



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea magistrale in Ingegneria Elettrica

A.a. 2024/2025

Sessione di Laurea Luglio 2025

Progettazione e Simulazione di un Motore C- Core ad Alto Numero di Poli e Alta Frequenza

Relatori:

Prof. Paolo Gugliemi

Candidato:

Junior Dounmene Dzoyem

Indice

Introduzione

Obiettivi del lavoro

Motivazioni e contesto applicativo

Schema della tesi

Conclusioni

Bibliografia e sitografia

Introduzione

I motori elettrici diventano sempre più importanti in settori strategici come la mobilità elettrica, l'automazione industriale, l'aerospazio e la robotica nel panorama della progettazione elettromeccanica in continua evoluzione. Lo sviluppo di soluzioni innovative in grado di coniugare efficienza energetica, compattezza e facilità costruttiva è necessario in particolare a causa della crescente richiesta di prestazioni elevate, affidabilità e miniaturizzazione.

L'obiettivo del presente lavoro di tesi è studiare, progettare e simulare un motore elettrico basato su una configurazione magnetica a nucleo a C. Un buon controllo del flusso magnetico, una maggiore semplicità di assemblaggio e un'elevata densità di potenza possono essere ottenuti con questa struttura se opportunamente ottimizzata, specialmente se combinata con un elevato numero di poli e una velocità operativa elevata.

La modellazione teorica, la progettazione CAD, la scelta dei materiali magnetici e la simulazione numerica con software agli elementi finiti sono tutti combinati per creare il progetto. L'obiettivo è ottenere una valutazione delle prestazioni elettromagnetiche del motore. Diamo particolare attenzione alla distribuzione del campo magnetico, alla saturazione del nucleo e alle perdite per isteresi e correnti parassite, che sono particolarmente importanti quando si tratta di alte frequenze.

Obiettivi del lavoro

Il compito della tesi è quello di:

- progettare un motore elettrico con struttura a C-core che sia ottimizzato per funzionare con un numero di poli superiore a dieci.
- Determinare il modo in cui la scelta dei materiali magnetici influisce sulle prestazioni del motore, in particolare a frequenze elevate
- Creare un modello CAD del motore in tre dimensioni che includa il nucleo, il traferro e gli avvolgimenti
- Utilizzare software FEM (Finite Element Method), come FEMM, per simulare il comportamento del circuito magnetico
- Analizzare i risultati in termini di densità di flusso, riluttanza, saturazione e perdite
- Proporre modi per migliorare l'efficienza del motore in situazioni reali

Motivazioni del progetto

La ricerca di soluzioni progettuali alternative ai motori convenzionali è fondamentale a causa della spinta verso dispositivi elettrici più compatti, rapidi e a basso consumo energetico. I motori ad alto numero di poli sono particolarmente adatti a:

- Applicazioni aerospaziali e automobiliste, dove spazio e peso sono fondamentali

- Sistemi robotici di alta qualità
- Attuatori elettromeccanici piccoli per ambienti ad alta frequenza di commutazione
- generazione di energia in microreti o dispositivi portatili

La configurazione a C-core in combinazione con tecniche di simulazione sofisticate consente l'esplorazione di soluzioni tecniche che combinano prestazioni e semplicità costruttiva.

Schema della tesi

La tesi è suddivisa in i seguenti capitoli:

- **Capitolo 1:** Principi teorici dei circuiti magnetici e dell'elettromagnetismo
- **Capitolo 2:** Modellazione e analisi geometrica del motore CAD
- **Capitolo 3:** Analisi dei materiali magnetici e delle loro caratteristiche di alta frequenza
- **Capitolo 4:** Determinazione del materiale ideale per il nucleo del motore
- **Capitolo 5:** Simulazione numerica e analisi del circuito magnetico FEMM
- **Capitolo 6:** Progettazione di poli e frequenze ad alto numero con attenzione alle perdite e alla risposta dinamica.
- **Capitolo 7:** I risultati e il confronto con altre configurazioni
- **Capitolo 8:** Valutazioni approfondite e suggerimenti per lo sviluppo futuro.
- **Capitolo 9:** Conclusioni generali e sintesi dei contributi del progetto

Capitolo 1 – Principi teorici dei circuiti magnetici e dell'elettromagnetismo

I principi fondamentali che regolano il funzionamento dei circuiti magnetici vengono presentati in questo capitolo, con particolare attenzione ai materiali ferromagnetici e alle leggi di Ampère e di Faraday. Queste leggi costituiscono la base per la progettazione e l'analisi di motori elettrici, come i motori C-core.

1.1 Circuiti magnetici e campo magnetico

La grandezza vettoriale del campo magnetico descrive la forza esercitata su particelle cariche in movimento e materiali magnetici.

Il campo magnetico B , noto anche come densità di flusso magnetico, e l'intensità del campo magnetico H sono i due vettori principali che lo definiscono. I due sono collegati da:

$$B = \mu H$$

dove la permeabilità magnetica del materiale, che indica la sua capacità di condurre il flusso magnetico, è μ . I materiali ferromagnetici, che hanno una permeabilità molto superiore a quella del vuoto, guidano e concentrano il campo magnetico nei circuiti magnetici, come quelli trovati nei motori elettrici. La legge di Ampère, formulata in questo modo:

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_{\text{libera}}$$

descrive come la corrente libera I che attraversa un percorso chiuso C crea un campo magnetico lungo l'area che lo circonda. Una grandezza che è paragonabile alla tensione elettrica in un circuito magnetico è nota come forza magnetomotrice (FMM) e è il prodotto del numero di spire N degli avvolgimenti per la corrente I che li attraversa:

$$FMM=N \cdot I$$

Il flusso magnetico Φ (Phi) prodotto dalla forza attraversa il circuito e incontra una riluttanza R , che è simile alla resistenza elettrica e dipende dalla geometria e dal materiale del circuito magnetico. Pertanto, la relazione fondamentale del circuito magnetico è la seguente:

$$FMM=\Phi R$$

1.2 Proprietà delle sostanze magnetiche

1.2.1 La curva di magnetizzazione B-H

I materiali ferromagnetici rispondono al campo magnetico in modo non lineare. La curva caratteristica, nota anche come curva **B-H**, mostra la relazione tra la densità di flusso magnetico **B** e l'intensità del campo magnetico **H**. La prima regione lineare della curva in cui il materiale risponde proporzionalmente al campo applicato viene seguita da una saturazione in cui l'aumento di **H** causa un aumento significativamente ridotto di **B**.

Oltre alla curva principale, si vede anche un fenomeno chiamato isteresi magnetica. Questo fenomeno descrive il ritardo nella risposta di un materiale al campo magnetico variabile. Le perdite di isteresi nei nuclei magnetici sono causate da questo effetto.

1.2.2 Capacità di permeabilità magnetica

La facilità con cui un materiale può essere magnetizzato è indicata dalla sua permeabilità μ , che è espressa come:

$$\mu = \frac{B}{H}$$

La permeabilità assoluta μ e la permeabilità relativa μ_r sono distinte, dove:

$$\mu = \mu_0 \times \mu_r$$

e $\mu_0=4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ è la permeabilità del vuoto. Nei materiali ferromagnetici, μ_r può variare da centinaia a migliaia, mentre in aria o vuoto è pari a **1**.

1.3 Perdite di energia magnetica

1.3.1 Perdite causate dall'isteria

La perdita di isteresi si verifica quando un materiale ferromagnetico è esposto a un campo

magnetico variabile. Questo processo è noto come ciclo di magnetizzazione e smagnetizzazione. La forma della curva di isteresi e la frequenza del campo magnetico determinano questo. Per applicazioni ad alta frequenza, sono preferiti materiali con bassa perdita di isteresi.

1.3.2 Perdite di correnti parassite

Le correnti parassite o eddy currents si verificano nei materiali conduttori quando il flusso magnetico cambia. Queste correnti provocano riscaldamento e perdite di potenza aggiuntive.

non desiderato I nuclei dei motori sono spesso realizzati con lamierini sottili che sono isolati tra loro, il che riduce la circolazione delle correnti parassite.

1.4 Utilizzo dei motori elettrici

Il circuito magnetico è essenziale per la trasformazione dell'energia elettrica in energia meccanica nei motori elettrici. Nel caso di motori C-core, la geometria del nucleo a forma di "C" consente al flusso magnetico di passare attraverso lo statore e il rotore in modo efficiente.

La progettazione di un circuito magnetico deve bilanciare molte cose, come ridurre le perdite magnetiche, evitare che il materiale si saturi e assicurarsi che il campo magnetico sia uniforme, il che produrrà coppia elevata con alta efficienza.

La prestazione finale del motore è direttamente influenzata dalle proprietà magnetiche del materiale insieme alla geometria e al posizionamento degli avvolgimenti..

Capitolo 2— Modellazione e analisi geometrica del motore CAD

Questa descrive come modellare il motore C-core con QCAD con il software CAD. Si mostra la definizione della geometria, la rappresentazione degli elementi principali come i nuclei a C, gli avvolgimenti, lo statore e il rotore, e le ragioni per scegliere di modellare solo un quarto di circonferenza. Infine, viene presentata un'analisi geometrica preliminare per valutare le dimensioni e le caratteristiche principali del modello.

2.1 La scelta del modello e l'uso della rappresentazione geometrica

2.1.1 Motivazioni per utilizzare il modello parziale

È possibile che la modellazione computazionale di un intero motore elettrico sia costosa. Di conseguenza, modellando solo un quarto della circonferenza del motore, sfruttando le simmetrie geometriche e magnetiche del sistema, è stato scelto. Questa opzione riduce notevolmente i tempi di simulazione senza compromettere la precisione dei risultati.

2.2 Le parti essenziali del modello

- Nuclei a C: sono rappresentati come parti di materiale ferromagnetico con forme e spessori specifici, che sono essenziali per il flusso magnetico.
- Avvolgimenti: aree in cui si applicano le correnti elettriche sono indicate come aree rettangolari utilizzate per l'inserimento delle bobine.
- Statore e rotore sono strutture meccaniche che supportano e delimitano il campo magnetico. Le loro dimensioni e posizioni sono state accuratamente modellate.