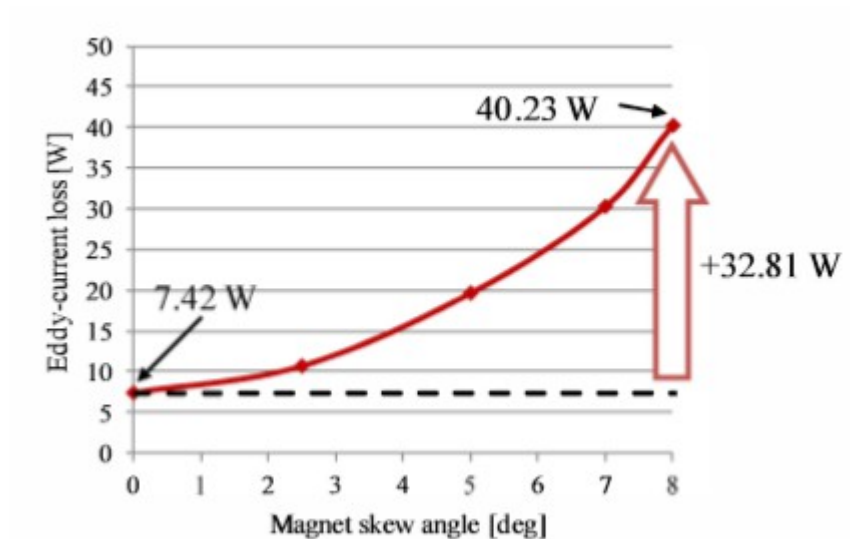


Figura 8.14: crescita delle perdite al crescere dello skewing

Le perdite per correnti parassite crescono fino a 40.23W in corrispondenza dell'angolo di skew di 8° precedentemente prescelto. Per mitigare questo problema la soluzione attuata è quella di effettuare dei buchi all'interno della struttura di supporto del rotore, come mostrato in figura 8.15.



figura 8.15: buchi nella struttura di rotore

Figura 8.16 mostra la situazione prima e dopo l'apertura di questi buchi nel rotore.

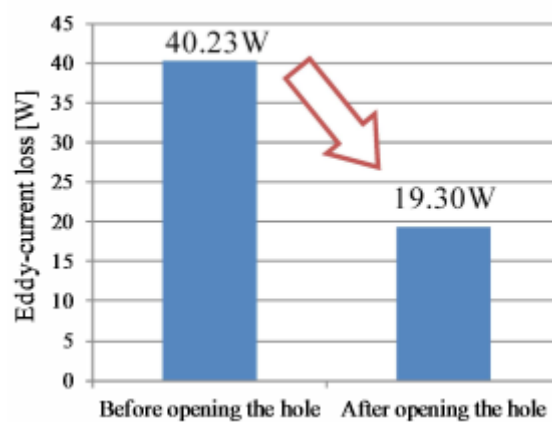


Figura 8.16: situazione prima e dopo l'apertura dei buchi nel rotore

Con l'apertura dei buchi, le perdite dovute alle correnti parassite sono state ridotte fino a 19.3W. Questo decremento potrebbe sembrare piccolo, ma diventa significativo considerando il calore prodotto da queste perdite, che decresce del 50%. In più i fori rendono migliore il raffreddamento del rotore, che, come già fatto notare, è un problema non da poco in questa applicazione. L'apertura di questi buchi potrebbe causare una diminuzione della resistenza allo stress. Con una simulazione tramite software è stato però dimostrato che il massimo stress (con condizioni di esercizio più gravose) è pari a 199,5MPa, mentre il punto di rottura del materiale utilizzato per il supporto di rotore si colloca a 296MPa.

# Capitolo 9 – Applicazioni eoliche – Differenze tra performance e costo dei magneti permanenti utilizzati nei generatori

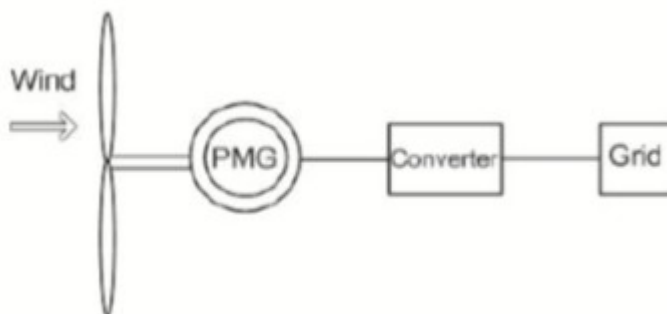
## 9.1 - Introduzione

Durante gli ultimi decenni, la crescita del settore legato all'energia eolica è stata davvero imponente. E' indiscutibile come l'energia eolica possa giocare, anche in futuro, un ruolo importante nella ricerca di soluzioni energetiche alternative. La crescita del prezzo dell'energia degli ultimi anni ha inoltre spinto ulteriormente sullo sviluppo di turbine eoliche di piccola taglia. Queste ultime possono essere utilizzate in zone senza connessione alla rete o come soluzione addizionale, in ogni contesto, per mitigare le spese per l'energia.

Per rendere conveniente l'uso di queste turbine è vitale renderle il più possibile compatte ed efficienti, oltre che economiche.

In questo capitolo verrà presentata una nuova struttura di generatore sincrono a magneti permanenti, senza cave e con bassa velocità di rotazione. Questa struttura presenta dimensioni contenute, una configurazione semplice e bassi costi di manutenzione, ovvero tutti i requisiti richiesti per questo genere di applicazioni.

Uno dei più grossi vantaggi è la possibilità di connessione diretta dell'albero della macchina con le pale di turbina, senza il bisogno di un moltiplicatore di giri, come mostrato in figura 9.1.



*Figura 9.1: connessione diretta all'albero della macchina*

## 9.2 - Macchina sperimentale

La macchina presentata in questo capitolo è un generatore a flusso radiale, caratterizzato da un diametro relativamente largo, piccola lunghezza assiale, bassa velocità e peso contenuto. Il modello di questa macchina è presentato in figura 9.2.



Figura 9.2: modello della macchina studiata

Per minimizzare la coppia resistente, la macchina presenta una geometria senza cave. La superficie interna dello statore è liscia e la riluttanza magnetica presente tra lo statore ed il rotore è la stessa per qualsiasi posizione relativa durante la rotazione. I magneti permanenti sono montati sulla superficie del rotore e l'avvolgimento trifase giace sullo statore.

Durante l'esperienza, il vento è stato simulato da un motore elettrico controllato tramite un convertitore di frequenza.

I parametri principali del generatore studiato possono venire trovati in tabella 9.1.

TABLE I. MAIN PARAMETERS OF THE STUDIED GENERATOR

Parameter	Value
Rated power	5 kW
Nominal rotational speed	230 rpm
Nominal voltage	240 V <sub>ac</sub>
Nominal current	12.1 A <sub>ac</sub>

Tabella 9.1: parametri principali del generatore

### 9.3 - Magneti studiati

La scelta per quanto riguarda i magneti permanenti può cadere su diversi materiali. In questo capitolo verranno messe a confronto le tre solite tipologie di materiali magnetici, le cui caratteristiche principali sono riportate in tabella 9.2.

TABLE II. MAIN PROPERTIES OF THE STUDIED MAGNETS

Magnet material	$BH_{max}$ (kJ/m <sup>3</sup> )	$B_r$ (T)	$H_c$ (kA/m)
NdFeB	220–500	0.97–1.45	740–1000
SmCo	120–240	0.85–1.1	620–840
Ferrite	7–42	0.2–0.48	120–360

Tabella 9.2: caratteristiche principali dei materiali magnetici

A causa dell'alta induzione residua e dell'elevata densità di energia, i magneti NdFeB sono i materiali attualmente più usati in questo genere di applicazioni. Tuttavia la ferrite, nonostante

caratteristiche decisamente inferiori, viene anch'essa largamente impiegata, soprattutto per via della sua economicità. Le temperature di utilizzo della ferrite si attestano in un intervallo compreso tra  $-40^{\circ}\text{C}$  e  $150^{\circ}\text{C}$  e da questo punto di vista si presenta superiore agli altri due materiali. Per produrre un campo magnetico al traferro forte con i magneti in ferrite è necessario usare una quantità di materiale significativamente maggiore rispetto ai due materiali con maggiore densità di energia. Questo influisce sulla massa del generatore. Una delle possibilità per superare questo problema può essere l'uso di configurazioni speciali dei magneti. Per esempio, è possibile aumentare la densità di energia della macchina implementando la struttura dell'array di Halbach. Usando questa configurazione si può aumentare notevolmente l'induzione al traferro, diminuendo nel contempo il volume di materiale magnetico necessario. Il principio dell'array di Halbach è presentato schematicamente in figura 9.3.

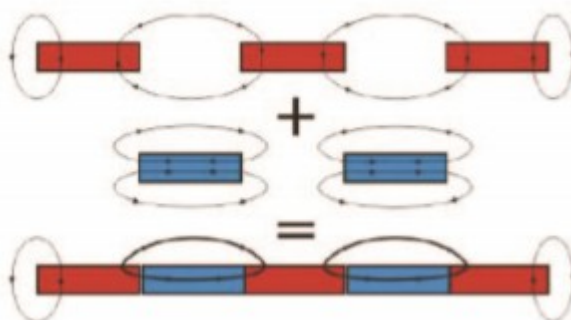


Figura 9.3: array di Halbach

Tuttavia, utilizzando questa struttura, possono presentarsi degli inconvenienti. E' meccanicamente difficile costruire una macchina con questa configurazione magnetica ed un rischio che può presentarsi è quello della smagnetizzazione (parziale o completa) dei magneti impiegati. Questo può succedere persino durante la costruzione della macchina, a causa di errori nel processo di assemblaggio.

## 9.4 - Risultati dei test

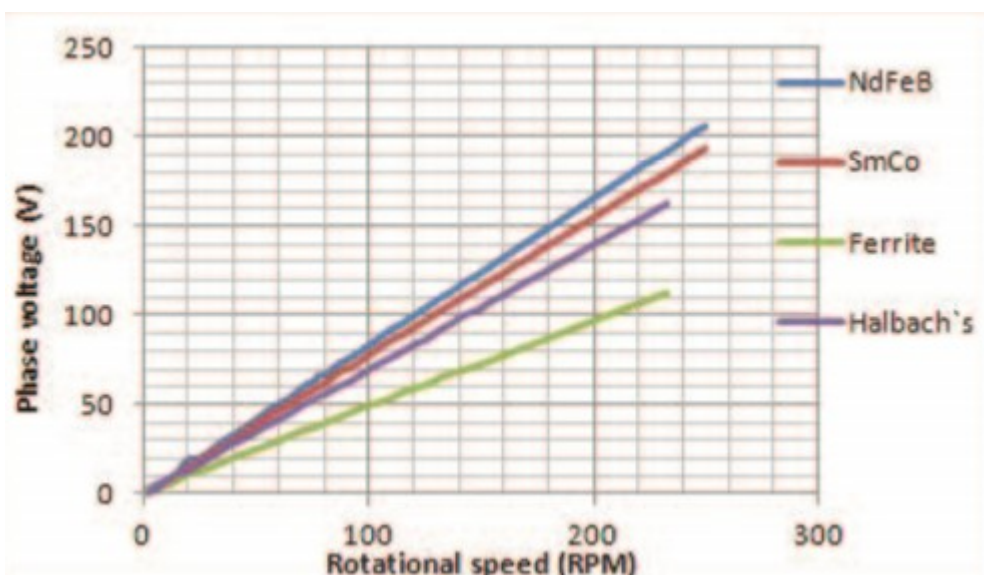


Figura 9.4: risultati della prova a vuoto coi diversi materiali

La prima serie di test, usando rotori contenenti diversi materiali magnetici, viene effettuata a vuoto. Le caratteristiche ottenute sono riportate in figura 9.4. Come si può notare più alta è la densità di energia prodotta dal magnete utilizzato, maggiore sarà la tensione di fase della macchina. Inoltre può essere notato come i magneti in ferrite, posti nella posizione presentata come array di Halbach, generino una tensione significativamente più alta degli omologhi con configurazione standard. Con velocità più elevata le differenze tra i vari materiali magnetici si fanno più accentuate. Successivamente viene condotto il test a carico, i cui risultati sono riportati in figura 9.5.

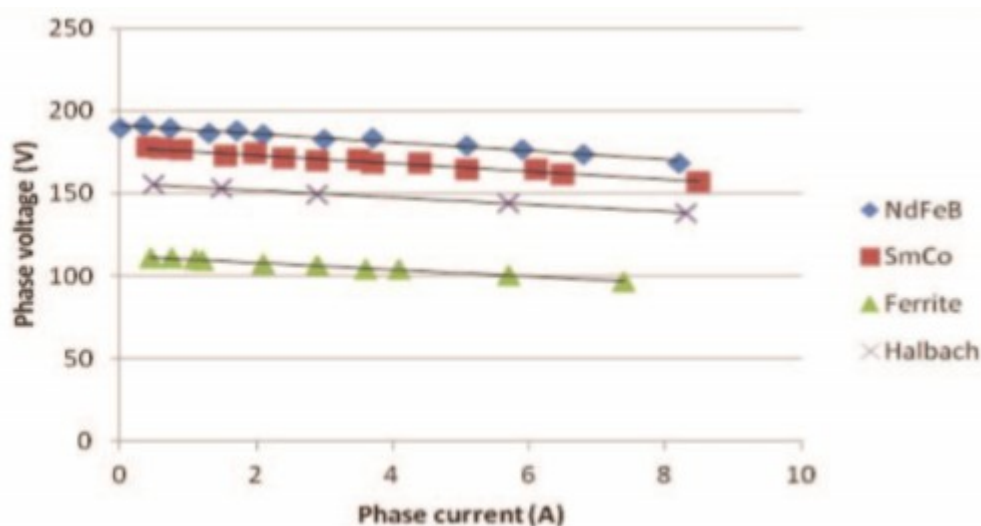


Figura 9.5: risultati della prova a carico per i diversi materiali

Può essere osservato un calo della tensione con l'aumentare della corrente. Il test è stato effettuato con velocità costante di 230rpm, che rappresenta la velocità nominale del generatore preso in considerazione.

La caduta di tensione ha andamento simile per ognuno dei materiali considerati, ma le differenze possono essere viste nei valori di tensione punto per punto. Il risultato dell'uso di materiali magnetici con densità di energia minore sta infatti nel presentarsi di valori meno elevati di tensione. In figura 9.6 è evidenziata la dipendenza della potenza in uscita dal generatore dalla corrente con la quale esso viene alimentato.



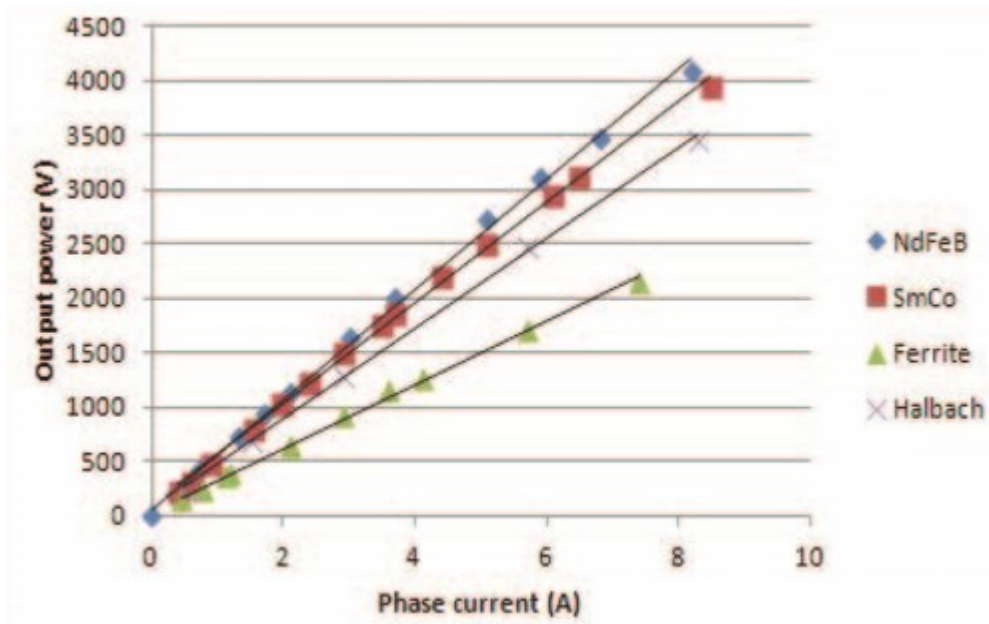


Figura 9.6: andamento della potenza in uscita in funzione della corrente di fase

Da queste caratteristiche fin qui mostrate può essere affermato che la corrente necessaria è minore per i materiali magnetici più forti, qualunque sia la potenza in uscita richiesta.

### 9.5 - Prezzo dei materiali magnetici utilizzati per il generatore considerato

Tabella 9.3 riporta la quantità di materiale magnetico necessaria per la realizzazione del generatore.

TABLE III. QUANTITIES AND DIMENSIONS OF THE STUDIED MAGNETS

Magnet		Dimensions (mm)	Quantity
NdFeB		35×55×10	40
SmCo		40×55×15	40
Ferrite		100×40×40	32
Ferrite (Halbach)	Main magnet	100×40×40	32
	Side magnet	100×39×23	32

Tabella 9.3: previsione della quantità di materiale magnetico da impiegare

Il costo dei magneti permanenti utilizzati per la macchina contenente NdFeB è approssimativamente pari a 1768 USD.

Il costo dei magneti SmCo si aggira attorno a 1927 USD.

Il costo dei magneti permanenti in ferrite nella loro configurazione tradizionale è di circa 1063 USD.

Il costo dei magneti permanenti per la configurazione Halbach è pari a 1600 USD.

## 9.6 - Conclusioni

I magneti in ferrite diventano competitivi quando la loro configurazione viene ottimizzata, con l'obiettivo di aumentare l'induzione al traferro della macchina. In questo capitolo si è parlato della configurazione dell'array di Halbach.

L'utilizzo della ferrite provoca un aumento del peso e delle dimensioni della macchina, che influenza anche il prezzo della stessa. In aggiunta la costruzione della configurazione Halbach si mostra essere particolarmente complessa e di difficile realizzazione nella pratica. Questo significa che esistono molte possibilità di errori durante la costruzione della macchina, tali da causare la smagnetizzazione totale o parziale dei magneti.

I magneti permanenti in NdFeB tendono ad avere il miglior rapporto qualità/prezzo, ma data l'instabilità del mercato, le soluzioni alternative non possono essere accantonate.

# Capitolo 10 – Applicazioni eolico – Sostituzione dei magneti NdFeB con la ferrite in un piccolo aerogeneratore da 1,5kW

## 10.1 - Introduzione

Questo studio descrive la possibile sostituzione dei magneti in NdFeB con quelli in ferrite per quanto riguarda un generatore eolico da 1.5kW, con l'obiettivo di perseguire prestazioni e dimensioni della macchina simili.

Il generatore convenzionale è di tipo slotless per eliminare le oscillazioni di coppia. Tuttavia, al fine di ottenere prestazioni soddisfacenti, la struttura magnetica dovrà essere di nuova concezione, in modo da migliorare la densità di energia ed andare così a mitigare le peggiori prestazioni naturali della ferrite utilizzata.

Questo modello di nuova concezione presenta una struttura studiata per minimizzare il traferro magnetico e la sua forma è ideale per ridurre quanto più possibile le oscillazioni di coppia.

L'ottimizzazione non usa il metodo FEM, ma procede in modo analitico, con risultati comunque affidabili e validati attraverso una successiva sperimentazione.

## 10.2 - Struttura e analisi del campo magnetico del generatore con PM in ferrite

### 10.2.1 - Struttura convenzionale con magneti in NdFeB

La Figura 10.1 mostra la configurazione standard del generatore da 1,5kW con magneti permanenti in NdFeB, precedentemente realizzato e progettato. Come già detto, e mostrato nella figura 1b, questo generatore è composto da una struttura con nucleo di statore slotless per ridurre l'oscillazione di coppia. L'induzione residua dei magneti permanenti è pari a 1,26T.

Per ottenere una tensione sinusoidale indotta, il rapporto arco/polo del magnete permanente è ottimizzato a 0,8.

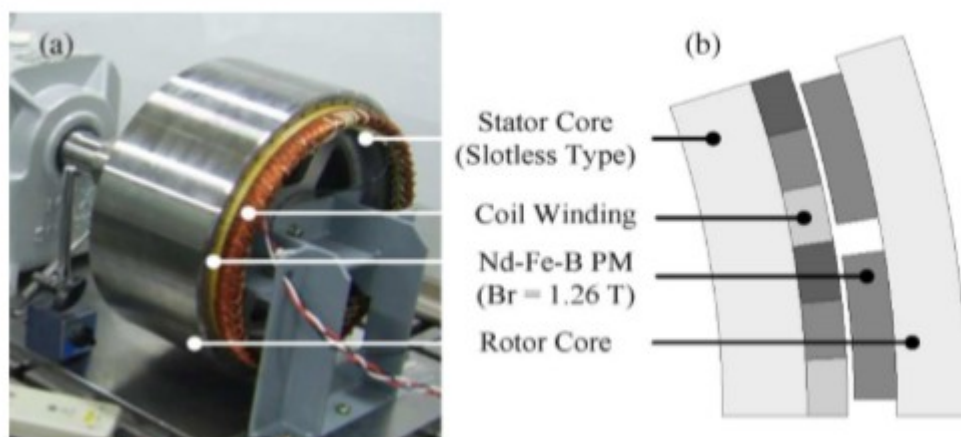


Figura 10.1: configurazione standard del generatore

Gli altri criteri di progettazione sono riportati in tabella 10.1.

TABLE I  
DESIGN SPECIFICATION OF CONVENTIONAL MODEL

Specification	Value	Specification	Value
Rated Speed	300(rpm)	Output Power	1.5(kW)
Number of Poles	40	Winding Type	Distributed
Outer Radius	157(mm)	Stack Length	101(mm)
Turns per phase	960(turns)	PM Remanence	1.26(T)

Tabella 10.1: caratteristiche del generatore standard

Quando un magnete permanente in ferrite, con induzione residua molto più bassa (0,40T), viene usato in questa struttura la tensione risultante indotta diminuisce drasticamente, come mostrato in figura 10.2.

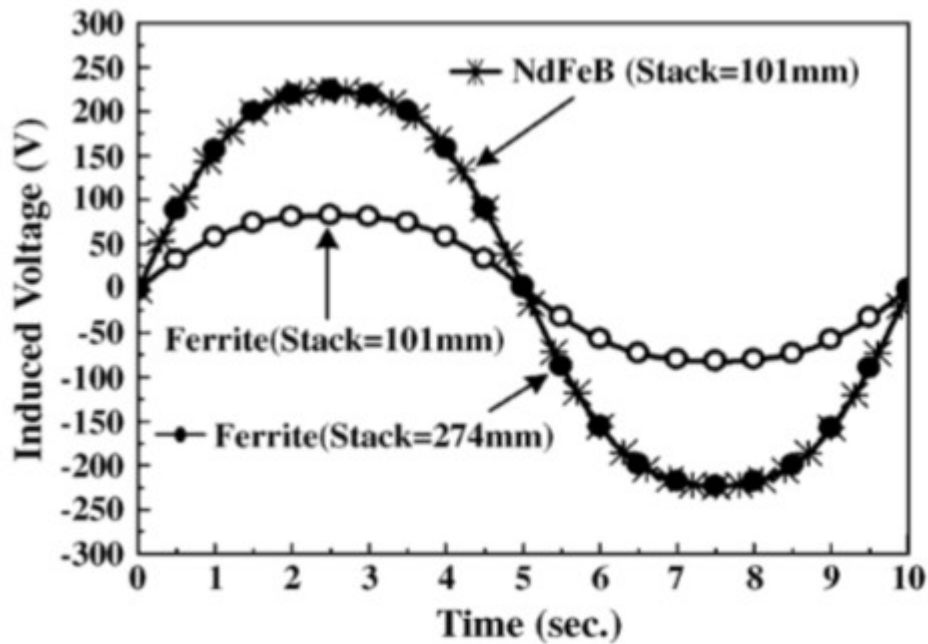


Figura 10.2: diminuzione tensione dovuta all'inserimento della ferrite

Per ottenere una tensione indotta identica a quella del caso standard, la lunghezza del pacco lamiera di rotore dovrebbe essere più che raddoppiata, rimanendo fisse le altre specifiche di progetto. In questo studio si vorranno ottenere prestazioni simili pur mantenendo un raggio esterno di rotore uguale di 157mm ed una lunghezza del pacco lamiera pari a 101mm.

### 10.2.2 - Nuovo design della macchina con PM in ferrite

In figura 10.3a è riportata una rappresentazione schematica di come si dovrebbe presentare il generatore di nuova concezione.

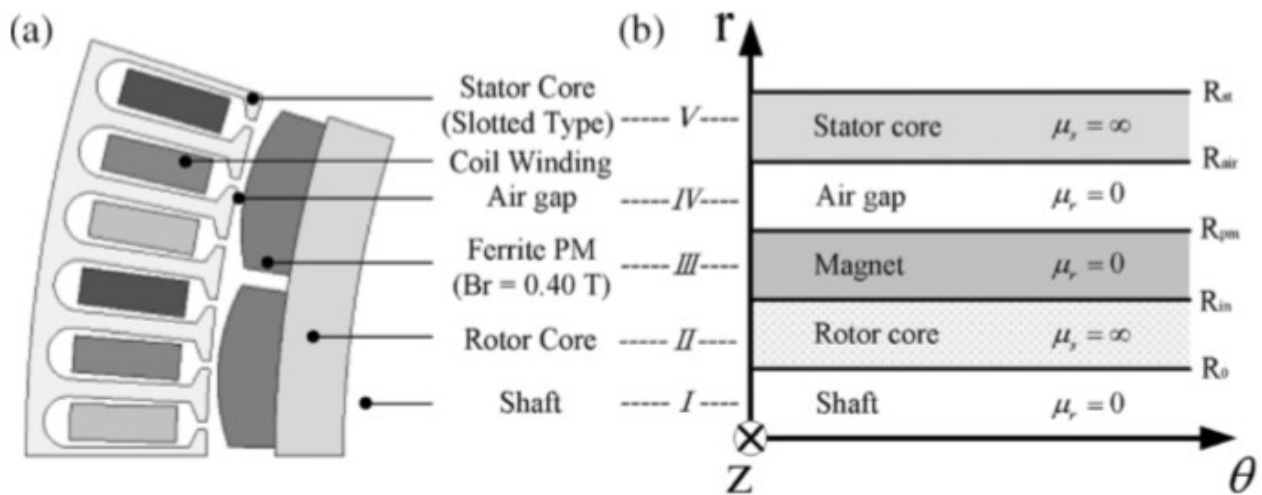


Figura 10.3: rappresentazione schematica della nuova struttura

Come precedentemente accennato si è scelto di usare una struttura scanalata, per aumentare la densità di energia nel traferro, e la forma dei PM è ottimizzata per ridurre le oscillazioni di coppia. La figura 10.3b mostra una versione semplificata del modello, utilizzabile per l'approccio analitico che verrà usato per lo studio della macchina.

### 10.2.3 - Modello matematico per magneti permanenti *bread-shaped*

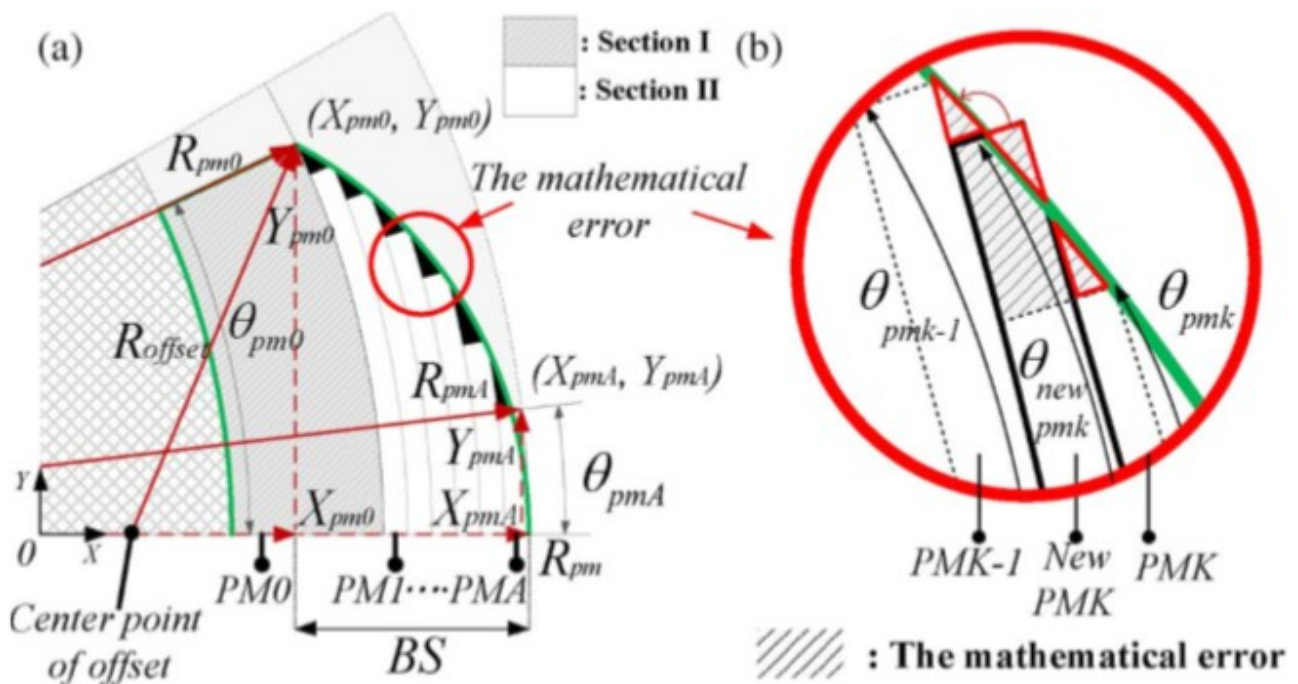


Figura 10.4: modello matematico per la struttura dei magneti permanenti

La figura 10.4a mostra il modello matematico per l'ottimizzazione dei magneti permanenti. Poiché lungo l'asse z viene tenuto un valore costante, la dimensione z può essere trascurata ed il modello può essere espresso in 2D. Inoltre si utilizzano coordinate cartesiane. Per esprimere matematicamente i magneti permanenti il modello viene diviso in due sezioni, utilizzando il rapporto arco/polo.

Come mostrato in figura 10.4, il rapporto arco/polo di una sezione del magnete permanente non cambia e l'altra sezione (sezione II), che consiste in innumerevoli magneti sottili, può essere modificata per ottenere una variazione nel rapporto arco/polo.

$$R_{pm0} = \sqrt{X_{pm0}^2 + Y_{pm0}^2} \quad (1)$$

$$R_{pm} - X_{pm0} = BS \quad (2)$$

$$X_{pmk} = X_{pm0} + \left( \frac{BS}{A} \right) k \quad (3)$$

$$Y_{pmk} = \sqrt{(R_{pm} - R_{offset})^2 - (X_{pmk} - R_{offset})^2} \quad (4)$$

$$\theta_{pmk} = \arctan \left( \frac{Y_{pmk}}{X_{pmk}} \right) \quad (5)$$

Poiché la sezione I non richiede l'esame della variazione del rapporto arco/polo, i valori iniziali del suo raggio possono essere ottenuti dalla equazione (1).

Per identificare le variabili si rimanda a figura 10.4.

L'angolo  $\theta_{pmk}$ , richiesto per modellizzare i magneti permanenti, può essere ricavato tramite la (2) e la (4), come mostrato nell'equazione (5). In queste equazioni  $R_{offset}$  è il raggio dello spostamento,  $A$  è il numero totale di magneti, mentre  $X_{pmk}$ ,  $Y_{pmk}$  e  $\theta_{pmk}$  sono gli elementi definiti per il Kesimo magnete.

Nella realtà può esistere una differenza tra angolo reale ed angolo calcolato matematicamente, come mostrato in figura 4b, e ciò può rendere meno precisi i risultati dell'analisi.

Per mitigare questa differenza si assume l'esistenza di un ulteriore angolo addizionale (6), come mostrato in figura. Nel modello matematico quindi il rapporto arco/polo di ogni magnete può essere ottenuto tramite l'equazione (7)

$$\theta_{newpmk} = \frac{(\theta_{pmk-1} + \theta_{pmk})}{2} \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{2p\theta_{newpmk}}{\pi} \quad (7)$$

#### 10.2.4 - Ottimizzazione dei PM per la riduzione dell'oscillazione di coppia

Per via dell'impiego di uno statore munito di cave, le considerazioni riguardanti la riduzione delle oscillazioni di coppia diventano essenziali, soprattutto per le applicazioni legate agli aerogeneratori. Per questo vengono utilizzati, ed in seguito regolati, i magneti *bread-shape*, come mostrato in figura 10.5a,.

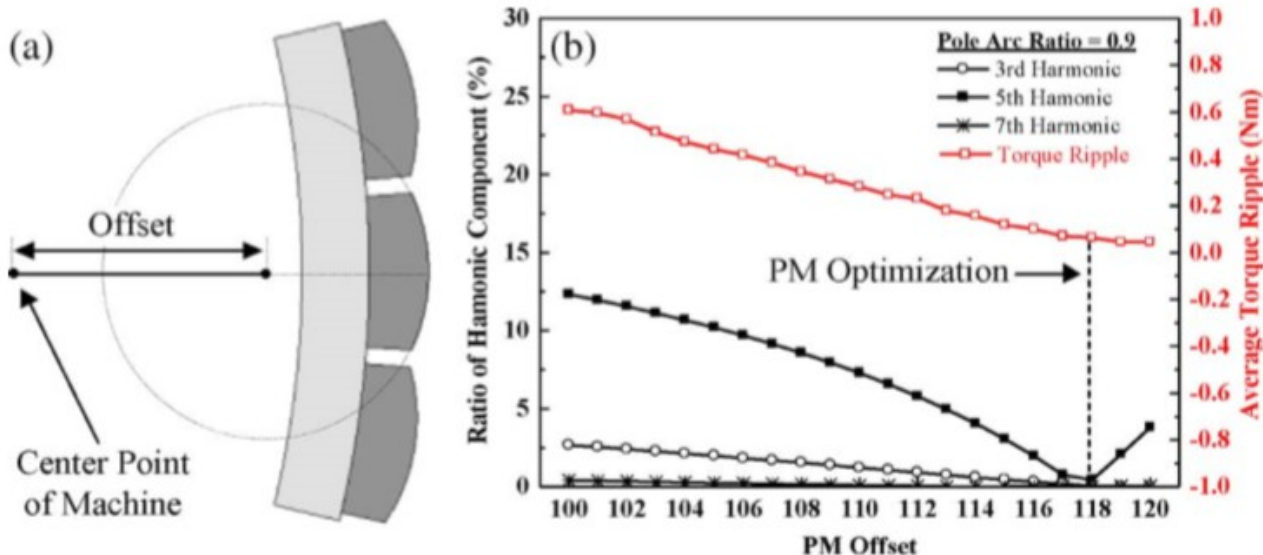


Figura 10.5: ottimizzazione dei magneti permanenti

La figura 10.5b compara i valori delle componenti armoniche di tensione e dell'oscillazione di coppia. Come indicato, il minimo valore della quinta armonica, che è la maggiore causa di vibrazione e rumore nelle macchine elettriche, si presenta con un offset di 118mm, al quale corrisponde anche un basso valore di oscillazione di coppia. Per questo i magneti permanenti sono costruiti con un offset di 118mm.

In aggiunta, le performance di generazione del nuovo modello possono essere predette con il metodo del circuito equivalente magnetico (ECM), i cui risultati sono mostrati in figura 10.6.

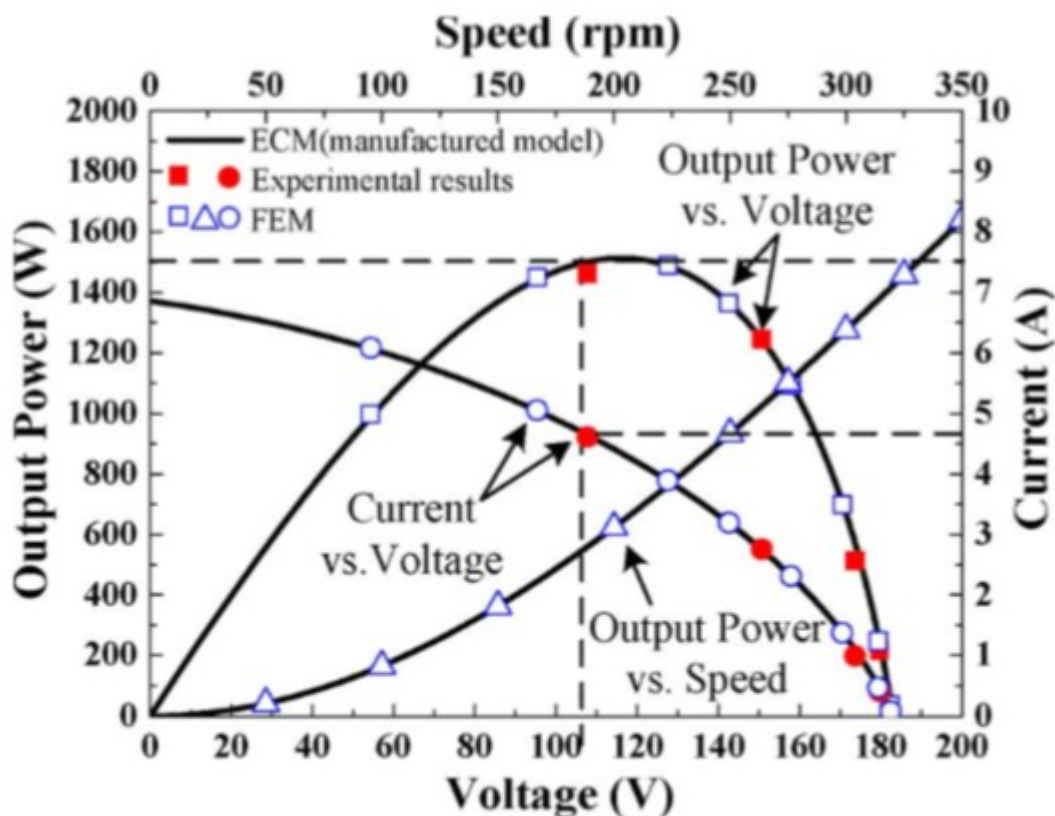


Figura 10.6: performance del nuovo modello, predette col metodo ECM

Come si può notare, la nuova configurazione impiegante la ferrite, riesce a soddisfare la condizione di potenza in uscita (1,5kW) alla velocità di 300rpm.

### 10.3 - Esperimento di verifica

I risultati vengono poi verificati sperimentalmente.

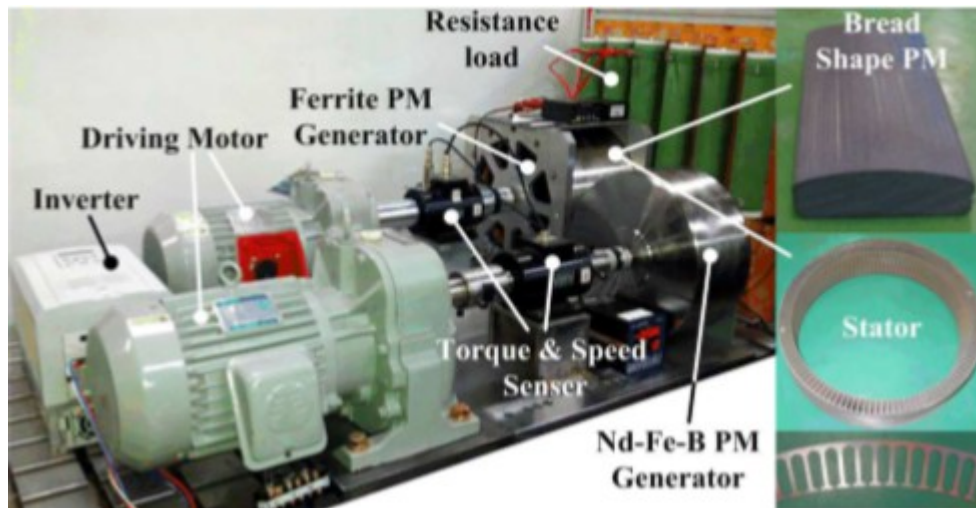


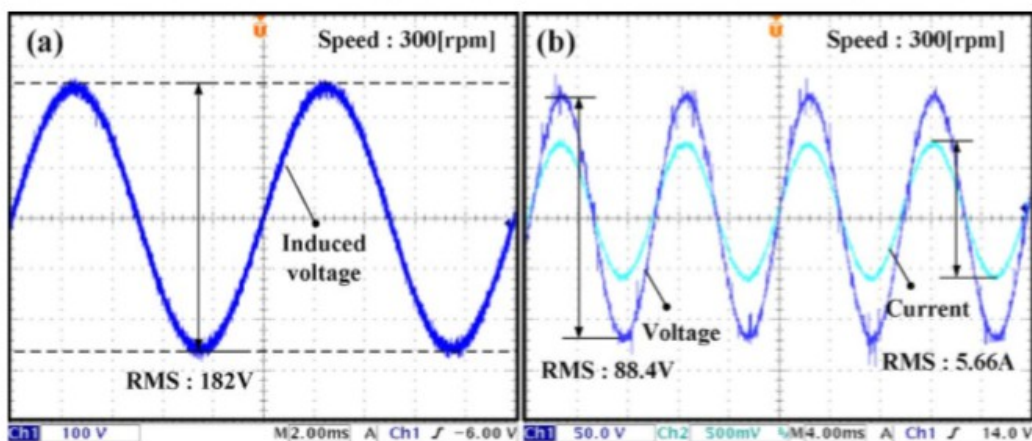
Figura 10.7: realizzazione dell'esperimento

Il generatore è connesso direttamente ad un motore a induzione che permette di applicare una coppia meccanica di avviamento. Per il test a carico è stato predisposto il collegamento ad un componente resistivo.

La velocità e la coppia di input applicate al generatore sono misurate da sensori di velocità e coppia, localizzati tra il motore ad induzione ed il generatore.

All'uscita del generatore vengono misurate tensione e corrente nel carico resistivo.

In figura 10.8 sono riportati i risultati delle prove effettuate.



Experimental results at 300 rpm: (a) induced voltage under no-load condition, (b) voltage and current under rated-load condition.

Figura 10.8: risultati dei test



Per statore e rotore sono impiegati gli stessi materiali costruttivi.  
 Come mostrato in tabella 10.2 per il generatore con ferrite è richiesto un minore volume di statore e questo può portare ad una riduzione di costo.

TABLE II  
 COMPARISON OF STATOR AND ROTOR CORE VOLUME

Nd-Fe-B Generator		Ferrite Generator	
Stator core	844080.28(mm <sup>3</sup> )	Stator core	786637.15(mm <sup>3</sup> )
Rotor core	814523.99(mm <sup>3</sup> )	Rotor core	629524.90(mm <sup>3</sup> )

Tabella 10.2: comparazione tra il volume dei nuclei di statore e rotore

In aggiunta, la figura 10.9 mostra un confronto tra le due tipologie di macchina sotto identiche condizioni di potenza in uscita.

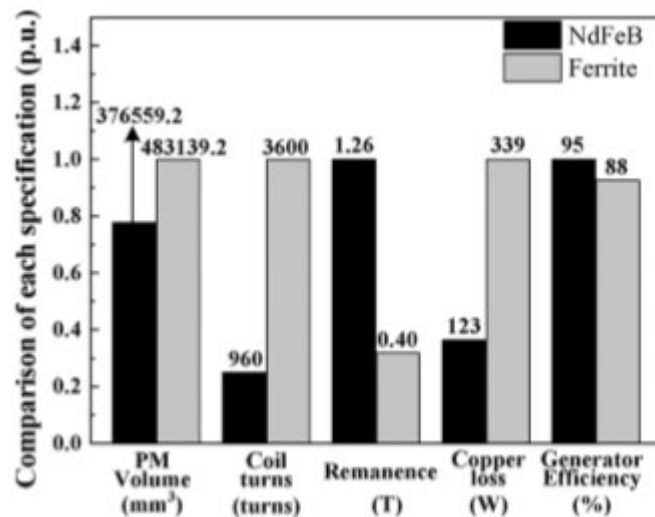


Figura 10.9: confronto finale

Per via della minore induzione residua della ferrite è necessario un volume maggiore dei magneti permanenti ed un numero più alto di spire.

Questo provoca un aumento delle perdite nel rame, che, come già detto, costituiscono la parte dominante delle macchine a magneti permanenti funzionanti a basse velocità. Questo ovviamente abbassa l'efficienza dal 95% all'88%.

Nonostante questo calo di prestazioni, l'uso dei magneti permanenti in ferrite dovrà essere preso in considerazione, qualora il prezzo dei magneti NdFeB dovesse continuare ad aumentare, essendo il loro utilizzo non così penalizzante in presenza di una macchina ottimizzata.



# Capitolo 11 – Uso combinato – Introduzione della ferrite per mitigare la quantità di terre rare impiegata

## 11.1 – Introduzione

Un'altra soluzione alternativa per diminuire il costo del materiale nelle macchine a magneti permanenti, potrebbe essere quella di accantonare il modello che usi esclusivamente la ferrite e studiare una struttura ibrida, una sorta di via di mezzo tra le due configurazioni.

La soluzione studiata in questo capitolo è appunto quella di usare nel contempo magneti con terre rare e magneti in ferrite. L'uso del NdFeB verrà ridotto del 50% e la struttura risultante verrà analizzata tramite delle simulazioni.

Queste ultime mostreranno che la coppia del nuovo modello di macchina sarà circa il 96,3% di quella originale, oltre ad un sostanziale aumento della velocità di rotazione (9000 giri/min contro i 1500 della soluzione originale).

## 11.2 - Modello base

Il modello base della macchina, con cui successivamente comparare la nuova configurazione, è riportato in figura 11.1.

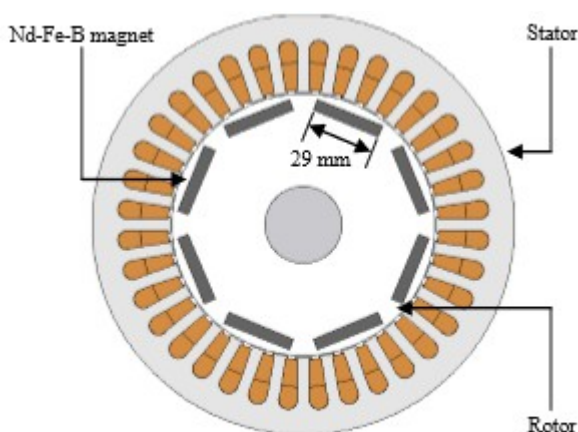


Fig. 1. Basic model

*Figura 11.1: modello base della macchina*

La configurazione è quella tipica dei PMSM, con 8 poli e 36 slots e l'uso dei magneti NdFeB.

Le caratteristiche di questo modello base e dei magneti impiegati sono riportate rispettivamente in tabella 11.1 e 11.2.

I magneti sono assegnati ad ogni polo del rotore e quindi sono anch'essi 8.

TABLE I. SPECIFICATIONS OF BASIC MODEL

<b>Outer diameter of stator [mm]</b>	175
<b>Outer diameter of rotor [mm]</b>	108.8
<b>Stack width [mm]</b>	50
<b>Air gap length [mm]</b>	0.6
<b>Rated power [kW]</b>	1.5
<b>Rated current [A]</b>	6
<b>Rated speed [min<sup>-1</sup>]</b>	1,500

Tabella 11.1: specifiche del modello base

TABLE II. SPECIFICATIONS OF Nd-Fe-B MAGNET

<b>Residual flux density [T]</b>	1.22
<b>Coercive force [kA/m]</b>	928
<b>Temperature [°C]</b>	60

Tabella 11.2: caratteristiche dei magneti NdFeB

## 11.3 - Nuovo modello

### 11.3.1 - Modello A

La struttura del rotore del nuovo modello è mostrata nelle figure 11.2 e 11.3 ed è indicata sotto il nome di *Modello A*.

Le specifiche, il design di statore e le condizioni di esercizio sono le stesse descritte per il modello base.

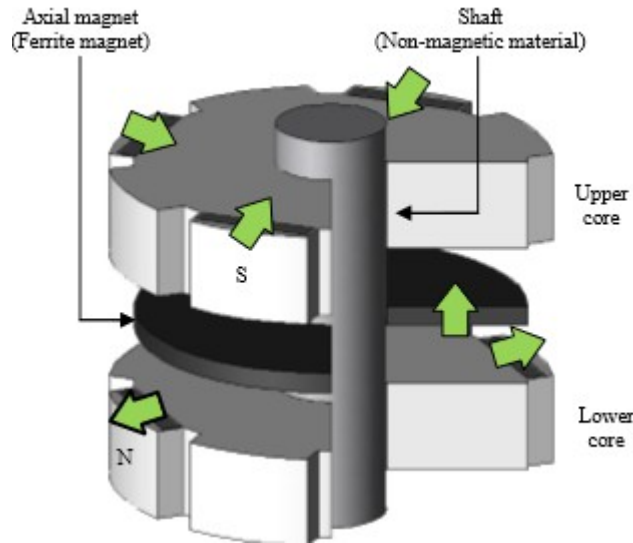


Figura 11.2: struttura di rotore per il "Modello A"

Come è possibile vedere in figura 11.2, il *Modello A* è diviso in due nuclei di ferro: il nucleo superiore ed il nucleo inferiore. I magneti NdFeB sono posizionati come mostrato in figura 11.3. Le frecce verdi in figura 11.2 indicano le direzioni del flusso magnetico. I poli con i magneti sono opposti a quelli che ne sono sprovvisti (4 e 4). Inoltre un magnete cilindrico in ferrite è posto tra il nucleo superiore e quello inferiore.

Visto che questo magnete è magnetizzato in direzione assiale, viene chiamato magnete assiale. Quest'ultimo può prevenire un cortocircuito magnetico che viene emesso dai magneti radiali. L'albero è costituito da materiale non magnetico per ridurre il cortocircuito magnetico nei nuclei. Così facendo la maggior parte del flusso passa allo statore e la coppia aumenta.

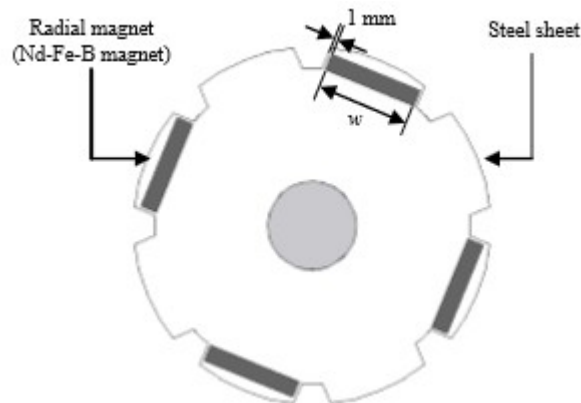


Figura 11.3: Modello A

La configurazione del rotore in questo modello A è differente da quella del modello base, pertanto il rapporto di posizione tra i denti dello statore ed i magneti radiali potrebbe non essere ottimizzato per la riduzione delle oscillazioni di coppia e quindi dovrebbe essere ridiscussa la larghezza dei magneti radiali. Questa larghezza viene riportata con la lettera  $w$  in figura 11.3 e nell'analisi è stata presa pari a 29,30,31 e 32mm. In tutti i casi la distanza tra la parte corta dei magneti radiali e la parte corta dei poli salienti è presa pari a 1mm, come mostrato in figura.

In tabella 11.3 sono riportate le caratteristiche del magnete in ferrite ed il volume totale dei magneti

NdFeB è riportato in tabella 11.4. Da queste si può notare che il modello A riduce il volume dei magneti NdFeB di oltre il 50%.

TABLE III. SPECIFICATIONS OF FERRITE MAGNET

<b>Residual flux density [T]</b>	0.407
<b>Coercive force [kA/m]</b>	317
<b>Temperature [°C]</b>	60

Tabella 11.3: caratteristiche dei magneti in ferrite

TABLE IV. TOTAL VOLUME OF Nd-Fe-B MAGNET

		<b>Volume [mm<sup>3</sup>]</b>	<b>Ratio to basic model [%]</b>
<b>Basic model</b>		58.0×10 <sup>3</sup>	100
<b>Model A</b>	<b>w = 29 mm</b>	26.1×10 <sup>3</sup>	45.0
	<b>w = 30 mm</b>	27.0×10 <sup>3</sup>	46.6
	<b>w = 31 mm</b>	27.9×10 <sup>3</sup>	48.1
	<b>w = 32 mm</b>	28.8×10 <sup>3</sup>	49.7

Tabella 11.4: volume dei magneti NdFeB impiegati

### 11.3.2 - Modello B

Il metodo più semplice per aumentare la coppia è quello di aumentare il volume di ferrite utilizzata. Tuttavia devono essere prevenuti il cortocircuito magnetico e l'aumento della resistenza magnetica. Per questo i magneti in ferrite vengono inseriti come mostrato in figura 11.4.

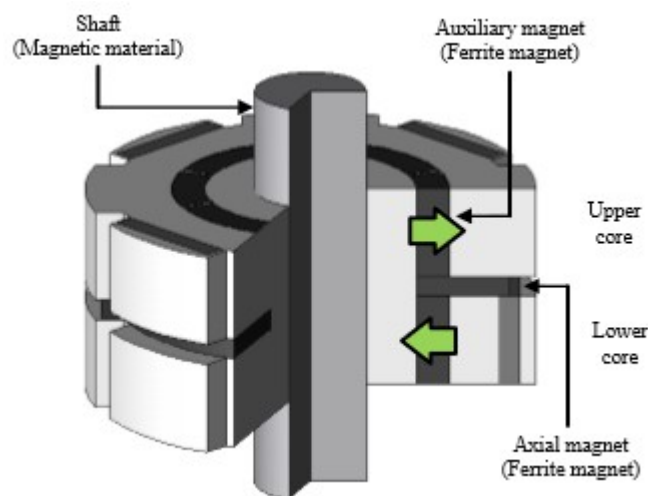


Figura 11.4: struttura di rotore del Modello B

Questi magneti aggiunti vengono chiamati magneti ausiliari e, come mostrato nelle figure 11.5a e 11.5b, magnetizzano il traferro nel nucleo superiore e l'albero in quello inferiore.

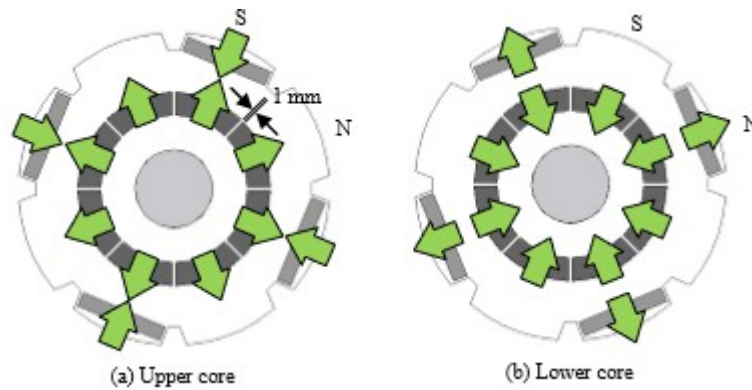


Figura 11.5: magnetizzazione dei due nuclei

Questo può prevenire il cortocircuito magnetico. L'albero è costituito da materiale magnetico e questo può prevenire l'aumento di resistenza magnetica. Inoltre la maggior parte del flusso prodotto dai magneti può passare allo statore ed incrementare la coppia.

### 11.4 - Coppia media ed oscillazioni di coppia

In figura 11.6 sono riportati i valori di coppia media e di oscillazione di coppia del modello base e dei 4 casi di *Modello A* (con le diverse ampiezze dei magneti). In questo modello la coppia ha oscillazione minima quando l'ampiezza è pari a 31mm e la coppia media è 10,3Nm, pari al 91,6% del modello base.

In figura 11.7 sono invece mostrati i valori di coppia media e di oscillazione per il *Modello B*, confrontandoli con il modello base e quello A con 31mm di ampiezza dei magneti. La coppia media del modello B è pari a 10,8Nm, pari al 96,3% del modello base.

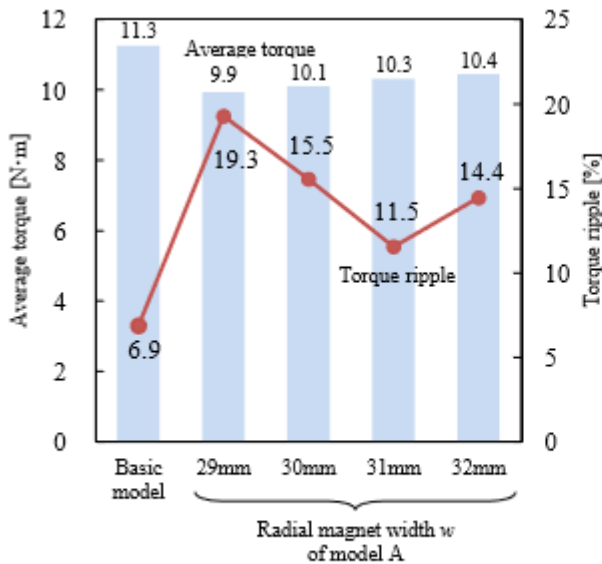


Fig. 6. Average torque and torque ripple

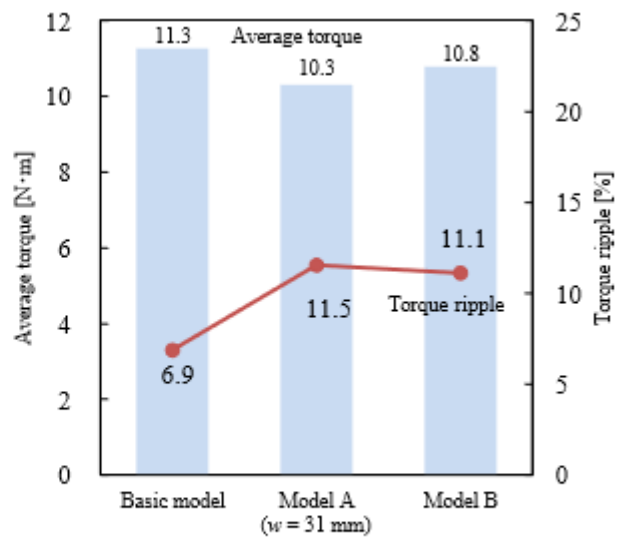


Fig. 7. Average torque and torque ripple

Figura 11.6: Oscillazioni e coppia media per il Modello A; Figura 11.7: Modello B

Infine in figura 11.8 è riportata l'induzione magnetica in T dei modelli A e B. Quest'ultima figura mostra come nel modello B il circuito magnetico possa essere formato dai magneti ausiliari e dall'albero costruito in materiale magnetico.

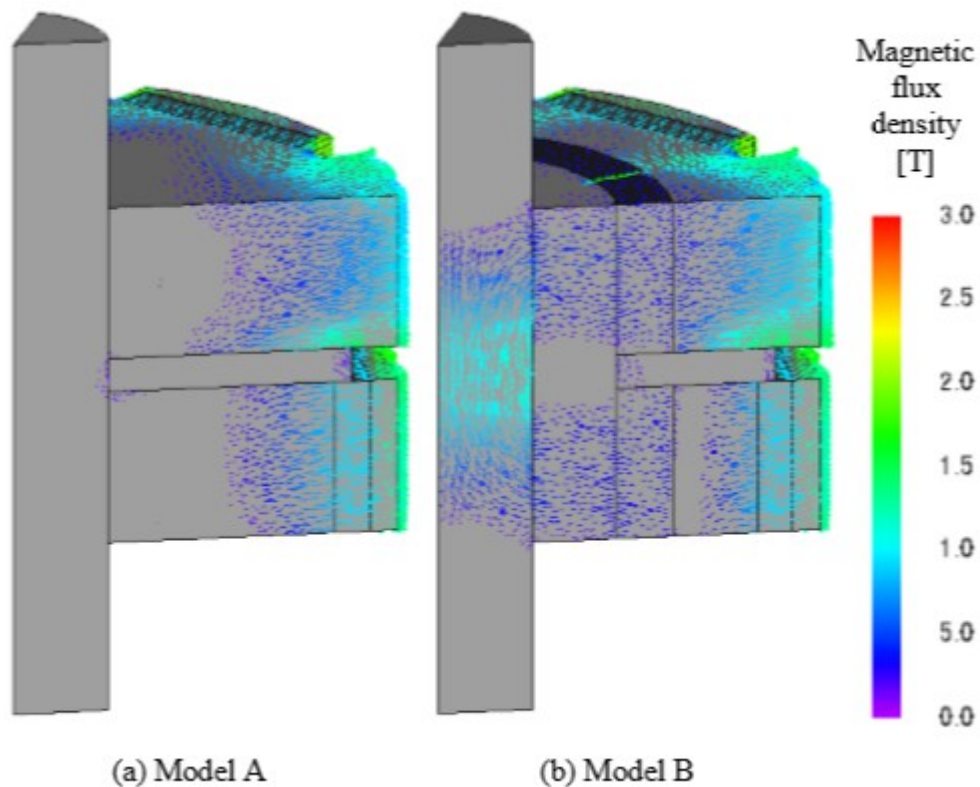


Figura 11.8: mappa dell'induzione magnetica

### 11.5 - Analisi della struttura

Come mostrato in figura 11.9, il rotore del nuovo *Modello B* ha una parte sottile di lamiera e lo stress è concentrato in questa parte. Per questo si è analizzato lo stress sul modello B quando esso funziona ad alte velocità.

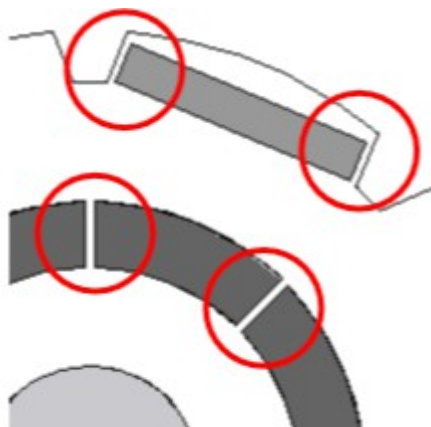


Figura 11.9: nuova struttura di rotore

Le costanti dei materiali che compongono la lamiera, l'albero, i magneti in NdFeB ed i magneti in



ferrite, sono riportate in tabella 11.5.

TABLE V. MATERIAL CONSTANTS

	<b>Mass density [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Young's modulus [MPa]</b>	<b>Poisson's ratio</b>
<b>Steel sheet</b>	7.85	210,000	0.3
<b>Shaft</b>	7.84	205,800	0.3
<b>Nd-Fe-B magnet</b>	7.70	160,000	0.3
<b>Ferrite magnet</b>	5.20	150,000	0.3

*Tabella 11.5: costanti dei materiali che compongono lamiera, albero e magneti*

Questi valori sono usati per l'analisi della struttura. La velocità è di 9000 giri al minuto, che è pari a 6 volte quella del modello base nelle stesse condizioni di analisi.

La figura 11.10 mostra la mappa dello stress sul modello B. Lo stress massimo vale 138MPa nella parte del nucleo mostrata in figura 11.10b. Essendo il punto di rottura della lamiera pari a 324MPa, il modello B può sostenere questo funzionamento ad alta velocità.

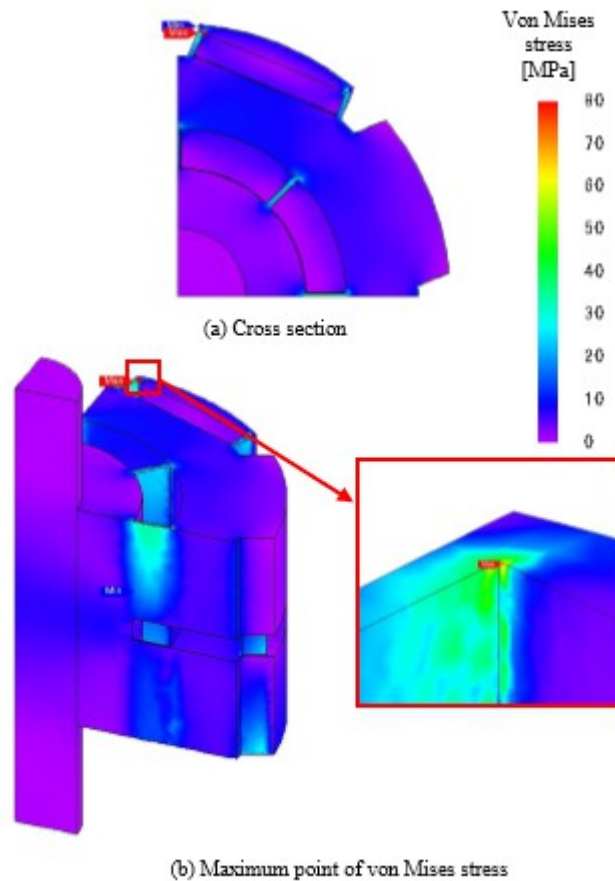


Fig. 10. Von Mises stress contour map of model B (9,000 min<sup>-1</sup>)

Figura 11.10: mappa dello stress sul rotore

## 11.6 - Conclusioni

Sono stati progettati due modelli (A e B) di PMSM, predisposti per mitigare il contenuto di magneti NdFeB tramite l'inserimento di magneti in ferrite, con l'obiettivo di trovare una soluzione più economica, con prestazioni simili e con la capacità di svincolare, almeno in parte, la creazione della macchina dall'utilizzo delle terre rare.

Nel *Modello A* è stata studiata la configurazione adatta per minimizzare l'oscillazione di coppia. Per farlo si è deciso di agire sull'ampiezza dei magneti e si è trovato che ad una lunghezza di 31mm corrisponde il valore minimo di oscillazione.

Nel *Modello B* sono stati inseriti degli ulteriori magneti ausiliari in ferrite e l'albero in materiale inerte è stato sostituito da uno in materiale magnetico. Questo ha permesso un aumento di coppia prodotta fino ad un valore pari al 95,6% di quella erogata dal modello base di partenza.

Inoltre un'analisi alle alte velocità ha dimostrato che questo motore può operare ad una velocità di 9000 giri al minuto senza problemi.

# Conclusioni

Come anticipato nell'introduzione, in questo lavoro la volontà è stata quella di presentare la possibilità, reale e concreta, di percorrere vie alternative all'uso dei costosi magneti permanenti in neodimio-ferro-boro nella costruzione delle macchine elettriche a magneti permanenti.

Il modo di procedere più interessante e ricco di aspettative è sicuramente quello dell'adozione di magneti permanenti in ferrite, meno costosi e più facili da reperire.

Come avrete potuto leggere, la questione è risultata ben più complessa di quanto potesse essere una banale sostituzione che mantenesse inalterate le caratteristiche della macchina originale, a causa di molteplici questioni: da una parte la minore densità di energia che i magneti permanenti in ferrite sono in grado di rendere disponibile, dall'altra problemi legati alla smagnetizzazione, allo stress, al maggior volume di materiale necessario.

Per questi motivi è stato necessario rielaborare, almeno in parte, il concetto di macchina a magneti permanenti, frutto di anni di ricerche e migliorie, cercando di superare i limiti ed esaltare i vantaggi di questo materiale alternativo. Il tutto cercando, ovviamente, di venire incontro alle particolari esigenze che applicazioni tanto diverse tra loro richiedono.

Alcune di queste richiedono che la coppia messa a disposizione sia elevata, altre richiedono spazi contenuti, altre ancora una resistenza particolare allo stress da rotazione.

Ognuno dei capitoli precedentemente presentati è stato concepito per venire incontro alle specifiche esigenze dell'applicazione in oggetto, senza fermarsi alla teoria, ma con un doveroso sguardo sulla pratica.

I risultati sono stati soddisfacenti: la sostituzione dei magneti permanenti è possibile e, con le giuste ottimizzazioni, intacca soltanto in piccola quantità le prestazioni della macchina. Si è parlato di cali delle prestazioni contenute, a fronte di un risparmio certamente non trascurabile e di uno svincolamento totale dai problemi riguardanti il mercato del neodimio.

Questo permette non solo di avere un risparmio economico, ma soprattutto di poter continuare a percorrere una strada che reputo giusta e fondamentale per il nostro futuro.

Lo sviluppo dei sistemi elettrici per la mobilità cittadina, la possibilità di continuare lo sviluppo di veicoli elettrici che possano soddisfare tutte le nostre esigenze, lo studio di nuove tecnologie per rendere ovunque accessibili e convenienti le forme di energia rinnovabili. Questi sono temi importanti, che potenzialmente potrebbero cambiare in meglio la vita di tutti e sui quali vale sempre la pena spendere tempo e risorse.

Penso che l'utilizzo della ferrite, anche in soluzioni ibride, possa essere una delle vie con cui risolvere il problema dell'approvvigionamento di terre rare. A questi sentirei anche di aggiungere la possibilità del riciclo dei materiali, rendendo al meglio ciò che già abbiamo.

In ogni caso le soluzioni per risollevare le sorti di queste applicazioni e non vanificare anni di ricerche e sviluppo ci sono e restano alla nostra portata. Sarebbe un vero peccato non approfittarne.

# Bibliografia

## [Capitolo 0]

- **Fonte:** Cost-Effectiveness Comparison of Coaxial Magnetic Gears With Different Magnet Materials
- **Autori:** Mu Chen (Dept. of Electr. & Electron. Eng., Univ. of Hong Kong, Hong Kong, China); Chau, K.T.; Wenlong Li; Chunhua Liu.
- **Publicato in:** Magnetics, IEEE Transactions on (Volume:50, Issue 2).
- **Data di pubblicazione:** 26 febbraio 2014

## [Capitolo 1]

- **Fonte:** Comparison of PM-machines With Ferrite and NdFeB Magnets in Terms of Machine Performance and Sensorless Start-up Control
- **Autori:** Demmelmayr F. (Inst. of Energy Syst. & Electr. Drives, Vienna Univ. of Technol., Vienna, Austria); Weiss B.; Troyer M.; Schroedl M.
- **Publicato in:** Industrial Technology (ICIT), 2013 IEEE International Conference on
- **Data della conferenza:** 25-28 febbraio 2013.

## [Capitolo 2]

- **Fonte:** Interior PM Machines Using Ferrite to Replace Rare-Earth Surface PM Machines
- **Autori:** Barcaro M.; Bianchi N.
- **Publicato in:** Ieee transactions on industry applications, VOL. 50, NO. 2, march/april 2014
- **Data di pubblicazione:** 17 marzo 2014

## [Capitolo 3]

- **Fonte:** A Comparison of IPM Traction Machines with Different PM Materials
- **Autori:** Jian Luo, Cheng Zhao, Ronghai Qu, Lingyun Gu and Xiaobo Zhang
- **Publicato in:** Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2013 IEEE
- **Data della conferenza:** 15-19 settembre 2013

## [Capitolo 4]

- **Fonte:** Low-Cost Ferrite PM-Assisted Synchronous Reluctance Machine for Electric Vehicles
- **Autori:** Haiwei Cai, Student Member, IEEE, Bo Guan, Student Member, IEEE, and Longya Xu, Fellow, IEEE
- **Publicato in:** Industrial Electronics, IEEE Transactions on(Volume:61 , Issue 10)
- **Data di pubblicazione:** 2 maggio 2014

## [Capitolo 5]

- **Fonte:** Experimental Evaluation of a Rare-Earth-Free PMASynRM With Ferrite Magnets for Automotive Application
- **Autori:** Shigeo Morimoto, Member, IEEE, Shohei Ooi, Yukinori Inoue, Member, IEEE, and Masayuki Sanada, Member, IEEE
- **Publicato in:** Industrial Electronics, IEEE Transactions on Volume: 61 , Issue: 10
- **Data di pubblicazione:** 2 maggio 2014

## [Capitolo 5B]

- **Fonte:** Rotor Structure for Reducing Demagnetization of Magnet in a PMASynRM with Ferrite Permanent Magnet and its Characteristics
- **Autori:** Masayuki Sanada, Yukinori Inoue and Shigeo Morimoto (Dept. of Electrical & Information Systems, College of Engineering Osaka Prefecture University)
- **Publicato in:** Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2011 IEEE

- **Data del congresso:** 17-22 settembre 2011

#### [Capitolo 6]

- **Fonte:** Low-Cost Ferrite Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Rotor an Alternative Solution for Rare Earth Permanent Magnet Synchronous Motors
- **Autori:** S. Musuroi, C. Sorandaru, M. Greconici (POLITEHNICA University of TIMISOARA Electrical Engineering Department Timisoara, ROMANIA); V.N. Olarescu, M. Weinman (Diehl AKO Stiftung&Co. K.G. Wangen, GERMANY)
- **Pubblicato in:** Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE
- **Data del congresso:** 10-13 novembre 2013

#### [Capitolo 7]

- **Fonte:** A Ferrite PM In-Wheel Motor Without Rare Earth Materials for Electric City Commuters
- **Autori:** Kodai Sone, Masatsugu Takemoto, Satoshi Ogasawara, Kenichi Takezaki, Hidekatsu Akiyama
- **Pubblicato in:** Magnetics, IEEE Transactions on, Volume 48, Issue 11
- **Data di pubblicazione:** 18 ottobre 2012

#### [Capitolo 8]

- **Fonte:** Consideration of 10kW In-Wheel Type Axial-Gap Motor Using Ferrite Permanent Magnets
- **Autori:** Kodai Sone, Masatsugu Takemoto, Satoshi Ogasawara, Kenichi Takezaki, Wataru Hino
- **Pubblicato in:** Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE-ASIA), 2014 International
- **Data di pubblicazione:** 18-21 maggio 2014

#### [Capitolo 9]

- **Fonte:** Cost Efficiency Analysis of Slow-Speed Slotless Permanent Magnet Synchronous Generator Using Different Magnetic Materials
- **Autori:** Sten Laurit, Ants Kallaste, Toomas Vaimann, and Anouar Belahcen
- **Pubblicato in:** Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ), 2014
- **Data della conferenza:** 11-13 giugno 2014

#### [Capitolo 10]

- **Fonte:** Design and Electromagnetic Field Characteristic Analysis of 1.5kW Small Scale Wind Power Generator for Substitution of Nd-Fe-B to Ferrite Permanent Magnet
- **Autori:** Seok-Myeong Jang, Ho-Jun Seo, Yu-Seop Park, Hyung-Il Park, and Jang-Young Choi
- **Pubblicato in:** Magnetics, IEEE Transactions on, Volume 48 Issue 11
- **Data di pubblicazione:** 18 ottobre 2012

#### [Capitolo 11]

- **Fonte:** Novel Rotor Structure of Permanent Magnet Synchronous Motor with Rare Earth and Ferrite Magnets
- **Autori:** Akitoshi Yamada and Ichiro Miki
- **Pubblicato in:** Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2014 International Symposium on
- **Data della conferenza:** 18-20 giugno 2014

# Ringraziamenti

Siamo ai saluti. Per anni ho immaginato il momento in maniera molto cinematografica. La scritta *Fine* che si materializza sullo schermo ormai scuro. Applausi. E vissero tutti felici e contenti. Negli ultimi mesi ho però realizzato appieno quello che tutti, in cuor loro sanno: la parola *Fine* deve essere sostituita dalla parola *Inizio*. Lo schermo non sta diventando nero, ma la stanza viene inondata dalla luce di un portone che si apre sul futuro.

Ora che ho finito con le frasi banali, sarebbe impossibile non ringraziare le persone che in questi anni mi sono state accanto e hanno creduto in me, anche (e soprattutto) nei momenti difficili.

Ringrazio innanzitutto il prof. Foglia per avermi dato la possibilità di svolgere un lavoro così interessante e per l'impegno con cui ha seguito il mio lavoro, permettendomi di rispettare alla perfezione ogni scadenza, nonostante i tempi stretti.

Ringrazio ovviamente i miei genitori, che con passione e dedizione sono sempre riusciti a darmi una mano quando necessario, sia in cose pratiche, che in questioni meno materiali. La fiducia di cui mi hanno inondato non è mai venuta a meno e gliene sono grato.

Ringrazio le mie sorelle, che hanno sopportato (e qualche volta pure ascoltato) le mie continue richieste di silenzio durante lo studio.

Un pensiero anche a chi non c'è più, ma che sento sempre qui vicino. Sono sicuro che anche loro mi stiano guardando in questo momento e che siano orgogliosi di me, come lo sono sempre stati.

Un grazie di cuore alla nonna Anna e alle sue candele accese nei giorni degli esami.

Grazie a Federica, che mi ha dato la spinta necessaria per non mollare mai. Grazie a lei ho capito che probabilmente è davvero l'amore a far girare il mondo.

Grazie anche a tutti i parenti che mi hanno supportato in questi anni, alle persone che più di una volta mi hanno fatto sentire a casa, così come tutte le persone che mi si sono affiancate in questo cammino e che hanno deciso di accompagnarmi per un tratto di strada.

*With a little help from my friends...*

Grazie a tutti gli amici che mi hanno accompagnato in questo viaggio. Amici di sempre, amici conosciuti tra i banchi del Politecnico, amici che ho trovato su un campo di calcio. Amici che hanno raccolto le mie paure ed incertezze, trasformandole in punti di forza. Amici con i quali, nel corso di questi anni, sono cresciuto e che mi hanno aiutato a diventare quello che sono. Grazie a tutti.

Siete veramente troppi per menzionare ognuno e probabilmente sforerei il limite di pagine, ma in questi anni siete stati veramente capaci di darmi quello che ognuno vorrebbe avere. Grazie di cuore.