

# Progettazione di un Motore Elettrico IPM V-type con SyR-e

**Relatore:** prof. Gianmario Pellegrino

**Correlatore:** dr. Simone Ferrari

**Candidato:** Federico Sportelli

## Introduzione

Si propone un metodo di progetto di motori IPM V-type con l'ausilio del tool di progettazione open-source SyR-e (Synchronous Reluctance, machines, - evolution). SyR-e è un codice sviluppato in Matlab che permette di creare diverse tipologie di macchine elettriche mediante analisi ad elementi finiti ed algoritmi di ottimizzazione multi-obiettivo.

## 1. Progettazione

L'applicazione finale è di tipo aeronautico, da ciò derivano esigenze di spazi e pesi. Sono ridotte in particolare le dimensioni radiali con un valore massimo di 180 mm del diametro esterno di statore e di 210 mm per il diametro totale di macchina. Il peso massimo è di 18 kg riferito alla struttura inclusa del sistema di raffreddamento. La potenza nominale target è di 90 kW, con la relativa coppia nominale di 145 Nm alla velocità di 5900 rpm. La potenza massima è di 120 kW con un valore di coppia pari a 194 Nm alla velocità nominale. È prevista una velocità massima di 7100 rpm.

Per mezzo di SyR-e si ottiene una prima struttura grazie ad una opzione, integrata nel programma, di progetto preliminare. Il risultato è un motore IPM a singolo strato che soddisfa le specifiche richieste in termini di coppia. Successivamente si modifica il rotore, da una geometria V-type a singolo strato ad una V-type a doppio strato, riconducendosi così alla configurazione proposta dalla tesi. Il modello AVALON-base è caratterizzato da un diametro di statore e di rotore rispettivamente di 180 mm e 130 mm, con una lunghezza del pac-

co attivo di 100 mm, raggiungendo un peso totale escluso l'housing di 17 kg, di cui i magneti corrispondono a 1,42 kg. La misura di coppia nominale è di 143 Nm con un'oscillazione picco-picco del 30%, e la corrente caratteristica ha un valore normalizzato rispetto l'ampiezza nominale di 2,15. Si considera la possibilità di aumentare il numero di coppie polari del motore in modo da alleggerire la macchina, ma in seguito si conserva il numero di coppie polari uguale a 4 utilizzato per il progetto di base.

## 2. Ottimizzazione

Si usa algoritmi di ottimizzazione per modificare il disegno di rotore del motore progettato, in modo da ridurre l'oscillazione di coppia. Gli algoritmi di ottimizzazione sono utili perché non sono noti dei principi analitici mediante cui definire una geometria del rotore più adatta di quella dedotta dalla progettazione iniziale.

Nella fase di ottimizzazione del progetto AVALON-base sorgono però delle difficoltà connesse al disegno di macchina. Quindi si cambiano alcuni dei criteri con cui viene costruito il rotore. L'obiettivo è quello di ridurre i casi in cui il controllo modifichi l'inclinazione delle barriere e se necessario tagliare la parte di barriera che si sovrappone all'albero, anziché forzare l'inclinazione dei magneti per ottenere una configurazione a V.

Al termine dell'ottimizzazione si migliora la caratteristica di ondulazione di coppia. In riferimento al modello ottimo AVALON-mode4 l'oscillazione picco-picco si riduce al 10% del valore medio. Mentre non si riesce ad aumentare la densità di coppia che caratterizza AVALON-base. Il parametro di rotore di maggiore rilievo per l'oscillazione di coppia risulta

la posizione dei magneti. La seconda variabile per importanza sembra essere lo spessore dei magneti e successivamente l'inclinazione delle barriere e la forma del ponticello tangenziale possono comunque influenzare la qualità della coppia prodotta dalla macchina.

### 3. Affinamenti

Si deve cambiare alcune caratteristiche del modello ottimizzato AVALON-mode4 al fine di aumentarne la resilienza alla smagnetizzazione. Il primo accorgimento preso è cambiare il materiale magnetico, la tecnologia scelta è Recoma 30HE. Si cambia poi il target di temperatura operativa dei magneti da  $180^{\circ}C$  a  $140^{\circ}C$ . Si determina così un rapporto tra la corrente smagnetizzante e la corrente caratteristica uguale a 2,7. Queste modifiche causano un peggioramento delle prestazioni meccaniche, per questo motivo si allunga il motore a 115 mm aumentando la coppia prodotta, ma a svantaggio del peso che aumenta a 18,2 kg. Si ottiene così il progetto definitivo AVALON-def1.

In parallelo una diversa strategia di progetto conduce ad un modello alternativo a quello appena discusso. Non si cambia il materiale magnetico N40EH o la temperatura di esercizio dei magneti di  $180^{\circ}C$ . Si tralascia il modello ottimo e si agisce direttamente sulla struttura iniziale AVALON-base. Si agisce sulla lunghezza dei magneti che diventano più corti in modo da ridurre le zone più critiche per la smagnetizzazione, ovvero le parti più vicine al traferro. E si interviene sulla configurazione del rotore, attraverso il taglio di uno strato. Così si ottiene una configurazione per cui uno strato di magneti è diviso in due parti isolate. Con queste modifiche si migliorano le caratteristiche magnetiche in analisi, ma il modello ottenuto AVALON-def2 risulta una macchina meno performante a confronto con il modello def1, avendo una densità di coppia più bassa e un'ondulazione di coppia più alta.

### 4. Analisi motori

Con analisi motori ci si riferisce ad alcuni test necessari per identificare le caratteristiche elettriche e meccaniche dei modelli definitivi. I test sono simu-

lazioni eseguite attraverso SyR-e, ma anche tramite un secondo programma chiamato Magnet. In questo modo si definiscono variabili utili per il controllo e si determina l'efficienza dei motori progettati. Per valutare il rendimento si calcolano perciò le perdite connesse al funzionamento, considerando oltre le perdite Joule anche l'effetto pelle e le perdite nel ferro.

### 5. Analisi termiche

Per concludere il progetto bisogna condurre le valutazioni termiche, le analisi termiche sono eseguite mediante Motor-CAD. I punti di funzionamento principali che si vogliono analizzare sono la condizione nominale e di sovraccarico. Le due modalità di lavoro sono studiate simultaneamente, inizialmente si caratterizza il regime termico associato al funzionamento nominale del motore e da questa condizione iniziale si avvia un transitorio in sovraccarico di una durata di 30 s.

### Conclusioni

Il risultato del progetto è la struttura AVALON-def1. Essa soddisfa il target di coppia di 145 Nm e di potenza nominale di 90 kW. Ha un alto rendimento uguale a 0,96 e un fattore di potenza pari a 0,88. Il valore di picco della corrente nominale è uguale a 250 A, mentre il valore di picco della tensione di linea è 490 V. Si prevede di conseguenza alla richiesta di sovraccarico una corrente massima di ampiezza 1,34 il valore nominale. A seguito delle analisi termiche, considerando il valore del coefficiente di carico termico di  $42 \text{ kW}/m^2$ , si valuta insufficiente un isolamento elettrico di classe H, imponendo invece un isolamento che tolleri la temperatura massima di  $220^{\circ}C$ . In Motor-CAD è possibile definire il peso totale del modello incluso del sistema di raffreddamento uguale a 22 kg. Esso risulta eccessivo superando il limite imposto da specifiche di 18 kg. A tal proposito si potrebbe riprogettare il sistema di raffreddamento in modo da estrarre più calore dalla macchina, così da aumentare il coefficiente di carico termico e di conseguenza la densità di coppia.