

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

DEI

Laurea in Ingegneria dell'energia elettrica

TESI DI LAUREA

in

Macchine Elettriche

STUDIO SULLA SATURAZIONE MAGNETICA DELLE CORONE
NELLE MACCHINE ASINCRONE MEDIANTE ANALISI AD
ELEMENTI FINITI

CANDIDATA:
Francesca Grazian

RELATORE:
Chiar.mo Prof. Giovanni Serra

CORRELATORE:
Chiar.mo Prof. Angelo Tani

Anno Accademico 2015/2016

Sessione I

Alla mia famiglia.

Indice

Introduzione

- 0.1 Descrizione e funzionamento del motore asincrono trifase pag. 7
0.2 Saturazione del circuito magnetico pag. 9

Capitolo 1

- Generalità su FEMM 4.2 pag. 12

Capitolo 2

Programmi in Lua

- 2.1 Assegna Asincrono Semplice pag. 15
2.2 Analizzatore Flussi-Correnti pag. 19

Capitolo 3

Metodo di analisi

- 3.1 Creazione dei file FEMM relativi al motore, variando lo spessore delle corone.. pag. 21
3.2 Stima della curva Alfa-Ks pag. 24
3.3 Verifica del valore di Φ_{max} pag. 26
3.4 Verifica della caduta di f.m.m. nella corona statorica pag. 28

Capitolo 4

Applicazione del metodo di analisi

IEC 132-4.125 con:

- ❖ spessore corona statorica di 10 mm e spessore corona rotorica di 10,53 mm pag. 30
- ❖ spessore corona statorica di 15 mm e spessore corona rotorica di 13,03 mm pag. 31
- ❖ spessore corona statorica di 18 mm e spessore corona rotorica di 15,53 mm pag. 32
- ❖ spessore corona statorica di 20 mm e spessore corona rotorica di 15,53 mm pag. 34
- ❖ spessore corona statorica di 22 mm e spessore corona rotorica di 15,53 mm pag. 36
- ❖ spessore corona statorica di 30 mm e spessore corona rotorica di 20,53 mm pag. 38
- ❖ spessore corona statorica di 35 mm e spessore corona rotorica di 25,53 mm pag. 40
- ❖ spessore corona statorica di 40 mm e spessore corona rotorica di 30,53 mm pag. 42
- ❖ spessore corona statorica di 50 mm e spessore corona rotorica di 35,53 mm pag. 44

Capitolo 5

Discussione dei risultati

- ❖ IEC 132-4.125 con spessore corona statorica di 10 mm e con spessore corona rotorica di 10,53 mm e con spessore corona statorica di 15 mm e spessore corona rotorica di 13,03 mm pag. 48
- ❖ IEC 132-4.125 con spessore corona statorica di 18 mm, 20mm e 22 mm e con spessore corona rotorica di 15,53 mm pag. 51
- ❖ IEC 132-4.125 con spessore corona statorica di 30 mm, 35 mm, 40 mm, 50 mm e rispettivo spessore corona rotorica di 20,53 mm, 25,53 mm, 30,53 mm, 35,53 mm pag. 56

Capitolo 6

- Conclusione e commenti pag. 62

- Bibliografia pag. 64

Elenco delle figure

Figura 1: Distribuzione sinusoidale di induzione magnetica al traferro.

Figura 2: Distribuzione di induzione magnetica al traferro con saturazione dei denti.

Figura 3: Distribuzione di induzione magnetica al traferro con saturazione della corona.

Figura 4: Curva Alfa-Ks teorica.

Figura 5: Pagina iniziale di FEMM 4.2, dopo aver scelto il tipo di problema (magnetic problem).

Figura 6: Pagina iniziale di Lua Motor.

Figura 7: *Andamento dell'induzione magnetica in un motore asincrono tramite FEMM.*

Figura 8: Andamento della densità di corrente in un motore asincrono tramite FEMM.

Figura 9: Valori delle grandezze elettromagnetiche nel punto del motore asincrono indicato dalla punta della freccia.

Figura 10: *Icona dedicata di FEMM, per importare file con estensione ".lua" oppure per scrivere comandi in linguaggio Lua nella console dedicata.*

Figura 11: *Esempio di un motore "vestito" tramite il programma "ASSEGNA Asincrono SEMPLICE".*

Figura 12: *Esempio di file con estensione ".ans", soluzione del problema magnetico per un determinato valore della variabile angolare.*

Figura 13: Scheda delle specifiche del motore IEC 132-4.125.

Figura 14: Curva di prima magnetizzazione del materiale ferromagnetico non lineare M250-50A.

Figura 15: *Linea di integrazione per il calcolo dell'induzione al traferro.*

Figura 16: Linea di integrazione per il calcolo della caduta di f.m.m. nel traferro e nei denti.

Figura 17: Esempio di induzione normale al traferro ottenuta con FEMM, relativa al motore con spessore 20 mm di corona statorica con corrente di 12A.

Figura 18: *Scomposizione in armoniche dell'induzione magnetica normale al traferro mediante l'applicazione Hyper Specrumalyzer.*

Figura 19: Illustrazione del procedimento per ricavare Hc, noto Bc.

Figura 20: *Linea di integrazione per ottenere il valore medio dell'induzione massima nella corona statorica.*

Figura 21: Linea di integrazione per ottenere la caduta di f.m.m. nella corona statorica.

Figura 22: Geometria e linee di campo di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 10 mm, con corrente di 2A.

Figura 23: Andamento della curva Alfa-Ks teorica ed empirica, di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 10 mm.

Figura 24: Geometria e linee di campo di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 15 mm, con corrente di 2A.

Figura 25: Andamento della curva Alfa-Ks teorica ed empirica, di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 15 mm.

Figura 26: Geometria e linee di campo di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 18 mm, con corrente di 2A.

Figura 27: Andamento della curva Alfa-Ks teorica ed empirica, di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 18 mm.

Figura 28: Andamento della curva Alfa-Ks teorica ed empirica di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 18 mm, mettendo a confronto i due metodi per calcolare Φ_{max} .

Figura 29: Geometria e linee di campo di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 20 mm, con corrente di 2A.

Figura 30: Andamento della curva Alfa-Ks teorica ed empirica, di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 20 mm.

Figura 31: Andamento della curva Alfa-Ks teorica ed empirica di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 20 mm, mettendo a confronto i due metodi per calcolare Φ_{max} .

Figura 32: Geometria e linee di campo di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 22 mm, con corrente di 2A.

Figura 33: Andamento della curva Alfa-Ks teorica ed empirica, di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 22 mm.

Figura 34: Andamento della curva Alfa-Ks teorica ed empirica di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 22 mm, mettendo a confronto i due metodi per calcolare Φ_{max} .

Figura 35: Geometria e linee di campo di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 30 mm, con corrente di 2A.

Figura 36: Andamento della curva Alfa-Ks teorica ed empirica, di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 30 mm.

Figura 37: Andamento della curva Alfa-Ks teorica ed empirica di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 30 mm, mettendo a confronto i due metodi per calcolare Φ_{max} .

Figura 38: Geometria e linee di campo di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 35 mm, con corrente di 2A.

Figura 39: Andamento della curva Alfa-Ks teorica ed empirica, di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 35 mm.

Figura 40: Andamento della curva Alfa-Ks teorica ed empirica di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 35 mm, mettendo a confronto i due metodi per calcolare Φ_{max} .

Figura 41: Geometria e linee di campo di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 40 mm, con corrente di 2A.

Figura 42: Andamento della curva Alfa-Ks teorica ed empirica, di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 40 mm.

Figura 43: Andamento della curva Alfa-Ks teorica ed empirica di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 40 mm, mettendo a confronto i due metodi per calcolare Φ_{max} .

Figura 44: Geometria e linee di campo di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 50 mm, con corrente di 2A.

Figura 45: Andamento della curva Alfa-Ks teorica ed empirica, di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 50 mm.

Figura 46: Grafico complessivo che rappresenta tutte le curve sperimentali ottenute e la curva teorica.

Figura 47: grafico che rappresenta le curve sperimentali dei motori con spessore di corona statorica di 10 mm, di 15 mm e la curva teorica.

Figura 48: Andamento dell'induzione magnetica normale al traferro nel motore con spessore di corona statorica pari a 10 mm e con corrente 8 A, considerando le armoniche dispari dalla 1° alla 11°.

Figura 49: Andamento dell'induzione magnetica normale al traferro nel motore con spessore di corona statorica pari a 10 mm e con corrente 20 A, considerando le armoniche dispari dalla 1° alla 13°.

Figura 50: Andamento dell'induzione magnetica normale al traferro nel motore con spessore di corona statorica pari a 15 mm e con corrente 8 A, considerando le armoniche dispari dalla 1° alla 11°.

Figura 51: Andamento dell'induzione magnetica normale al traferro nel motore con spessore di corona statorica pari a 15 mm e con corrente 20 A, considerando le armoniche dispari dalla 1° alla 13°.

Figura 52: Grafico che rappresenta le curve sperimentali dei motori con spessore di corona statorica di 18 mm, di 20 mm, di 22 mm e la curva teorica.

Figura 53: Andamento della curva Alfa-Ks teorica ed empirica di IEC 132-4.125 con spessore di corona statorica di 18 mm, mettendo a confronto i due metodi per calcolare Φ_{max} .

Figura 54: Andamento della curva Alfa-Ks teorica ed empirica di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica di 20 mm, mettendo a confronto i due metodi per calcolare Φ_{max} .

Figura 55: Andamento della curva Alfa-Ks teorica ed empirica di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica di 22 mm, mettendo a confronto i due metodi per calcolare Φ_{max} .

Figura 56: Grafico che rappresenta le curve sperimentali dei motori con spessore della corona statorica di 30 mm, di 35 mm, di 40 mm, di 50 mm e la curva teorica.

Figura 57: Andamento della curva Alfa-Ks teorica ed empirica di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica di 30 mm, mettendo a confronto i due metodi per calcolare Φ_{max} .

Figura 58: Andamento della curva Alfa-Ks teorica ed empirica di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica di 35 mm, mettendo a confronto i due metodi per calcolare Φ_{max} .

Figura 59: Andamento della curva Alfa-Ks teorica ed empirica di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica di 40 mm, mettendo a confronto i due metodi per calcolare Φ_{max} .

Figura 60: Panoramica che rappresenta tutte le curve sperimentali ottenute e la curva teorica.

Introduzione

0.1 Descrizione e funzionamento del motore asincrono trifase

Il Motore Asincrono Trifase, o MAT, venne per la prima volta realizzato da Galileo Ferraris nel 1885 come sistema bifase e, nel 1888, Nikola Tesla ne brevettò il sistema trifase per uso pratico a livello industriale.

Questo motore è alimentato direttamente dalla rete di distribuzione a tensione e frequenza costanti (50Hz/60Hz) e rappresenta il motore elettrico più semplice, economico, robusto e affidabile che la tecnica conosca.

Esso è caratterizzato da un elevato rendimento; inoltre, non richiede né lubrificazione né manutenzione e, pertanto, è il dispositivo più diffuso per la conversione dell'energia elettrica in energia meccanica.

Rispetto agli altri tipi di motori elettrici, il MAT presenta diversi vantaggi: peso ed ingombro ridotti a parità di potenza, mancanza di particolari dispositivi di eccitazione, poiché la potenza magnetizzante necessaria viene prelevata direttamente dalla rete per creare il flusso induttore nella macchina.

Tra gli innumerevoli dispositivi meccanici azionati dal MAT possiamo trovare: montacarichi, gru, ascensori, macchine utensili tradizionali, pompe e ventilatori.

Il MAT è costituito da una parte fissa che prende il nome di Statore e da una parte mobile che prende il nome di Rotore. I circuiti magnetici sono realizzati con lamierini a basse perdite, isolati tra loro e impaccati a formare statore e rotore.

Sullo statore vi sono le cave, dove alloggia un avvolgimento trifase simmetrico con p coppie di poli collegato alla rete, il quale può essere collegato a stella oppure a triangolo tramite una morsettiera. In questo modo si permette, quindi, di alimentare lo stesso motore con tensioni trifase di 400 V e 230 V. In alcuni grossi motori si preferisce avviare a stella e poi commutare a triangolo, al fine di limitare la corrente di spunto che può risultare anche 4-10 volte maggiore della corrente assorbita a pieno carico. Per questo stesso scopo si possono usare, alternativamente, anche azionamenti a inverter.

Andando a distribuire l'avvolgimento in più cave per polo e raccorciando le bobine, si va a ridurre, nella realizzazione pratica, l'ampiezza delle armoniche di ordine superiore.

La bobina è realizzata con spire di conduttori cilindrici o piattine in rame o alluminio, isolate fra loro e verso massa.

Il rotore della macchina asincrona è formato da un circuito chiuso su se stesso, quindi in cortocircuito. Se il circuito di rotore fosse realizzato con un avvolgimento, il rotore della macchina prenderebbe il nome di rotore avvolto. In questo caso l'avvolgimento, situato in cave simili a quelle statoriche, sarebbe fatto a immagine e somiglianza dell'avvolgimento statorico.

Altrimenti, il circuito rotorico potrebbe essere realizzato creando delle cave sul rotore laminato, che sarebbero riempite con barre di rame o di alluminio, le quali sono disposte lungo la periferia del rotore e sono chiuse in corrispondenza delle due basi del rotore da due anelli di rame massiccio, creando così la gabbia di scoiattolo.

È possibile realizzare anche un rotore particolare chiamato rotore a doppia gabbia di scoiattolo, che vede due gabbie di scoiattolo: una più esterna e una più interna. Le cave della gabbia più esterna hanno sezione più piccola delle cave della gabbia più interna; quindi la gabbia più esterna ha una resistenza maggiore rispetto alla gabbia più interna.

La velocità angolare del rotore è inferiore alla velocità di rotazione del campo magnetico generato dagli avvolgimenti di statore e, da questo fatto, nasce l'asincronismo.

Il principio di funzionamento del MAT è il seguente:

- applico agli avvolgimenti statorici un sistema simmetrico di tensioni,
- essendo simmetrici gli avvolgimenti, circola un sistema equilibrato di correnti,
- l'avvolgimento induttore produce quindi una serie di campi magnetici rotanti di ordine armonico p per i quali risulta intero il valore $(p \pm 1)/3$,
- ciascun campo magnetico rotante induce negli avvolgimenti rotorici un sistema di f.e.m. indotte,
- essendo gli avvolgimenti cortocircuitati ciascun sistema di f.e.m. indotte produce un sistema equilibrato di correnti,
- i sistemi di correnti producono a loro volta campi magnetici rotanti con velocità angolare rispetto al rotore tale per cui sia soddisfatta la relazione:
 velocità angolare del campo magnetico rotante statorico = velocità angolare rotore + velocità angolare del campo magnetico rotorico.

Quando, a causa di una forza esterna, il rotore ha una velocità superiore al campo rotante dello statore, il motore asincrono può essere utilizzato come alternatore, ovvero come generatore di energia elettrica sia con che senza l'utilizzo di condensatori, a seconda che venga collegato alla rete o no. Questo è utilizzato per piccole potenze, in occorrenze nelle quali si preferisce la facilità d'impiego rispetto al motore sincrono (che richiede l'uso dell'inverter), anche a discapito del rendimento.

Tuttavia, il rendimento è funzione della massima potenza.

Fino a ora abbiamo considerato che la distribuzione dell'induzione magnetica al traferro sia sinusoidale (figura 1). Ciò sarebbe ragionevole nell'ipotesi che il materiale ferromagnetico, che costituisce il motore, abbia permeabilità magnetica molto elevata e costante.

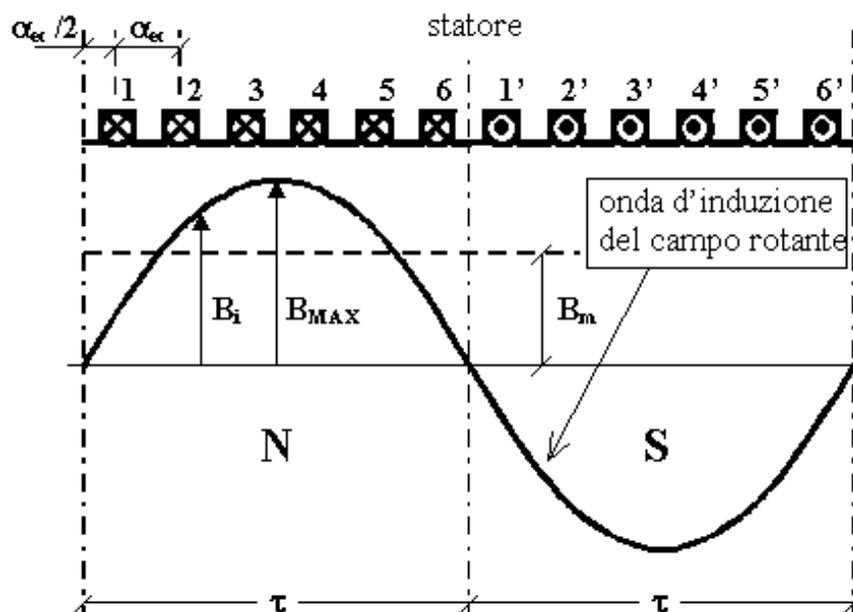


Figura 5: distribuzione sinusoidale di induzione magnetica al traferro.

0.2 Saturazione del circuito magnetico

Per sfruttare al meglio il ferro, l'attuale tendenza dei progettisti di macchine asincrone è quella di porre la condizione nominale di funzionamento in zona di saturazione. Questo comporta la comparsa nella tensione di fase di una componente di terza armonica. Ad essa corrisponde un flusso di magnetizzazione di terza armonica che risulta in fase con il flusso di magnetizzazione alla frequenza fondamentale; esiste quindi una coincidenza tra i massimi dei due flussi.

Nella macchina asincrona esistono due fenomeni di saturazione: la saturazione dovuta ai denti e la saturazione della corona di statore.

Nella prima, i denti di statore che saturano sono quelli in corrispondenza del flusso di magnetizzazione. In questa direzione l'induzione al traferro presenta un appiattimento, quindi la terza armonica presenta un punto di minimo (figura 2).

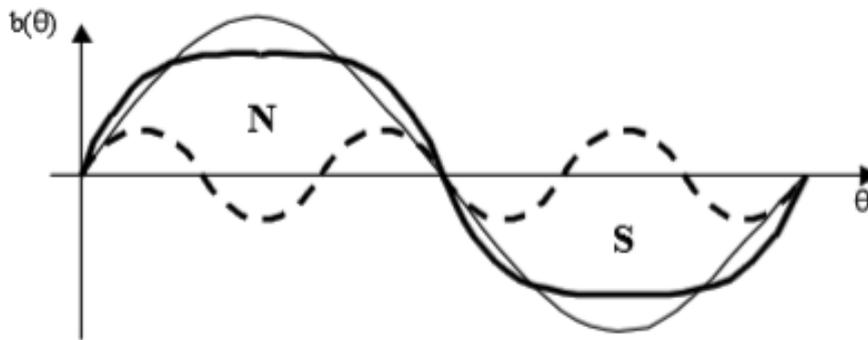


Figura 6: distribuzione di induzione magnetica al traferro con saturazione dei denti. Definiamo con **un tratto continuo per l'andamento reale**, con un tratto leggero di prima armonica e con un tratteggio per rappresentare la terza armonica.

La saturazione della corona di statore è dovuta alla distribuzione di forza magnetomotrice lungo il traferro. In corrispondenza dell'asse interpolare, il flusso di giogo è massimo e può mandare in saturazione il ferro. In questo caso l'andamento dell'induzione al traferro è completamente differente dal caso precedente: in corrispondenza del flusso di magnetizzazione si ha il massimo della terza armonica (figura 3).

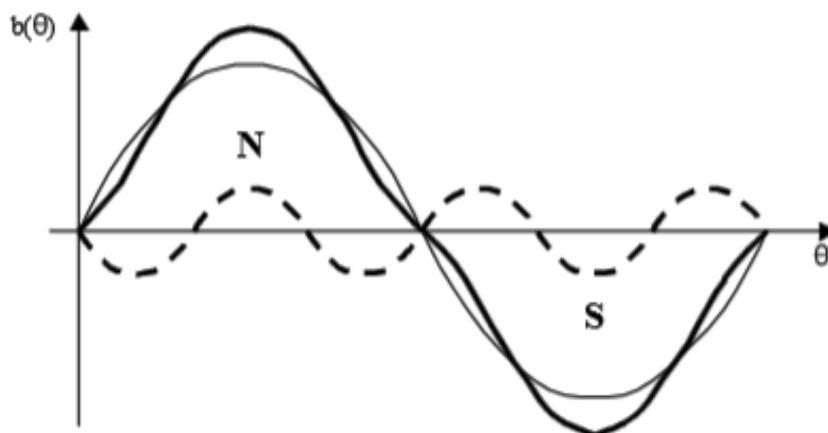


Figura 7: distribuzione di induzione magnetica al traferro con saturazione della corona. Definiamo con **un tratto continuo per l'andamento reale**, con un tratto leggero di prima armonica e con un tratteggio per rappresentare la terza armonica.

In questa tesi analizzeremo il contributo dato dalla corona statorica nella saturazione, al variare del suo spessore.

Andremo quindi a verificare quanta caduta di forza magnetomotrice sia presente nella corona statorica e nei denti, per quantificare quanto esse incidano sulla caduta totale.

Dunque, nel caso in cui la saturazione sia dovuta ai denti, la distribuzione di induzione al traferro risulterà appiattita (figura2), mentre, nel caso in cui la saturazione sia dovuta alla corona statorica, tale distribuzione presenterà un massimo dato dalla terza armonica (figura3).

Il valore di induzione massimo al traferro è esprimibile mediante la seguente relazione:

$$B_{max} = \frac{\Phi_{max}}{L * \tau * Alfa}$$

In cui Φ_{max} è il flusso massimo, L è la lunghezza assiale della macchina e τ è il passo polare.

Se ci trovassimo in una situazione di materiale ferromagnetico lineare e ideale, il valore di Alfa sarebbe costante e pari a $2/\pi$.

Nella realtà il coefficiente Alfa è funzione dell'indice di saturazione K_s , definito come il rapporto tra la caduta di forza magnetomotrice (CFM) nel dente statorico, rotorico e al traferro e la CFM al solo traferro.

Tradizionalmente, si fa riferimento alla curva riportata nella figura 4:

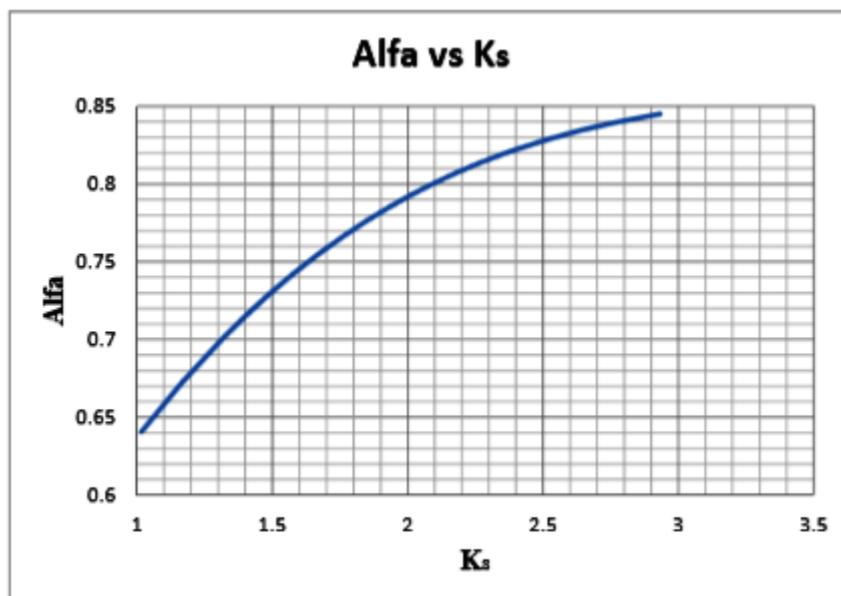


Figura 8: curva Alfa-Ks teorica.

Tale curva può essere rappresentata mediante un polinomio, per valori di K_s compresi tra 1 e 3, come segue:

$$Alfa = 0.0108 * K_s^3 - 0.1147 * K_s^2 + 0.4234 * K_s + 0.3175$$

Osserviamo che il valore iniziale di Alfa, per K_s uguale a 1, è proprio $2/\pi$.

Nonostante questa curva sia largamente utilizzata durante la fase di dimensionamento dei motori asincroni, si può ragionevolmente ritenere che l'andamento effettivo di tale curva possa dipendere dall'influenza delle scelte progettuali, come per esempio dallo spessore della corona statorica oppure dalla caratteristica del materiale ferromagnetico impiegato, ovvero dal suo stato di saturazione.

L'obiettivo principale di questa tesi è analizzare l'influenza della scelta dello spessore della corona statorica sulla saturazione magnetica in un motore asincrono.

I dati, su cui si baserà questo studio, saranno ricavati dall'analisi condotta mediante metodi a Elementi Finiti, utilizzando software appropriati che saranno descritti in seguito.

In conclusione, ci porremo di verificare la validità del modello teorico oppure, eventualmente, di dedurre curve più idonee per famiglie di motori.

Capitolo 1

Generalità su FEMM 4.2

FEMM 4.2 è una suite di programma volta a risolvere problemi elettromagnetici a bassa frequenza, bidimensionali o a domini simmetrici. Tale software permette lo studio e la risoluzione dei problemi magnetici, utilizzando il metodo degli elementi finiti.

Il metodo degli elementi finiti è una tecnica numerica atta a cercare soluzioni approssimate per risolvere problemi descritti da equazioni differenziali alle derivate parziali, riducendo queste ultime a un sistema di equazioni algebriche. La caratteristica principale del metodo degli elementi finiti è una discretizzazione del dominio continuo in un dominio discreto (mesh) mediante l'uso di primitive (elementi finiti) di semplici forme (triangoli e quadrilateri per domini 2D, esaedri e tetraedri per domini 3D).

La discretizzazione, che, come già detto, può essere di varie forme, solitamente sono triangoli. I vertici di questi triangoli sono il punto in cui si determina la soluzione del potenziale vettore \vec{A} . All'interno del triangolo il programma approssima, con un piano passante per i vertici del triangolo, i valori da attribuire a ogni singolo punto.

Il vantaggio di ciò sta nel fatto che, così, si va a trasformare un problema piccolo ma difficile, in un problema più grande ma di semplice soluzione.

In questa tesi, FEMM, è stato utilizzato per risolvere problemi di campo magnetico. La pagina iniziale del programma si presenta come nella figura sottostante:

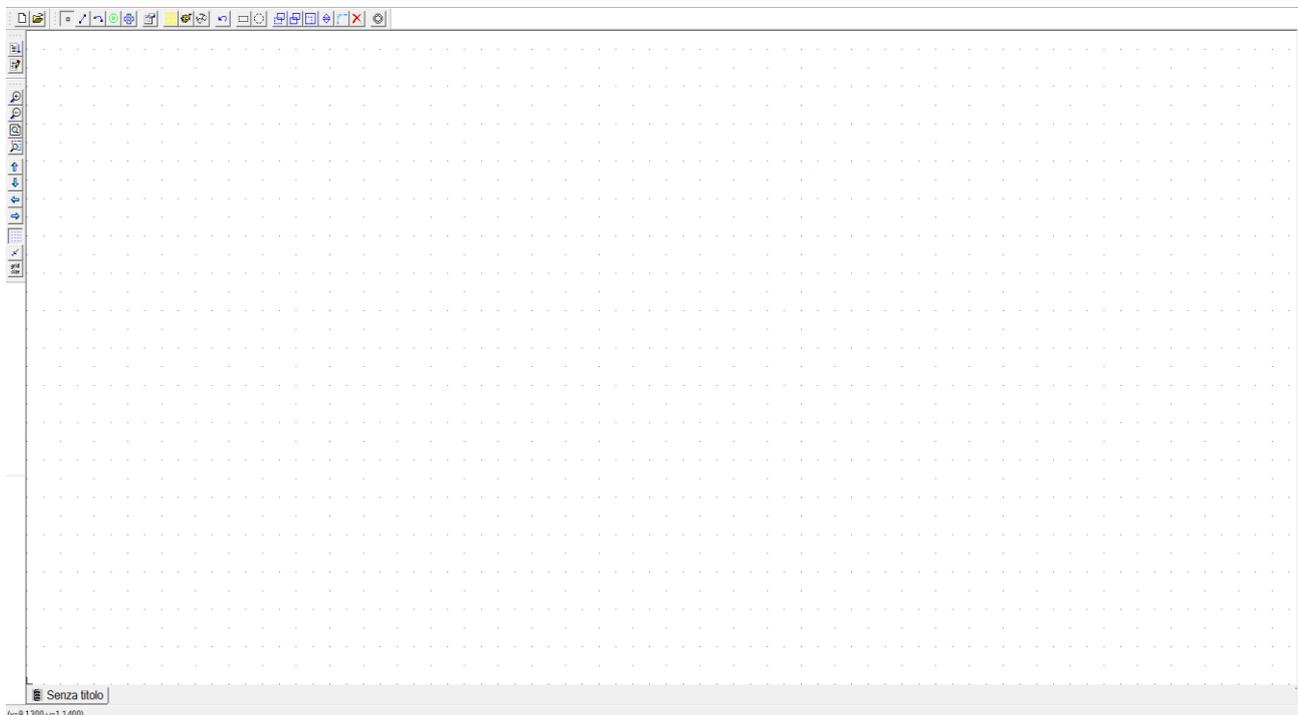


Figura 5: pagina iniziale di FEMM 4.2, dopo aver scelto il tipo di problema (magnetic problem).

A questo punto è possibile iniziare a disegnare la geometria del sistema tramite una serie di funzioni, facendo uso della griglia che aiuta l'utente nella realizzazione del disegno.

Altrimenti, per geometrie più complesse, è possibile importare file con estensione “.dxf”

provenienti da programmi cad, o usare script Lua per il disegno di particolari geometrie simmetriche, come nel caso di motori.

In questa tesi è stato utilizzato un software, chiamato Lua Motor, che, tramite programmi in linguaggio Lua, è in grado di automatizzare la parte di disegno nell'ambiente di lavoro FEMM.

Questo programma permette di definire le caratteristiche geometriche del lamierino impostandole negli appositi boxes, oppure importando un file di testo contenente tutte le informazioni numeriche.

Nella figura seguente è rappresentata la schermata iniziale di Lua Motor.

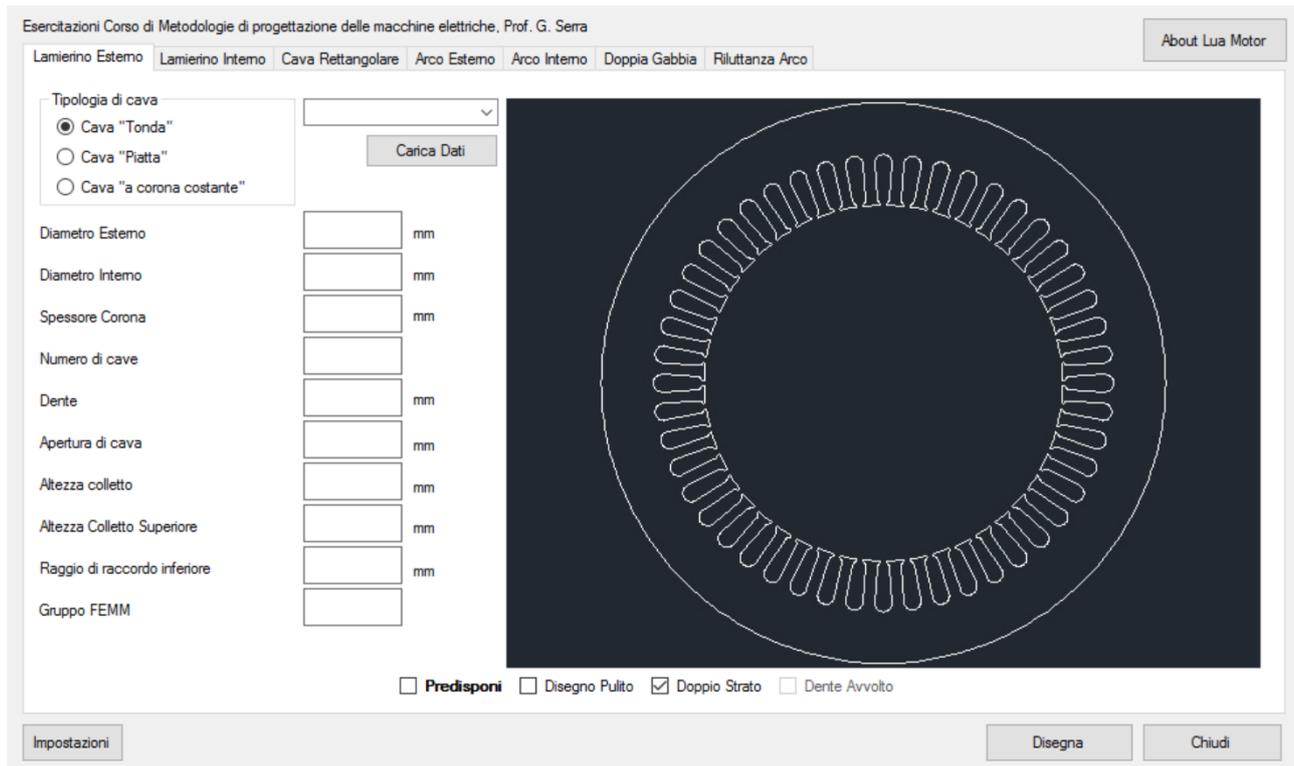


Figura 6: pagina iniziale di Lua Motor.

Una volta disegnata la geometria del dispositivo da analizzare, FEMM consente di assegnare:

- la definizione del problema e la precisione della soluzione;
- le proprietà dei materiali;
- le condizioni al contorno di Dirichlet o Neumann;
- le proprietà elettriche in un punto e le sue unità di misura;
- l'intensità e la modalità di connessione del circuito;
- la profondità della geometria e il tipo di risoluzione;

Tutto questo può essere automatizzato tramite programmi in linguaggio Lua che vedremo nel capitolo successivo.

Dopo aver definito tutti i parametri del mio problema, è possibile procedere alla sua risoluzione che è eseguita da FEMM.

Una volta che il problema sia stato risolto, è possibile visualizzare tutti i valori delle grandezze elettromagnetiche in un punto della macchina oppure l'andamento di alcune di esse. Un esempio di quest'applicazione è presentato nelle figure della pagina successiva.

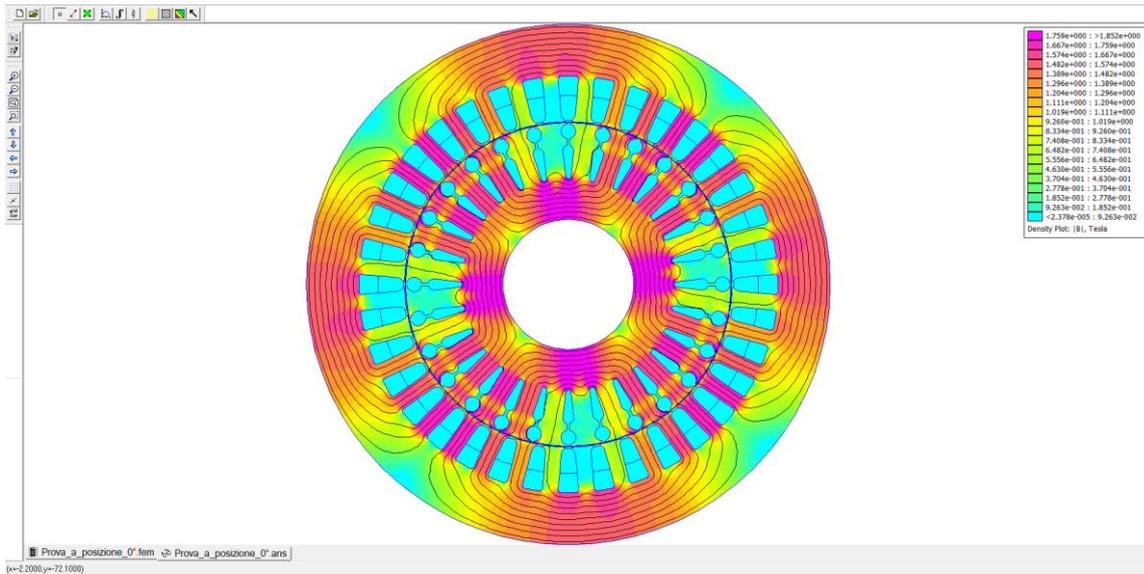


Figura 7: andamento dell'induzione magnetica in un motore asincrono tramite FEMM.

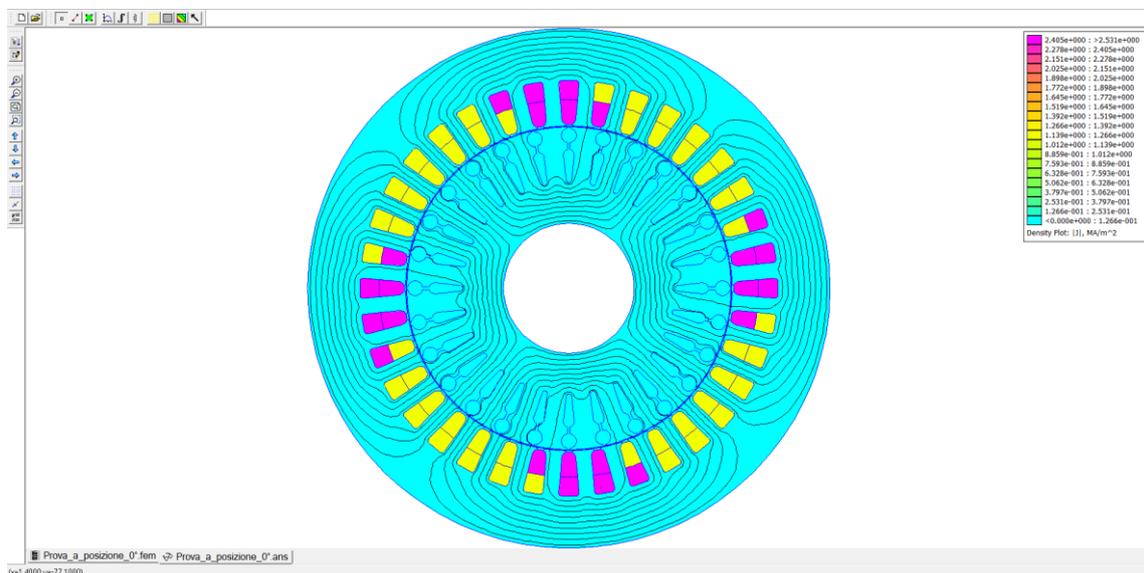


Figura 8: andamento della densità di corrente in un motore asincrono tramite FEMM.

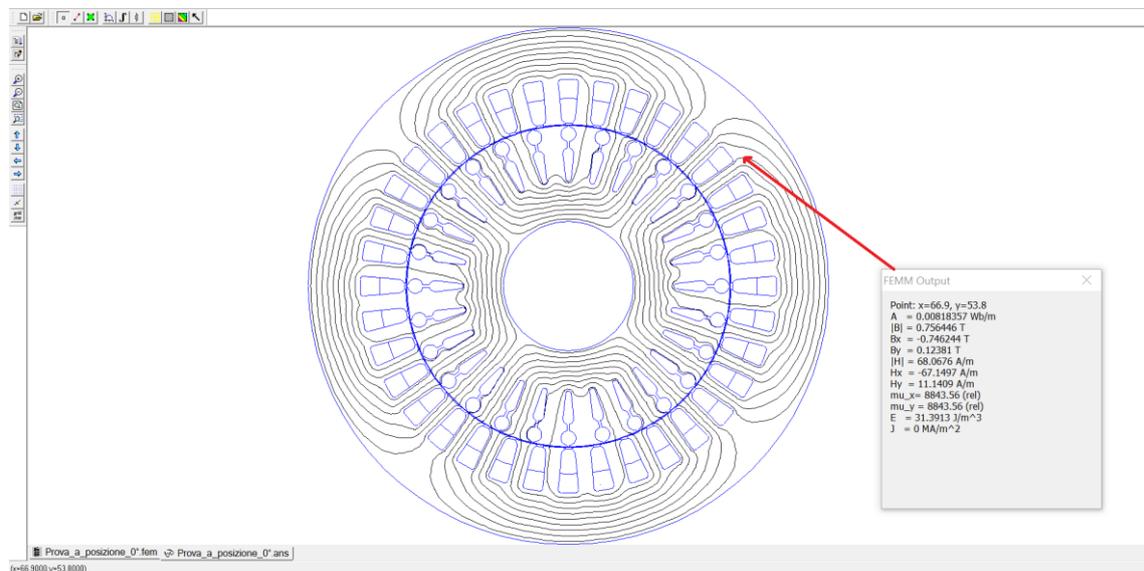


Figura 9: valori delle grandezze elettromagnetiche nel punto del motore asincrono indicato dalla punta della freccia.

Capitolo 2

Programmi in LUA

Lua è un linguaggio di programmazione dinamico e leggero che, come abbiamo già accennato in precedenza, può essere utilizzato per automatizzare la modellizzazione e il disegno nelle varie simulazioni di FEMM.

Lua è stato creato nel 1993 da Roberto Ierusalimschy, Luiz Henrique de Figueiredo e Waldemar Celes, membri del Gruppo tecnologico di computer grafica presso L'università Pontificia di Rio de Janeiro, in Brasile.

In FEMM, è possibile aprire direttamente un file con estensione “.lua” dall'icona dedicata, riportata nella figura 10. Dopo aver aperto il file, FEMM eseguirà lo script, cioè tutti i comandi contenuti nel file di testo.



Figura 10: Icona dedicata di FEMM, per importare file con estensione “.lua” oppure per scrivere comandi in linguaggio Lua nella console dedicata.

I file Lua che sono stati utilizzati per questa tesi sono “ASSEGNA Asincrono SEMPLICE”, che automatizza i processi di assegnazione delle proprietà dei materiali che costituiscono i lamierini, l'assegnazione degli avvolgimenti all'interno dei lamierini stessi e la definizione delle condizioni al contorno, e “Analizzatore Flussi-Correnti”, che consente di analizzare l'andamento delle grandezze elettromagnetiche nel tempo tramite la definizione di una variabile angolare, la quale, incrementandosi, fa sì che il campo magnetico rotante ruoti di una certa quantità ed eseguendo simulazioni per ogni suo valore è possibile risalire ai valori di corrente e flusso nel tempo.

Di seguito sono riportati i due programmi e la loro descrizione:

2.1 ASSEGNA Asincrono SEMPLICE

La parte iniziale del programma è costituita da un menù che deve essere completato in ogni sua voce. È qui che vengono inseriti i dati costruttivi del motore.

Di seguito si propone uno degli esempi studiati:

- MENU' GENERALE: COMPLETARE QUESTO MENU' CORRETTAMENTE IN OGNI SUA VOCE.

nomefilefemm = "Motore132-4.125_48cave.FEM" Nome del file FEMM relativo al progetto del motore da studiare.

- STATORE

nomefilestat = "IEC.132-4.125 statore.dat" Nome del file di testo prodotto dalla macro utilizzata con autocad in cui sono contenute le informazioni geometriche statoriche.

nomefileavv = "3fasi48cave4poli.txt" Nome del file relativo alla sequenza di riempimento delle fasi dello statore.

DoppioStrato = "s" "s" vuol dire che l'avvolgimenti è in doppio strato, altrimenti inserire "n" per il semplice strato.

numspire = 13 Numero di conduttori per strato se viene impostato il doppio strato altrimenti rappresenta il numero di conduttori per cava.

diametro = 1.283 Diametro del conduttore del lamierino esterno [mm], se viene inserito 0 lo prenderà come un conduttore massiccio.

lunghezza = 170 Lunghezza del motore [mm].

passobobina = 11 Passo della bobina.

scalameshs=35 Parametro che servirà a fissare la dimensione massima, verrà utilizzato nella relazione ($meshsizes = raggio/scalameshs$).

- PROPRIETA' DEI CIRCUITI DELLE TRE FASI DI STATORE

m=3 numero di fasi.

Ia=1 valore massimo della corrente (valore efficace* $\sqrt{2}$) relativa alle Fasi [A].

alfa=0 Fase iniziale della corrente ($0=I_{1max}$).

frequenza=50 Frequenza della corrente [Hz].

mcc=1 Modalità di connessione dei circuiti di Fase statorica (0=parallelo; 1=serie).

- ROTORE

nomefileroto = "IEC.132-4.125 rotore.dat" Nome del file di testo prodotto dalla macro utilizzata con autocad in cui sono contenute le informazioni geometriche rotoriche.

materialecircuitrot= "" Inserire tra gli apici il nome del magnete che si vuole utilizzare per riempire le cave di rotore; bisogna indicare correttamente il nome completo del materiale che va precedentemente caricato nel progetto relativo al file da usare. Se invece si vuole utilizzare il materiale di default, che presenta le caratteristiche indicate in basso nella parte relativa alle proprietà, non indicare niente e lasciare gli apici vuoti.

materialeferroest_as="" Inserire tra gli apici il nome del materiale che si vuole utilizzare per il lamierino esterno; bisogna indicare correttamente il nome completo del materiale che va precedentemente caricato nel progetto relativo al file da usare. Se invece si vuole utilizzare il materiale di default, che presenta le caratteristiche indicate in basso nella parte relativa alle proprietà, non indicare niente e lasciare gli apici vuoti.

materialeferroint_as="" Inserire tra gli apici il nome del materiale che si vuole utilizzare per il lamierino interno; bisogna indicare correttamente il nome completo del materiale che

va precedentemente caricato nel progetto relativo al file da usare. Se invece si vuole utilizzare il materiale di default, che presenta le caratteristiche indicate in basso nella parte relativa alle proprietà, non indicare niente e lasciare gli apici vuoti.

maxsegdeg = 0.25 Parametro relativo alla mesh da dare alla linea mediana al traferro.

scalamesh = 35 Parametro che servirà a fissare la dimensione massima, verrà utilizzato nella relazione ($meshsizes = raggio/scalameshs$).

Oltre i materiali di default è possibile usare i materiali nella libreria di FEMM o definirne di nuovi (come verrà fatto in seguito). La seconda parte del programma riguarda l'acquisizione dei dati relativi alle dimensioni dei lamierini.

- ACQUISIZIONE DEI PARAMETRI GEOMETRICI DEL MOTORE

Acquisizione dei dati del file relativo al lamierino di STATORE:

```
FileStatore = openfile(nomefilestat,"r")
a1 = read(FileStatore,"*l")
a1 = read(FileStatore,"*l")
a1 = read(FileStatore,"*n")
print("Diametro esterno: ",a1)
```

```
b1 = read(FileStatore,"*l")
b1 = read(FileStatore,"*l")
b1 = read(FileStatore,"*n")
print("Diametro interno: ",b1)
```

```
c1= read(FileStatore,"*l")
c1= read(FileStatore,"*l")
c1= read(FileStatore,"*l")
c1= read(FileStatore,"*l")
c1= read(FileStatore,"*n")
print("Altezza corona: ",c1)
```

```
c1= a1/2-c1-b1/2
print("Altezza cava: ",c1)
```

```
d1= read(FileStatore,"*l")
d1= read(FileStatore,"*l")
d1= read(FileStatore,"*n")
print("Numero cave: ",d1)
closefile(FileStatore)
```

Acquisizione dei dati del file relativo al lamierino di ROTORE:

```
FileRotore = openfile(nomefileroto,"r")
a2 = read(FileRotore,"*l")
a2 = read(FileRotore,"*l")
a2 = read(FileRotore,"*l")
a2 = read(FileRotore,"*l")
a2 = read(FileRotore,"*n")
```

```

print("Diametro esterno: ",a2)

b2 = read(FileRotore,"*|")
b2 = read(FileRotore,"*|")
b2 = read(FileRotore,"*n")
print("Diametro interno: ",b2)

c2 = read(FileRotore,"*|")
c2 = read(FileRotore,"*|")
c2 = read(FileRotore,"*n")
print("Altezza cava: ",c2)

d2 = read(FileRotore,"*|")
d2 = read(FileRotore,"*|")
d2 = read(FileRotore,"*n")
print("Numero cave: ",d2)
closefile(FileRotore)

```

La parte successiva del programma permette di tracciare una linea media al traferro, per facilitare la misura di induzione e delle cadute di forze magnetomotrici nello stesso. Inoltre, in questa si impone che non venga utilizzata alcuna mesh dove verrà inserito l'albero, per diminuire il numero di poli nella simulazione di FEMM, quindi alleggerire e velocizzare l'analisi.

La parte finale del programma associa i parametri dei lamierini di statore e rotore alle variabili del programma e definisce tutte le caratteristiche del problema.

Il risultato finale è il motore “vestito” di cui riportiamo un esempio:

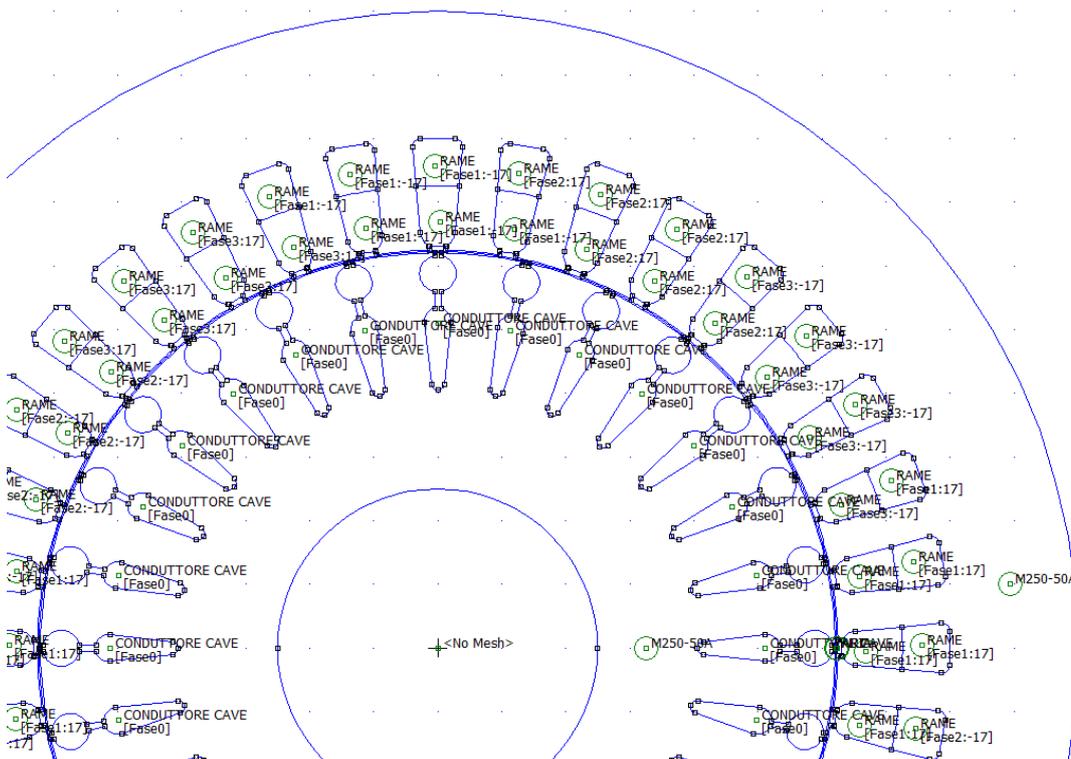


Figura 11: Esempio di un motore “vestito” tramite il programma “ASSEGNA Asincrono SEMPLICE”.

2.1 Analizzatore Flussi-Correnti

Questo programma viene utilizzato per analizzare l'andamento delle grandezze elettromagnetiche nel dominio del tempo. Per fare ciò, al suo interno è presente un ciclo for che risolve il problema magnetico per ogni valore della variabile ang, come si accennava in precedenza. La variabile ang indica il valore in radianti dell'angolo di cui si è spostato il campo magnetico rotante rispetto alla posizione iniziale. Dimensionando il ciclo in modo appropriato si può ricavare l'andamento delle grandezze per un giro completo della macchina.

Osserviamo il programma più nel dettaglio, prendendo come esempio un motore che è stato studiato.

Anche in questo caso, la prima parte del programma è costituita da un menù generale che deve essere completato in ogni sua parte.

- MENU' GENERALE

nomefilefemm = "Motore132-4.125 (vestito).FEM" Nome del file FEMM relativo al progetto del motore da studiare a cui sono già stati assegnati i materiali tramite il programma precedente.

m=3 Numero di fasi.

nomefileroto = "IEC.132-4.125 rotore.dat" Nome del file di testo prodotto dalla macro utilizzata con autocad in cui sono contenute le informazioni geometriche relative al rotore del motore.

filetemp = "s" Indicare tra gli apici la lettera "s" minuscola se si desidera memorizzare nella cartella del programma ogni file Femm relativo ad ogni singola prova oppure indicare "n" minuscola se non si vogliono memorizzare i file Femm relativi alle singole prove.

la=2 Valore massimo della corrente relativa alle Fasi [1].

alfa=0 fase iniziale della corrente (0=l1 max).

Vn=400 Tensione nominale del motore in valore efficace [V].

fn=50 Frequenza nominale del motore [Hz].

l=170 Lunghezza del motore [mm].

p=2 numero di coppie di poli del motore.

Ciclo relativo alla ROTAZIONE:

```
inc=(2*pi)/50
for nn=0, 49, 1 do
open(nomefilefemm)
ang=(nn*inc)
print("Angolo: "..ang*180/pi.." deg")
fi=(2*pi)/m
```

```

for j=1, m, 1 do
  Fi_m=j*(fi)-fi
  i_re = la*cos(-Fi_m+ang)  --Valore della parte reale della corrente nella Fase [A]
  i_im = la*sin(-Fi_m+ang)  --Valore della parte immaginaria della corrente nella
                              Fase [A]
  mi_modifycircprop("Fase"..j,1,i_re+l*i_im)
end
end

```

Le restanti parti del programma sono quelle relative ai risultati. Il programma restituisce in uscita tre risultati:

- Un foglio Excel in cui per ogni valore della variabile ang viene dato il valore istantaneo delle correnti nelle tre fasi;
- Un foglio Excel in cui per ogni valore della variabile ang viene dato il valore istantaneo dei flussi concatenati con le tre fasi;
- Un certo numero di file ans e femm che possono essere aperti con FEMM. Ogni file ans è la soluzione del problema magnetico per un particolare valore della variabile ang descritta nel file femm. Ecco un esempio (figura 12):

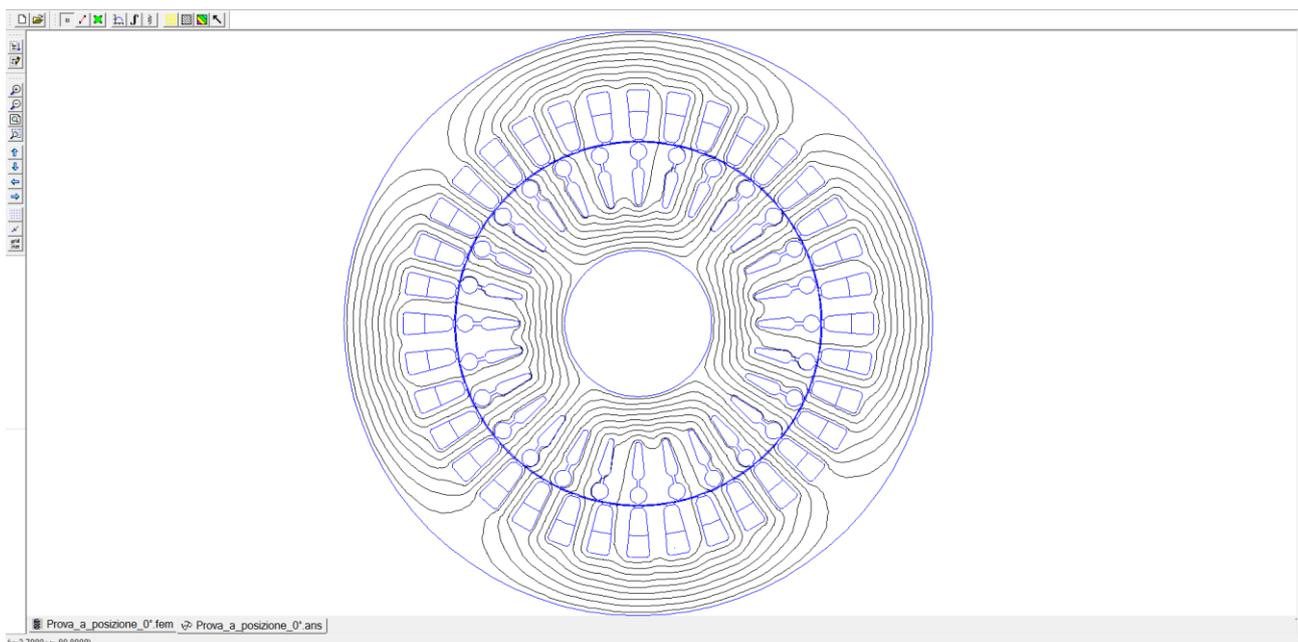


Figura 12: Esempio di file con estensione “.ans”, soluzione del problema magnetico per un determinato valore della variabile angolare.

Nello specifico, sono stati studiati i valori dei flussi concatenati con le fasi, per valori di correnti da 2 a 20 Ampere, in modo da ricostruire l’andamento della curva Alfa-Ks nelle varie configurazioni progettuali.

Capitolo 3

Metodo di Analisi

L'attività svolta può essere suddivisa nei seguenti passaggi:

3.1 Creazione dei file FEMM relativi al motore, variando lo spessore delle corone

Il motore preso sotto esame è IEC 132-4.125, con 36 cave statoriche e a 4 poli. Come lunghezza assiale è stato preso il valore 170 mm e come spessore del traferro 45 mm. L'avvolgimento è stato realizzato in doppio strato e con il raccorciamento di una cava. Le altre specifiche costruttive sono presenti nella scheda del motore sottostante.

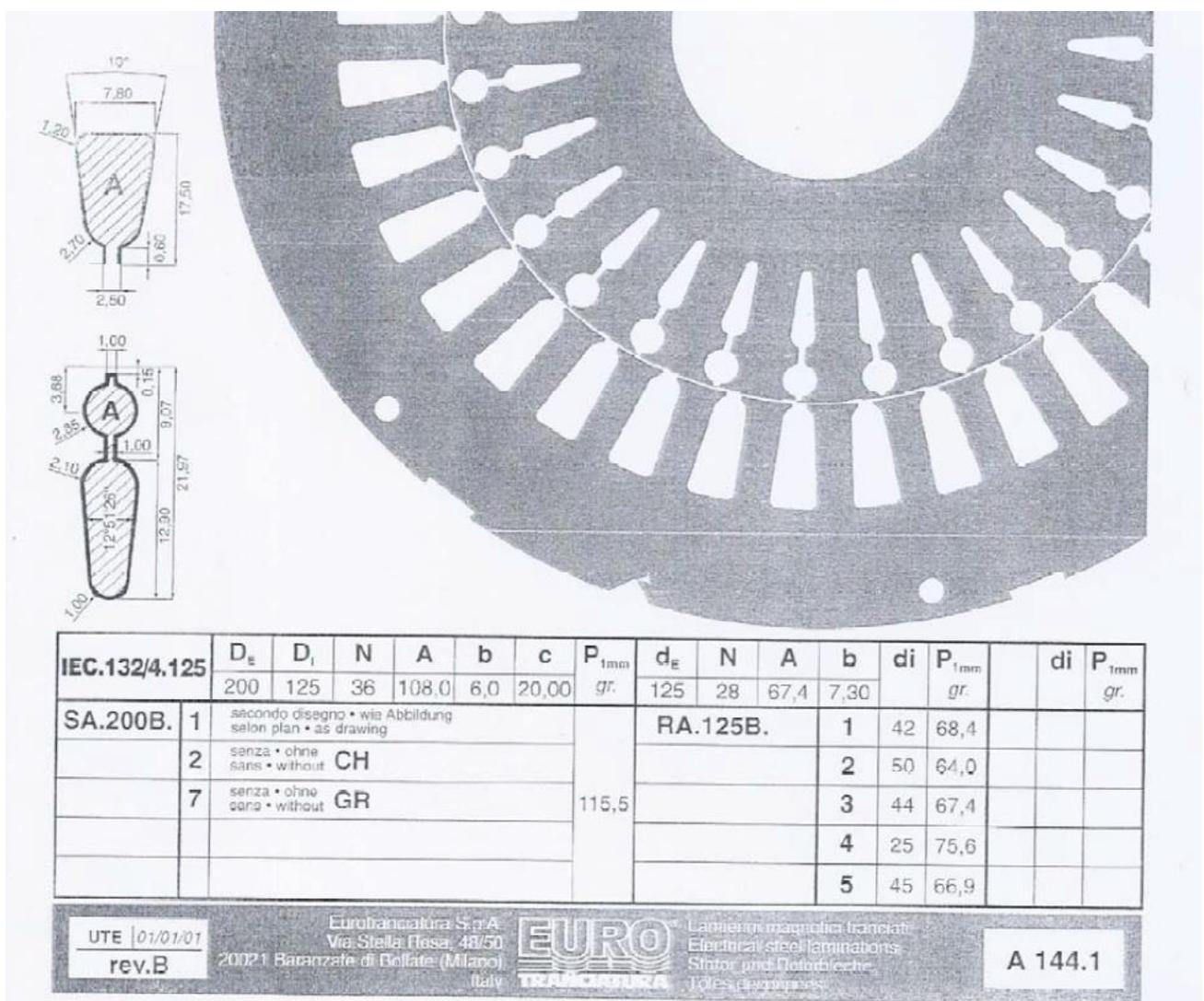
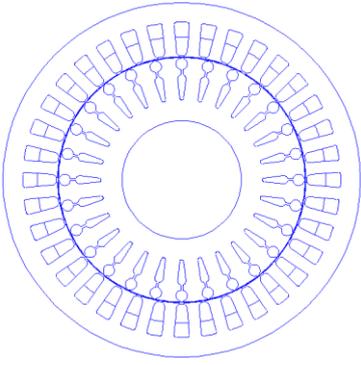


Figura 13: Scheda delle specifiche del motore IEC 132-4.125.

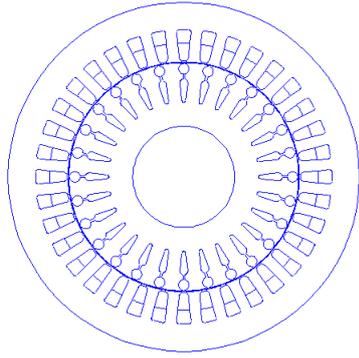
Di questo motore sono state studiate diverse configurazioni, variando lo spessore sia della corona statorica sia della corona rotorica, senza però apportare modifiche alle altre caratteristiche costruttive.

I lamierini analizzati sono nove:

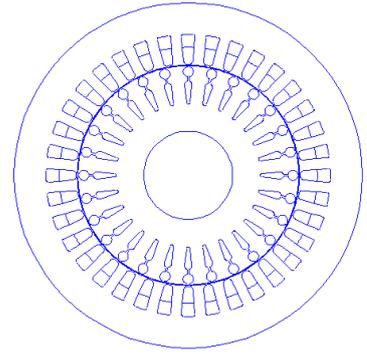
1. Spessore corona statorica di 10 mm e spessore corona rotorica di 10,53 mm (corrisponde a 60 mm di diametro dell'albero).
2. Spessore corona statorica di 15 mm e spessore corona rotorica di 13,03 mm (corrisponde a 55 mm di diametro dell'albero).
3. Spessore corona statorica di 18 mm e spessore corona rotorica di 15,53 mm (corrisponde a 50 mm di diametro dell'albero).
4. Spessore corona statorica di 20 mm e spessore corona rotorica di 15,53 mm (corrisponde a 50 mm di diametro dell'albero). Questa configurazione corrisponde a quella originale del motore, descritta nella sua scheda.
5. Spessore corona statorica di 22 mm e spessore corona rotorica di 15,53 mm (corrisponde a 50 mm di diametro dell'albero).
6. Spessore corona statorica di 30 mm e spessore corona rotorica di 20,53 mm (corrisponde a 40 mm di diametro dell'albero).
7. Spessore corona statorica di 35 mm e spessore corona rotorica di 25,53 mm (corrisponde a 30 mm di diametro dell'albero).
8. Spessore corona statorica di 40 mm e spessore corona rotorica di 30,53 mm (corrisponde a 20 mm di diametro dell'albero).
9. Spessore corona statorica di 50 mm e spessore corona rotorica di 35,53 mm (corrisponde a 10 mm di diametro dell'albero).



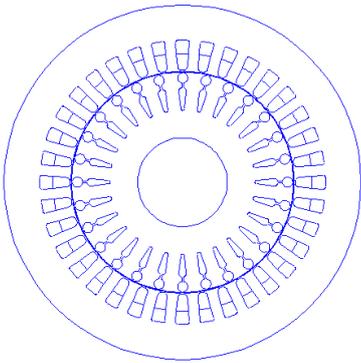
1.



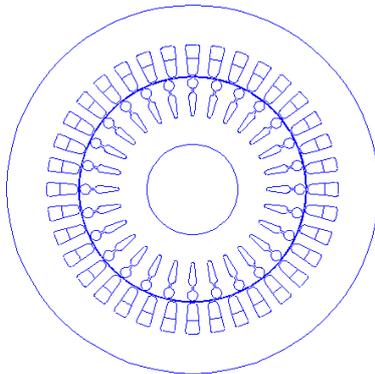
2.



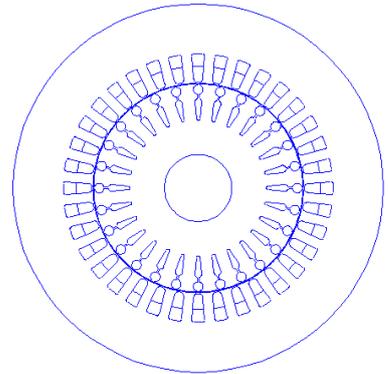
3.



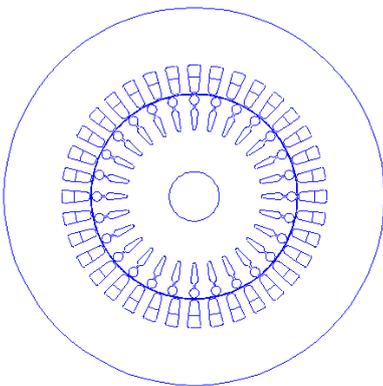
4.



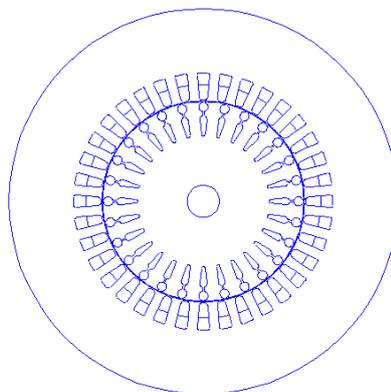
5.



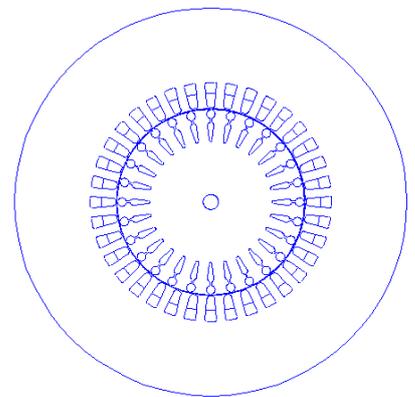
6.



7.



8.



9.

Il disegno dei motori in ambiente FEMM è stato realizzato tramite il software Lua Motor. Dopo aver disegnato i motori, sono state assegnate le condizioni al contorno e le caratteristiche dei materiali attraverso il file LUA “Assegna Asincrono Semplice”, descritto nel capitolo precedente.

Successivamente abbiamo sostituito il materiale ferromagnetico lineare, che era stato assegnato di default, con un materiale ferromagnetico non lineare chiamato M250-50A, la cui curva di prima magnetizzazione è:

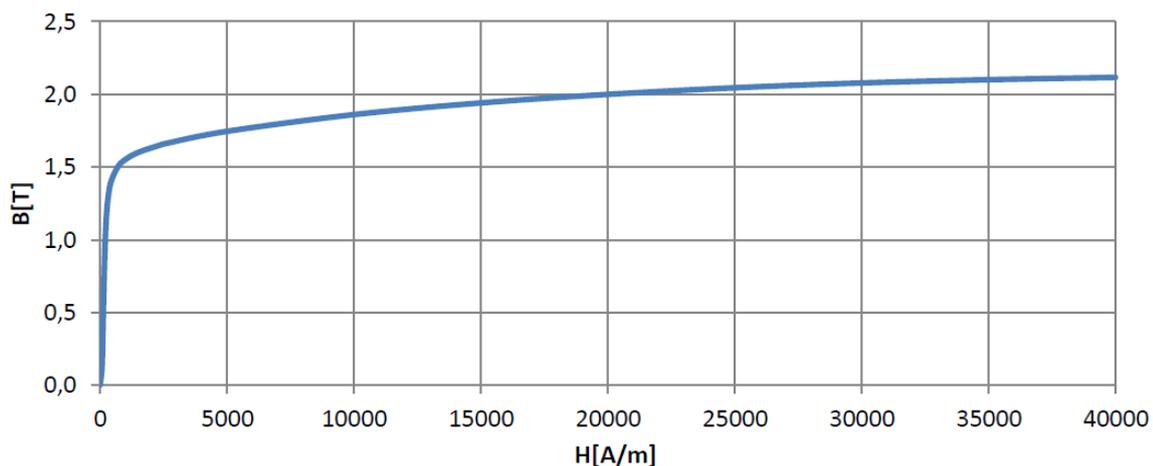


Figura 14: Curva di prima magnetizzazione del materiale ferromagnetico non lineare M250-50A.

In questa configurazione abbiamo studiato il comportamento di ogni motore in condizione di saturazione.

Per far ciò, abbiamo simulato con FEMM il funzionamento di ciascuna macchina attraverso il file LUA “Analizzatore Flussi-Correnti”, per valori di corrente che vanno da 1 A fino a 20 A. Per accorciare i tempi di lavoro, da 1 A a 10 A la corrente ha assunto tutte le quantità intere, mentre nella seconda decina ha assunto solo i valori pari.

Questo programma genera due fogli Excel: in “Flussi.xls” riporta i valori dei flussi concatenati delle tre fasi per ciascuna rotazione assunta dal motore, mentre in “Correnti.xls” sono riportati i valori assunti in ogni rotazione da ciascuna fase. Inoltre, come risultato otteniamo anche un file “.FEMM” del motore con il relativo file “.ans” per ciascuna rotazione assunta dalla macchina.

3.2 Stima della curva Alfa-Ks

Per stimare l’andamento della curva Alfa-Ks, è stato in primo luogo necessario calcolare questi due parametri.

Alfa è esprimibile come:

$$Alfa = \frac{\Phi_{max}}{L * \tau * B_{max}}$$

Quindi per risalire al valore di Alfa, ci siamo ricavati i valori di Φ_{max} e B_{max} .

B_{max} è rappresentato dal valore medio dell'induzione al traferro in corrispondenza del dente più saturo, considerando un tratto pari al passo polare del dente. Questo valore è stato ottenuto dai file FEMM risultanti dalle simulazioni. Nella figura sottostante riportiamo la linea rossa su cui è stato fatto l'integrale.

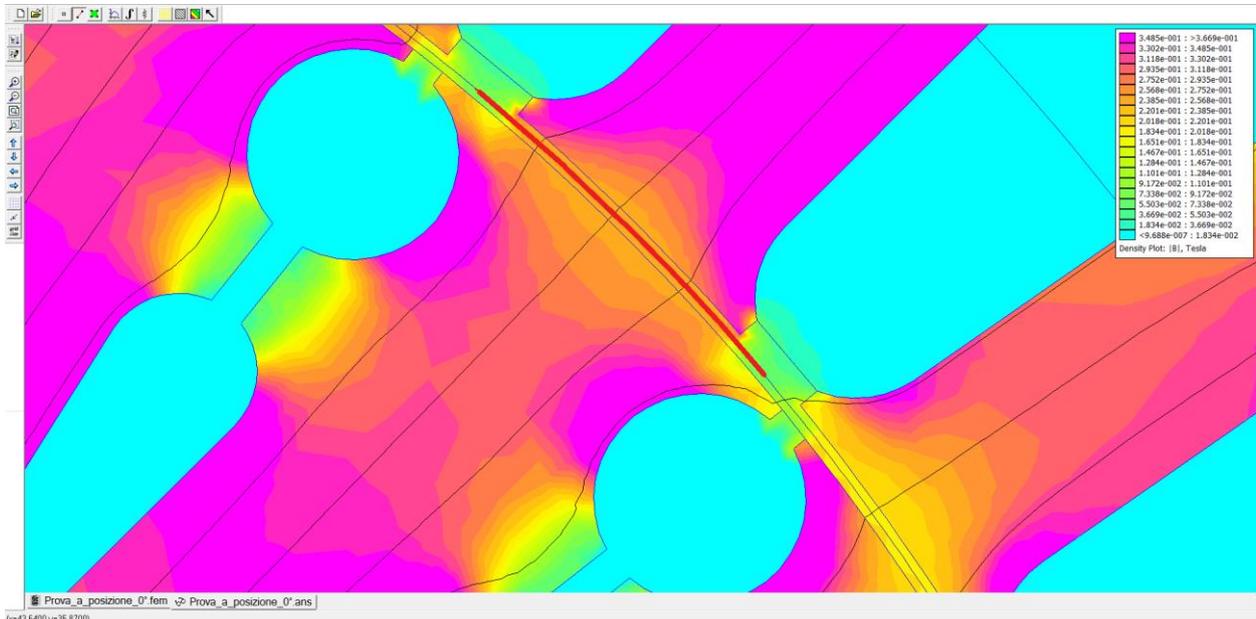


Figura 15: Linea di integrazione per il calcolo dell'induzione al traferro.

In un primo momento, Φ_{max} è stato ricavato dal flusso concatenato con la fase 1 quando la corrente è massima. Questo valore è stato ottenuto dal file Excel creato dal programma "Analizzatore Flussi-Correnti".

Il flusso massimo in funzione del flusso concatenato si esprime tramite la relazione seguente:

$$\Phi_{max} = \frac{2 * \Phi_c}{N * Ka}$$

in cui N è il numero di conduttori per fase e Ka è il fattore di avvolgimento.

Dopo aver stimato Alfa, ci siamo calcolati il valore di Ks come:

$$Ks = \frac{Atot}{At}$$

in cui $Atot$ è la somma della caduta di forza magnetomotrice nel traferro e nei denti di statore e rotore e At è la sola caduta di forza magnetomotrice nel traferro.

At_{tot} è stato ottenuto grazie a FEMM mediante l'integrale sulla linea rossa in figura:

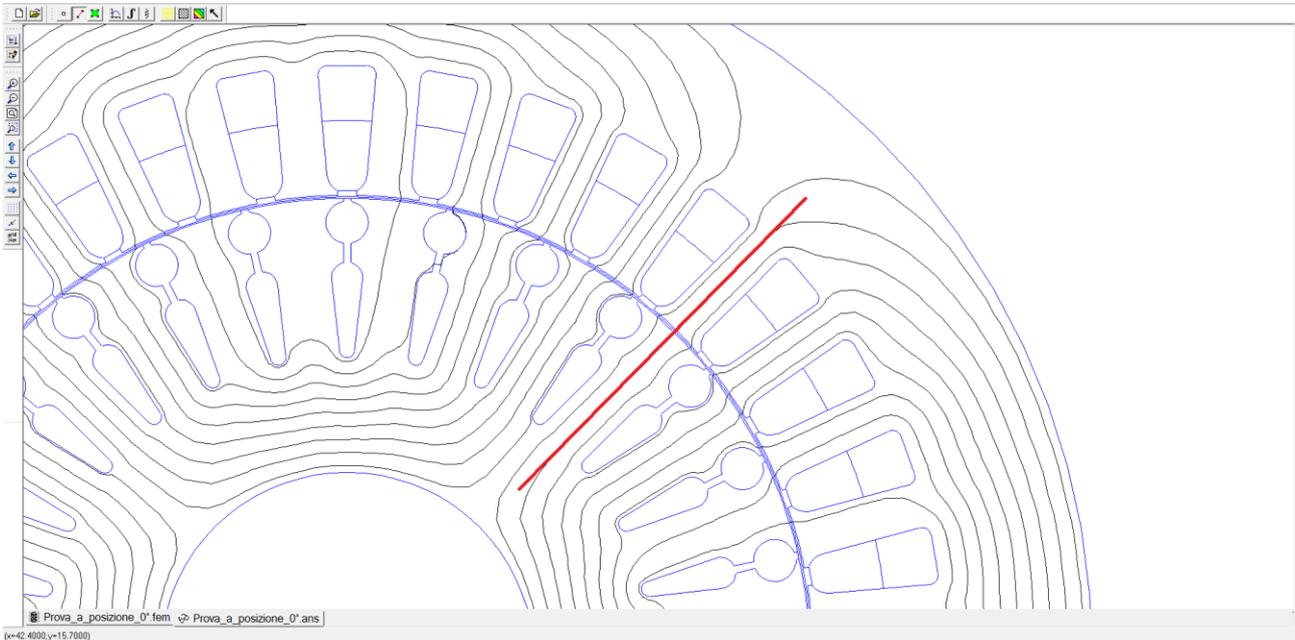


Figura 16: Linea di integrazione per il calcolo della caduta di f.m.m. nel traferro e nei denti.

Mentre At è stato ottenuto mediante la relazione:

$$At = \frac{B_{max} * \delta * K_c}{\mu_0}$$

in cui δ è lo spessore del traferro, μ_0 è la permeabilità nel vuoto e K_c è il fattore di Cartier, il quale tiene conto dell'addensamento del flusso in corrispondenza dei denti che produce un aumento del valore massimo dell'induzione.

Nella pratica tale coefficiente è stato considerato dal fatto di aver misurato B_{max} con FEMM.

3.3 Verifica del valore di Φ_{max}

In un secondo momento, abbiamo verificato la correttezza dei valori di Φ_{max} che avevamo ottenuto attraverso il flusso concatenato.

Il primo, infatti, è un metodo approssimato che ci permette di arrivare al valore del flusso massimo senza considerare l'induzione massima B_{max} .

In questa fase successiva invece, ci siamo proposti di ricavare il valore del flusso massimo attraverso l'induzione massima, grazie alla seguente relazione:

$$\Phi_{max} = \frac{2}{\pi} * B_{max} * L * \tau$$

Per risalire al valore di B_{max} ci siamo riferiti alla forma d'onda dell'induzione normale al traferro ottenuta attraverso FEMM, che presenta una caratteristica di questo tipo:

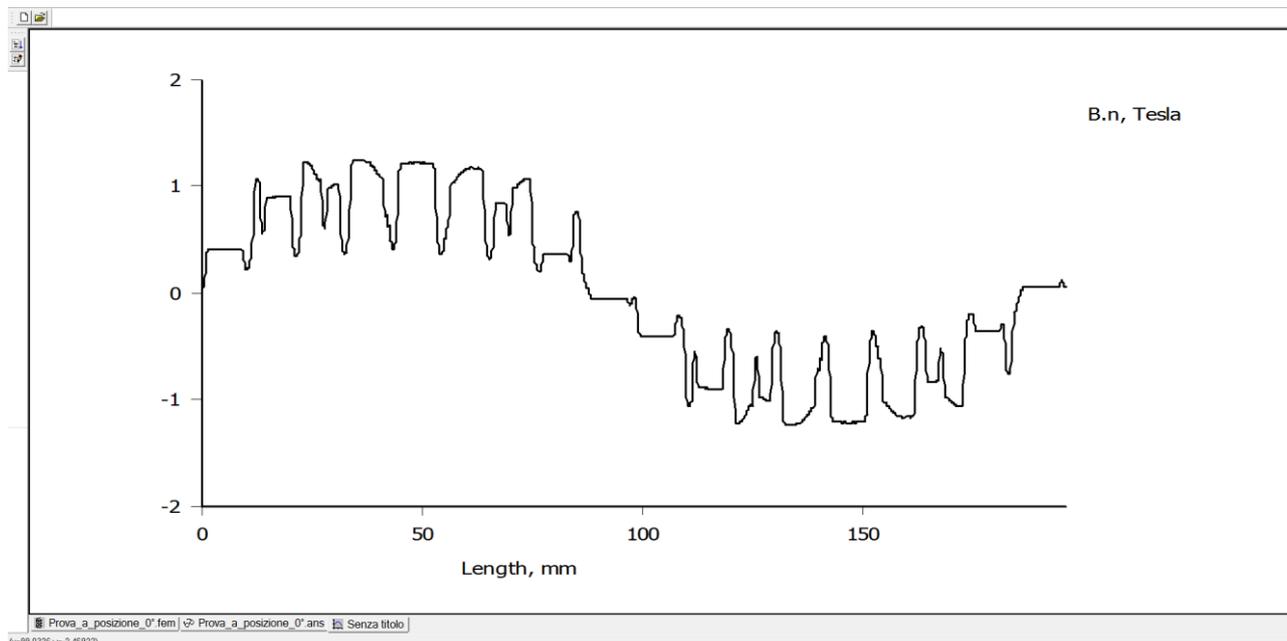


Figura 17: Esempio di induzione normale al traferro ottenuta con FEMM, relativa al motore con spessore 20 mm di corona statorica con corrente di 12A.

I valori discreti della funzione nella figura precedente sono stati esportati su un file di testo, in modo tale da poterli caricare sull'applicazione Hyper Specrumalyzer, che implementa la forma d'onda dell'induzione e permette di scomporla nelle sue armoniche.

N. (v)	Magnitude	Phase	Real	Imag
0	6,6457668504975E-05	3,1415926535...	-6,645766...	0
1	1,0775644657375	-1,3957676441...	0,1876431...	-1,061100...
2	0,000591502954478378	2,2850501263...	-0,000387...	0,000446...
3	0,0583706544043573	-0,8974657235...	0,0363995...	-0,045631...
4	0,000324552996829168	2,7077342697...	-0,000294...	0,000136...
5	0,0227570596074869	2,4199102023...	-0,017083...	0,015034...
6	0,000125497988609211	2,3964120746...	-9,223668...	8,510075...
7	0,0312198393870335	2,4503611036...	-0,024053...	0,019902...
8	0,000248879862640616	1,6781900137...	-2,667677...	0,000247...
9	0,0155069862751052	0,7184971637...	0,0116735...	0,010207...
10	0,000156311491005651	-2,4846262543...	-0,000123...	-9,546216...
11	0,0289175067238533	0,4597134051...	0,0259152...	0,012830...
12	0,000457050616081538	-2,7665475602...	-0,000425...	-0,000167...
13	0,00449611518577065	0,2827245942...	0,0043176...	0,001254...
14	0,00057614032010614	3,0577104808...	-0,000574...	4,827124...
15	0,0770804188400189	2,0439789446...	-0,035127...	0,068611...
16	0,00233141816135776	-1,6913803712...	-0,000280...	-0,002314...
17	0,24196866907586	-1,7307300671...	-0,038534...	-0,238880...
18	0,0024177826279349	1,4929711605...	0,0001879...	0,002410...
19	0,0516957280839182	1,7930815449...	-0,011396...	0,050423...
20	0,000277841980198718	0,6501009153...	0,0002211...	0,000168...

Figura 18: Scomposizione in armoniche dell'induzione magnetica normale al traferro mediante l'applicazione Hyper Specrumalyzer.

Come valore d'induzione massima B_{max} abbiamo considerato quello di prima armonica, nonché la componente con ampiezza maggiore.

Sostituendo questi valori d'induzione nella relazione citata in precedenza, ci siamo trovati i corrispondenti valori di flusso massimo e siamo andati a confrontarli con i risultati ottenuti attraverso il primo metodo.

3.4 Verifica della caduta di f.m.m. nella corona statorica

Tradizionalmente, troviamo scritto che sia possibile trovare il valore di caduta di f.m.m. nella corona statorica A_s , conoscendo sia il valore d'induzione massimo $B_{c,max}$ in corona sia la curva di prima magnetizzazione del materiale ferromagnetico costituente la corona.

Ciò è possibile attraverso il seguente procedimento:

- 1) definisco B_c come:

$$B_c = B_{c,max} * 0,85$$

- 2) sulla curva mi trovo il valore di H_c corrispondente a B_c .

- 3) Infine, mi ricavo la caduta di forza magnetomotrice nella corona statorica A_s , come:

$$A_s = H_c * \frac{\tau_s}{2}$$

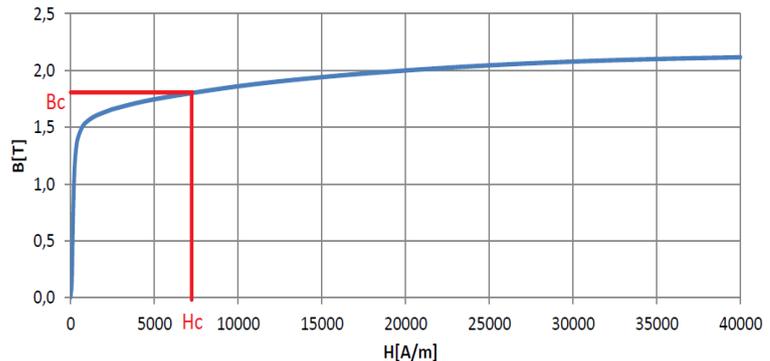


Figura 19: Illustrazione del procedimento per ricavare H_c , noto B_c .

in cui τ_s è il passo polare relativo alla corona statorica.

In questa fase, abbiamo voluto verificare la validità di questo metodo usando due procedimenti diversi:

- Metodo diretto: procedendo come indicato in precedenza, abbiamo preso come $B_{c,max}$ il valore medio dell'induzione nello spessore della corona statorica nel punto in cui essa è massima. Questo valore è stato ottenuto integrando con FEMM sulla linea rossa come nella figura sottostante:

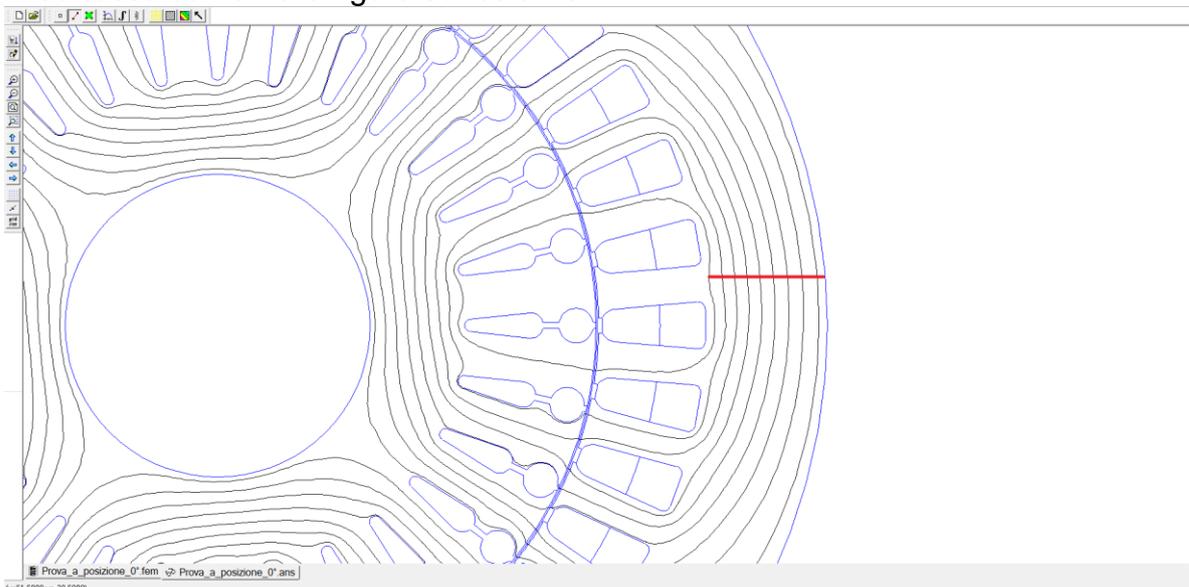


Figura 20: Linea di integrazione per **ottenere il valore medio dell'induzione massima nella corona statorica.**

Il valore di A_s , relativo all' H_c che abbiamo ottenuto mediante la curva di prima magnetizzazione del materiale, lo siamo andati poi a confrontare con la caduta di forza magnetomotrice ottenuta con FEMM, che chiamiamo A_{femm} .
 A_{femm} è stato ricavato integrando sulla linea rossa in figura:



Figura 21: Linea di integrazione per ottenere la caduta di f.m.m. nella corona statorica.

- **Metodo inverso:** partendo dalla caduta di f.m.m. nella corona statorica A_{femm} , ottenuta integrando con FEMM (come in figura 21), ci siamo trovati il corrispondente valore di H_c con la relazione: $H_c = A_{femm} * \frac{2}{\tau_s}$.

Poi, sulla curva di prima magnetizzazione siamo andati a leggere il corrispondente valore di B_c .

$B_{c,max}$ l'abbiamo trovato nello stesso modo descritto per la "strada diretta" e siamo andati a calcolare il valore $a = \frac{B_c}{B_{c,max}}$ per verificare se il suo valore fosse pari a 0,85 come nel modello teorico oppure per quantificare quanto questi due numeri differiscano tra loro.

Capitolo 4

Applicazione del Metodo di Analisi

Nella fase iniziale abbiamo analizzato diversi tipi di motori, variando considerevolmente lo spessore della corona statorica rispetto al valore assunto dalla macchina originaria: ci siamo addirittura spinti a considerare una configurazione con la metà e un'altra con perfino più del doppio del valore originale dello spessore della corona statorica.

In questo modo, siamo riusciti ad avere una visione generale sia dell'andamento delle curve Alfa-Ks, sia della distribuzione della caduta di forza magnetomotrice al variare dello spessore delle corone.

Dopo aver preso atto di queste considerazioni, ci siamo soffermati maggiormente sulle configurazioni più rilevanti per la nostra analisi, ossia abbiamo posto maggior attenzione su quelle più simili al motore reale.

Nei grafici concernenti la seconda fase del metodo di analisi (descritta nel paragrafo 2 del capitolo 3) è stato riportato l'andamento Alfa-Ks di due curve ottenute stimando:

1. Alfa e Ks in modo sperimentale come spiegato nel capitolo precedente. Abbiamo indicato questa curva empirica ottenuta con Alfa2.
2. il parametro Ks allo stesso modo, però abbiamo valutato Alfa con l'equazione della curva teorica. Abbiamo indicato la curva teorica con Alfa(Ks).

Di seguito riportiamo i risultati ottenuti applicando ai nove motori il Metodo di Analisi descritto al capitolo precedente.

IEC 132-4.125 con spessore corona statorica di 10 mm e spessore corona rotorica di 10,53 mm

In figura è riportata la geometria e le linee di campo del motore:

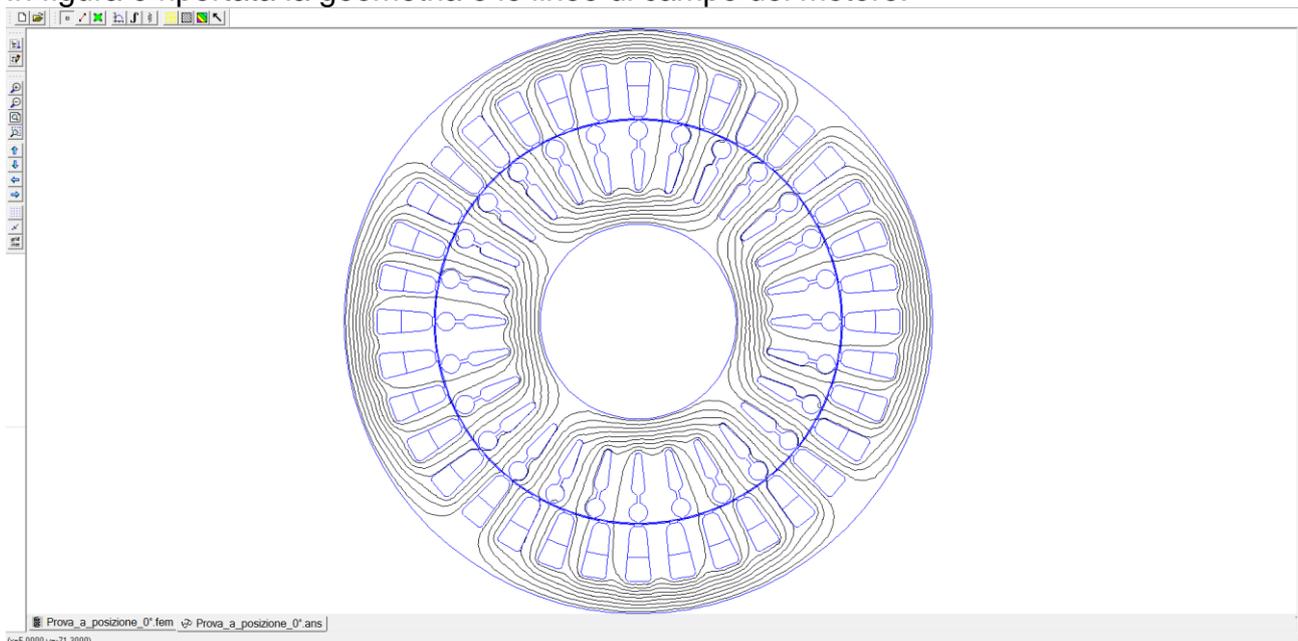


Figura 22: Geometria e linee di campo di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 10 mm, con corrente di 2A.

Questo motore ha lo spessore della corona statorica pari alla metà di quello originale. Questa condizione costruttiva è molto estrema e poco realistica, infatti ci siamo aspettati un comportamento peculiare e molto accentuato in condizione di funzionamento in saturazione.

Di seguito è riportato l'andamento della curva Alfa-Ks teorica e di quella empirica:

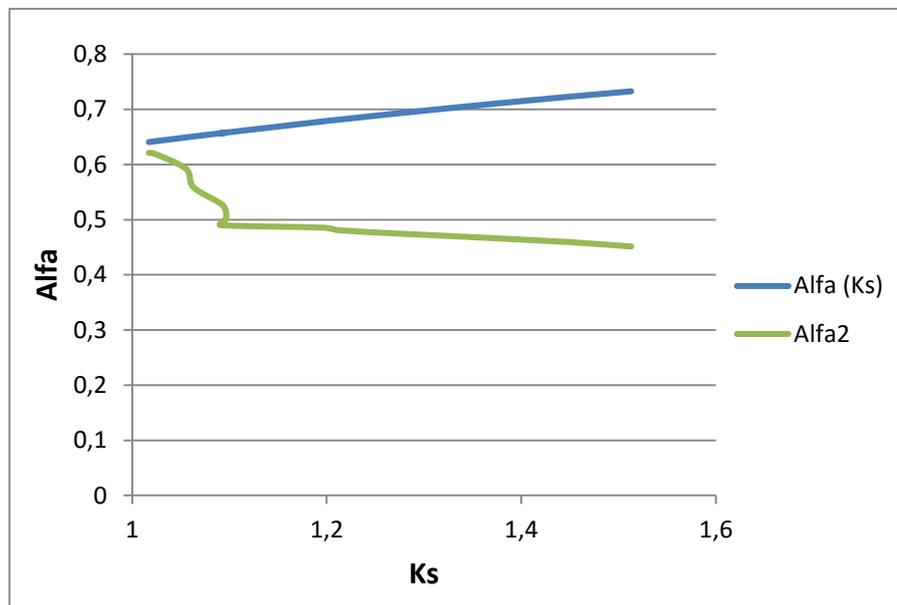


Figura 23: Andamento della curva Alfa-Ks teorica ed empirica, di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 10 mm.

IEC 132-4.125 con spessore corona statorica di 15 mm e spessore corona rotorica di 13,03 mm

In figura è riportata la geometria e le linee di campo del motore:

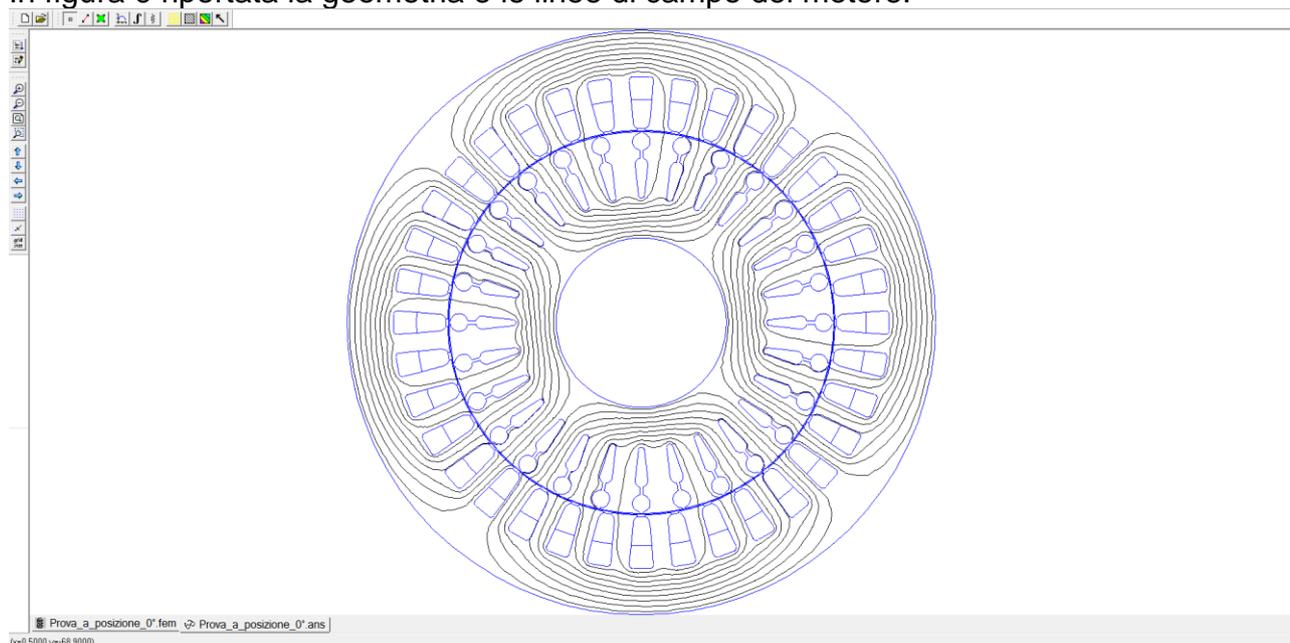


Figura 24: Geometria e linee di campo di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 15 mm, con corrente di 2A.

Di seguito è riportato l'andamento della curva Alfa-Ks teorica e di quella empirica:

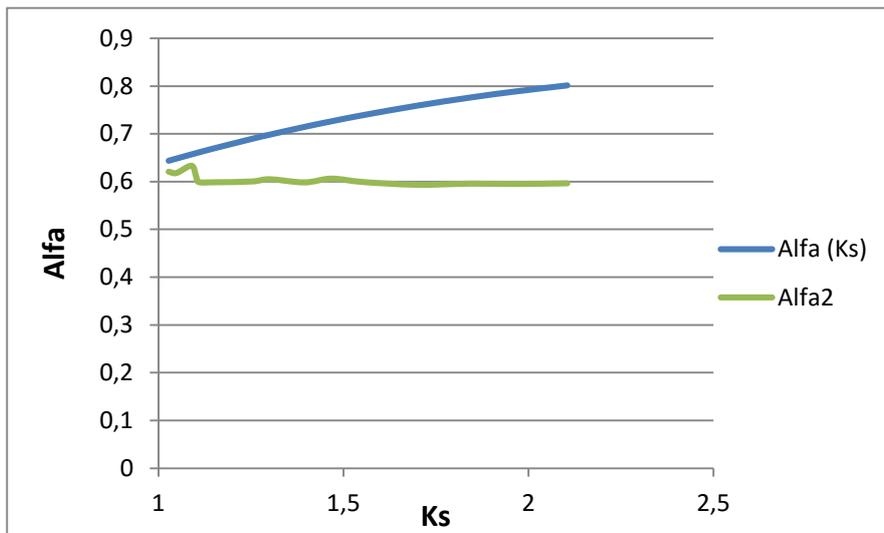


Figura 25: Andamento della curva Alfa-Ks teorica ed empirica, di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 15 mm.

Nei due motori precedenti notiamo un estremo schiacciamento dell'andamento della curva empirica, che si discosta completamente da quella teorica. Questi risultati sono stati discussi più nel dettaglio nel capitolo successivo.

Non sono stati eseguiti su queste due configurazioni gli altri due passaggi del metodo di analisi, poiché queste si discostano molto dal modello del motore reale.

IEC 132-4.125 con spessore corona statorica di 18 mm e spessore corona rotorica di 15,53 mm

In figura è riportata la geometria e le linee di campo del motore:

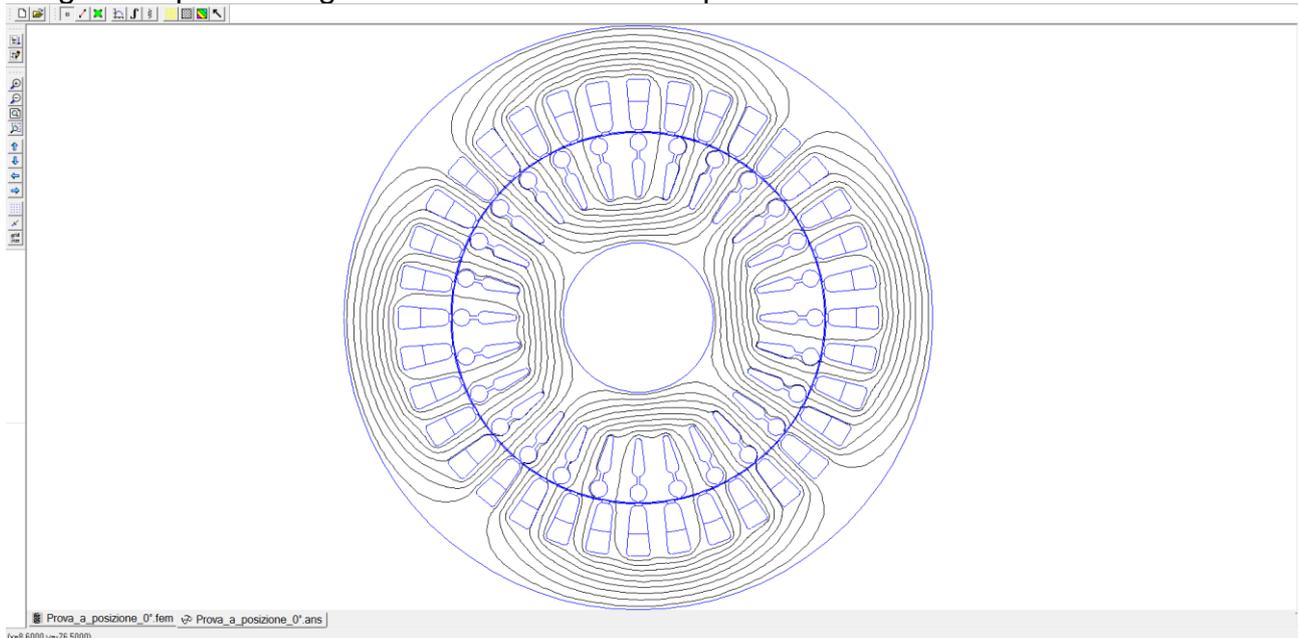


Figura 26: Geometria e linee di campo di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 18 mm, con corrente di 2A.

Questa configurazione è stata presa in considerazione poiché molto simile a quella del motore originale: lo spessore della corona statorica è stato diminuito di soli 2 mm.

Di seguito è riportato l'andamento della curva Alfa-Ks teorica e di quella empirica:

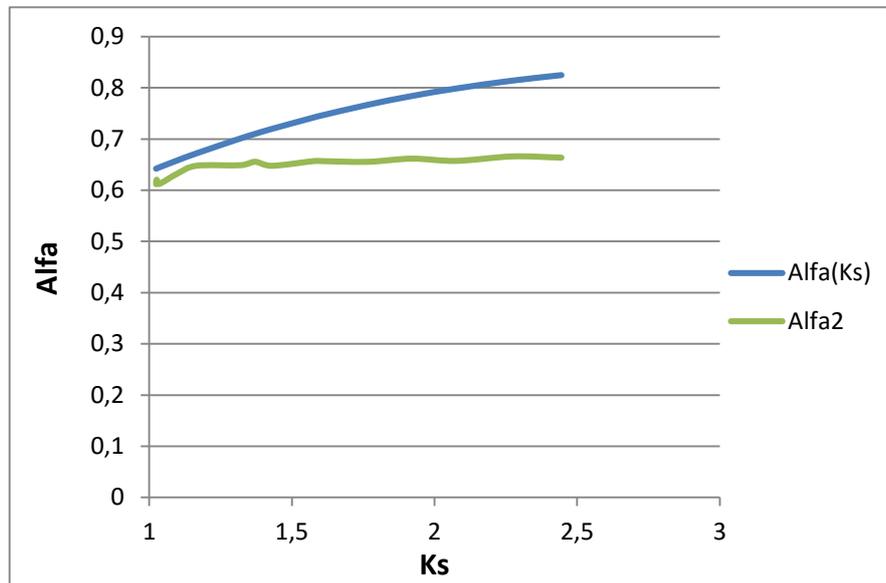


Figura 27: Andamento della curva Alfa-Ks teorica ed empirica, di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 18 mm.

Dalla figura 27, la curva sperimentale risulta molto schiacciata rispetto a quella teorica.

Come descritto nella terza fase del Metodo di Analisi (descritta nel paragrafo 3 del capitolo 3), abbiamo calcolato Φ_{max} attraverso B_{max} , ottenuta dalla prima armonica dell'induzione magnetica normale al traferro. Abbiamo poi creato una nuova curva Alfa2(Φ_c), che nel grafico sottostante, abbiamo messo a confronto con quella che ci siamo trovati in precedenza, calcolando Φ_{max} attraverso il flusso concatenato Φ_c .

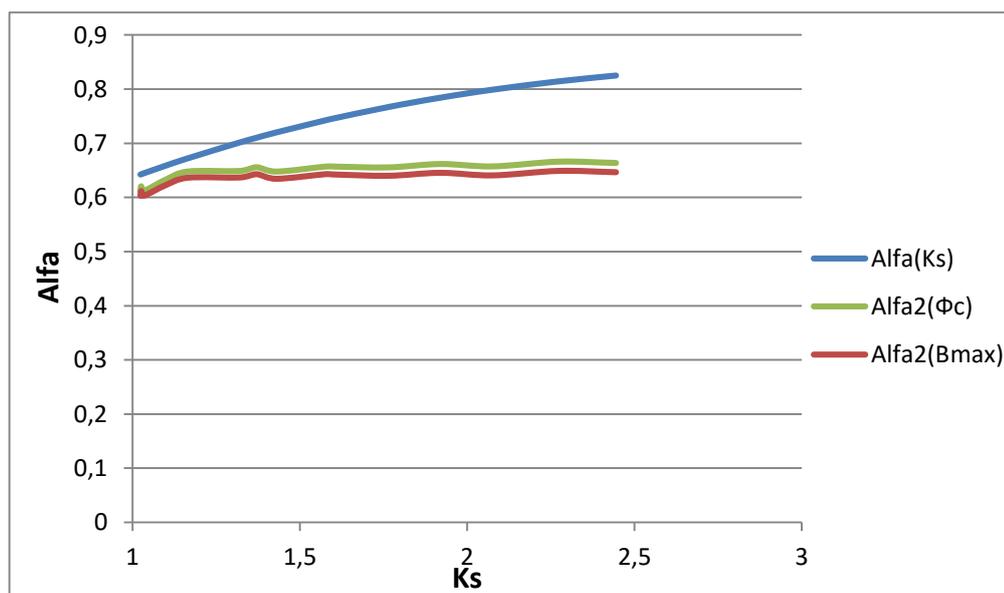


Figura 28: Andamento della curva Alfa-Ks teorica ed empirica di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 18 mm, mettendo a confronto i due metodi per calcolare Φ_{max} .

Per quanto riguarda invece la verifica della caduta di f.m.m. nella corona statorica, (descritta nel paragrafo 4 del capitolo 3), abbiamo ottenuto:

Metodo diretto:

Corrente (A)	Afemm	As
1	2.20894	2.586316152
2	3.09756	3.774623573
3	4.96036	5.592034923
4	9.84548	8.388052385
5	23.98380	10.83456766
6	46.81410	12.51217814
7	72.60740	14.67909167
8	101.83000	18.52361568
9	129.33800	20.62062878
10	162.32300	23.76614842
12	227.58200	34.95021827
14	296.81000	50.32831431
16	359.09200	68.50242781
18	430.86700	90.87056751
20	495.18200	100.3071264

Metodo inverso:

Corrente (A)	a
1	0.554451
2	0.624268
3	0.776282
4	0.898323
5	0.983861
6	0.989238
7	0.987016
8	0.988087
9	0.985525
10	0.978567
12	0.977616
14	0.974142
16	0.972555
18	0.972419
20	0.976505

IEC 132-4.125 con spessore corona statorica di 20 mm e spessore corona rotorica di 15,53 mm

In figura è riportata la geometria e le linee di campo del motore:

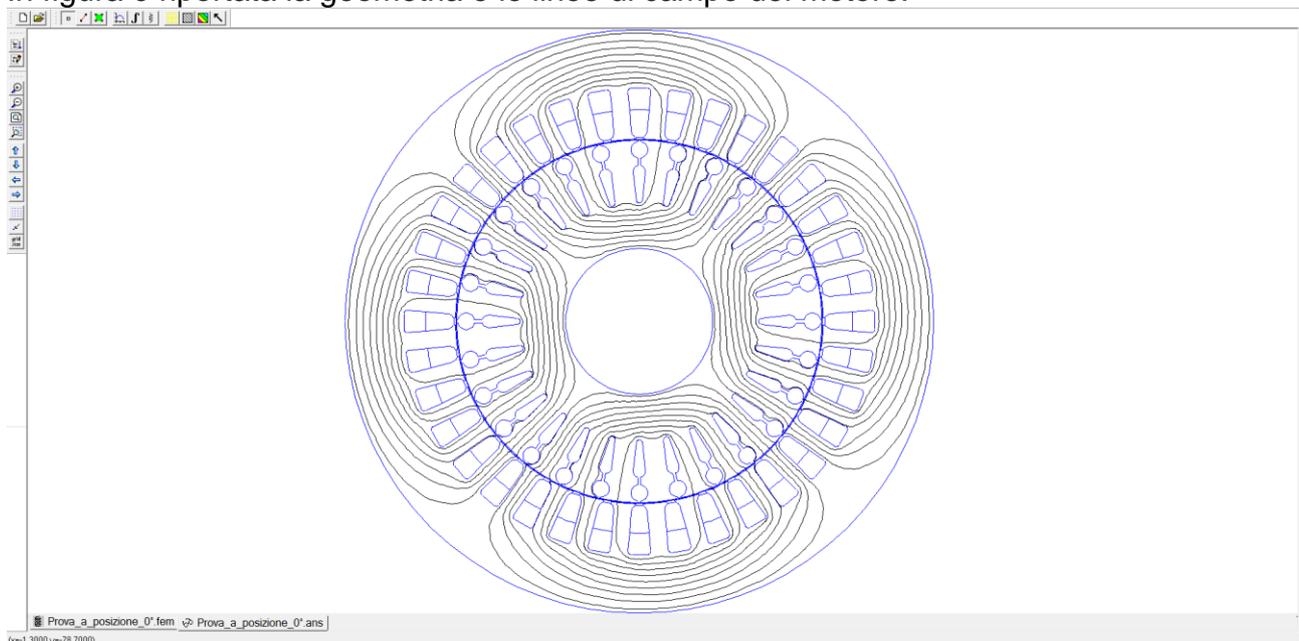


Figura 29: Geometria e linee di campo di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 20 mm, con corrente di 2A.

Questa è la configurazione del motore originale, che ha spessore della corona statorica di 20 mm e diametro dell'albero di 50 mm.

Di seguito è riportato l'andamento della curva Alfa-Ks teorica e di quella empirica:

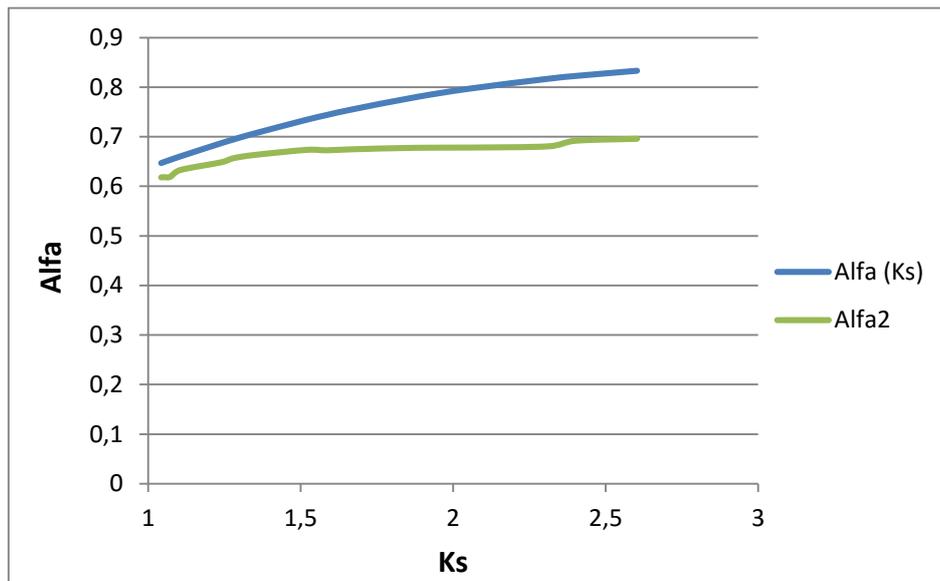


Figura 30: Andamento della curva Alfa-Ks teorica ed empirica, di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 20 mm.

Dal grafico precedente, la curva sperimentale risulta ancora molto schiacciata rispetto a quella teorica.

Come descritto nella terza fase del Metodo di Analisi (descritta nel paragrafo 3 del capitolo 3), abbiamo calcolato Φ_{max} attraverso B_{max} , ottenuta dalla prima armonica dell'induzione magnetica normale al traferro. Abbiamo poi creato una nuova curva Alfa2(Φ_c), che nel grafico sottostante, abbiamo messo a confronto con quella che ci siamo trovati in precedenza, calcolando Φ_{max} attraverso il flusso concatenato Φ_c .

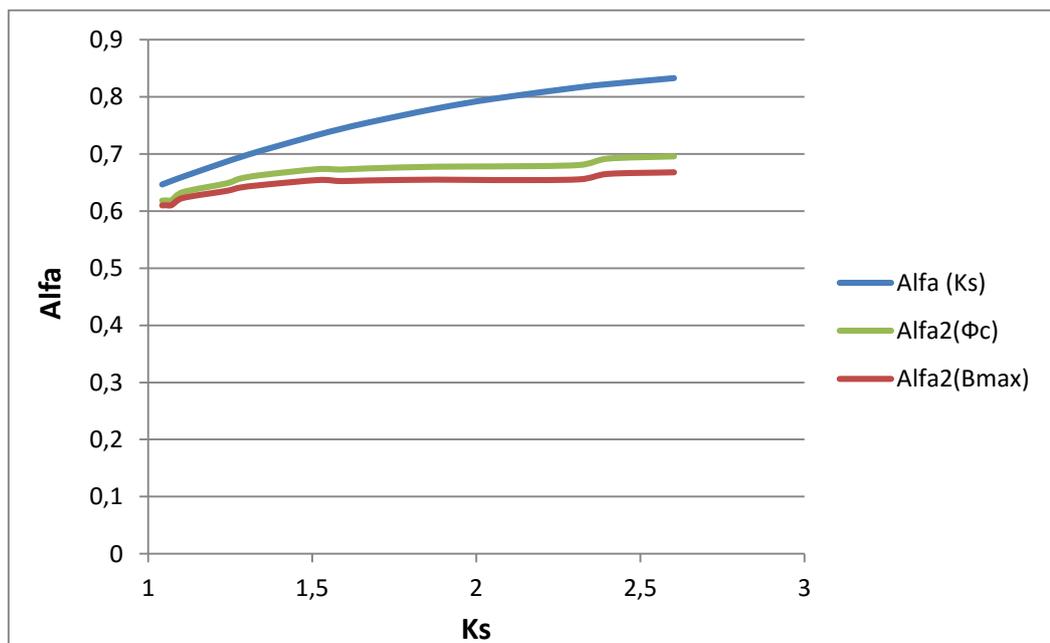


Figura 31: Andamento della curva Alfa-Ks teorica ed empirica di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 20 mm, mettendo a confronto i due metodi per calcolare Φ_{max} .

Per quanto riguarda invece la verifica della caduta di f.m.m. nella corona statorica, (descritta nel paragrafo 4 del capitolo 3), abbiamo ottenuto:

Metodo diretto:

Corrente (A)	Afemm	As
1	2.10316	2.615375884
2	3.1588	3.534291735
3	4.36010	4.948008429
4	6.99233	6.927211801
5	11.36810	8.835729338
6	21.32780	10.60287521
7	35.02990	12.37002107
8	53.21450	13.43030859
9	75.18560	16.96460033
10	97.77970	18.37831702
12	144.55500	24.38661297
14	190.79000	35.34291735
16	230.70400	39.58406744
18	276.87600	65.03096793
20	345.00300	81.99556826

Metodo inverso:

Corrente (A)	a
1	0.500503322
2	0.722786851
3	0.739142087
4	0.848847537
5	0.919754231
6	0.973696691
7	0.98168164
8	0.979584051
9	0.970565938
10	0.981392675
12	0.97415707
14	0.957812244
16	0.964119107
18	0.949738629
20	0.9602258

IEC 132-4.125 con spessore corona statorica di 22 mm e spessore corona rotorica di 15,53 mm

In figura è riportata la geometria e le linee di campo del motore:

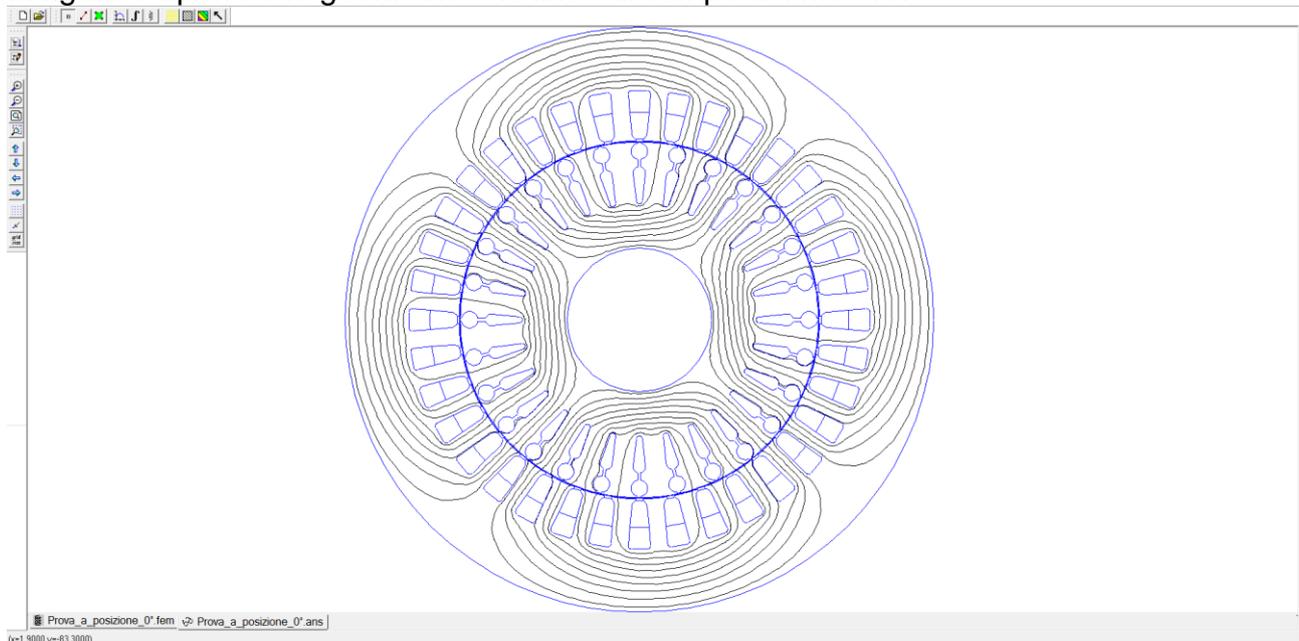


Figura 32: Geometria e linee di campo di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 22 mm, con corrente di 2A.

Questa configurazione è stata presa in considerazione poiché molto simile a quella del motore originale, infatti lo spessore della corona statorica di quest'ultimo è stato incrementato di soli 2 mm.

Di seguito è riportato l'andamento della curva Alfa-Ks teorica e di quella empirica:

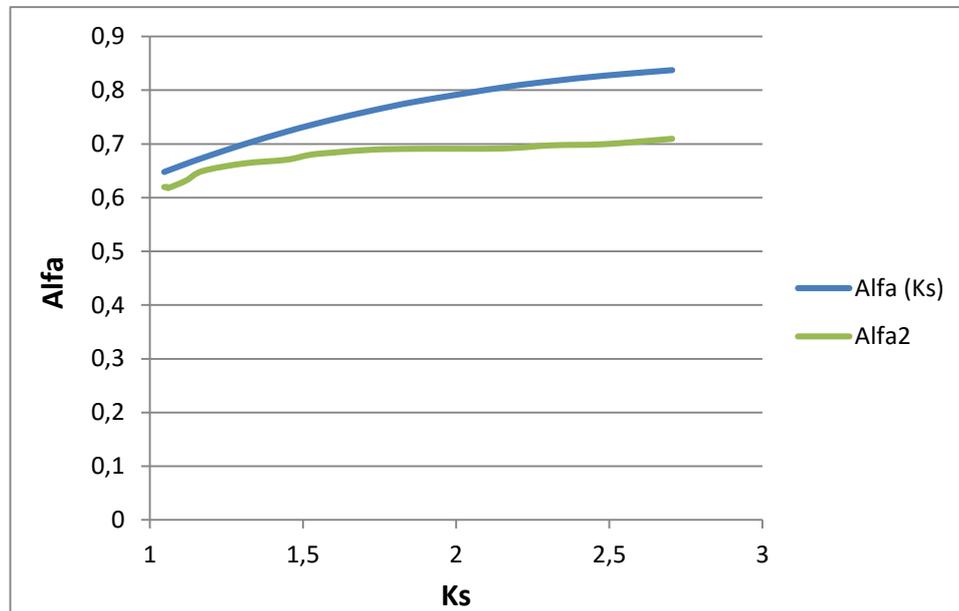


Figura 33: Andamento della curva Alfa-Ks teorica ed empirica, di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 22 mm.

Dal grafico precedente, la curva sperimentale risulta ancora molto schiacciata rispetto a quella teorica.

Come descritto nella terza fase del Metodo di Analisi (descritta nel paragrafo 3 del capitolo 3), abbiamo calcolato Φ_{max} attraverso B_{max} , ottenuta dalla prima armonica dell'induzione magnetica normale al traferro. Abbiamo poi creato una nuova curva Alfa2(Φ_c), che nel grafico sottostante, abbiamo messo a confronto con quella che ci siamo trovati in precedenza, calcolando Φ_{max} attraverso il flusso concatenato Φ_c .

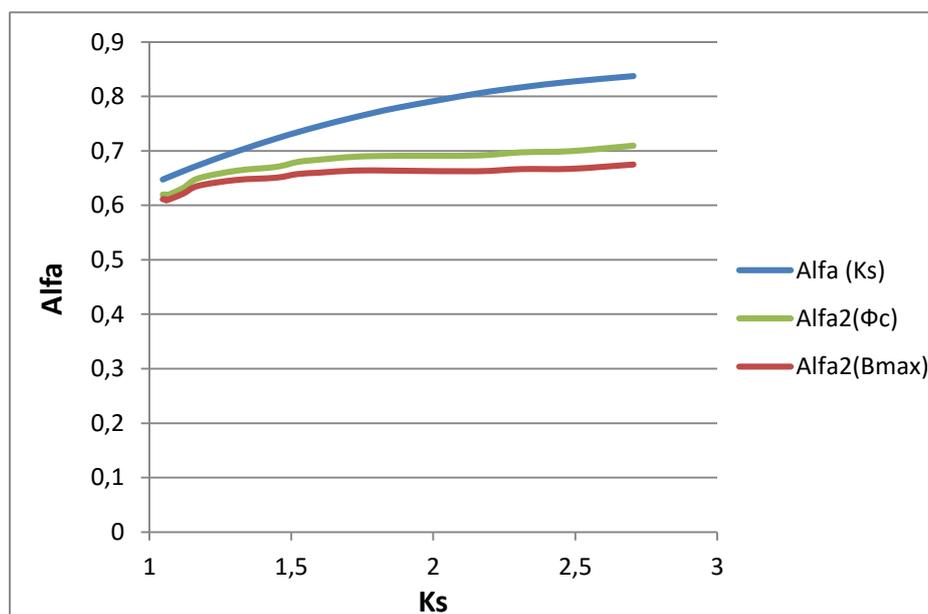


Figura 34: Andamento della curva Alfa-Ks teorica ed empirica di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 22 mm, mettendo a confronto i due metodi per calcolare Φ_{max} .

Per quanto riguarda invece la verifica della caduta di f.m.m. nella corona statorica, (descritta nel paragrafo 4 del capitolo 3), abbiamo ottenuto:

Metodo diretto:

Corrente (A)	Afemm	As
1	2.08145	2.430021918
2	2.8388	3.430619178
3	4.12763	4.645630136
4	5.81138	6.075054794
5	7.35649	7.504479451
6	10.01220	8.790961643
7	15.19020	10.0059726
8	22.83370	11.22098356
9	32.27450	12.15010959
10	43.34980	13.22217808
12	75.38250	17.15309589
14	100.36500	21.44136986
16	130.09500	27.15906849
18	163.42500	32.16205479
20	196.56300	40.02389041

Metodo inverso:

Corrente (A)	a
1	0.54313606
2	0.60843226
3	0.75867961
4	0.81953717
5	0.82755506
6	0.9021294
7	0.948299
8	0.97069194
9	0.97632471
10	0.97470631
12	0.97269117
14	0.96012305
16	0.96002325
18	0.95301832
20	0.95113303

IEC 132-4.125 con spessore corona statorica di 30 mm e spessore corona rotorica di 20,53 mm

In figura è riportata la geometria e le linee di campo del motore:

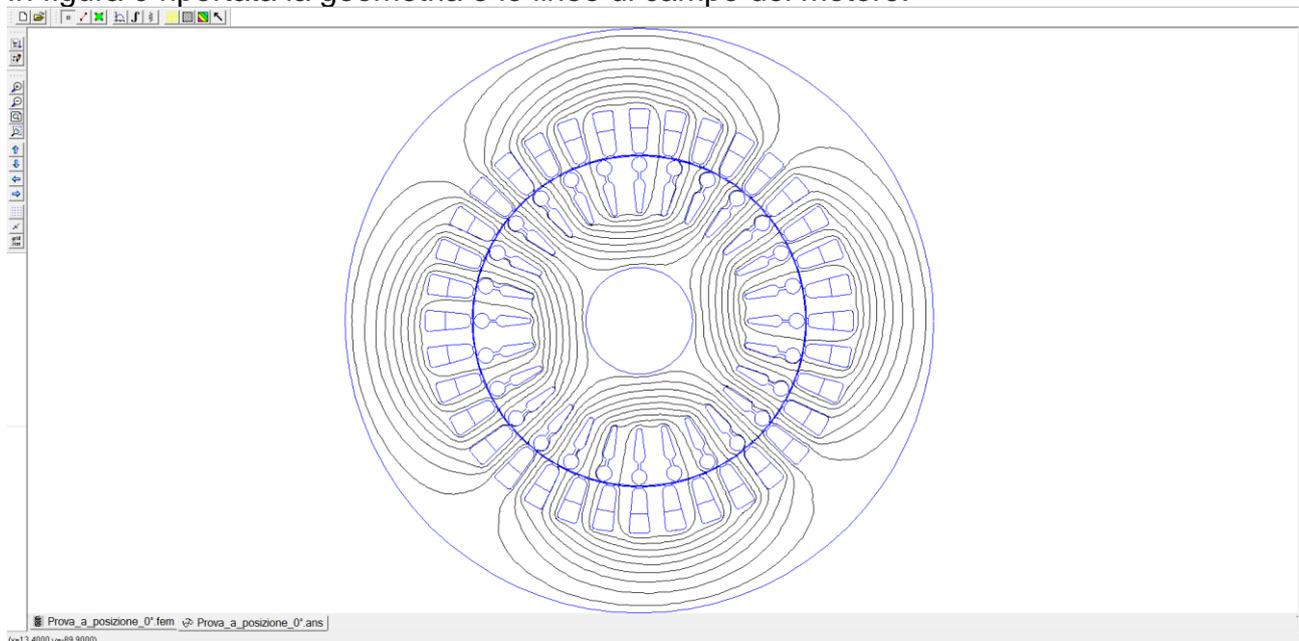


Figura 35: Geometria e linee di campo di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 30 mm, con corrente di 2A.

Di seguito è riportato l'andamento della curva Alfa-Ks teorica e di quella empirica:

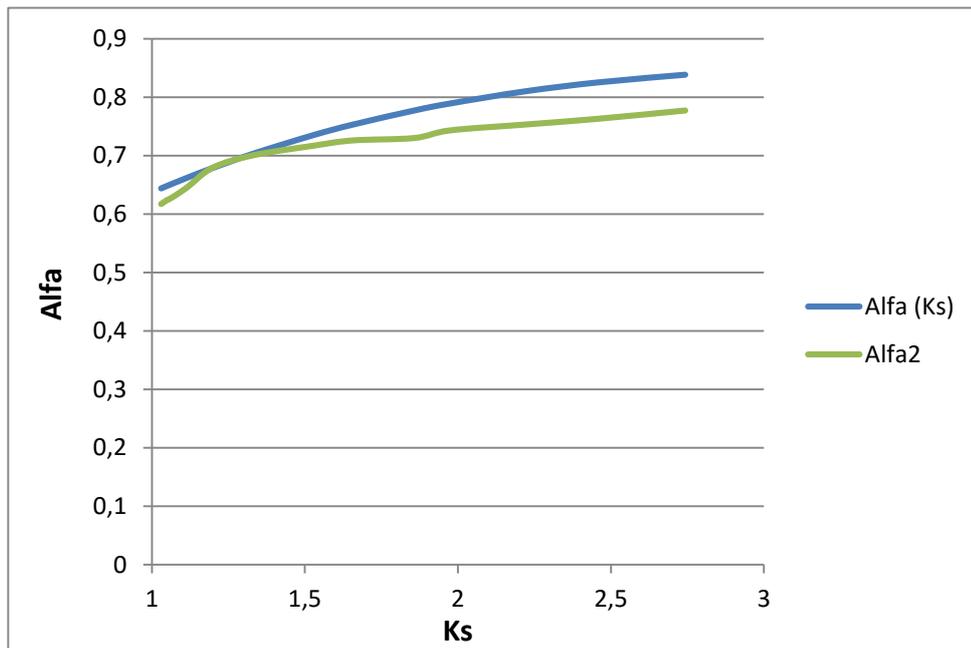


Figura 36: Andamento della curva Alfa-Ks teorica ed empirica, di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 30 mm.

È evidente che in questa configurazione del motore ci sia un maggiore avvicinamento della curva empirica a quella teorica, rispetto a quelle analizzate in precedenza.

Come descritto nella terza fase del Metodo di Analisi (descritta nel paragrafo 3 del capitolo 3), abbiamo calcolato Φ_{max} attraverso B_{max} , ottenuta dalla prima armonica dell'induzione magnetica normale al traferro. Abbiamo poi creato una nuova curva Alfa2(B_{max}), che nel grafico sottostante, abbiamo messo a confronto con quella che ci siamo trovati in precedenza, calcolando Φ_{max} attraverso il flusso concatenato Φ_c .

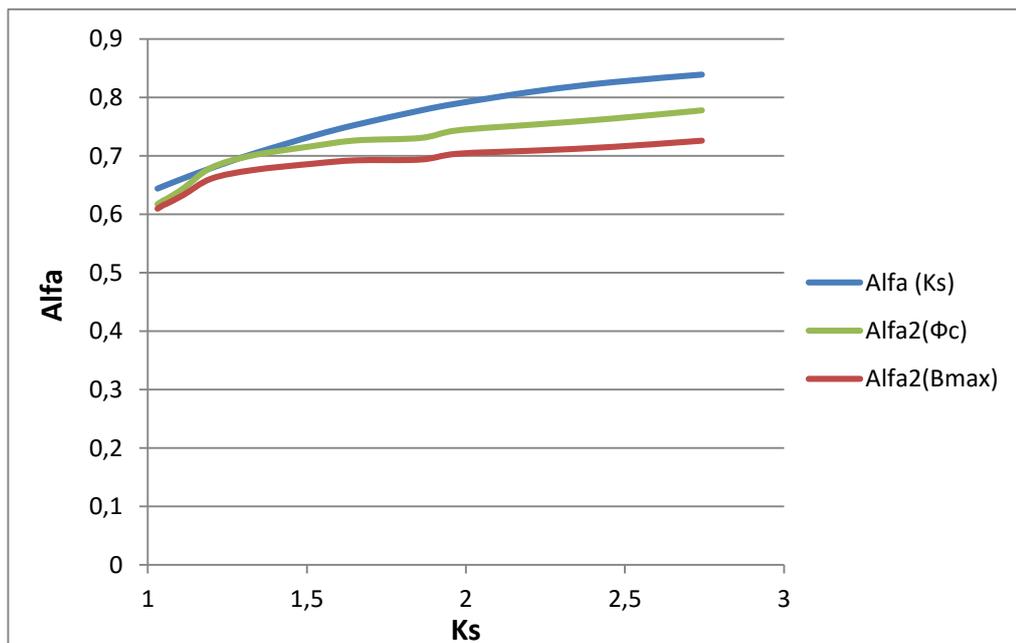


Figura 37: Andamento della curva Alfa-Ks teorica ed empirica di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 30 mm, mettendo a confronto i due metodi per calcolare Φ_{max} .

È evidente che gradualmente le due curve empiriche si stiano distaccando, all'aumentare dello spessore della corona.

Per quanto riguarda invece la verifica della caduta di f.m.m. nella corona statorica, (descritta nel paragrafo 4 del capitolo 3), abbiamo ottenuto:

Metodo diretto:

Corrente (A)	Afemm	As
1	2.05624	2.462223
2	2.62689	2.9099
3	3.53139	3.730641
4	4.21062	4.551382
5	5.11431	5.521349
6	5.74788	6.043639
7	6.41290	6.86438
8	6.76807	7.38667
9	7.74343	7.834347
10	9.11981	8.580475
12	11.84890	10.07273
14	17.28030	10.81886
16	23.16210	12.38573

Metodo inverso:

Corrente (A)	a
1	0.72585675
2	0.60119408
3	0.77483034
4	0.77556345
5	0.78712988
6	0.80637316
7	0.81764467
8	0.81295366
9	0.82710512
10	0.87020882
12	0.88704121
14	0.93840675
16	0.95016562

IEC 132-4.125 con spessore corona statorica di 35 mm e spessore corona rotorica di 25,53 mm

In figura è riportata la geometria e le linee di campo del motore:

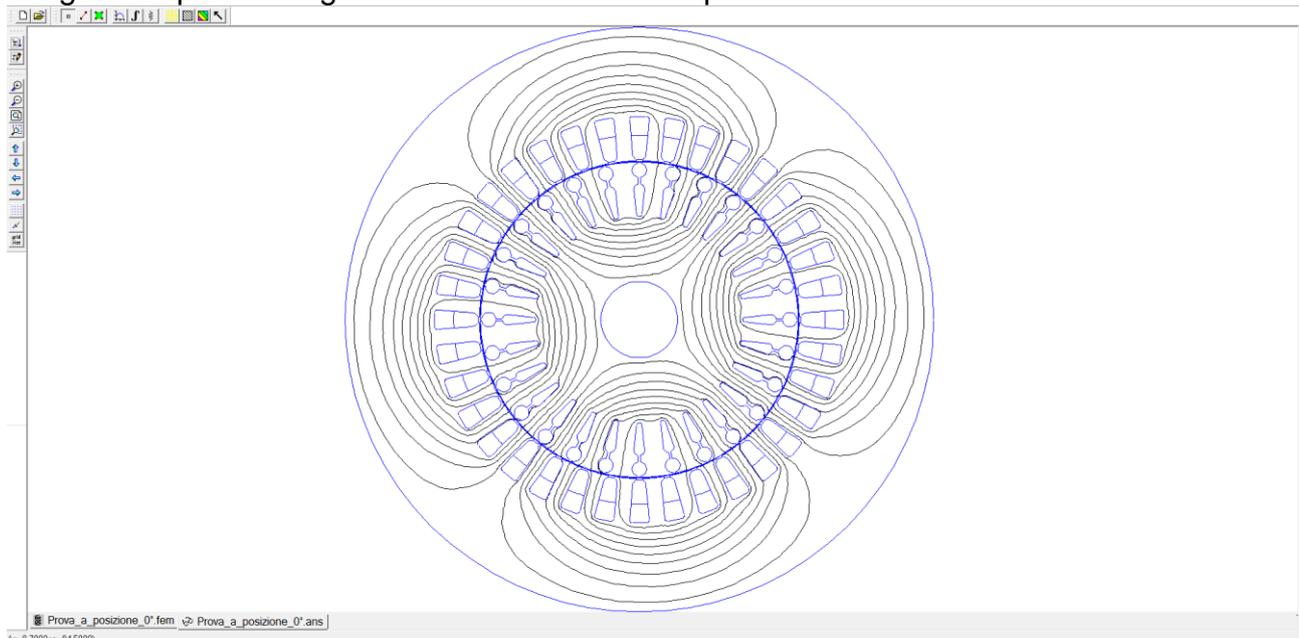


Figura 38: Geometria e linee di campo di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 35 mm, con corrente di 2A.

Di seguito è riportato l'andamento della curva Alfa-Ks teorica e di quella empirica:

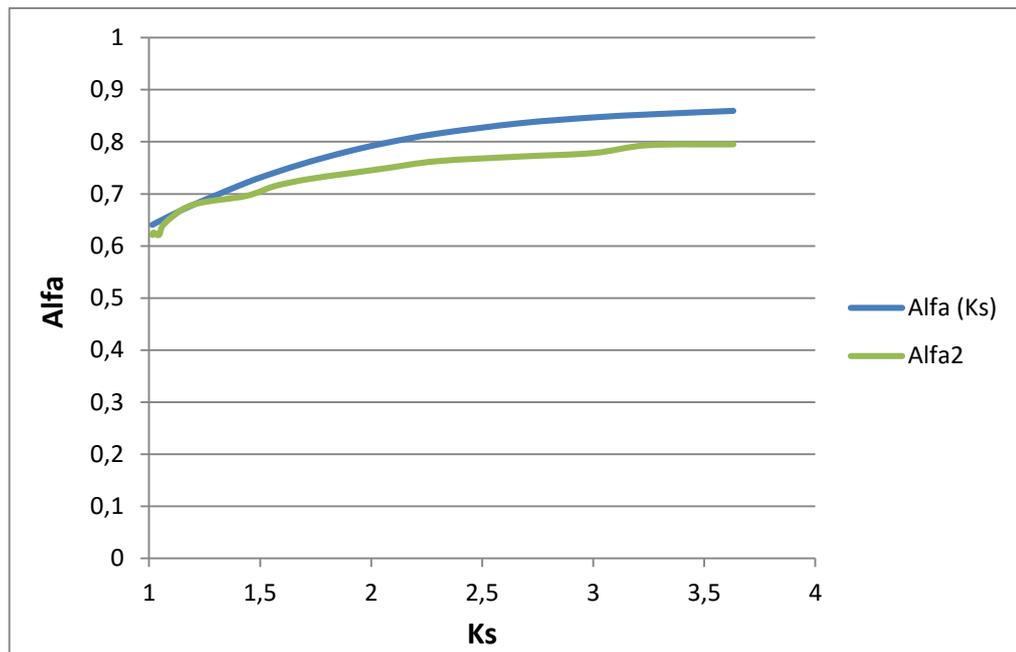


Figura 39: Andamento della curva Alfa-Ks teorica ed empirica, di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 35 mm.

È evidente che in questa configurazione del motore ci sia un maggiore avvicinamento della curva empirica a quella teorica, rispetto a quelle analizzate in precedenza.

Come descritto nella terza fase del Metodo di Analisi (descritta nel paragrafo 3 del capitolo 3), abbiamo calcolato Φ_{max} attraverso B_{max} , ottenuta dalla prima armonica dell'induzione magnetica normale al traferro. Abbiamo poi creato una nuova curva Alfa2(Φ_c), che nel grafico sottostante, abbiamo messo a confronto con quella che ci siamo trovati in precedenza, calcolando Φ_{max} attraverso il flusso concatenato Φ_c .

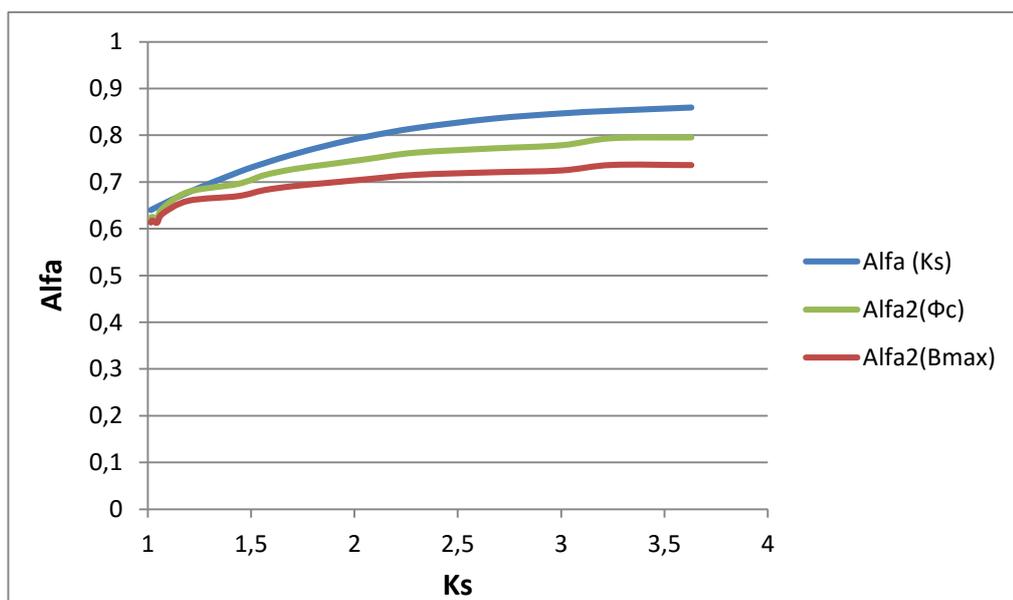


Figura 40: Andamento della curva Alfa-Ks teorica ed empirica di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 35 mm, mettendo a confronto i due metodi per calcolare Φ_{max} .

È evidente che gradualmente le due curve empiriche si stiano distaccando, all'aumentare dello spessore della corona.

Per quanto riguarda invece la verifica della caduta di f.m.m. nella corona statorica, (descritta nel paragrafo 4 del capitolo 3), abbiamo ottenuto:

Metodo diretto:

Corrente (A)	Afemm	As
1	1.874	2.220713307
2	2.477	2.833323874
3	3.012	3.369358121
4	3.927	4.13512133
5	4.473	4.671155577
6	4.847	5.130613502
7	5.415	5.590071428
8	5.893	6.126105675
9	6.117	6.355834637
10	6.718	6.891868884
12	7.609	7.657632093
14	7.943	8.040513698
16	8.680	8.729700586
18	10.561	9.189158512
20	11.041	9.725192758

Metodo inverso:

Corrente (A)	a
1	0.506965508
2	0.558406304
3	0.640490634
4	0.781817128
5	0.813957657
6	0.797185119
7	0.813048907
8	0.815665899
9	0.813263296
10	0.827093569
12	0.848974679
14	0.82896763
16	0.844588515
18	0.89299449
20	0.885144894

IEC 132-4.125 con spessore corona statorica di 40 mm e spessore corona rotorica di 30,53 mm

In figura è riportata la geometria e le linee di campo del motore:

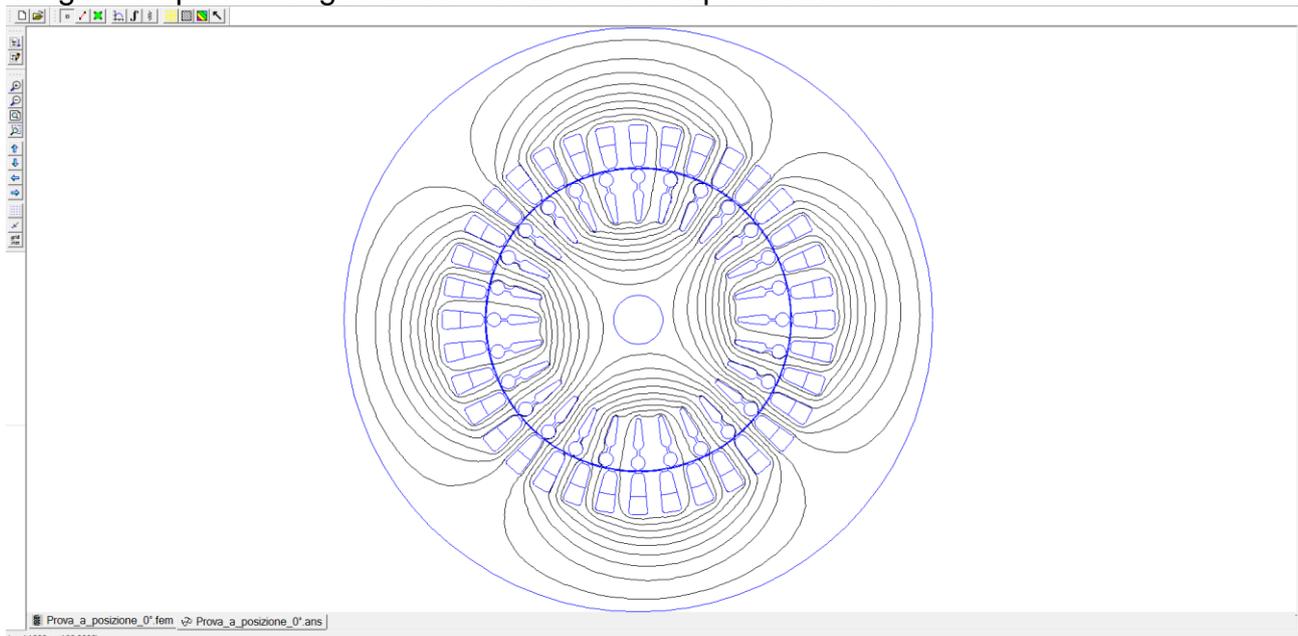


Figura 41: Geometria e linee di campo di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 40 mm, con corrente di 2A.

Di seguito è riportato l'andamento della curva Alfa-Ks teorica e di quella empirica:

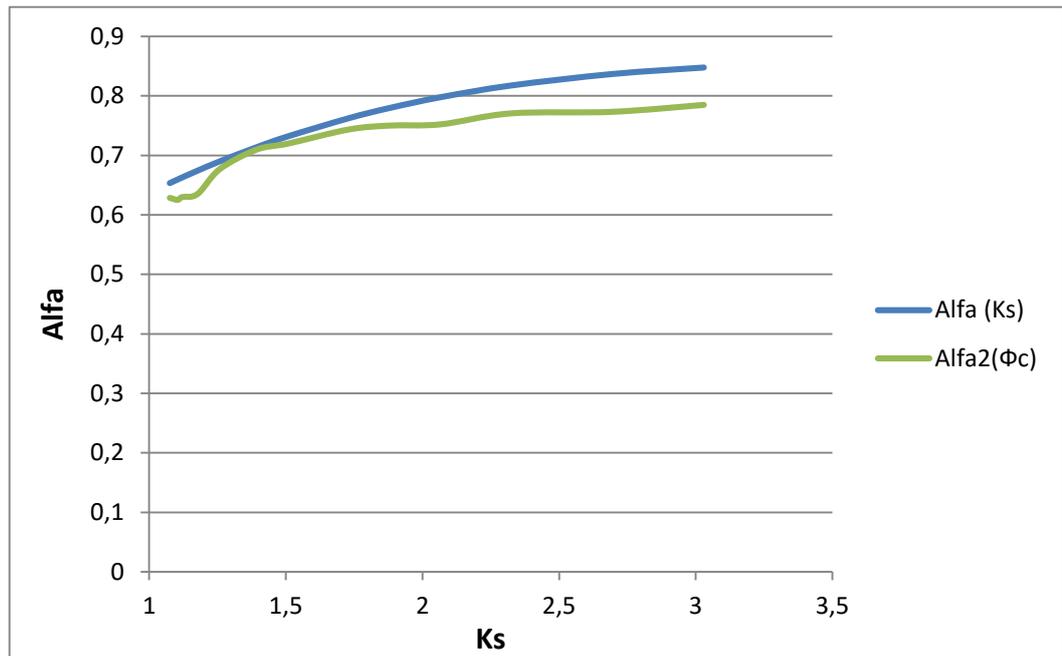


Figura 42: Andamento della curva Alfa-Ks teorica ed empirica, di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 40 mm.

Si nota che ci sia un avvicinamento della curva empirica a quella teorica, che avviene gradualmente, all'aumentare dello spessore della corona statorica.

Come descritto nella terza fase del Metodo di Analisi (descritta nel paragrafo 3 del capitolo 3), abbiamo calcolato Φ_{max} attraverso B_{max} , ottenuta dalla prima armonica dell'induzione magnetica normale al traferro. Abbiamo poi creato una nuova curva Alfa2(B_{max}), che nel grafico sottostante, abbiamo messo a confronto con quella che ci siamo trovati in precedenza, calcolando Φ_{max} attraverso il flusso concatenato Φ_c .

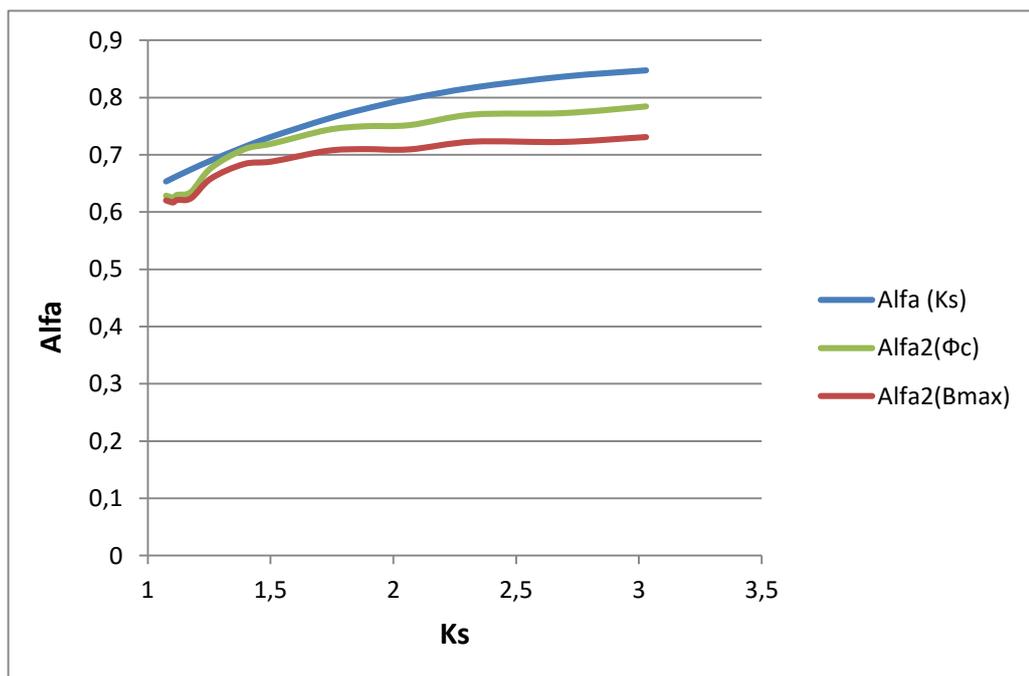


Figura 43: Andamento della curva Alfa-Ks teorica ed empirica di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 40 mm, mettendo a confronto i due metodi per calcolare Φ_{max} .

È evidente che gradualmente le due curve empiriche si stiano distaccando, all'aumentare dello spessore della corona.

Per quanto riguarda invece la verifica della caduta di f.m.m. nella corona statorica, (descritta nel paragrafo 4 del capitolo 3), abbiamo ottenuto:

Metodo diretto:

Corrente (A)	Afemm	As
1	1.970	2.120575
2	2.524	2.905973
3	3.177	3.377212
4	3.359	3.612832
5	4.091	4.31969
6	4.321	4.555309
7	4.663	4.869469
8	4.966	5.105088
9	5.210	5.497787
10	5.525	5.811946
12	5.692	6.047566
14	6.291	6.597345
16	6.824	7.068583

Metodo inverso:

Corrente (A)	a
1	0.70241877
2	0.61519129
3	0.78582597
4	0.68516614
5	0.80433371
6	0.78848746
7	0.81079556
8	0.79759831
9	0.81628458
10	0.81104874
12	0.80086396
14	0.82547947
16	0.83165119

IEC 132-4.125 con spessore corona statorica di 50 mm e spessore corona rotorica di 35,53 mm

In figura è riportata la geometria e le linee di campo del motore:

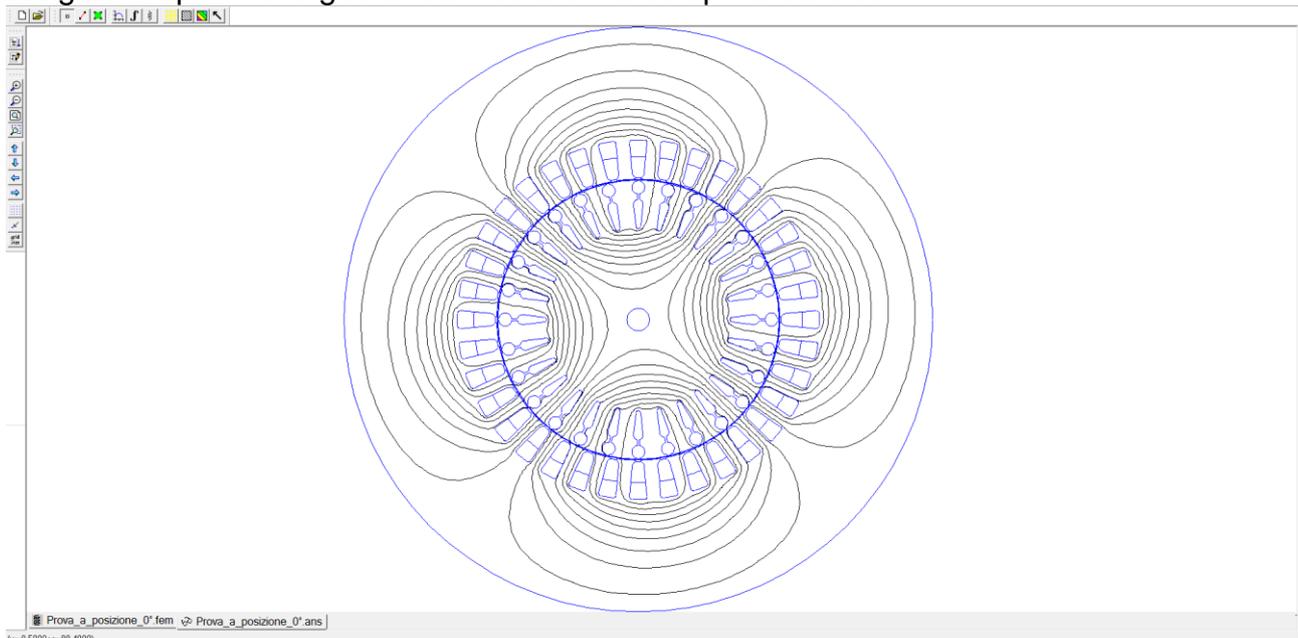


Figura 44: Geometria e linee di campo di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 50 mm, con corrente di 2A.

Di seguito è riportato l'andamento della curva Alfa-Ks teorica e di quella empirica:

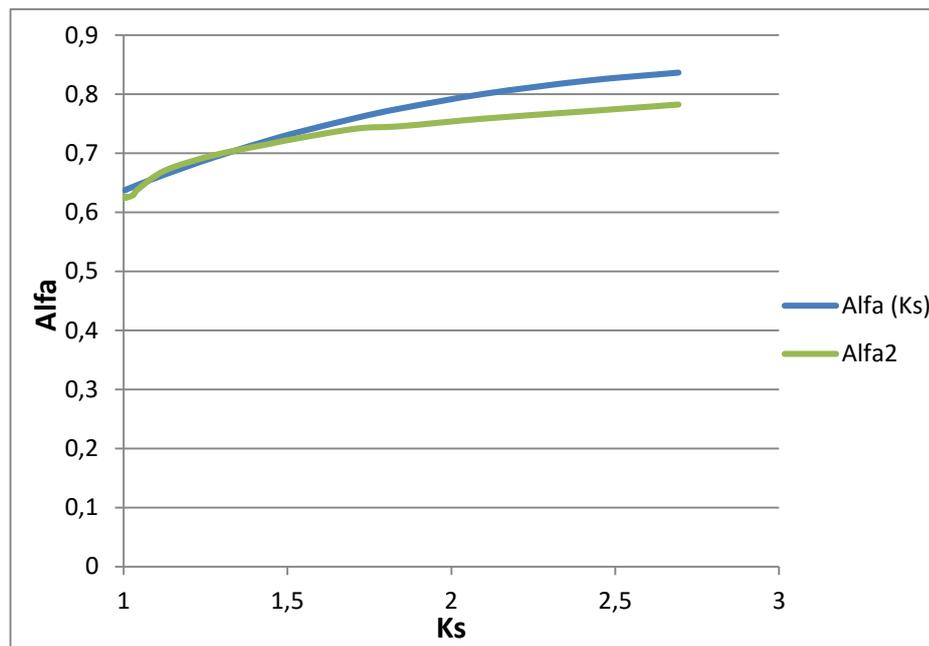


Figura 45: Andamento della curva Alfa-Ks teorica ed empirica, di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica pari a 50 mm.

Abbiamo subito notato che questa curva si avvicina molto nel tratto iniziale alla curva teoria e che, all'aumentare della saturazione, essa tende a schiacciarsi come avveniva nei motori precedenti.

Comunque, questa curva empirica è quella che in assoluto si avvicina maggiormente a quella teorica tra le curve che abbiamo esaminato.

Per questo ultimo lamierino non abbiamo ritenuto necessario proseguire con il resto dell'analisi, poiché gli andamenti al crescere delle corone erano già chiari e, in più, perché questa configurazione risulta molto diversa rispetto a quella del motore originale e perciò non realistica: lo spessore della corona statorica è stato aumentato più del doppio rispetto a quello originale!

Capitolo 5

Discussione dei risultati

In questo capitolo ci siamo proposti di discutere i risultati ottenuti al capitolo precedente, cercando di dare un'interpretazione a essi e facendo anche un confronto tra di loro.

Panoramica complessiva delle curve Alfa-Ks ottenute:

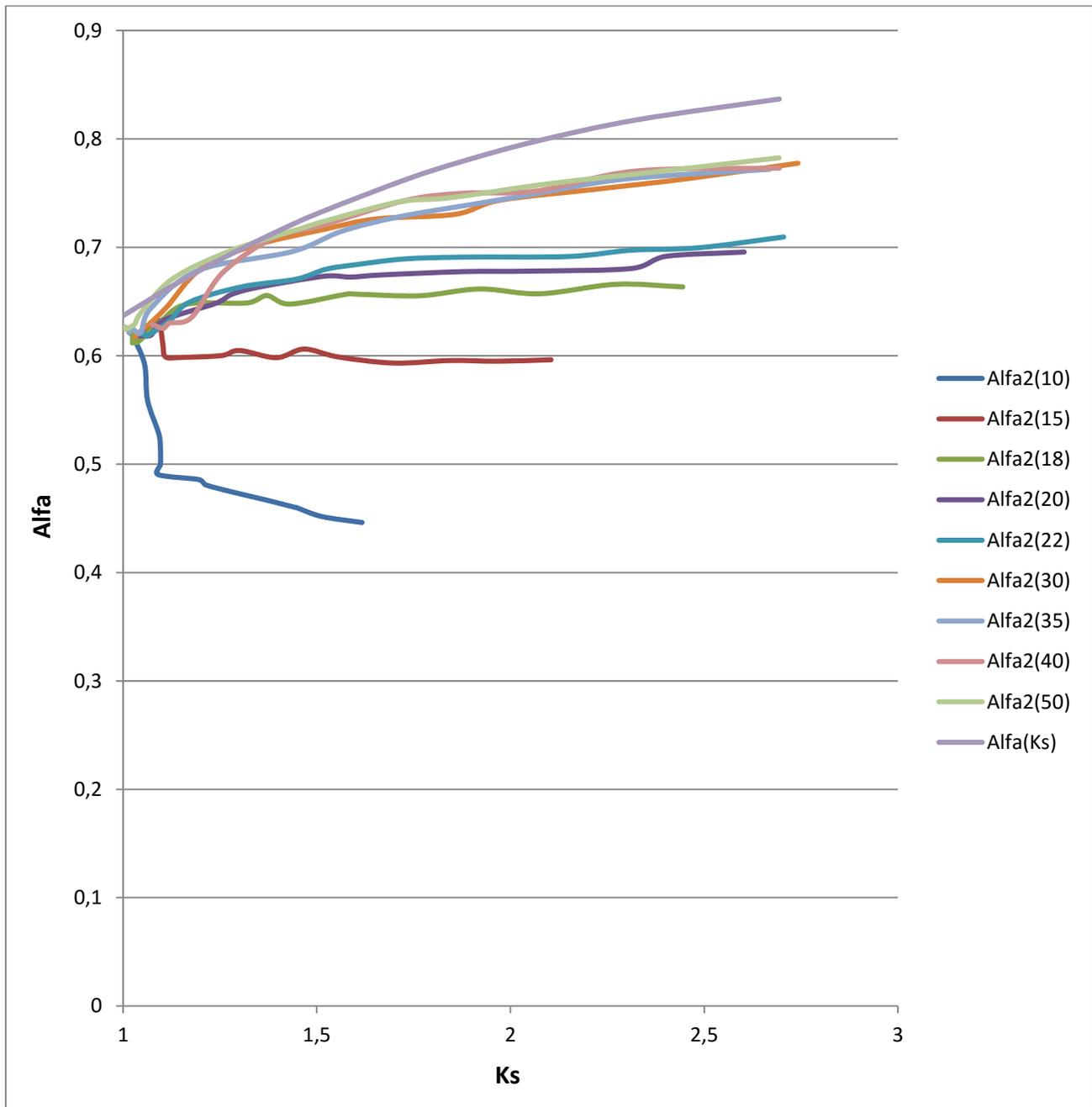


Figura 46: Grafico complessivo che rappresenta tutte le curve sperimentali ottenute e la curva teorica.

In riferimento a questo grafico, abbiamo discusso questi andamenti raggruppando, per semplicità, le curve più simili tra loro.

IEC 132-4.125 con spessore corona statorica di 10 mm e con spessore corona rotorica di 10,53 mm e con spessore corona statorica di 15 mm e spessore corona rotorica di 13,03 mm

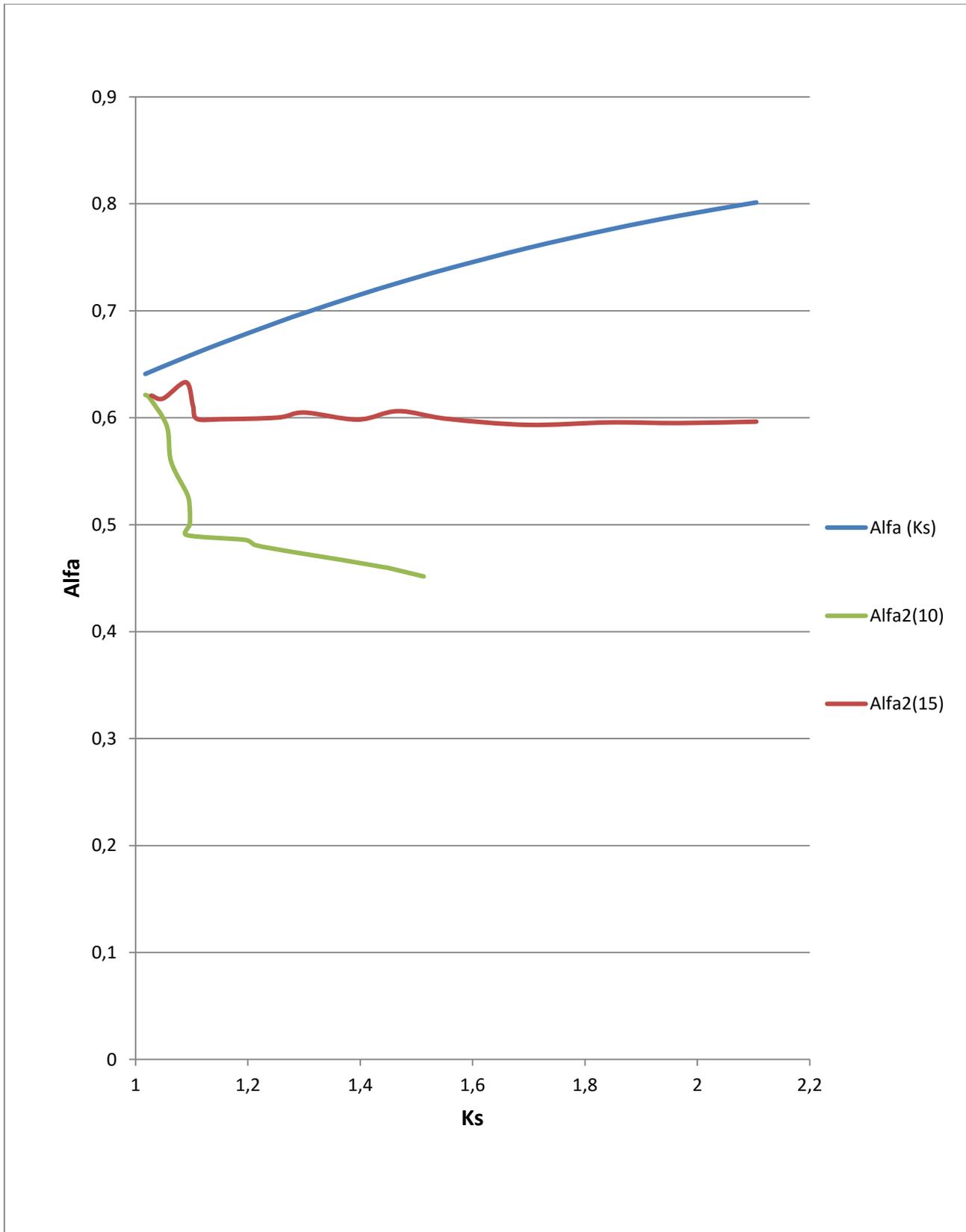


Figura 47: Grafico che rappresenta le curve sperimentali dei motori con spessore di corona statorica di 10 mm, di 15 mm e la curva teorica.

Poiché queste due configurazioni danno dei risultati molto differenti dalle altre, si è pensato di andare a vedere come si fosse deformata la forma d'onda dell'induzione magnetica normale al traferro, andando ad analizzare anche la sua composizione armonica con l'esecutivo Hyper Specrumalyzer. Per entrambi i motori abbiamo considerato le forme d'onda a 8 A e a 20 A.

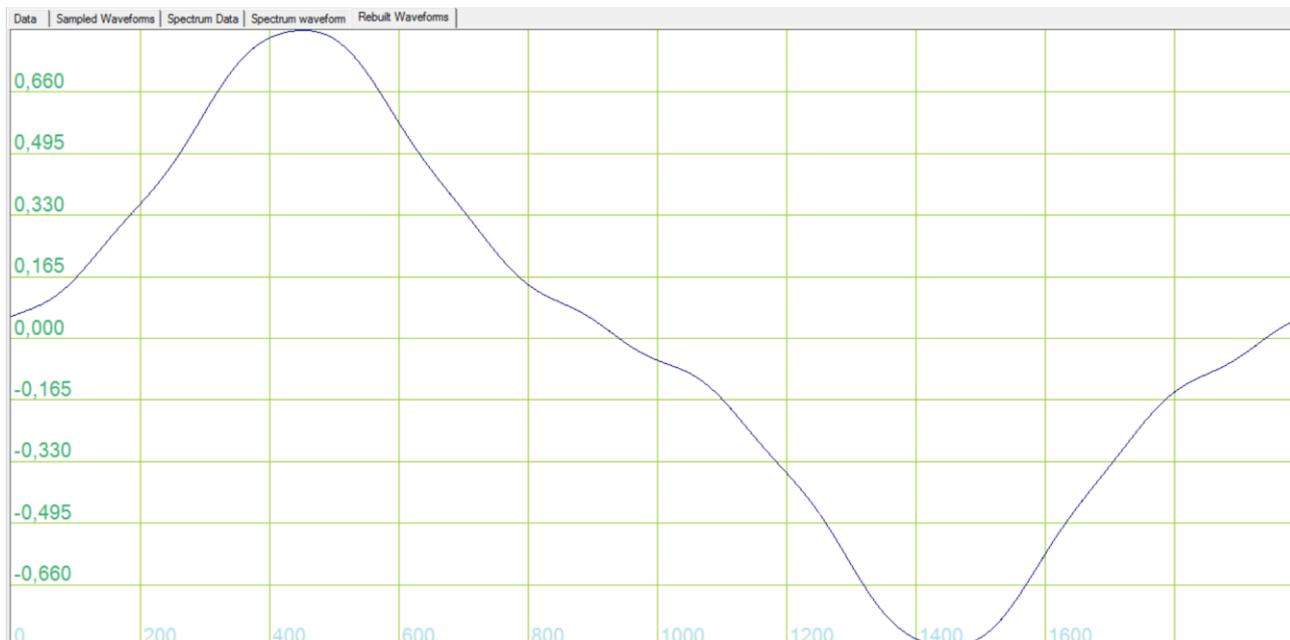


Figura 48: *Andamento dell'induzione magnetica normale al traferro nel motore con spessore di corona statorica pari a 10 mm e con corrente 8 A, considerando le armoniche dispari dalla 1° alla 11°.*

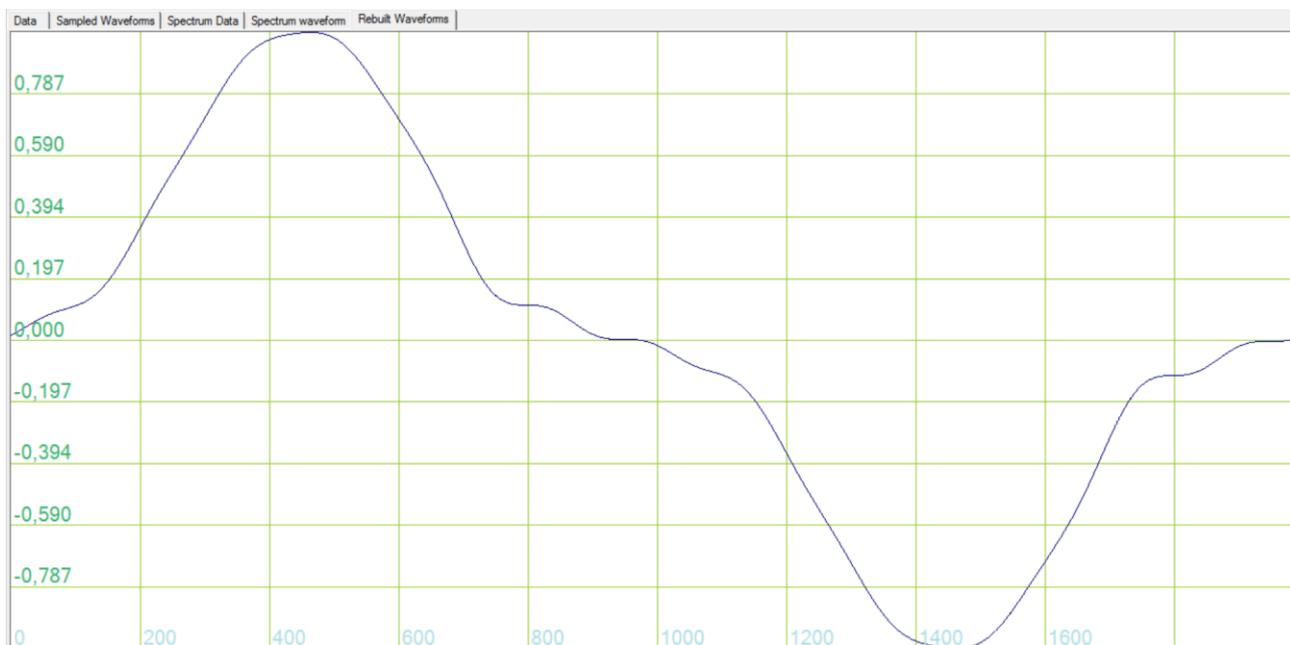


Figura 49: *Andamento dell'induzione magnetica normale al traferro nel motore con spessore di corona statorica pari a 10 mm e con corrente 20 A, considerando le armoniche dispari dalla 1° alla 13°.*

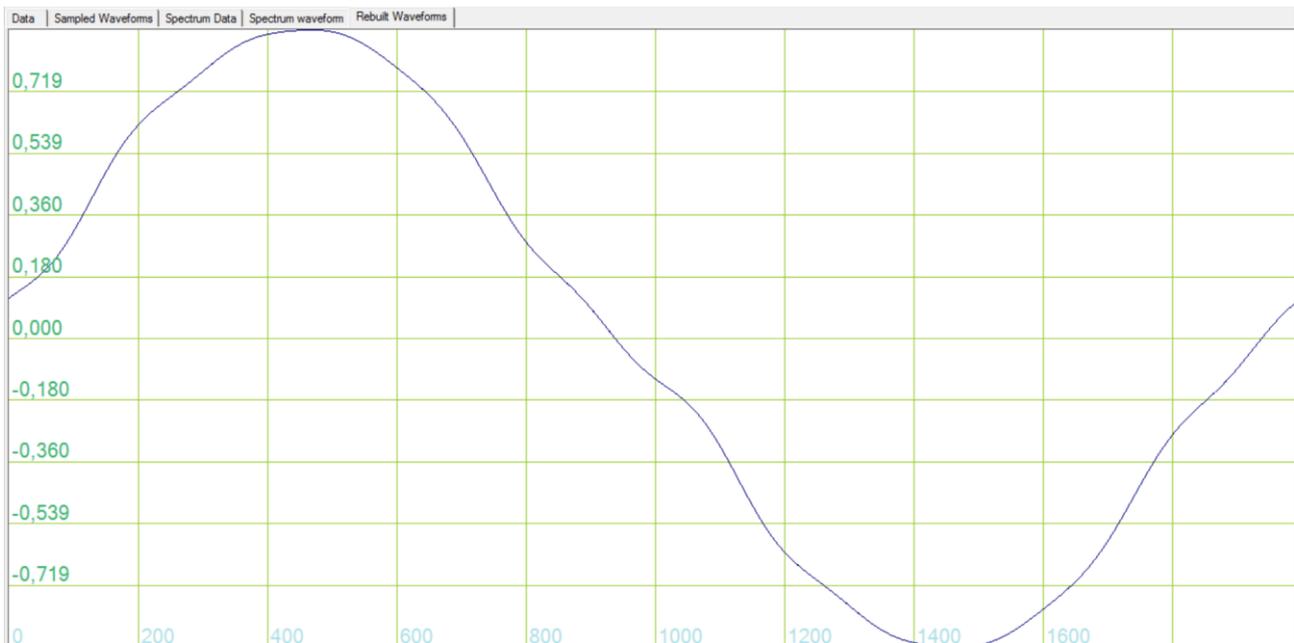


Figura 50: **Andamento dell'induzione magnetica normale al traferro nel motore con spessore di corona statorica pari a 15 mm e con corrente 8 A**, considerando le armoniche dispari dalla 1° alla 11°.



Figura 51: **Andamento dell'induzione magnetica normale al traferro nel motore con spessore di corona statorica pari a 15 mm e con corrente 20 A**, considerando le armoniche dispari dalla 1° alla 13°.

Da questi andamenti si capisce chiaramente che, nel caso in cui le corone statoriche siano molto scarse, l'induzione non tende a "schiacciarsi" in corrispondenza del suo valore massimo quando il motore si trova in condizione di saturazione, ma, al contrario, tende ad avere un valor massimo molto accentuato, a causa di una rivelante componente di 3° armonica, il cui massimo va a sommarsi con il massimo della componente fondamentale di 1° armonica.

In più, calcolando la caduta di f.m.m. nella corona statorica per tutti i valori di corrente considerati in entrambi i motori, si nota come essa non sia assolutamente trascurabile rispetto alla caduta di f.m.m. complessiva del motore.

Infatti, per il valore di corrente massimo assunto, si ha:

Spessore corona statorica (mm)	Contributo della caduta di f.m.m. in corona sulla caduta totale
10	57,3%
15	36,8%

Per questo motivo, le curve Alfa2 non crescono in funzione di K_s : all'aumentare della saturazione, i denti e il traferro non hanno un grande contributo sulla caduta di f.m.m. complessiva, ipotesi che invece sarebbe di fondamentale importanza per il modello teorico, data la definizione di K_s .

Nel caso del motore con spessore della corona statorica di 15 mm, per il motivo citato in precedenza, l'andamento di Alfa2(K_s) risulta essere pressoché costante, mentre, nel caso del motore con spessore della corona statorica di 10 mm, questo andamento risulta addirittura diminuire al crescere della saturazione!

Lo studio di questi due lamierini rappresenta uno studio di massima, interessante solo dal punto di vista teorico e poco rilevante per quanto riguarda la realizzazione di motori, poiché le loro dimensioni non sono coerenti a quelle reali.

IEC 132-4.125 con spessore corona statorica di 18 mm, 20 mm e 22 mm e con spessore corona rotorica di 15,53 mm

Nel grafico sottostante (figura 52), sono stati riportati i risultati ottenuti con gli spessori di corona statorica pari a 18 mm (rappresentato dalla curva Alfa2(18)), a 20 mm (rappresentato dalla curva Alfa2(20)) e a 22 mm (rappresentato dalla curva Alfa2(22)), per rendere più facile il confronto tra essi.

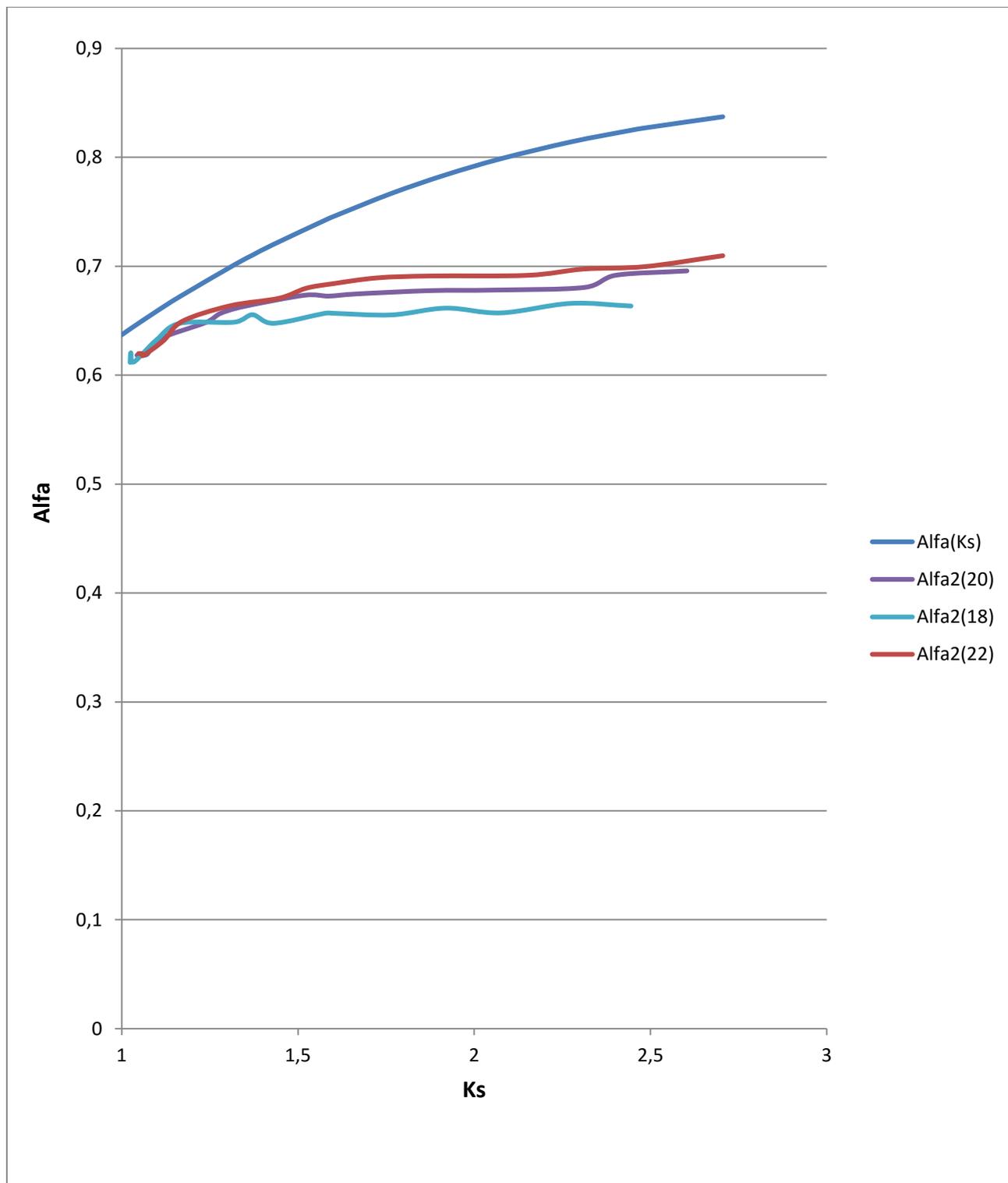


Figura 52: Grafico che rappresenta le curve sperimentali dei motori con spessore di corona statorica di 18 mm, di 20 mm, di 22 mm e la curva teorica.

Notiamo che le tre curve partono circa da uno stesso valore. Queste crescono per i primissimi istanti della saturazione, per poi andare a schiacciarsi e rimanere pressoché costanti per valori di saturazione più accentuati. Le tre caratteristiche sperimentali sono molto distanti da quella teorica.

Notiamo inoltre che per questi tre valori di spessore della corona statorica, la caduta di f.m.m. nella corona stessa non è trascurabile rispetto alla caduta nell'intera macchina. La caduta di f.m.m. nei denti e nel traferro, quindi, non riesce a rappresentare completamente quella totale. Infatti, per il valore di corrente massimo assunto, si ha:

Spessore corona statorica (mm)	Contributo della caduta di f.m.m. in corona sulla caduta totale
18	27,0%
20	18,4%
22	11,1%

Adesso andiamo a discutere in modo più dettagliato per ciascuno di questi tre motori i risultati ottenuti dalla Verifica del valore di Φ_{max} e dalla Verifica della caduta di f.m.m. nella corona statorica.

IEC 132-4.125 con spessore corona statorica di 18 mm e con spessore corona rotorica di 15,53 mm

Verifica del valore di Φ_{max}

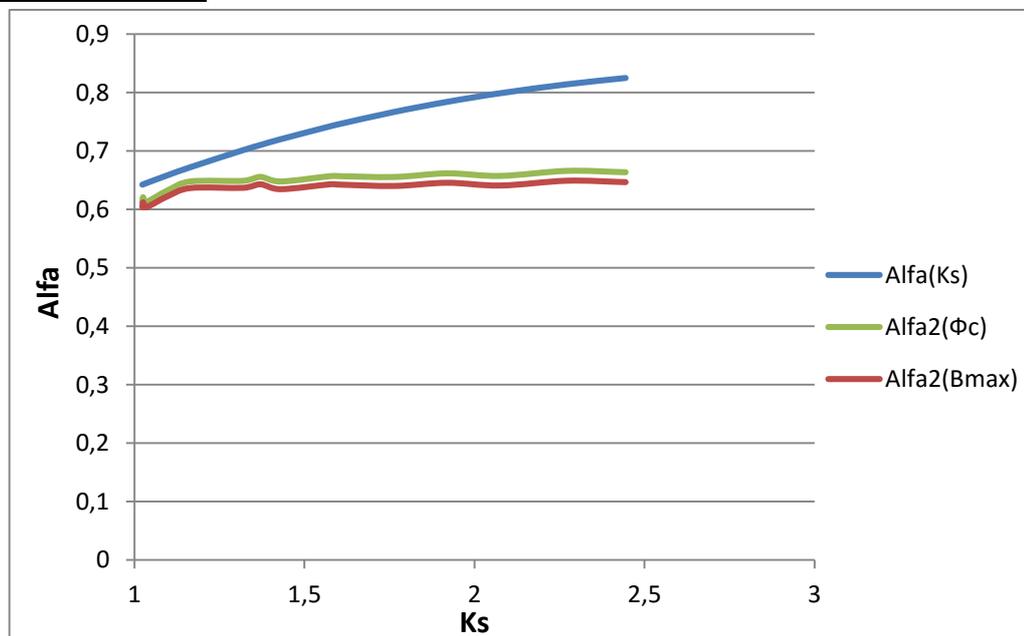


Figura 53: Andamento della curva Alfa-Ks teorica ed empirica di IEC 132-4.125 con spessore di corona statorica di 18 mm, mettendo a confronto i due metodi per calcolare Φ_{max} .

Dal grafico risulta che le due caratteristiche empiriche siano circa le stesse. Poiché la massima differenza tra loro è del 2,64%, posso considerare l'approssimazione fatta accettabile.

Verifica della caduta di f.m.m. nella corona statorica

Metodo diretto:

Corrente (A)	Afemm	As	$\frac{As - Afemm}{Afemm} * 100$
1	2.20894	2.586316152	17.08403814
2	3.09756	3.774623573	21.85796476
3	4.96036	5.592034923	12.73445724
4	9.84548	8.388052385	-14.8030123
5	23.98380	10.83456766	-54.82547526
6	46.81410	12.51217814	-73.2726291
7	72.60740	14.67909167	-79.78292616
8	101.83000	18.52361568	-81.80927459
9	129.33800	20.62062878	-84.05679013
10	162.32300	23.76614842	-85.35873017
12	227.58200	34.95021827	-84.64280204
14	296.81000	50.32831431	-83.04359209
16	359.09200	68.50242781	-80.92343249
18	430.86700	90.87056751	-78.90983354
20	495.18200	100.3071264	-79.74338194

Metodo inverso:

Corrente (A)	a	$\frac{a - 0,85}{0,85} * 100$
1	0.554451	-34.7705
2	0.624268	-26.5568
3	0.776282	-8.67276
4	0.898323	5.68506
5	0.983861	15.74831
6	0.989238	16.38089
7	0.987016	16.11959
8	0.988087	16.2455
9	0.985525	15.94408
10	0.978567	15.12553
12	0.977616	15.01369
14	0.974142	14.60493
16	0.972555	14.41818
18	0.972419	14.4022
20	0.976505	14.88295

In entrambi i procedimenti notiamo che non c'è coerenza nel metodo, per quanto riguarda questa configurazione.

IEC 132-4.125 con spessore corona statorica di 20 mm e con spessore corona rotorica di 15,53 mm

Verifica del valore di Φ_{max}

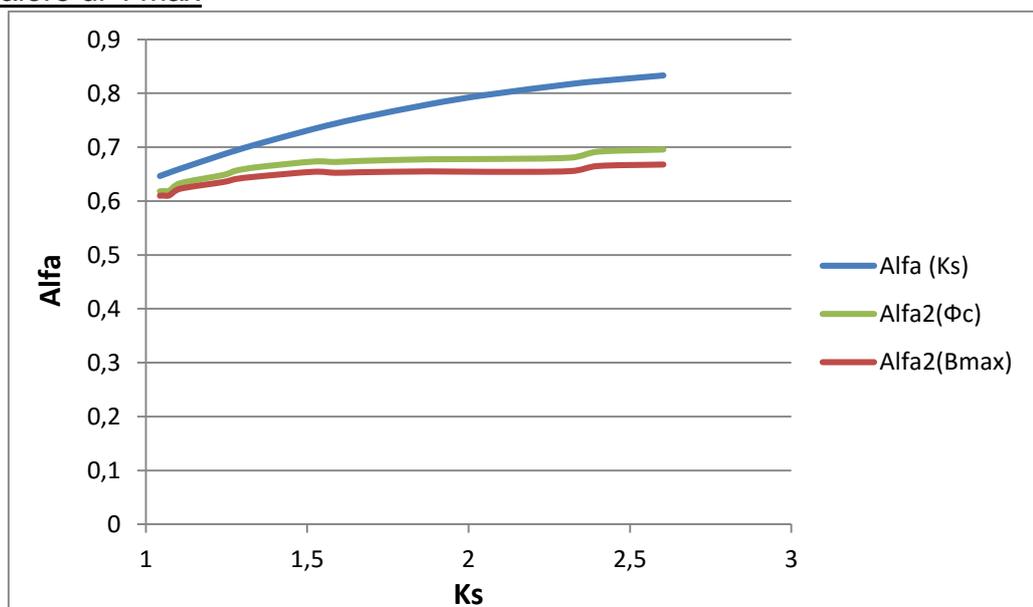


Figura 54: Andamento della curva Alfa-Ks teorica ed empirica di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica di 20 mm, mettendo a confronto i due metodi per calcolare Φ_{max} .

Dal grafico risulta che le due caratteristiche empiriche siano circa le stesse per i valori iniziali di Ks.

Al crescere di Ks le due curve gradualmente si distaccano, fino ad avere una differenza massima di circa 4,2%. Possiamo ancora ritenere accettabile l'approssimazione fatta.

Verifica della caduta di f.m.m. nella corona storica

Metodo diretto:

Corrente (A)	Afemm	As	$\frac{As - Afemm}{Afemm} * 100$
1	2.10316	2.615375884	24.35458473
2	3.1588	3.534291735	11.88716396
3	4.36010	4.948008429	13.48382903
4	6.99233	6.927211801	-0.931280401
5	11.36810	8.835729338	-22.27611177
6	21.32780	10.60287521	-50.28612794
7	35.02990	12.37002107	-64.68724983
8	53.21450	13.43030859	-74.76193783
9	75.18560	16.96460033	-77.43637036
10	97.77970	18.37831702	-81.20436346
12	144.55500	24.38661297	-83.12987239
14	190.79000	35.34291735	-81.47548752
16	230.70400	39.58406744	-82.84205413
18	276.87600	65.03096793	-76.51260206
20	345.00300	81.99556826	-76.23337529

Metodo inverso:

Corrente (A)	a	$\frac{a - 0,85}{0,85} * 100$
1	0.500503322	-41.1172562
2	0.722786851	-14.9662528
3	0.739142087	-13.0421074
4	0.848847537	-0.1355839
5	0.919754231	8.206380164
6	0.973696691	14.5525519
7	0.98168164	15.49195759
8	0.979584051	15.24518252
9	0.970565938	14.18422803
10	0.981392675	15.45796173
12	0.97415707	14.60671414
14	0.957812244	12.68379335
16	0.964119107	13.42577733
18	0.949738629	11.73395638
20	0.9602258	12.96774117

In entrambi i procedimenti notiamo che non c'è coerenza nel metodo, per quanto riguarda questa configurazione.

IEC 132-4.125 con spessore corona storica di 22 mm e con spessore corona rotorica di 15,53 mm

Verifica del valore di Φ_{max}

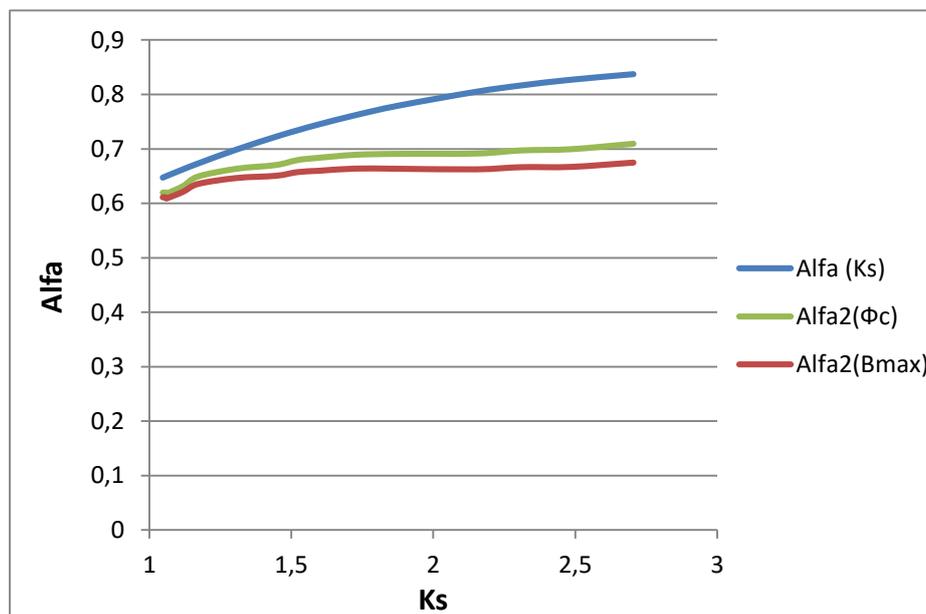


Figura 55: Andamento della curva Alfa-Ks teorica ed empirica di IEC 132-4.125 con spessore corona storica di 22 mm, mettendo a confronto i due metodi per calcolare Φ_{max} .

Dal grafico risulta che le due caratteristiche empiriche siano circa le stesse per i valori iniziali di Ks.

Al crescere di Ks le due curve gradualmente si distaccano, fino ad avere una differenza massima di circa 5,2%. Possiamo ancora ritenere accettabile l'approssimazione fatta.

Verifica della caduta di f.m.m. nella corona statorica

Metodo diretto:

Corrente (A)	Afemm	As	$\frac{As - Afemm}{Afemm} * 100$
1	2.08145	2.430021918	16.74659096
2	2.8388	3.430619178	20.84751225
3	4.12763	4.645630136	12.54957776
4	5.81138	6.075054794	4.537214807
5	7.35649	7.504479451	2.011685617
6	10.01220	8.790961643	-12.19750262
7	15.19020	10.0059726	-34.12876327
8	22.83370	11.22098356	-50.85779545
9	32.27450	12.15010959	-62.353841
10	43.34980	13.22217808	-69.49887178
12	75.38250	17.15309589	-77.24525468
14	100.36500	21.44136986	-78.63660653
16	130.09500	27.15906849	-79.12366464
18	163.42500	32.16205479	-80.31999095
20	196.56300	40.02389041	-79.63813617

Metodo inverso:

Corrente (A)	a	$\frac{a - 0,85}{0,85} * 100$
1	0.54313606	-36.1016399
2	0.60843226	-28.4197337
3	0.75867961	-10.743575
4	0.81953717	-3.58386247
5	0.82755506	-2.64058148
6	0.9021294	6.132870083
7	0.948299	11.56458767
8	0.97069194	14.19905152
9	0.97632471	14.8617301
10	0.97470631	14.67133112
12	0.97269117	14.4342555
14	0.96012305	12.95565324
16	0.96002325	12.94391188
18	0.95301832	12.11980229
20	0.95113303	11.89800295

In entrambi i procedimenti notiamo che non c'è coerenza nel metodo, per quanto riguarda questa configurazione.

IEC 132-4.125 con spessore corona statorica di 30 mm, 35 mm, 40 mm, 50 mm e rispettivo spessore corona rotorica di 20,53 mm, 25,53 mm, 30,53 mm, 35,53 mm.

Nel grafico sottostante sono stati riportati i risultati ottenuti con gli spessori di corona statorica pari a 30 mm (rappresentato dalla curva Alfa2(30)), a 35 mm (rappresentato dalla curva Alfa2(35)), a 40 mm (rappresentato dalla curva Alfa2(40)) e a 50 mm per rendere più facile il confronto tra essi.

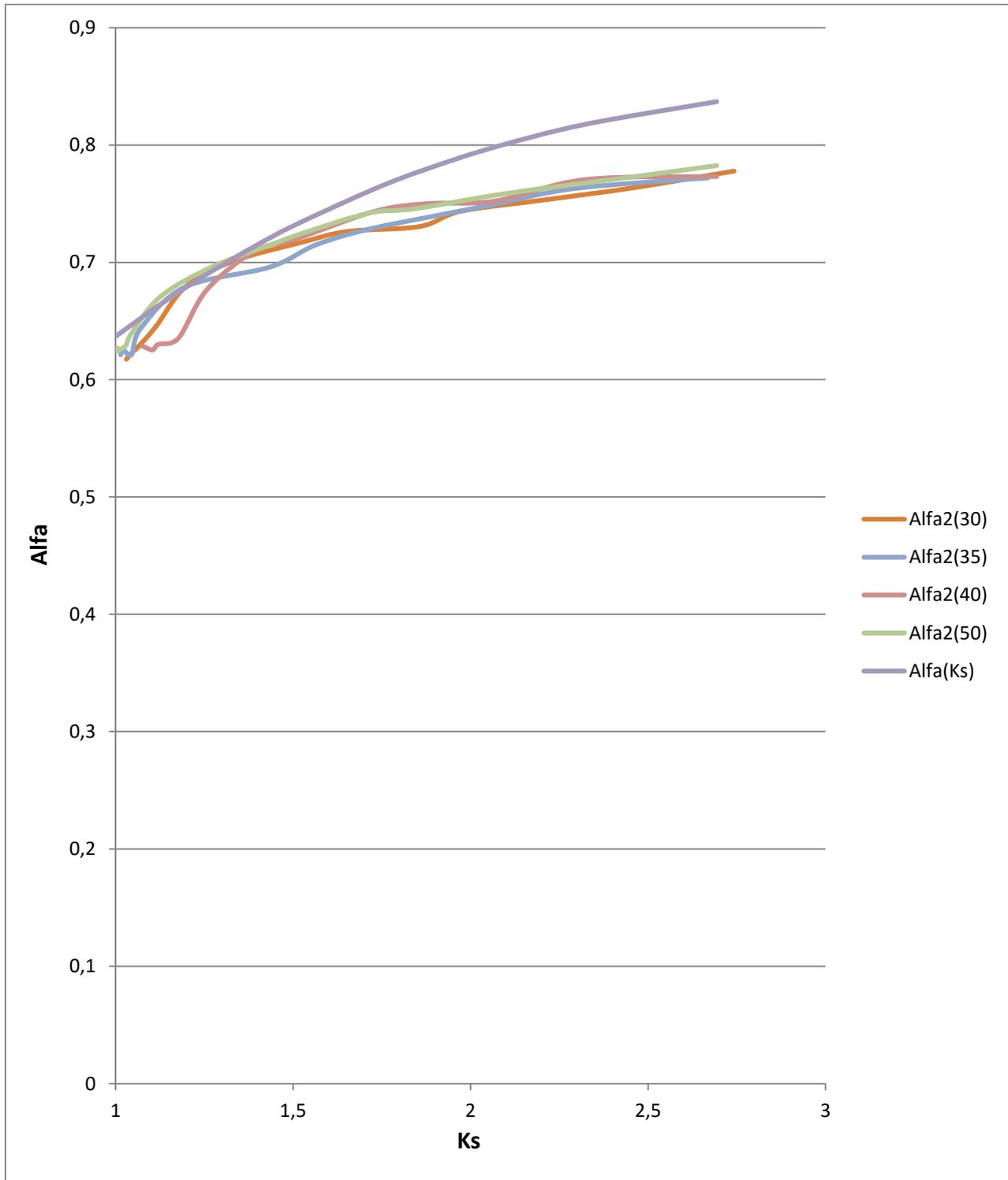


Figura 56: Grafico che rappresenta le curve sperimentali dei motori con spessore della corona statorica di 30 mm, di 35 mm, di 40 mm, di 50 mm e la curva teorica.

Notiamo che le quattro curve partono circa dallo stesso valore, che è inferiore al valore iniziale della curva teorica. Inizialmente queste tendono a seguire l'andamento della curva Alfa(Ks), per poi appiattirsi e raggiungere valori finali minori. Comunque, queste caratteristiche si avvicinano di più alla curva teorica rispetto a quelle del motore originale e dei motori con corona statorica simile all'originale.

Notiamo inoltre che la caduta di f.m.m. nella corona statorica in queste configurazioni è trascurabile rispetto alla caduta totale. Si ha che la caduta nella corona statorica è tanto più trascurabile tanto è maggiore lo spessore della corona stessa. Infatti, per il valore di corrente massimo assunto, si ha:

Spessore corona statorica (mm)	Contributo della caduta di f.m.m. in corona sulla caduta totale
30	1,6%
35	0,6%
40	0,47%
50	0.37%

Adesso andiamo a discutere in modo più dettagliato per ciascuno di questi tre motori i risultati ottenuti dalla Verifica del valore di Φ_{max} e dalla Verifica della caduta di f.m.m. nella corona statorica.

IEC 132-4.125 con spessore corona statorica di 30 mm e spessore corona rotorica di 20,53 mm

Verifica del valore di Φ_{max}

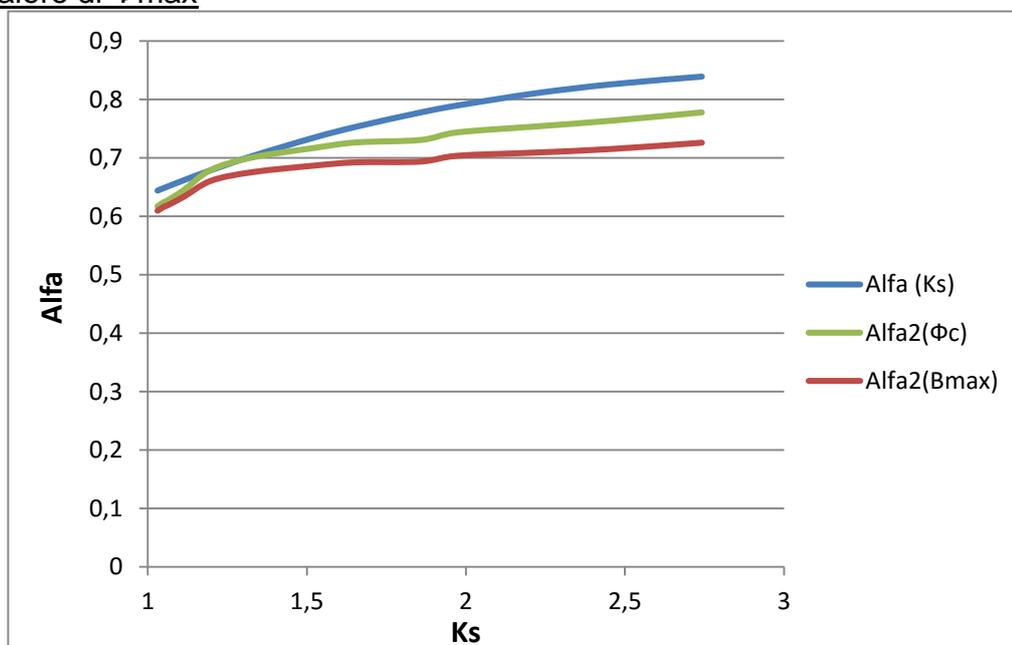


Figura 57: Andamento della curva Alfa-Ks teorica ed empirica di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica di 30 mm, mettendo a confronto i due metodi per calcolare Φ_{max} .

Dal grafico risulta che le due caratteristiche empiriche siano circa le stesse per i primissimi valori di Ks.

Al crescere di Ks le due curve si distaccano in modo evidente, fino ad avere una differenza massima di circa 7,2%. Non possiamo più ritenere accettabile l'approssimazione fatta.

Verifica della caduta di f.m.m. nella corona statorica

Metodo diretto:

Corrente (A)	Afemm	As	$\frac{As - Afemm}{Afemm} * 100$
1	2.05624	2.462223	19.7439619
2	2.62689	2.9099	10.7735838
3	3.53139	3.730641	5.64229032
4	4.21062	4.551382	8.092925908
5	5.11431	5.521349	7.958827069
6	5.74788	6.043639	5.14552961
7	6.41290	6.86438	7.040183818
8	6.76807	7.38667	9.139972352
9	7.74343	7.834347	1.174113796
10	9.11981	8.580475	-5.913884882
12	11.84890	10.07273	-14.99015566
14	17.28030	10.81886	-37.39194516
16	23.16210	12.38573	-46.52588048

Metodo inverso:

Corrente (A)	a	$\frac{a - 0,85}{0,85} * 100$
1	0.72585675	-14.6051
2	0.60119408	-29.2713
3	0.77483034	-8.84349
4	0.77556345	-8.75724
5	0.78712988	-7.39648
6	0.80637316	-5.13257
7	0.81764467	-3.80651
8	0.81295366	-4.35839
9	0.82710512	-2.69352
10	0.87020882	2.377509
12	0.88704121	4.357789
14	0.93840675	10.40079
16	0.95016562	11.78419

In entrambi i procedimenti notiamo che non c'è coerenza nel metodo, per quanto riguarda questa configurazione. Comunque, è evidente che ci siamo maggiore coerenza rispetto ai motori precedenti.

IEC 132-4.125 con spessore corona statorica di 35 mm e spessore corona rotorica di 25,53 mm

Verifica del valore di Φ_{max}

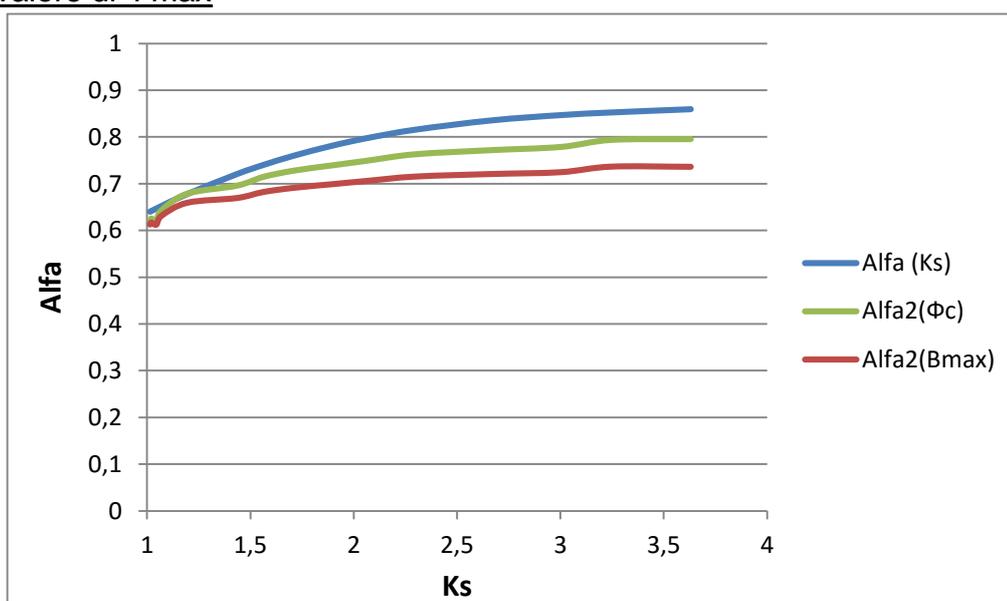


Figura 58: Andamento della curva Alfa-Ks teorica ed empirica di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica di 35 mm, mettendo a confronto i due metodi per calcolare Φ_{max} .

Dal grafico risulta che le due caratteristiche empiriche non siano coincidenti in nessun punto e al crescere di K_s le due curve si distaccano sempre più in modo evidente, fino ad avere una differenza massima di circa 12,4%. Non possiamo più ritenere accettabile l'approssimazione fatta.

Verifica della caduta di f.m.m. nella corona statorica

Metodo diretto:

Corrente (A)	Afemm	As	$\frac{As - Afemm}{Afemm} * 100$
1	1.874	2.220713307	18.51389193
2	2.477	2.833323874	14.39268885
3	3.012	3.369358121	11.84962558
4	3.927	4.13512133	5.305116896
5	4.473	4.671155577	4.438209491
6	4.847	5.130613502	5.854596334
7	5.415	5.590071428	3.236705036
8	5.893	6.126105675	3.956871616
9	6.117	6.355834637	3.909536798
10	6.718	6.891868884	2.592075368
12	7.609	7.657632093	0.64482673
14	7.943	8.040513698	1.232129047
16	8.680	8.729700586	0.568648073
18	10.561	9.189158512	-12.98557349
20	11.041	9.725192758	-11.91507098

Metodo inverso:

Corrente (A)	a	$\frac{a - 0,85}{0,85} * 100$
1	0.506965508	-40.357
2	0.558406304	-34.3051
3	0.640490634	-24.6482
4	0.781817128	-8.02151
5	0.813957657	-4.24028
6	0.797185119	-6.21352
7	0.813048907	-4.34719
8	0.815665899	-4.03931
9	0.813263296	-4.32197
10	0.827093569	-2.69487
12	0.848974679	-0.12063
14	0.82896763	-2.4744
16	0.844588515	-0.63665
18	0.89299449	5.058175
20	0.885144894	4.134693

In entrambi i procedimenti notiamo che non c'è coerenza nel metodo, per quanto riguarda questa configurazione. Comunque, è evidente che ci sia maggiore coerenza rispetto ai motori precedenti: troviamo prevalentemente differenze percentuali di qualche per cento tra i parametri.

IEC 132-4.125 con spessore corona statorica di 40 mm e spessore corona rotorica di 30,53 mm

Verifica del valore di Φ_{max}

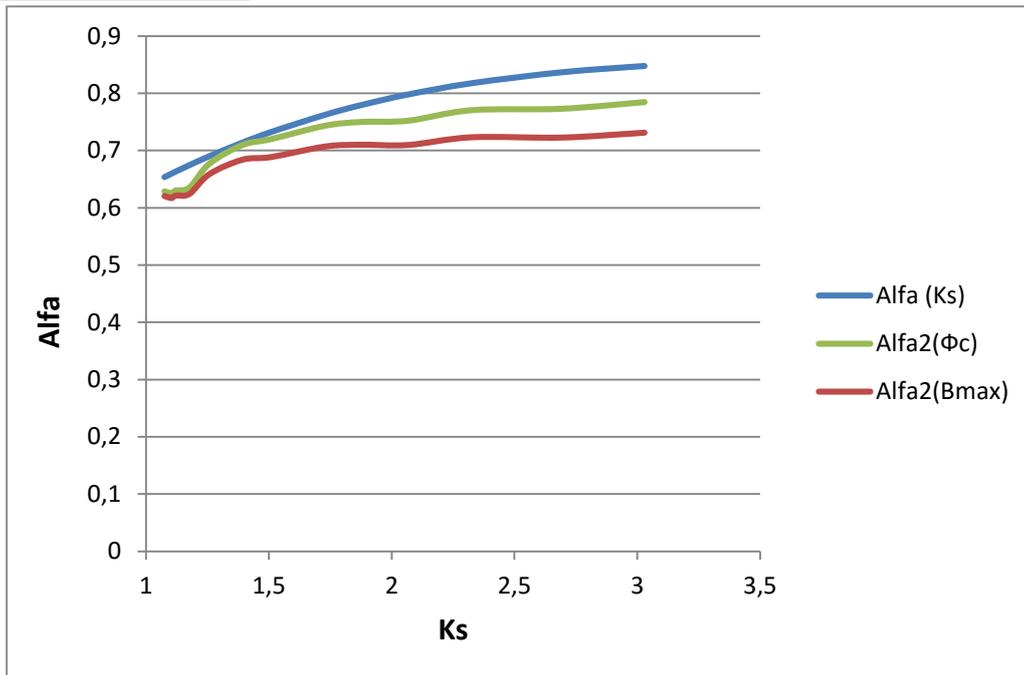


Figura 59: Andamento della curva Alfa-Ks teorica ed empirica di IEC 132-4.125 con spessore corona statorica di 40 mm, mettendo a confronto i due metodi per calcolare Φ_{max} .

Dal grafico risulta che le due caratteristiche empiriche siano circa le stesse per i primissimi valori di Ks.

Al crescere di Ks le due curve si distaccano in modo evidente, fino ad avere una differenza massima di circa 7,4%. Non possiamo più ritenere accettabile l'approssimazione fatta.

Verifica della caduta di f.m.m. nella corona statorica

Metodo diretto:

Corrente (A)	Afemm	As	$\frac{As - Afemm}{Afemm} * 100$
1	1.970	2.120575	7.637392895
2	2.524	2.905973	15.13227674
3	3.177	3.377212	6.302592481
4	3.359	3.612832	7.564444963
5	4.091	4.31969	5.59704255
6	4.321	4.555309	5.41257015
7	4.663	4.869469	4.427134568
8	4.966	5.105088	2.808259602
9	5.210	5.497787	5.531847815
10	5.525	5.811946	5.202739951
12	5.692	6.047566	6.250684902
14	6.291	6.597345	4.871235794
16	6.824	7.068583	3.583710367

Metodo inverso:

Corrente (A)	a	$\frac{a - 0,85}{0,85} * 100$
1	0.70241877	-17.3625
2	0.61519129	-27.6246
3	0.78582597	-7.54989
4	0.68516614	-19.3922
5	0.80433371	-5.3725
6	0.78848746	-7.23677
7	0.81079556	-4.61229
8	0.79759831	-6.16491
9	0.81628458	-3.96652
10	0.81104874	-4.5825
12	0.80086396	-5.78071
14	0.82547947	-2.88477
16	0.83165119	-2.15868

In entrambi i procedimenti notiamo che non c'è coerenza nel metodo, per quanto riguarda questa configurazione. Notiamo che in questo caso, A_s sovrastimi A_{fem} di qualche percento e che a invece sottostimi il coefficiente 0,85 di qualche percento, per ogni valore di corrente. Questo non si è verificato negli altri motori analizzati.

Capitolo 6

Conclusione e commenti

L'obiettivo di questa tesi è verificare come la scelta dello spessore della corona statorica influenzi la saturazione in un motore asincrono.

In più, sono state verificate anche alcune definizioni che tradizionalmente sono sempre state prese per valide, come:

- ❖ calcolo del flusso massimo attraverso il flusso concatenato,
- ❖ metodo per trovare la caduta di forza magnetomotrice nella corona statorica, attraverso l'induzione massima in corona e la caratteristica di prima magnetizzazione del materiale in corona.

La prima osservazione evidente è che la saturazione in corona statorica sia inversamente proporzionale allo spessore della corona stessa.

Infatti, all'aumentare dello spessore, la caduta di forza magnetomotrice tende a diventare sempre più trascurabile rispetto alla caduta totale nel motore.

Conseguenza diretta di questo fatto è che il modello teorico, che descrive la saturazione nel motore asincrono, rappresentato dalla curva Alfa-Ks, sia verificato in modo migliore da configurazioni con corone ampie.

Questo modello teorico, infatti, come ipotesi fondante prevede che la caduta di f.m.m. sia da attribuire solamente ai denti (statorico e rotorico) e al traferro, escludendo completamente la caduta in corona statorica. Per questo motivo, esso è maggiormente rispettato quando la caduta di f.m.m. in corona statorica è trascurabile, rispetto alla totale.

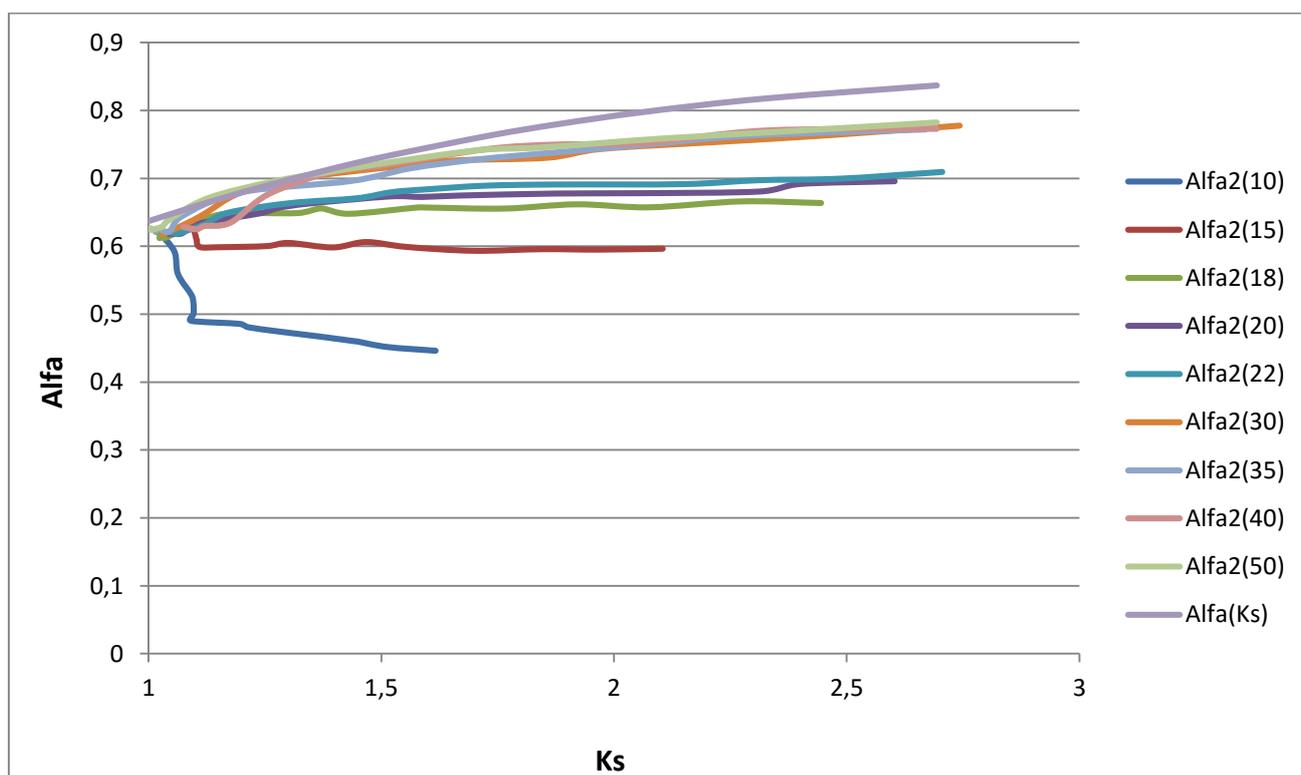


Figura 60: Panoramica che rappresenta tutte le curve sperimentali ottenute e la curva teorica.

Per la stessa ragione, notiamo che, nel caso di motori con corone statoriche ampie, venga anche maggiormente verificato il metodo per trovare la caduta di forza magnetomotrice nella corona statorica, attraverso l'induzione massima in corona e la caratteristica di prima magnetizzazione del materiale in corona.

Infatti, in tali configurazioni, il coefficiente a che ci siamo ricavati nei capitoli precedenti risulta essere più stabile e molto prossimo al suo valore teorico, che sarebbe 0,85.

Questi andamenti che abbiamo ottenuto, possono essere giustificati dal fatto che il modello teorico è stato definito in passato, quando i motori asincroni erano caratterizzati da corone esuberanti e, quindi, esse erano ininfluenti nel funzionamento.

Al giorno d'oggi, invece, la tendenza dei progettisti è quella di minimizzare le dimensioni dei motori, sia per una questione di economia sia per cercare di sfruttare al massimo le loro caratteristiche.

Per questo motivo i motori attuali sembrano avere una caratteristica molto diversa da quella teorica.

In più, tutte le curve sembrano partire approssimativamente da uno stesso valore, che è leggermente inferiore al valore teorico iniziale di $2/\pi$.

Per quanto riguarda il calcolo del flusso massimo attraverso il flusso concatenato e poi, in un secondo momento, attraverso l'induzione massima al traferro, abbiamo notato che le due curve Alfa ottenute, Alfa(Φ_{con}) e Alfa(B_{max}), tendono a essere praticamente coincidenti per corone sottili.

All'aumentare dello spessore della corona statorica, le due curve tendono gradualmente a distaccarsi, facendo sì che in modo sempre più evidente, crescendo la saturazione, la curva Alfa(B_{max}) sia più schiacciata rispetto alla Alfa(Φ_{con}).

Da ciò, ne consegue che per corone sottili fino alla corona con spessore originale, con buona approssimazione si possa ricorrere al calcolo approssimato del flusso massimo attraverso il flusso concatenato in questo modo: $\Phi_{max} = \frac{2 * \Phi_c}{N * K a}$;

per corone ampie, invece, si debba ricorrere all'induzione massima, attraverso questa espressione: $\Phi_{max} = \frac{2}{\pi} * B_{max} * L * \tau$.

Questa considerazione tende a contraddire ancora di più il modello teorico, poiché provoca uno schiacciamento maggiore delle curve empiriche ottenute rispetto a quella teorica.

Per verificare se ci fosse una validità generale dei risultati ottenuti dovremmo studiare, nelle stesse condizioni, anche altri motori con caratteristiche diverse da quello studiato in questa tesi.

In questo modo, potremmo in un futuro definire famiglie di curve teoriche che approssimino in modo migliore le curve sperimentali ottenute.

Bibliografia

- ❖ Slides “*progettazione e gestione di sistemi elettromeccanici*” – progetto macchine asincrone, prof. Fiorenzo Filippetti.
- ❖ “*motore asincrono*”: https://it.wikipedia.org/wiki/Motore_asincrono.
- ❖ Slides “*macchine elettriche T*” e “*metodologie di progettazione delle Macchine Elettriche M*”– prof. Giovanni Serra.
- ❖ Tesi di Elia Nieri: “Analisi dell’influenza delle scelte progettuali sulla saturazione magnetica delle macchine asincrone mediante studio ad elementi finiti”, anno accademico 2014/2015.
- ❖ “*Metodo degli elementi finiti*”:
http://it.wikipedia.org/wiki/Metodo_degli_elementi_finiti.
- ❖ “*FEMM Reference Manual*”: <http://www.femm.info/Archives/doc/manual42.pdf>.
- ❖ “*linguaggio Lua*”: <https://it.wikipedia.org/wiki/Lua>.