POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea in Ingegneria Elettrica

Tesi di Laurea Magistrale

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

Relatore:
prof. Gianmario Pellegrino
Correlatore:
dr. Simone Ferrari

Candidato:
Federico Sportelli

Dicembre 2020

Indice

Introduzione 4

1 Progettazione 6
- 1.1 Specifiche di progetto . . . 7
- 1.2 GUI SyR-e . . . 9
- 1.3 Progetto preliminare . . . 13
- 1.4 Motore IPM V-type doppio strato . . . 21
- 1.5 Specifica del numero di coppie polari . . . 23

2 Ottimizzazione 28
- 2.1 Utilizzo e funzionamento . . . 29
- 2.2 Modifica della fase di disegno del rotore . . . 31
- 2.3 Scelta delle variabili da ottimizzare . . . 37
- 2.4 Risultati ottimizzazione . . . 38
- 2.5 Modifica input ottimizzazione . . . 48
- 2.6 Confronto fra le geometrie ottime . . . 51

3 Affinamenti 54
- 3.1 Corrente caratteristica e smagnetizzante . . . 54
- 3.2 Specifica di coppia . . . 56
- 3.3 Riavvolgimento motore . . . 57
- 3.4 AVALON-def1 . . . 58
- 3.5 Modello alternativo . . . 59
- 3.6 AVALON-def2 . . . 61
- 3.7 Confronto fra la geometria ottima e definitiva . . . 63

4 Analisi motori 65
- 4.1 Test AVALON-def1 . . . 66
  - 4.1.1 Mappe di flusso . . . 66
  - 4.1.2 Effetto pelle . . . 70
  - 4.1.3 Perdite nel ferro . . . 72
  - 4.1.4 Mappe di efficienza . . . 73

4.2 Test AVALON-def2 75
4.2.1 Mappe di flusso 75
4.2.2 Effetto pelle 79
4.2.3 Perdite nel ferro 80
4.2.4 Mappe di efficienza 80
4.3 Confronto fra le geometrie definitive 82

5 Analisi termiche 84
5.1 Caratteristiche del sistema di raffreddamento 85
5.2 Input e risultati simulazione 85
5.3 AVALON-def3 90
5.4 Principali parametri modelli definitivi 93

Conclusioni 95

Bibliografia 97

Introduzione

I motori elettrici sono sempre più diffusi nei diversi settori della società, dal campo industriale alle applicazioni residenziali o alla mobilità. L'elettrificazione di apparecchi nelle diverse aree di utilizzo è una via imprescindibile per affrontare la sfida contemporanea del cambiamento climatico. Unitamente all'uso di risorse energetiche rinnovabili, si può condurre una transizione energetica dal combustibile fossile ad energie rinnovabili.

Se pensiamo all'elettrificazione della mobilità via terra, in particolare a mezzi di trasporto non alimentati via filo quindi soprattutto a macchine elettriche, la loro diffusione porta a una serie di vantaggi, tra cui: si riduce l'emissione di anidride carbonica e di ossidi di azoto a favore dell'ambiente e della popolazione che ci vive; diminuisce l'inquinamento acustico; e c'è anche un aspetto economico che porta ad allentare la dipendenza dal petrolio.

Inoltre il numero di autoveicoli è in costante aumento, si stima che attualmente nel 2020 ci siano 1,2 miliardi di macchine in circolazione per una popolazione mondiale di 7,5 miliardi. Non è pessimistico assumere che solo il 10% sia elettrica, ibrida o alimentata da gas naturale.

La mobilità aeronautica è certamente più complessa di quella stradale, anche in termini di rischi nel caso di malfunzionamento. Tuttavia l'elettrificazione sta penetrando anche in quest'area, si possono osservare i primi elicotteri e piccoli aerei leggeri totalmente elettrici.

La propulsione elettrica è più efficiente, senza emissioni e più silenziosa. Il sistema di trazione è più semplice a confronto di una trazione da motore tradizionale, nonché più affidabile e con meno esigenze di manutenzione. Un grande ostacolo è la riserva energetica ossia l'autonomia delle batterie. Inoltre la sorgente elettrica è spesso ingombrante e pesante, ma anche inaffidabile e con prestazioni incostanti.

Focalizzandosi sul motore elettrico, ce ne sono diverse tipologie. La tesi qui proposta si basa su una macchina a funzionamento in corrente alternata in modo sincrono al campo magnetico rotante. Il campo magnetico è prodotto da magneti permanenti collocati internamente al rotore, per questa ragione è chiamata macchina IPM (Interior Permanent Magnet). Si propone una geometria di rotore in cui ci sono due strati di magneti, ciascuno con una forma a V e così V-type. Spesso ci si riferisce ai motori a magneti permanenti anche con l'accezione motori brushless.

Le macchine IPM presentano un'alta densità di coppia e ottimi rendimenti. Il posizionamento interno al rotore dei magneti li rende solidi con la struttura e favorisce la regolazione di flusso. Una difficoltà connessa a questa tipologia di macchina è la gestione del guasto e della smagnetizzazione. C'è anche uno svantaggio economico relativo ai magneti permanenti, spesso molto costosi.

Si propone un metodo di progetto di motori IPM V-type con l'ausilio del tool di progettazione open-source SyR-e [1]. SyR-e è un codice sviluppato in Matlab (Matrix Laboratory) che permette di creare diverse tipologie di macchine elettriche mediante analisi ad elementi finiti ed algoritmi di ottimizzazione multi-obiettivo. Il suo utilizzo necessita l'installazione di Matlab e FEMM (Finite Element Method Magnetics); il primo è un ambiente per il calcolo numerico e l'analisi statistica scritto in C, mentre il secondo è un programma che permette di eseguire simulazioni ad elementi finiti di campo magnetico. Non è necessario conoscere entrambi i programmi, ma si crede che sia consigliata una base nell'utilizzo di Matlab. Si accede al tool SyR-e attraverso Matlab che quindi bisogna avviare ed utilizzare, in modo più o meno approfondito in relazione a quanto l'utente è pratico del programma. FEMM invece non è mai eseguito direttamente dall'utente SyR-e perché è lanciato all'occasione in modo automatico dal tool.

Il seguente elaborato è suddiviso in cinque capitoli: i primi tre capitoli descrivono le scelte e il modo in cui si progetta il motore; gli ultimi due sono invece dedicati alle analisi elettromagnetiche e termiche della struttura creata. Il primo capitolo si svolge sul progetto preliminare del motore, dalle specifiche richieste per l'applicazione si deduce una struttura base di macchina elettrica. Il secondo capitolo è incentrato sull'algoritmo di ottimizzazione, accennando al funzionamento su cui si basa per riprodurre i risultati e riportando in modo approfondito i passaggi seguiti per migliorare il progetto preliminare di macchina. In seguito nel terzo capitolo si spiega perché sono apportate delle modifiche al modello ricavato attraverso l'ottimizzazione. Questi affinamenti sono eseguiti coerentemente a due diverse strategie e così si ottengono due possibili strutture di motore.

Nel quarto capitolo entrambe le strutture progettate sono esaminate in dettaglio. Tra le analisi svolte c'è anche il calcolo delle perdite nel ferro, per cui si preferisce l'utilizzo di Magnet. Questo è un programma di simulazione 2D/3D che utilizza tecniche ad elementi finiti per risolvere differenti problemi. Così come per FEMM anche in questo caso non è un utilizzo diretto del programma, ma è eseguito in modo automatico attraverso SyR-e. Il quinto capitolo è dedicato alle analisi termiche dei motori, queste sono eseguite mediante il programma Motor-CAD.

Attualmente non c'è un metodo progettuale consolidato di motori IPM V-type doppio strato. Per questo motivo le analisi ad elementi finiti e gli algoritmi di ottimizzazioni non sono un mezzo di conferma di possibili valutazioni analitiche, ma divengono uno strumento propedeutico per la realizzazione stessa del motore.

Capitolo 1

Progettazione

La progettazione di un motore IPM V-type consiste nel definirne le caratteristiche elettriche e meccaniche che permettano di soddisfare le richieste del committente. Le richieste sono associate all'applicazione finale della macchina e sono gli obiettivi del progetto. L'obiettivo può essere una richiesta di potenza in termini di coppia e velocità. Ci sono dei vincoli da rispettare in relazione all'ambiente in cui si inserisce l'applicazione. Il funzionamento nel deserto comporta delle difficoltà differenti dal funzionamento di un motore in regioni artiche. Allo stesso modo si può distinguere applicazioni in cui il peso e lo spazio sono delle richieste prioritarie, si pensi al campo aeronautico, piuttosto che sistemi in cui non ha importanza l'ingombro, ma si richiede molta potenza, come può accadere nel campo energetico della generazione elettrica.

Per quanto riguarda le caratteristiche del progetto da definire ci sono quelle elettriche come ad esempio tensione o corrente nominale, e quelle meccaniche che sono le dimensioni fisiche effettive, come lunghezza del pacco attivo o il diametro esterno del rotore. Per progettare un motore bisogna definirne anche i materiali. In prima approssimazione si possono distinguere due modi per affrontare la scelta. Da una parte si può scegliere di minimizzare il costo del progetto con materiali possibilmente più economici, dall'altra in maniera opposta disinteressarsi del costo e preferire materiali di prima scelta per cercare di ottenere un progetto ottimale. Il modo di scegliere è quindi legato al capitale disponibile.

Il disegno di una macchina elettrica spesso consiste in un processo iterativo. Dalle specifiche di progetto si definisce una prima struttura, un motore con delle dimensioni finite, e in seguito si verificano le prestazioni elettromeccaniche. Difficilmente il primo modello di macchina ottenuto soddisferà a pieno gli obiettivi predisposti. Così è necessario correggere il disegno di macchina, ad esempio allungandola, e controllare i nuovi risultati. Una volta ottenute delle prestazioni elettromeccaniche idonee per l'applicazione, si procede nell'analizzare le caratteristiche termiche del motore. Nuovamente potrebbe esserci la possibilità che la struttura non sia adeguata da un punto di vista termico e la necessità di apportare dei cambiamenti. Per

progettare una macchina elettrica bisogna conoscere la tecnologia in studio, ma è anche importante l'esperienza. Per ottenere un buon modello può essere vantaggioso sfruttare disegni preesistenti e da essi definire una nuova macchina tramite similitudine. Per similitudine si fa riferimento al metodo che sfrutta coefficiente di proporzione per definire nuovi motori da modelli esistenti, ad esempio raddoppiando il raggio al traferro e la lunghezza del rotore, come se si eseguisse uno "zoom" della macchina esistente.

Il progetto qui esposto è elaborato tramite l'utilizzo di SyR-e. In questo modo la progettazione è notevolmente semplificata grazie alla commistione di un'interfaccia grafica e algoritmi automatizzati. 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 al fine di migliorare la qualità della coppia prodotta si modifica il rotore, da una geometria V-type a singolo strato ad una V-type a doppio strato. In seguito si considera la possibilità di aumentare il numero di coppie polari del motore in modo da alleggerire la macchina.

Una volta determinato un modello, tramite processi di ottimizzazione si cerca di migliorarne le prestazioni meccaniche. Ottenere delle prestazioni più vantaggiose può significare produrre una coppia con minore ondulazione. Allo stesso tempo può voler dire ridurre la quantità di magnete o aumentare la coppia a parità di ingombro. In quest'ultimo caso, è possibile ridurre la dimensione assiale della macchina, riducendone il peso, e garantendo comunque la specifica di coppia richiesta.

1.1 Specifiche di progetto

In Tabella 1.1 sono racchiusi i dati del progetto. L'applicazione finale è di tipo aeronautico, da ciò derivano esigenze di spazi e pesi. L'obiettivo del peso infatti è molto stringente, con un valore massimo di 18 kg riferito alla struttura definitiva del motore, inclusa del sistema di raffreddamento. Anche le dimensioni della macchina sono ridotte, in particolare le dimensioni radiali con un valore massimo di 180 mm del diametro esterno dello statore e di 210 mm per il diametro totale di macchina.

Si prevede un funzionamento a temperature elevate dovendo così ammettere un isolamento di classe H per il materiale conduttore, identificato con il rame. L'avvolgimento sarà di tipo hairpin, una modalità di avvolgimento che favorisce alti coefficienti di riempimento cava, fino valori uguali a 0,7. I magneti sono di alta qualità ed ad alta densità di potenza, le due possibilità sono magneti al neodimio (NdFeB) o samario (SmCo). Queste classi di materiali in terre rare sono sviluppate per resistere negli ambienti più duri; sono caratterizzati da un'alta resistenza alla temperatura e alla corrosione. Dai materiali possibili per il progetto è evidente come non sia importante ottenere un'applicazione competitiva economicamente.

Il sistema di raffreddamento prevede l'utilizzo di acqua ed etilene con una temperatura di ingresso prevista pari a $85°C$. Il campo di funzionamento del motore

Tabella 1.1: Specifiche di progetto

Grandezza	Unità	Valore
Tensione DC-link	V	650
Numero fasi		3
Velocità nominale	rpm	5900
Velocità massima	rpm	7100
Potenza nominale	kW	90
Potenza massima (30 s)	kW	120
Coppia nominale	Nm	145
Coppia massima	Nm	194
Diametro massimo statore (solo parti attive)	mm	180
Lunghezza massima (solo parti attive)	mm	180
Diametro massimo esterno (con housing)	mm	210
Lunghezza massima esterna (con housing)	mm	300
Peso massimo (solo parti attive)	kg	12
Peso massimo motore (con housing)	kg	18
Fluido di raffreddamento		Acqua/Glicole al 50/50
Temperatura di ingresso	$°C$	85
Materiale conduttore		Rame, classe H
Tipologia di avvolgimento		Hairpin

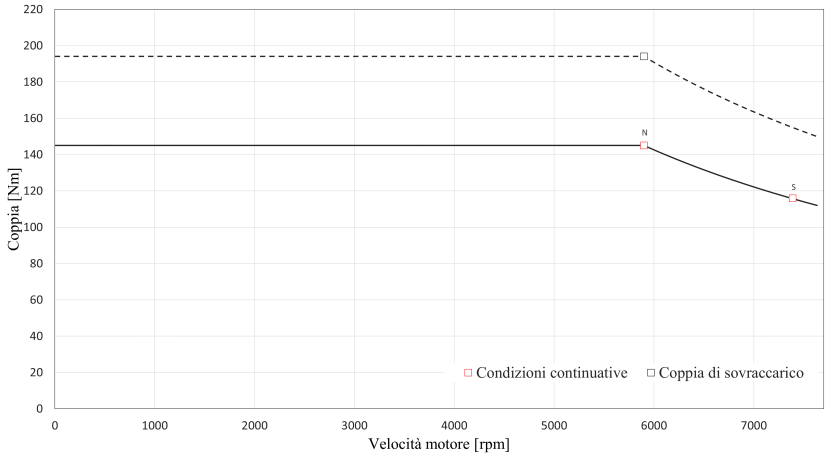

Figura 1.1: Target motore

è mostrato in Figura 1.1. La potenza nominale 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. É prevista una velocità massima di 7100 rpm.

1.2 GUI SyR-e

L'interfaccia grafica (Graphical User Interface) di SyR-e, ovvero la possibilità di eseguire delle azioni tramite icone grafiche e non attraverso un'interfaccia a riga di comando, rende intuitivo l'utilizzo del programma. In Figura 1.2 è evidenziato come appare il programma per una delle sezioni comprese in SyR-e. In alto nel riquadro si distinguono diverse aree:

- main data;
- geometry;
- options;
- windings;
- materials;
- optimization;
- simulation;
- Motor-CAD.

Le prime cinque sezioni da "Main Data" a "Materials" permettono di progettare il motore. Successivamente ci sono la pagina per eseguire processi di ottimizzazione, la pagina per eseguire alcune simulazioni ed infine una pagina dedicata all'export del modello in un secondo programma, ossia Motor-CAD.

Ci si sofferma sulle sezioni dedicate al progetto. Brevemente si elencano le caratteristiche richieste nelle diverse pagine, per un motore V-type. Le prime scelte da affrontare sono in "Main Data". É possibile impostare:

- numero di coppie polari;
- numero di cave per polo per fase;
- spessore del traferro;
- raggio esterno di statore;
- raggio esterno di rotore;
- raggio d'albero;
- lunghezza del rotore;
- tipologia di rotore.

La seconda sezione "Geometry" in Figura 1.2, è dedicata alla geometria dello statore e del rotore. Alcuni parametri sono indicati nella Figura 1.3. Quelli relativi allo statore influenzano l'aspetto delle cave. Le variabili che fanno riferimento al dente indirettamente influenzano anch'esse la cava. I dati per lo statore sono:

- lunghezza del dente;
- larghezza del dente;
- forma della cava;
- dimensione apertura cava;
- lunghezza del piede di cava;
- angolo connessione fianco-scarpa di cava;
- smussatura fondo cava.

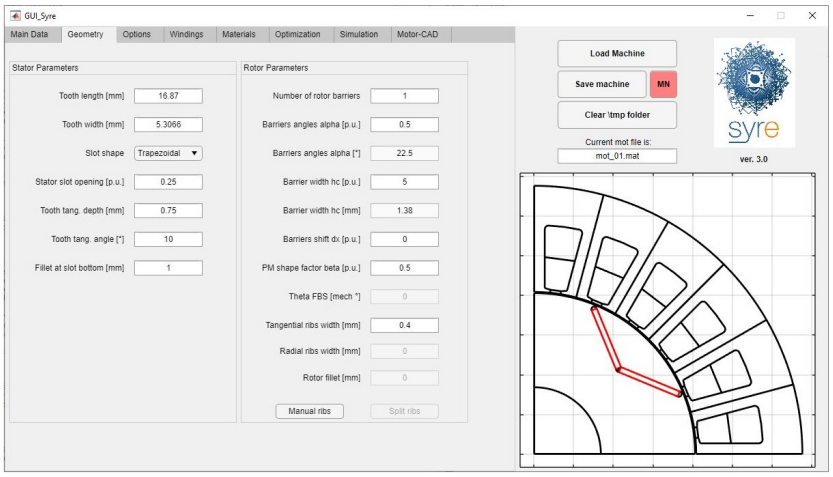

Figura 1.2: GUI Syre, Geometry

Il rotore puo' essere caratterizzato da più strati di magnete. Si deve scegliere le caratteristiche di ogni strato, come posizione, inclinazione o spessore. Le variabili di rotore presenti nella sezione "Geometry" sono:

- numero di strati;
- posizione barriera;
- spessore magnete;
- forma ponticello tangenziale;
- inclinazione barriera;
- spessore ponticello tangenziale.

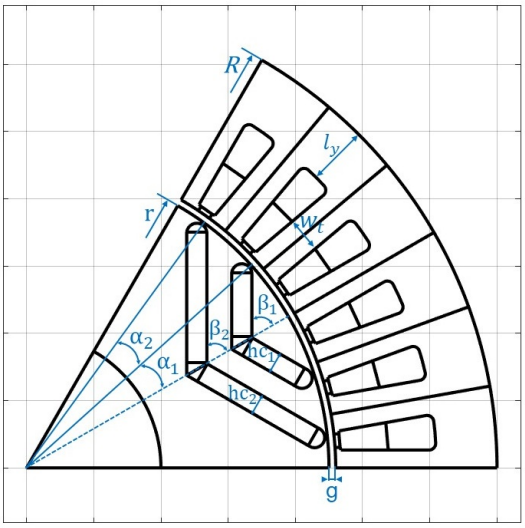

Figura 1.3: Parametri inerenti alla geometria di macchina

Nella sezione "Options" si racchiudono parametri relativi a diversi aspetti della macchina, non solo strutturali. Ci sono parametri termici come ad esempio il coefficiente di carico termico ed altri invece come la tolleranza meccanica che influenzano la struttura. É anche possibile controllare variabili relative alle caratteristiche delle simulazioni eseguibili attraverso SyR-e. Inoltre è presente una sottosezione dedicata al progetto di magneti per macchine sincrone a riluttanza assistite da magneti, i dati richiesti in input da questa sottosezione non vengono riportati nell'elenco seguente. I parametri presenti in "Options" sono:

- coefficiente di carico termico;
- temperatura del rame;
- temperatura della superficie esterna di statore;
- mesh;
- mesh-mooa;
- velocità massima;
- tolleranza meccanica.

La quarta area, "Windings" è dedicata al progetto dell'avvolgimento. É anche presente una sottosezione per condurre delle analisi sull'effetto pelle inerenti alla geometria dei conduttori in cava. Trascurando la sottosezione dedicata all'effetto pelle, le scelte possibili sono:

- coefficiente di riempimento cava;
- numero di spire in serie per fase;
- raccorciamento del passo;
- tipo di avvolgimento;
- numero di cave simulate;
- possibilità multi-trifase.

L'ultima sezione dedicata alla progettazione è quella dei materiali. In questa pagina si scelgono i materiali dei diversi componenti:

- conduttore;
- nucleo di statore;
- nucleo di rotore;
- magneti;
- albero.

Dopo che si è progettato un motore, attraverso la pagina "Simulation" si può eseguire delle simulazioni ad elementi finiti. In Figura 1.4 è illustrata la pagina dedicata. Gli input richiesti possono variare in funzione del tipo di analisi scelta. Sono a disposizione dell'utente diverse analisi tra cui: calcolo di coppia; mappe di flusso; calcolo dei valori di induzione magnetica in diverse zone del motore; perdite nel ferro in singole condizioni di lavoro o mappe di perdita; calcolo di corrente caratteristica; e analisi di smagnetizzazione.

La simulazione che valuta la misura di coppia è definita "Single point", scegliendo per questo tipo di analisi un numero di posizioni di rotore pari a 20 ed una escursione

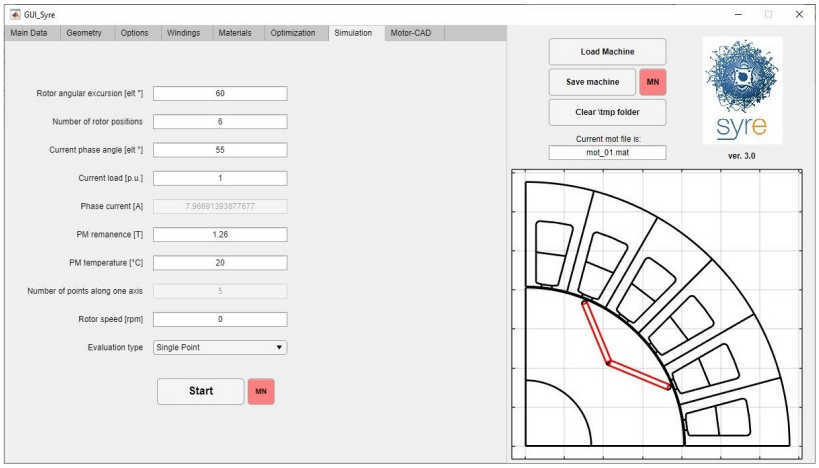

Figura 1.4: GUI Syre, Simulation

del rotore di 60 gradi elettrici, in meno di un minuto si ottiene il risultato. Questo è un notevole vantaggio di SyR-e perché ha il modo di eseguire delle valutazioni tramite metodi ad elementi finiti in breve tempo. La durata necessaria per le simulazioni dipende dal tipo scelta, ma anche per le analisi più lunghe come per le mappe di flusso i tempi possono essere ristretti ad alcune ore.

L'esempio in figura del tipo "Single Point" per una data corrente dq, che è l'input della simulazione, calcola non solo la coppia erogabile dal motore, ma anche il fattore di potenza e i flussi in assi d e q. Nel complesso per eseguire questa analisi elettromagnetica è necessario assegnare:

- l'escursione angolare del rotore in angoli elettrici;
- numero di posizioni del rotore da campionare;
- l'angolo di fase della corrente;
- l'ampiezza della corrente;
- la temperatura target dei magneti.

Facendo ora un passo indietro alla fase di progetto bisogna chiedersi come scegliere le caratteristiche che definiscono un motore. A questa domanda dà un ottima risposta il tool "Preliminary design".

1.3 Progetto preliminare

Con progetto preliminare si fa in particolare riferimento ad un tool presente in SyR-e denominato "Preliminary Design". Lo si utilizza tramite la prima pagina "Main Data", l'interfaccia grafica appare come mostrato in Figura 1.5.

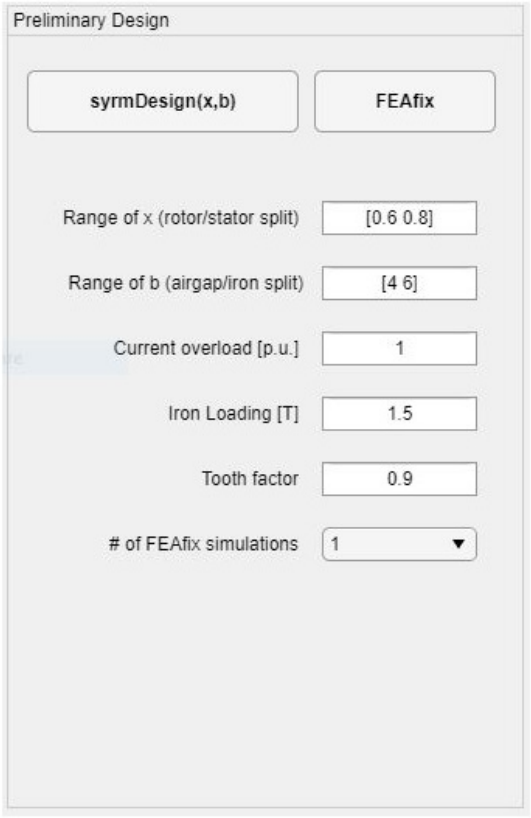

Figura 1.5: Tool progetto preliminare

Dall'immagine si notano due comandi principali: "syrmDesign(x,b)" e "FEAfix". In basso ci sono diversi parametri in funzione dei quali è calcolato il risultato. Il risultato è un grafico, riportato in Figura 1.6, che rappresenta le prestazioni di diverse macchine in funzione di due parametri adimensionali. Ogni punto del piano corrisponde ad una diversa macchina che rispetta le specifiche inserite.

Il primo comando "syrmDesign(x,b)" esegue il progetto preliminare e produce le curve riportate in Figura 1.6. Il secondo comando "FEAfix" può essere utilizzato per correggere i risultati che si otterrebbero con il solo utilizzo del primo comando. Infatti, se il primo esegue il progetto in accordo ad un algoritmo e i risultati sono il prodotto di equazioni analitiche; tramite il secondo comando si processano anche delle simulazioni ad elementi finiti e da queste si leggono i risultati richiesti. Il numero di simulazioni eseguite è scelto dall'utente. Se uguale ad uno, viene

lanciata una sola simulazione con una macchina che ha per caratteristiche quelle corrispondenti al centro dei due assi del grafico in Figura 1.6. Se uguale a quattro si simulano quattro macchine. Le caratteristiche sono quelle corrispondenti ai quattro vertici del rettangolo che ha per lati gli assi del grafico, ossia i punti relativi ai valori minimo e massimo delle ascisse e delle ordinate. Le simulazioni ad elementi finiti aumentano il tempo necessario per ottenere il risultato del progetto preliminare, ma ne incrementano l'accuratezza. I valori in ascissa e ordinata corrispondono a due parametri adimensionali in funzione dei quali si realizza il progetto di macchina. Le espressioni dei due sono le seguenti:

$$x = \frac{r}{R} \tag{1.1}$$

$$b = \frac{hc}{g} \tag{1.2}$$

Nella prima equazione si definisce il valore delle ascisse x come rapporto tra il raggio esterno di rotore r e quello esterno di statore R. Mentre la seconda equazione definisce il valore delle ordinate b, uguale al rapporto tra lo spessore dei magneti hc e lo spessore del traferro g.

Ci sono cinque parametri in input richiesti dal tool:

- x; imposto il valore del raggio di statore, al crescere del parametro si hanno macchine con un rotore più grande;
- b; scelta la dimensione del traferro, per valori più bassi di b si ottengono motori con magneti più sottili;
- current overload è il valore di corrente scelto per i calcoli e le simulazioni eseguite dall'algoritmo di progetto preliminare. Scelto uguale ad uno le macchine sono valutate per la corrente nominale;
- iron loading B_{Fe} è il valore di densità di campo magnetico a vuoto che si assume nel giogo di statore;
- tooth factor k_t è il rapporto tra la densità di campo magnetico presente nel giogo di statore e quella presente nel dente. Un valore minore di uno significa che nel dente ci sono valori di induzione magnetica più alti che nel giogo.

Nel paragrafo precedente descrivendo il programma SyR-e è stato anche spiegato quali sono alcune delle scelte collegate al disegno di un motore. Non è semplice determinare il valore di ogni singola variabile senza l'utilizzo di un metodo, soprattutto se non si ha esperienza di motori sviluppati in precedenza e se non si progetta per similitudine. Tramite questo tool è immediato ottenere una struttura di motore scegliendo due valori, x e b, coordinate del grafico in Figura 1.6. Inoltre come si

evince dall'immagine, sono presenti due famiglie di curve. Una, in rosso, rappresenta la previsione della coppia erogabile dal motore che ha per caratteristiche quelle identificate dal punto corrispondente nel grafico; una seconda, in blu, indica il valore di corrente caratteristica in rapporto alla corrente nominale.

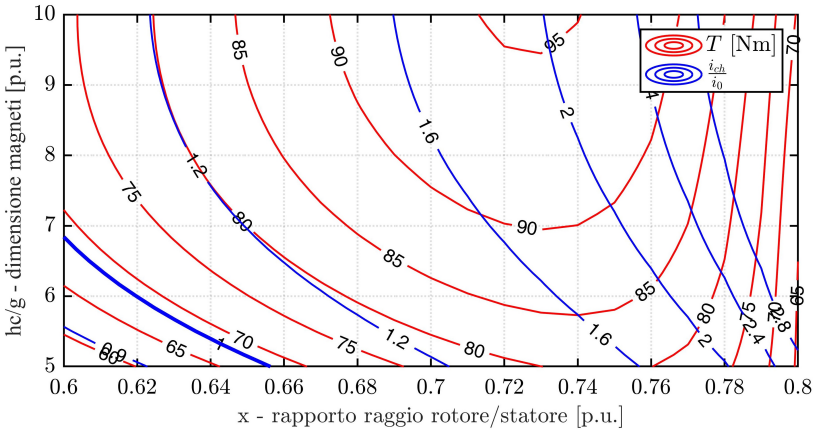

Figura 1.6: Esempio risultato progetto preliminare

Scelto un punto, ad esempio in funzione del target di coppia, si ottiene come risultato un motore elettrico con la propria geometria di statore e di rotore. Allo stesso tempo tramite il "Preliminary Design" si ha una prospettiva di come variano i valori di coppia e corrente caratteristica in funzione delle due variabili: spessore del magnete e raggio al traferro. E quindi come cambia la corrente caratteristica al crescere della variabile x, ossia per motori con un raggio al traferro più grande e cave più piccole; oppure come differisce la coppia erogabile al crescere della variabile b, ossia al crescere dello spessore del magnete.

La famiglia di motori elettrici è generata in accordo al metodo di progetto per motori IPM a singolo strato [2]. Il processo di disegno di una macchina si può studiare suddividendolo in tre parti: calcolo del flusso concatenato a vuoto dei magneti; realizzazione della geometria di cava; valutazione delle prestazioni elettriche e meccaniche.

La prima parte del processo è legata implicitamente al disegno di rotore. Per definire il flusso prodotto dai magneti è inevitabile associarli ad un rotore. E soprattutto definire l'inclinazione e la posizione delle barriere di flusso dove viene collocato il materiale magnetico. L'utente decide lo spessore dei magneti, ma non specifica nulla a riguardo delle variabili spaziali. L'algoritmo del "Preliminary Design" progetta il rotore in modo tale che i magneti siano il più possibile inclinati, aumentando l'anisotropia del rotore, e sceglie la posizione cosicché la distanza tra due barriere di due poli consecutivi sia uguale allo spessore di un dente di statore. Una volta che il disegno del rotore è completo è anche determinata l'induzione magnetica al traferro generata dai magneti. Assumendo che l'induzione magnetica

al traferro generata dai magneti abbia una forma ad onda quadra che si espanda lungo tutto l'arco corrispondente alla posizione dei magneti, si formula il flusso concatenato:

$$\lambda_{PM} = \frac{2\,r\,L\,k_w\,N_s}{p} \cdot \left[\frac{4}{\pi} \cdot \sin(p\,\alpha) \cdot B_{sq}\right] \tag{1.3}$$

Nella parentesi quadra è calcolato il picco della componente fondamentale sinusoidale associata all'onda quadra di induzione magnetica. Il termine B_{sq} si riferisce al valore dell'onda quadra. Quest'ultimo risulta una funzione delle caratteristiche geometriche di rotore e del traferro, si tralascia l'espressione analitica utilizzata dall'algoritmo di progetto. In (1.3) si legge anche il raggio esterno di rotore r; la lunghezza del rotore L; il coefficiente di avvolgimento k_w; il numero di spire in serie per fase N_s; e il numero di coppie polari p. L'argomento della funzione seno $p\,\alpha$ indica metà dell'angolo elettrico sotteso dallo strato di magneti.

Prestando attenzione a come si è ottenuto il valore del flusso concatenato al traferro prodotto dai magneti potrebbe sembrare che ci sia un contrasto con la filosofia di progetto nel disegno del rotore. Ossia si utilizza lo spessore del dente di statore come misura per posizionare i magneti all'interno del rotore, ma lo statore non è ancora definito. Questa è una contraddizione solo apparente. Si pensi ad esempio ad uno dei valori di raggio esterno di rotore (x) e spessore dei magneti (b) compresi nell'intervallo dato in input dall'utente, Figura 1.5. L'algoritmo, per questi valori, calcola un insieme di possibili geometrie di rotore ipotizzando diverse posizioni per i magneti. Per ciascun rotore valuta la densità di campo al traferro e così la corrispondente larghezza del dente di statore. Infine in questo insieme sceglie una sola macchina che risulta più affine con il criterio di realizzazione del rotore spiegato. Ossia per cui la larghezza del dente e la distanza tra due barriere di due poli consecutivi sia uguale.

La geometria di cava è realizzata dopo che si sono definite le dimensioni del dente, spessore e altezza, e quelle del giogo di statore. Per calcolare la larghezza del dente w_t si eguaglia il valore di flusso imposto nel componente con quello presente nel traferro lungo un passo di dentatura:

$$w_t = \frac{2\,\pi\,r}{6\,p\,q}\,k_t\,\frac{B_{sq}}{B_{Fe}} \tag{1.4}$$

Il valore di densità di campo B_{sq} è stato calcolato. Il valore di induzione magnetica nel giogo di statore B_{Fe} è scelto dall'utente ed imposto come input, allo stesso modo dell'induzione magnetica nel dente imposta tramite il coefficiente k_t. Il numero di coppie polari p e il numero di cave per polo per fase q sono fissate dal progettista per tutta la famiglia di macchine.

Con un procedimento analogo si calcola la lunghezza del giogo di statore l_y in modo che il flusso da esso condotto sia uguale a metà di quello presente al traferro:

$$l_y = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{r}{p} \cdot \frac{B_{sq}}{B_{Fe}} \cdot \left(\alpha \frac{2p}{\pi} \right) \tag{1.5}$$

Dopo aver calcolato la lunghezza del giogo di statore si può definire la lunghezza del dente l_t. Infatti il raggio esterno di statore è fissato così come lo spessore del traferro g, perciò per differenza si ottiene la dimensione del dente cercata:

$$l_t = R - r - g - l_y \tag{1.6}$$

Per disegnare la cava, non sono sufficienti le informazioni di larghezza e altezza, l'utente deve specificare il tipo di cava desiderato, ad esempio con i fianchi paralleli, e ulteriori dettagli come la lunghezza del piede di cava. Tutte le caratteristiche necessarie sono quelle descritte nel paragrafo precedente, presenti nella sezione di statore in SyR-e. L'algoritmo calcola in funzione della geometria di rotore l'altezza e la larghezza di cava, ma le altre caratteristiche sono una scelta del progettista. Queste ultime saranno fisse per tutta la famiglia di macchine ottenuta dal "Preliminary Design".

Così la cava è definita e perciò lo è la geometria dello statore. La valutazione delle prestazioni elettriche e meccaniche consiste nel determinare il valore di coppia e corrente caratteristica del motore. Per eseguire queste valutazioni si utilizza il seguente modello:

$$\begin{cases} \lambda_d = \lambda_{PM} - L_d \, i_0 \, \sin(\gamma) \\ \lambda_q = L_q \, i_0 \, \cos(\gamma) \end{cases} \tag{1.7}$$

In (1.7) è descritto il modello magnetico del motore IPM. λ_d e λ_q rappresentano i flussi concatenati a statore lungo l'asse d e q rispettivamente. Si nota la corrente nominale i_0 e l'induttanza in asse d L_d e in asse q L_q. L'argomento delle funzioni seno e coseno γ è l'angolo di fase della corrente misurato rispetto l'asse q. Tutte le grandezze sono note. In particolare la corrente nominale risulta definita dall'equazione seguente:

$$i_0 = \sqrt{k_j \cdot \frac{k_{cu}}{\rho} \cdot \frac{L}{L + l_{end}} \cdot \frac{\pi \, R \, A_{slots}}{9 \, N_s^2}} \tag{1.8}$$

Il valore della corrente è funzione di diverse variabili tra cui: il coefficiente di carico termico k_j; coefficiente di riempimento cava k_{cu}; la resistività del rame ρ; la lunghezza delle testate l_{end}; il raggio esterno di statore R; l'area delle cave A_{slots}. L'espressione della corrente nominale è ricavata per inversione dall'equazione che definisce il coefficiente di carico termico. L'espressione del coefficiente k_j è infatti:

$$k_j = \frac{\frac{3}{2} \, R_s \, i_0^2}{2 \, \pi \, R \, L} \tag{1.9}$$

La coppia T e la corrente caratteristica i_{ch} sono calcolate come segue:

$$T = \frac{3}{2}\, p \left[\lambda_{PM}\, i_0\, \cos(\gamma) \, + (L_q - L_d)\, i_0^2\, \frac{\sin(2\gamma)}{2} \right] \tag{1.10}$$

$$i_{ch} = \frac{\lambda_{PM}}{L_d} \tag{1.11}$$

In modo iterativo il "Preliminary Design" genera una macchina per ogni coppia di valori x,b. Infine racchiude i calcoli eseguiti nelle curve riportate in Figura 1.6. I motori ottenuti differiscono tra loro per geometria di rotore e statore, perché hanno diversi raggi di rotore e spessori dei magneti. D'altra parte l'insieme ottenuto è omogeneo rispetto molte caratteristiche come: p; q; spessore al traferro; R; L; forma della cava; dimensione apertura cava; coefficiente di carico termico k_j; N_s. Tutte le caratteristiche in comune e fisse occorre inserirle attraverso le rispettive sezioni nel programma SyR-e prima di selezionare il tool del progetto preliminare. Sebbene il tool sia efficace nel progettare un valido modello di partenza, non sono sufficienti i dati in input del "Preliminary Design" per determinare un motore, ma è implicito che si facciano diverse scelte relative alle caratteristiche appena discusse che risultano fisse per tutta la famiglia di motori generata.

Tabella 1.2: Scelte di progetto motore IPM

Grandezza	Simbolo	Unità	Valore
Numero di coppie polari	p		4
Numero di cave per polo per fase	q		2
Spessore del traferro	g	mm	0,50
Raggio esterno di statore	R	mm	90,00
Lunghezza del rotore	L	mm	100,00
Forma cava			Rettangolare
Apertura cava		$p.u.$	0,25
Lunghezza del piede cava		mm	0,75
Coefficiente di carico termico	k_j	kW/m^2	40
Target temperatura rame	θ_{cu}	$°C$	180
Target temperatura magnete	θ_{PM}	$°C$	180
Ferro			M250-35A
Magnete			N40EH

Le scelte di progetto fatte per lo svolgimento di questa tesi sono racchiuse in Tabella 1.2. Nella Tabella 1.3 sono riportati i dati in input per il tool "Preliminary Design". In Figura 1.7 il risultato del tool, al centro del grafico è evidenziato il punto caratterizzante la macchina che è stata simulata con il programma FEMM tramite

Tabella 1.3: Input progetto preliminare

Grandezza	Unità	Valore
Intervallo variabile x		[0,6 0,8]
Intervallo variabile b		[5 10]
Valore di corrente	*p.u.*	1
Induzione magnetica nel ferro	T	1,5
Coefficiente k_t		0,9
Numero di simulazioni FEAfix		1

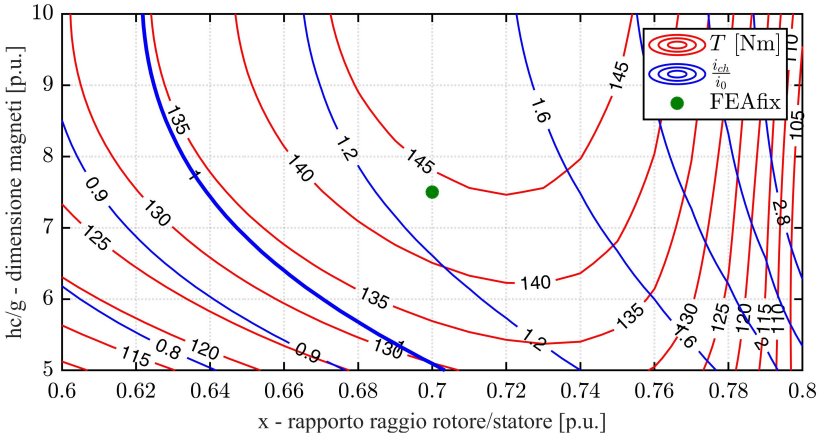

Figura 1.7: Risultato progetto preliminare

elementi finiti. Più ci si allontana dal punto evidenziato più i risultati possono ammettere un errore. Per questa ragione le curve rappresentate sono un buon riferimento, ma la macchina scelta sarà rianalizzata in dettaglio tramite simulazione ad elementi finiti.

Si seleziona in funzione del target di coppia di 145 Nm il punto di coordinate (0,725; 8). La geometria del motore ottenuta è in Figura 1.8. É stato determinato un motore elettrico IPM V-type a singolo strato. I valori ottenuti dal dimensionamento sono riportati in Tabella 1.4. Così si possono leggere il valore di α e β che insieme agli input r e hc definiscono la geometria di rotore. In particolare dall'immagine in Figura 1.8 si evidenzia la strategia di disegno utilizzata: il ponticello tangenziale della barriera, ossia l'estremo vicino al traferro, è allineato con la cava di statore; l'inclinazione della barriera è la massima accettabile per una geometria a V. Massima in quanto fissata la posizione α, immaginando di "allungare" la V, i magneti fuoriuscirebbero dal rotore verso l'albero. Per quanto riguarda lo statore si sono ottenuti i valori l_t e w_t del dente.

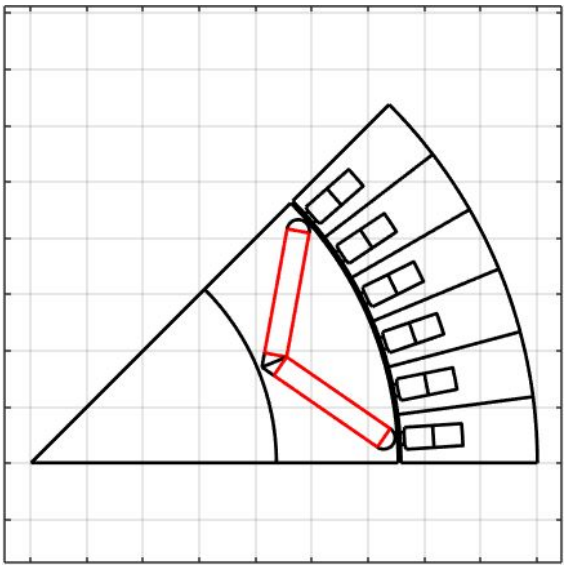

Figura 1.8: Motore IPM V-type singolo strato

Tabella 1.4: Parametri mot IPM V-type singolo strato

Grandezza	Simbolo	Unità	Valore
Raggio esterno di rotore	r	mm	65,25
Raggio d'albero		mm	43,60
Lunghezza dente	l_t	mm	11,08
Larghezza dente	w_t	mm	4,81
Posizione barriera	α	$^\circ$	18,45
Spessore magnete	hc	mm	4,00
Inclinazione barriera	β	$^\circ$	56,25
Peso macchina		kg	16,24
Peso magnete		kg	1,07
Coppia	T	Nm	132
Corrente nominale	i_0	A	135
Corrente caratteristica	i_{ch}	A	210
Ondulazione di coppia picco-picco	$\Delta T_{p_k p_k}$	Nm	60

Si procede nel confermare le previsioni del tool attraverso analisi ad elementi finiti. Le impostazioni delle simulazioni sono controllate nella rispettiva sezione in SyR-e "Simulation". Le analisi sono condotte per una escursione del rotore pari a 60 gradi elettrici ed un numero di posizioni campionate uguale a 20. L'angolo di fase della corrente è imposto di 135 gradi rispetto l'asse d e la temperatura operativa dei magneti è di $180°C$. I risultati delle prove si leggono in Tabella 1.4. La coppia risultante è inferiore della previsione di 145 Nm, ma in particolare presenta

un'ondulazione picco-picco del 45% rispetto il valore medio. La previsione di corrente caratteristica pari a 1,5 volte la corrente nominale è confermata dalla simulazione.

In Figura 1.9 è illustrata la distribuzione di densità di campo magnetico a vuoto del motore. Nel giogo di statore sono presenti zone con valori massimi di induzione magnetica pari a 1,7 T. Nei denti di statore invece, si riscontrano zone con valori massimi di densità di campo pari a 1,8 T. Sebbene il rapporto non sia esattamente di 0,9 l'obiettivo di ottenere dei valori di induzione magnetica maggiori nei denti di statore piuttosto che nel giogo, in modo tale che saturino prima di quest'ultimo, è raggiunto. Non si evince dal risultato illustrato, ma al traferro si ha una induzione magnetica con una forma circa ad onda quadra di un valore uguale a 1,3 T, alla quale, secondo (1.3), corrisponde una componente fondamentale sinusoidale con un ampiezza di 1,6 T. Si può anche notare dalla Figura 1.9 che i ponticelli tangenziali sono saturi come da ipotesi di progetto.

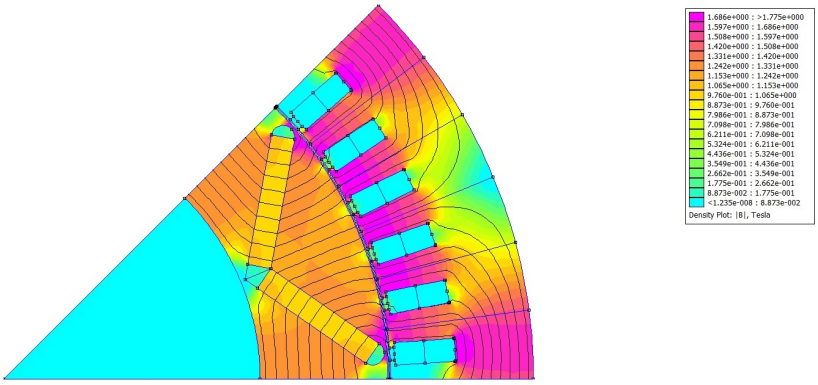

Figura 1.9: Simulazione ad elementi finiti motore IPM V-type singolo strato: densità di campo magnetico a vuoto

1.4 Motore IPM V-type doppio strato

La geometria di rotore V-type doppio strato può essere scelta dalla sezione "Geometry" in SyR-e tramite la variabile del numero di strati di barriere. Si modifica così il motore ottenuto tramite il progetto preliminare, Figura 1.8, in modo che a rotore ci siano due strati di magneti. L'aggiunta di un secondo strato è eseguita da SyR-e cosicché la quantità di magnete utilizzata per il progetto non cambi. La posizione delle barriere è definita ammettendo un passo costante misurato dall'asse di simmetria del polo. Infatti l'angolo α_1 caratterizzante la prima barriera è uguale a quello della seconda e doppio rispetto l'angolo misurato tra la seconda barriera e la fine dell'espansione polare. L'angolo α_2 caratterizzante la seconda barriera è misurato a partire dal ponticello tangenziale della prima. Il disegno del rotore è riportato in Figura 1.10.

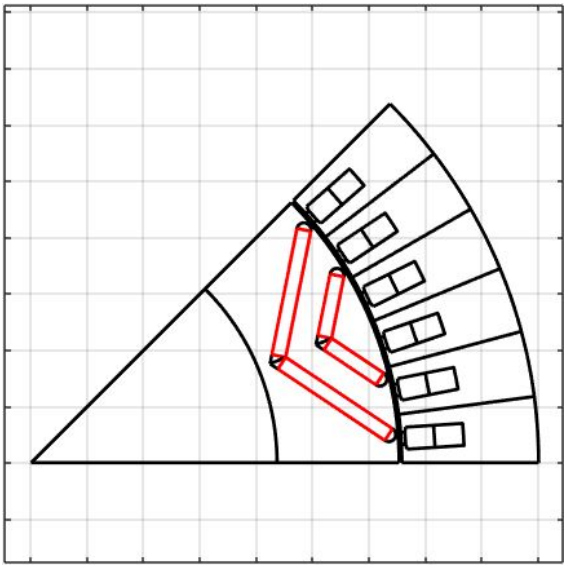

Figura 1.10: Motore IPM V-type doppio strato

Tabella 1.5: Parametri IPM V-type doppio strato

Grandezza	Simbolo	Unità	Valore
Posizione 1° barriera	α_1	°	9,00
Spessore 1° magnete	hc_1	mm	2,50
Inclinazione 1° barriera	β_1	°	56,25
Posizione 2° barriera	α_2	°	9,00
Spessore 2° magnete	hc_2	mm	2,50
Inclinazione 2° barriera	β_2	°	56,25
Peso macchina		kg	16,24
Peso magnete		kg	1,02
Coppia	T	Nm	138
Corrente nominale	i_0	A	135
Corrente caratteristica	i_{ch}	A	230
Ondulazione di coppia picco-picco	$\Delta T_{p_k p_k}$	Nm	44

In Tabella 1.5 ci sono le variabili relative al rotore del motore a doppio strato. Entrambi gli strati hanno la stessa inclinazione, che non è modificata dal disegno di partenza a singolo strato. Il peso dei magneti rimane circa lo stesso. Si ottiene un leggero incremento del valore di coppia e una diminuzione dell'ondulazione picco-picco. L'ondulazione di coppia diminuisce perché la forma d'onda di induzione magnetica al traferro si può approssimare con un'onda quadra a due gradini. Il contenuto armonico associato diminuisce a confronto di un'onda quadra con un unico valore e di conseguenza si riduce il ripple di coppia. Dalla tabella si legge

un valore di corrente caratteristica più alto di quello del modello a singolo strato. Questo incremento si può attribuire alla maggiore presenza di barriere nel rotore che causa un valore più basso di induttanza lungo l'asse d. Come descritto da (1.11), a parità di flusso concatenato prodotto dai magneti, un minore valore di induttanza in asse d comporta un aumento della corrente caratteristica. Il numero più alto di barriere aumenta l'anisotropia del rotore, di conseguenza c'è un aumento se pur lieve del valore di coppia.

La nuova geometria di rotore, Figura 1.10, è ulteriormente modificata perché lo spessore dei magneti così dedotto risulta basso rischiando una smagnetizzazione dei magneti. E si ritiene di ridurre l'inclinazione delle barriere in modo da ottenere un valore di flusso al traferro maggiore. La struttura a seguito dei cambiamenti è riportata in Figura 1.11. Il motore è denominato AVALON-base. Le caratteristiche del motore sono descritte in Tabella 1.6.

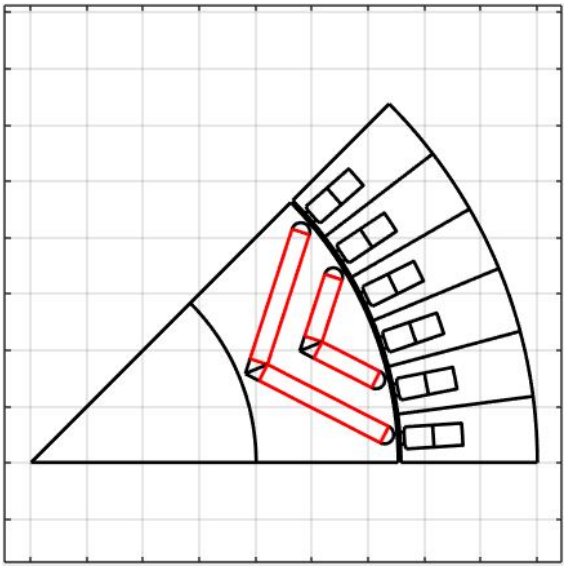

Figura 1.11: AVALON-base

1.5 Specifica del numero di coppie polari

La specifica del numero di coppie polari è una scelta che influenza diversi aspetti della macchina sia di tipo elettrico che di tipo meccanico.

Il numero di poli condiziona in primo luogo la frequenza di funzionamento della macchina elettrica. In questa tesi la velocità nominale della macchina prevista è di circa 6000 rpm perciò la frequenza elettrica nominale risultante è pari a 400 Hz. Un numero di poli più alto aumenta la frequenza elettrica nominale della macchina.

Strutturalmente la variabile p condiziona l'ampiezza dell'espansione polare. In Figura 1.11 è rappresentato un polo, del motore progettato AVALON-base, con

Tabella 1.6: Parametri AVALON-base

Grandezza	Simbolo	Unità	Valore
Raggio d'albero		mm	40,00
Posizione 1° barriera	α_1	°	9,00
Spessore 1° magnete	hc_1	mm	3,25
Inclinazione 1° barriera	β_1	°	49,50
Posizione 2° barriera	α_2	°	9,00
Spessore 2° magnete	hc_2	mm	3,25
Inclinazione 2° barriera	β_2	°	49,50
Peso macchina		kg	17,00
Peso magnete		kg	1,42
Coppia	T	Nm	143
Corrente nominale	i_0	A	135
Corrente caratteristica	i_{ch}	A	290
Ondulazione di coppia picco-picco	$\Delta T_{p_k p_k}$	Nm	45

un'ampiezza di 45°. Al crescere di p l'espansione polare si restringe. Può risultare conveniente aumentare il numero di poli perché il motore tende ad una geometria più ad anello. Se l'espansione polare diventa più corta è possibile allargare il raggio d'albero ottenendo un rotore meno spesso. La macchina diventa più leggera.

Per valutare gli effetti di una modifica del numero di coppie polari non si riesegue l'intero progetto. D'altra parte considerando il motore progettato AVALON-base, se si cambia il numero di poli bisogna adeguare la geometria di macchina al nuovo valore introdotto. Sarebbe scorretto lasciare inalterate le dimensioni della cava e aumentare o diminuire il numero di poli.

Nell'ottica in cui è necessario modificare la geometria di macchina, per quanto riguarda il rotore ed in particolare la posizione dei magneti non sorgono problemi; le variabili caratteristiche del rotore come posizione delle barriere o spessore dei magneti sono normalizzate e imposte costanti. La difficoltà sorge per la geometria di statore dove le caratteristiche di cava, altezza e larghezza, devono essere nuovamente determinate.

Si procede utilizzando dei coefficienti di progetto derivanti dalla teoria di costruzione di macchine sincrone a riluttanza [3]. In questo modo si confronteranno strutture aventi le stesse proporzioni geometriche. I coefficienti utilizzati dipendono esclusivamente dalla geometria di statore. Dalle espressioni dei coefficiente si evince che, b_{SyR} dipende dalla lunghezza del giogo, mentre il coefficiente k_{tSyR} è funzione della larghezza del dente w_t. La lunghezza del giogo l_y secondo (1.6) è legata alla lunghezza del dente di statore l_t.

$$x = \frac{r}{R} \tag{1.12}$$

$$b_{SyR} = l_y \cdot \frac{p}{R} \cdot \frac{1}{x} \tag{1.13}$$

$$k_{tSyR} = w_t \cdot \frac{6pq}{2\pi\, R} \cdot \frac{1}{x\, b_{SyR}} \tag{1.14}$$

Tabella 1.7: Parametri comuni per le diverse geometrie di macchina testate

Grandezza	Simbolo	Unità	Valore
Numero di cave per polo per fase	q		2
Spessore del traferro	g	mm	0,50
Raggio esterno di statore	R	mm	90,00
Lunghezza rotore	L	mm	100,00
Coefficiente di progetto 1	x		0,72
Coefficiente di progetto 2	b_{SyR}		0,81
Coefficiente di progetto 3	k_{tSyR}		0,70
Posizione 1° barriera	α_1	$p.u.$	0,4
Spessore 1° magnete	hc_1	mm	3,25
Inclinazione 1° barriera	β_1	$p.u.$	0,6
Posizione 2° barriera	α_2	$p.u.$	0,4
Spessore 2° magnete	hc_2	mm	3,25
Inclinazione 2° barriera	β_2	$p.u.$	0,6
Coefficiente di carico termico	k_j	kW/m^2	40
Numero di spire in serie per fase	N_s		44

In funzione della geometria del motore AVALON-base sono calcolati i valori dei coefficienti introdotti. In Tabella 1.7 sono riportati i risultati, insieme ai parametri imposti costanti per le diverse macchine che si vuole testare. I valori in p.u. (Per Unit) di posizione α e inclinazione β delle barriere sono imposti costanti. La posizione è normalizzata rispetto metà arco polare, mentre l'inclinazione è normalizzata rispetto l'angolo complementare a metà espansione polare. Quindi per ottenere i valori assoluti delle variabili:

$$\alpha = \alpha_{pu} \cdot \frac{\pi}{2p} \tag{1.15}$$

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \beta_{pu} \cdot (\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2p}) \tag{1.16}$$

Evidentemente il valore costante in p.u. non implica, ad esempio, una posizione delle barriere costante, ma un valore che sarà funzione del numero di coppie polari.

Fissati i valori introdotti in Tabella 1.7 è possibile definire una geometria di cava di statore in funzione del numero di coppie polari. Infatti da (1.13) e (1.14) si determinano le variabili cercate l_y e w_t tramite inversione. Tutti i parametri coinvolti sono noti ad eccezione della variabile p.

L'obiettivo è quello di ottenere una macchina più leggera, perciò si aumenta il numero di coppie polari. Si ottengono due diverse strutture caratterizzate da un numero di poli uguale a 10 e 12 rispettivamente. Assegnando il numero di coppie polari sono dedotte come spiegato le nuove caratteristiche geometriche di statore. I parametri sono elencati in Tabella 1.8 e comparati con il motore progettato AVALON-base avente 8 poli.

Tabella 1.8: Caratteristiche dei tre diversi motori

Grandezza	Simbolo	Unità	Valore		
Numero di coppie polari	p		4	5	6
Raggio d'albero	A_r	mm	40,00	43,00	45,00
Lunghezza dente	l_t	mm	11,08	13,71	15,47
Larghezza dente	w_t	mm	4,81	3,85	3,21
Peso macchina		kg	17,00	16,70	16,43
Peso magnete		kg	1,42	1,45	1,46
Corrente nominale	i_0	A	135	153	165
Coppia nominale	T_n	Nm	143	157	163

Dai risultati in Tabella 1.8 è confermata l'aspettativa di ottenere un motore più leggero. All'aumentare del numero di coppie polari infatti la larghezza del dente diminuisce e aumenta la sua lunghezza, viceversa diminuisce la lunghezza del giogo di statore. A rotore è possibile allargare il diametro d'albero così ottenendo una struttura meno massiccia. Il guadagno in peso però non è sostanziale, esso si riduce di massimo 0,5 kg. La quantità di magneti utilizzata è in pratica la stessa per i tre diversi motori.

Prestando attenzione alle caratteristiche elettriche e meccaniche, i motori con un numero di poli più alto presentano una corrente nominale maggiore ed anche un valore di coppia più alto. Equivalentemente si può affermare che a parità di coppia richiesta i modelli ottenuti risulteranno più freddi. Infatti se i motori con 5 o 6 coppie polari producono un coppia di 145 Nm assorbiranno una corrente inferiore della nominale, perciò una condizione termica vantaggiosa.

Ricordando che il numero di coppie polari influenza la frequenza elettrica, bisogna considerare che all'aumentare della frequenza aumentano le perdite nel ferro. In particolar modo per una applicazione come quella affrontata in questo progetto che prevede alte velocità di funzionamento.

In secondo luogo ci potrebbe essere un problema con le dimensioni dei lamierini della macchina. Le richieste sugli ingombri, di lunghezza massima e diametro massimo di statore sono dei vincoli da rispettare. Si è scelto il massimo diametro esterno di statore ammesso pari a 180 mm, un valore basso per uno statore caratterizzato da un alto numero di paia poli. Una macchina con 6 coppie polari comporta una larghezza del dente di statore di circa 3 mm.

In seguito al test di modifica del numero di coppie polari, se da un lato si possono ottenere macchine più fredde, dall'altro si prevede perdite maggiori nel ferro e difficoltà costruttive dovute alle piccole dimensioni di cava. Così si è scelto di conservare il numero di coppie polari uguale a 4 utilizzato per il progetto di base.

Capitolo 2

Ottimizzazione

In questo capitolo si vuole descrivere le modalità con cui si è provato a migliorare il motore AVALON-base definito dal progetto preliminare. Con il termine ottimizzazione si vuole far riferimento al processo di ottimizzazione che si è utilizzato in questa tesi attraverso il programma SyR-e.

Un processo di ottimizzazione è un algoritmo che ha lo scopo di trovare la soluzione ottimale ad un problema. Il problema si identifica con un obiettivo, o meglio con una funzione obiettivo. Se ad esempio, in tema economico, la funzione obiettivo è la funzione costi, l'algoritmo cerca di diminuire il più possibile i costi e così la soluzione ottimale corrisponde al minimo globale della funzione. Molto spesso la funzione obiettivo è più di una, si definisce un analisi multi-obiettivo. Nel caso di analisi multi-obiettivo la definizione di soluzione ottimale si identifica con il concetto di fronte di Pareto. Il fronte di Pareto racchiude le soluzioni migliori del problema.

L'algoritmo di ottimizzazione utilizzato da SyR-e è chiamato MODE, che sta per Multi-Objective Differential Evolution. É un tipo di algoritmo multi-obiettivo, quindi che si pone di trovare l'ottimo tra diverse funzioni obiettivo, ed è basato sull'evoluzione della specie (Differential Evolution), che mira a riprodurre matematicamente l'evoluzione di una specie, secondo il principio di Darwin. L'algoritmo MODE si definisce del tipo metaeuristico, ossia l'algoritmo esegue alcuni compiti in modo deterministico (meta) ed altri in modo probabilistico (euristico). É proprio la componente aleatoria che può condurre a risultati inattesi e vantaggiosi.

Il carattere metaeuristico è utile per problemi dove l'insieme di soluzioni è ampio e perciò sarebbe difficile o impossibile studiare tutti i risultati secondo logiche unicamente deterministiche. Non essendo possibile definire in maniera completa il problema, la componente probabilistica può ugualmente condurre al risultato migliore limitando la ricerca per un intervallo ridotto di soluzioni e con tempi accettabili di esecuzione. Il risultato del processo di ottimizzazione potrebbe coincidere con l'ottimo globale oppure risultare un ottimo locale. Ottimo locale

nel senso del migliore risultato relativo all'insieme di soluzioni trovate, un insieme ristretto rispetto al totale delle soluzioni possibili del problema.

Si è usato un algoritmo di ottimizzazione per modificare il disegno di rotore del motore progettato. In riferimento al rotore a singolo strato, la geometria ottenuta dal progetto preliminare è fatta in modo da sfruttare in modo esaustivo lo spazio del rotore, ottenendo uno strato molto esteso e un'elevata anisotropia. Modificando il rotore in un doppio strato, il passaggio è rigido mantenendo costante la quantità di magnete e disponendo in modo equidistanti le barriere del rotore. In questo modo, dal progetto del motore a singolo strato e il successivo passaggio a doppio strato, si ottiene una macchina che non ha delle buone qualità in termini di ondulazione di coppia picco-picco. E l'assenza di principi noti per definire una geometria del rotore maggiormente consona spinge all'utilizzo degli algoritmi di ottimizzazione. Con queste motivazioni non solo è più chiaro perché si ottimizza il motore, ma anche le variabili che sono soggette a modifiche, ossia quelle di rotore.

2.1 Utilizzo e funzionamento

L'ottimizzazione del motore in SyR-e è lanciata dalla pagina "Optimization", riportata in Figura 2.1. Nella pagina si notano diverse sottosezioni:

- parametri ottimizzazione: numero di generazioni da simulare e numero di individui per ogni generazione;
- parametri della simulazione time-stepping: escursione angolare e numero di posizioni da simulare, con valori differenti durante la fase di evoluzione MODE (più grezzi) e durante la rivalutazione finale del fronte di Pareto (più raffinati);
- variabili di ottimizzazione e relativi limiti;
- obiettivi dell'ottimizzazione e relativi limiti per la penalizzazione delle soluzioni.

Una generazione o popolazione corrisponde ad un insieme di individui che nel caso di algoritmo genetico sono chiamati cromosomi. Un cromosoma è un elenco di valori chiamati geni, e corrisponde ad una macchina con delle specifiche caratteristiche. Il cromosoma racchiude solo i parametri soggetti a modifiche durante l'esecuzione dell'algoritmo. Infatti durante l'evoluzione alcune caratteristiche delle macchine sono fisse, mentre i parametri che si sono scelti attraverso la sottosezione "variabili e limiti" si modificano nel corso dello svolgimento. Tante più variabili si scelgono tanto più lungo risulterà un cromosoma. Le differenze tra le macchine all'interno di una popolazione sono quindi relative alle variabili, o geni, che si è scelto.

La logica del processo di ottimizzazione è di orientare l'evoluzione della popolazione inziale verso un miglioramento. L'insieme di partenza è ottenuto assegnando per ogni cromosoma valori casuali dei geni, ciascuno estratto dal rispettivo intervallo

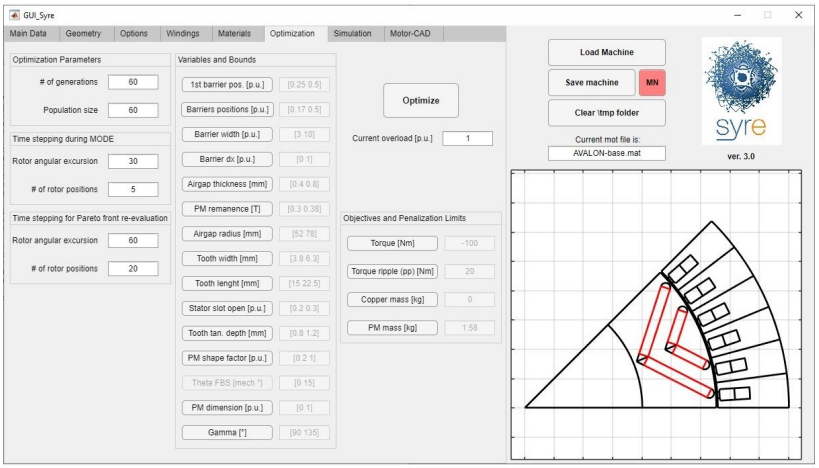

Figura 2.1: GUI SyR-e Optimization

di esistenza. Ogni macchina ottenuta è simulata a seconda delle funzioni obiettivo scelte; se ad esempio la funzione obiettivo è la funzione coppia allora si calcolerà la coppia erogabile dalla macchina. La penalizzazione interessa questa fase del processo, perché se il valore di coppia ottenuto è inferiore del limite scelto si penalizza il risultato.

Dopo che si è analizzata la popolazione iniziale, l'algoritmo interviene attraverso delle operazioni di modifica dei cromosomi con il fine di produrre delle macchine migliori. Due dei processi caratteristici dell'algoritmo genetico sono la mutazione e il crossover. La mutazione agisce sull'intero cromosoma cambiando tutti i geni, mentre il crossover interviene su un singolo gene. La possibilità che avvenga uno dei due o entrambi o nessuno dei due cambiamenti è casuale. I parametri modificati da una mutazione o da un crossover devono comunque appartenere ai rispettivi intervalli di esistenza. Queste azioni producono una popolazione modificata. Un terzo fattore che agisce sull'evoluzione della popolazione iniziale è la selezione. La selezione consiste nel comparare i cromosomi della popolazione iniziale e quelli della popolazione modificata, se questi ultimi risultano migliori dei primi li rimpiazzano. Il criterio per cui si promuove l'uno o l'altro cromosoma dipende dalle funzioni obiettivo.

Il processo evolutivo dalla popolazione iniziale in una seconda generazione si porta a termine tramite la ricerca del fronte di Pareto. Il fronte di Pareto consiste nelle soluzioni non dominate; una soluzione si definisce non dominata se confrontandola con altri risultati non è possibile migliorare una funzione obiettivo senza peggiorare le altre. La ricerca dei migliori cromosomi avviene in un insieme ibrido, composto da tutti gli individui della prima generazione e della popolazione modificata. La costruzione del fronte di Pareto è fatta secondo il metodo denominato NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) [4]. Il primo step è quello di definire

tutte le macchine appartenenti al fronte di Pareto. Successivamente escludendo dall'insieme ibrido gli individui del fronte di Pareto si definiscono le nuove soluzioni non dominate. Così in modo iterativo si crea una classifica di fronti successivi non dominati. Per ogni fronte, si caratterizza ciascun individuo che vi appartiene di una grandezza definita "crowding-distance". Questa grandezza è una misura per garantire una diversificazione dei cromosomi durante il processo evolutivo.

Infine si genera la seconda generazione preservando gli individui del fronte di Pareto, poi quelli del secondo fronte non dominato, poi quelli del fronte successivo, sino al raggiungimento nel numero massimo di individui ammessi per una popolazione. Se non è possibile accettare interamente un fronte si utilizza la grandezza "crowding-distance" per escludere gli elementi in eccesso. La seconda generazione è la nuova base di partenza per il procedimento evolutivo. Quindi è analizzata e così come per la prima generazione, è soggetta alle operazioni di mutazione, crossover e selezione dando vita ad una popolazione modificata. Nuovamente si definiscono i fronti successivi non dominati e da questi si ammettono i cromosomi che caratterizzeranno la terza generazione. Il procedimento prosegue fino al numero di generazioni che si vuole analizzare.

Man mano che la popolazione si evolve con il susseguirsi delle generazioni, i cromosomi diventano sempre più omogenei ad una o più soluzioni ottimali (minimi locali). Ciò avviene perché i migliori individui sopravvivono al criterio di selezione e il resto della popolazione tende a mutare omologandosi ai migliori. Il tipo di geni, le caratteristiche dei cromosomi, convergono ad un modello ottimale. La geometria di macchina che si ottiene al termine dell'esecuzione dell'ottimizzazione è un ottimo locale. Non è la migliore in senso assoluto, ma è la migliore in relazione ai modelli che sono stati analizzati durante il procedimento. Nell'utilizzo di algoritmi di ottimizzazione è importante scegliere opportunamente gli intervalli dei valori delle variabili considerate dall'ottimizzazione. Tramite questa scelta si indirizza la ricerca dell'ottimo verso una zona dello spazio delle soluzioni piuttosto che in un'altra.

2.2 Modifica della fase di disegno del rotore

Prima di descrivere come è stata modificata la fase di disegno del rotore è opportuno specificare come avveniva precedentemente e il perché c'è stato bisogno di intervenire.

Durante l'ottimizzazione ogni macchina viene simulata per quantificare la funzione obiettivo. Si è dato per scontato che dall'insieme dei parametri che definiscono la geometria di macchina, si ottiene il disegno effettivo che viene così analizzato ad elementi finiti. Durante questo passaggio , dalle variabili in SyR-e al disegno in FEMM, c'è bisogno di controllare che i valori introdotti dei parametri geometrici siano realizzabili. Basti pensare a cosa succederebbe se si inserisse come spessore del magnete un valore maggiore dello spazio disponibile a rotore; naturalmente lo spessore sarebbe automaticamente ridotto al valore massimo ammesso. Questo è un

controllo che realmente avviene, ma ce ne sono anche altri. La verifica dei parametri è necessaria soprattutto per un algoritmo di ottimizzazione attraverso cui il valore assegnato alle variabili è casuale.

La geometria a V del rotore di una macchina IPM presenta una simmetria tra una metà del polo e l'altra. La verifica e così il disegno si concentra su metà V e una volta realizzata si copia il disegno in modo speculare. In Figura 2.2 è illustrato un diagramma di flusso semplificato della procedura con cui SyR-e verifica che la geometria di rotore sia fattibile. I passaggi illustrati sono:

Verifica dimensione magneti La prima verifica è sulla dimensione dei magneti, che nel caso di un motore a doppio strato, consiste nel controllare che lo spessore totale, dato dalla somma di ciascuno strato, sia inferiore dello spazio disponibile a rotore. Questa prima verifica controlla anche che ci sia un minimo spessore di ferro tra gli estremi tangenziali delle barriere. L'estremo tangenziale di una barriera è la zona più vicina al traferro, viceversa l'estremo radiale è diametralmente opposto.

Verifica asse q La seconda verifica verte sullo strato più interno, cioè quello più vicino all'albero. Questo strato è anche quello che potrebbe risultare troppo ravvicinato al confine dell'espansione polare. La verifica dell'asse q controlla appunto la distanza tra la fine dell'espansione polare e l'estremo tangenziale dello strato interno.

Verifica intersezione tra la barriera e l'albero Si verifica che la barriera non si sovrapponga all'albero. Ci si riferisce alla barriera più interna.

Verifica 1 intersezione tra le barriere Si misura la distanza tra gli estremi radiali delle barriere.

Verifica 2 intersezione tra le barriere Si misura la distanza tra le due barriere lungo la loro estensione longitudinale.

L'oggetto delle verifiche sono tre parametri del rotore: la posizione, l'inclinazione delle barriere, rispettivamente α e β e lo spessore dei magneti hc. Se i vincoli imposti dal controllo sono rispettati il valore delle variabili non cambia, viceversa vengono modificate.

La posizione potrebbe essere cambiata in seguito della "verifica asse q", ma questo accade di rado. Se lo strato interno è troppo vicino al confine del polo si riduce la dimensione del magnete e quindi della barriera. Solo qualora anche con la dimensione più piccola ammessa per lo spessore del magnete non ci sia abbastanza distanza, si cambia la posizione con un valore minore.

La dimensione dei magneti come appena visto può variare per effetto della "verifica asse q", ma soprattutto per il primo controllo delle dimensioni, in Figura 2.2. Lo

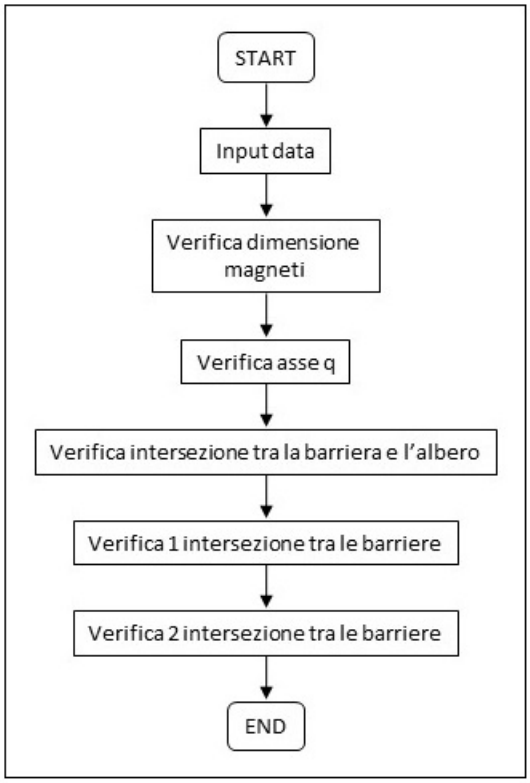

Figura 2.2: Diagramma di flusso 1 del controllo dei valori delle variabili di rotore

spessore dei magneti può risultare incompatibile con la minima distanza necessaria tra gli estremi tangenziali delle barriere, in questo caso se ne riduce i valori.

Per quanto riguarda l'inclinazione delle barriere, in prima battuta si deve evitare che queste si incrocino. In genere non deve essere assegnato un valore di inclinazione della barriera più interna maggiore di quello dello strato più esterno, perché può implicare una intersezione ad "x" delle barriere. Se questo avviene il controllo "verifica 1 intersezione tra le barriere" assegna i valori corretti per le inclinazioni. I nuovi valori sono calcolati in funzione della posizione limite degli estremi radiali delle due barriere. Tra i due estremi ci deve essere almeno uno spessore minimo di ferro.

Segue la seconda verifica delle inclinazioni delle barriere: accade che anche se ci sono delle opportune distanze fra gli estremi tangenziali e radiali di due strati, lungo la loro espansione longitudinale ci siano zone di lamierino troppo sottili. In questo caso spesso per guadagnare spazio è assegnato alla barriera più interna il valore limite dell'inclinazione.

Il limite è imposto dal raggio dell'albero, perché fissata la posizione di una barriera, il criterio è quello di sfruttare più spazio possibile di rotore. Se si assegna il valore limite di inclinazione ad una barriera si fa così, mantenendo fissa la posizione

e quindi l'estremo tangenziale, "slittare" il suo estremo radiale più vicino possibile all'albero.

Osservando il diagramma di flusso in Figura 2.2 si può concludere che le prime due verifiche intervengono sulla dimensione dei magneti, mentre le successive tre sulla loro inclinazione. La posizione è in genere inalterata.

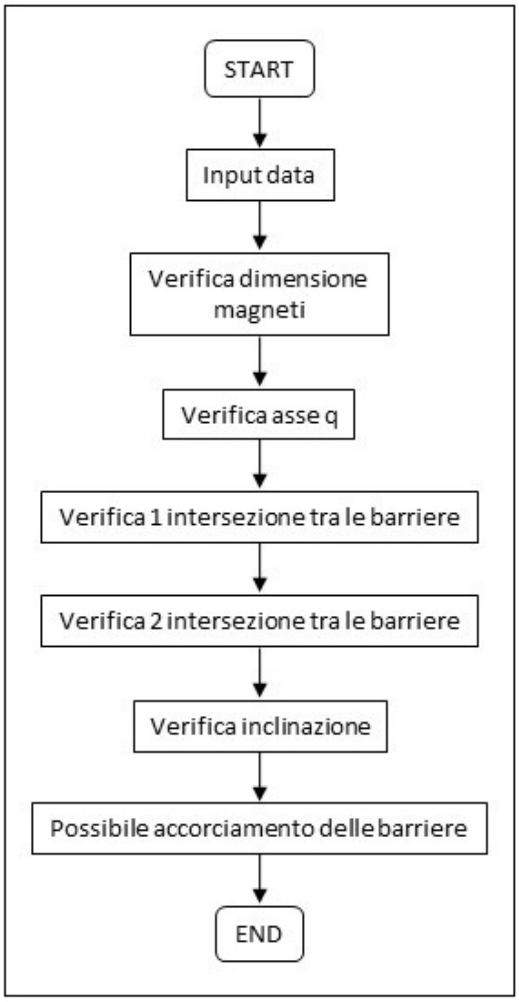

Figura 2.3: Diagramma di flusso 2 del controllo dei valori delle variabili di rotore

Nella fase di ottimizzazione del progetto AVALON-base sono nate però delle difficoltà connesse al disegno del rotore. Il problema è stato definire una larghezza dell'albero che non ostacolasse l'evoluzione dell'ottimizzazione. Tanto più grande è il raggio d'albero a parità di raggio esterno di rotore tanto più facilmente sorgono delle criticità nel disegno. In un primo momento si è assegnato un raggio d'albero molto piccolo in modo da aggirare l'ostacolo. I risultati sono stati poco soddisfacenti perché distorti dalla dimensione dell'albero. In seguito anziché forzare l'evoluzione

dell'ottimizzazione si sono cambiati alcuni dei criteri con cui viene costruito il rotore, passando dal primo diagramma di flusso al nuovo in Figura 2.3. L'obiettivo è stato quello di ridurre i casi in cui il controllo modificasse l'inclinazione delle barriere.

Comparando i due diagrammi di flusso la prima differenza che si riscontra dall'inizio del procedimento verso la fine è il controllo denominato "verifica intersezione tra la barriera e l'albero". L'assenza di questa verifica nel nuovo diagramma di flusso è già esplicativa del nuovo criterio con cui si disegna il rotore: l'inclinazione scelta per le barriere sarà accettata indipendentemente se la barriera sia interamente nel rotore o ne fuoriesca. Se necessario sarà tagliata la parte di barriera che si sovrappone all'albero.

In seguito nel nuovo diagramma è aggiunto un controllo denominato "verifica inclinazione". Questa verifica è introdotta perché non c'è più il limite dell'inclinazione imposto dall'albero, l'estremo radiale di una barriera potrebbe essere incidente con il confine dell'espansione polare. In questo passaggio così ci si assicura che il valore minimo per β sia uguale all'angolo definito da metà espansione polare, ossia di una posizione della barriera parallela al bordo del polo. Il valore massimo è sempre di 90 °, condizione in cui la barriera è perpendicolare all'asse di simmetria del polo.

Per terminare il nuovo disegno del rotore c'è la nuova fase di accorciamento: Se c'è intersezione tra una barriera e l'albero si procede nell'eliminare la parte eccedente. In questo modo c'è anche la possibilità di ottenere una struttura che non si identifica propriamente con la geometria V type, ma più simile alla geometria Spoke rotor.

Tabella 2.1: Valori introdotti dei parametri prima che agisse il controllo e valori modificati dal controllo iniziale (a) e dal nuovo controllo (b)

Grandezza	Simbolo	Unità	Input	Output	
				(a)	(b)
Posizione 1° barriera	α_1	*p.u.*	0,49	0,49	0,49
Spessore 1° magnete	hc_1	*p.u.*	9,58	9,58	9,38
Inclinazione 1° barriera	β_1	*p.u.*	0,30	0,30	0,30
Posizione 2° barriera	α_2	*p.u.*	0,25	0,25	0,25
Spessore 2° magnete	hc_2	*p.u.*	9,70	9,70	9,70
Inclinazione 2° barriera	β_2	*p.u.*	0,25	0,46	1,00

In Figura 2.4 c'è un esempio di come differisce la geometria del rotore in funzione delle scelte del controllo. La geometria (a) è in accordo alle verifiche inizialmente eseguite sui parametri introdotti, mentre l'immagine (b) rappresenta il nuovo risultato che si ottiene con le nuove scelte apportate al controllo delle variabili di rotore. In Tabella 2.1 ci sono i parametri introdotti, che sono gli stessi sia per una che per l'altra geometria.

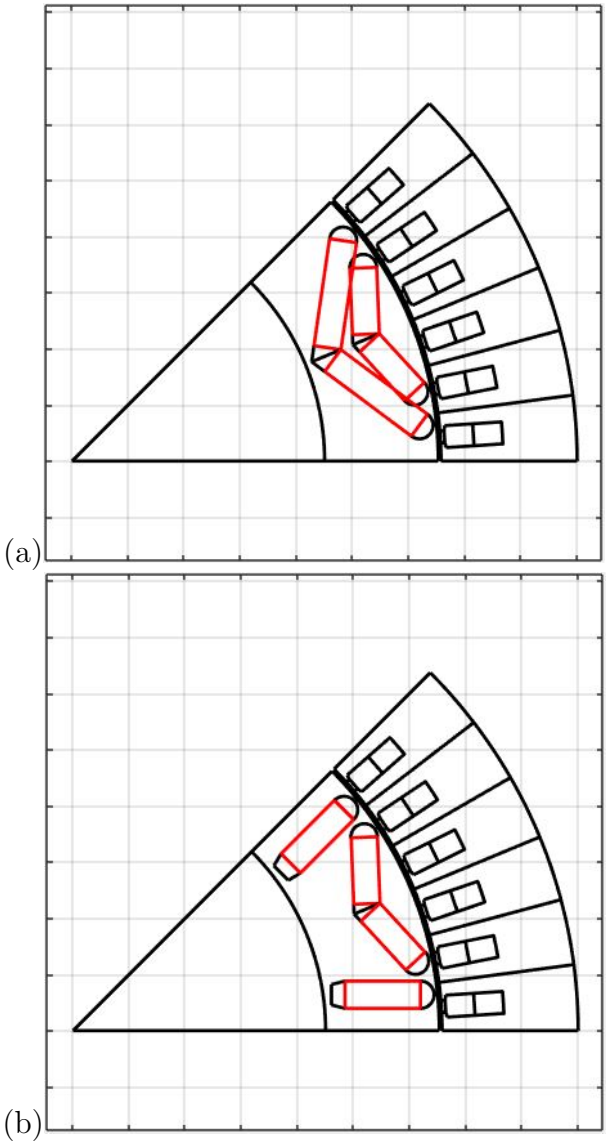

Figura 2.4: Esempio di una geometria di rotore ottenuta in seguito alla procedura di controllo iniziale (a) e in seguito alla nuova procedura di controllo (b)

Differiscono invece i valori effettivamente utilizzati per il disegno del rotore, ottenuti come risultato dei due diversi controlli. Nel primo capitolo sono state introdotte le grandezze normalizzate di posizione ed inclinazione, rispettivamente (1.15) e (1.16). Lo spessore dei magneti invece è normalizzato rispetto la dimensione del traferro, per ottenere la grandezza in termini assoluti basta moltiplicare il valore normalizzato per quello del traferro pari a 0,5 mm.

La sostanziale differenza fra le due geometrie è che la prima (a) conserva una configurazione degli strati a V mentre la seconda (b) no. La scelta nella seconda

configurazione di spezzare uno strato deriva dall'esigenza di ottenere una distanza adeguata fra le due barriere.

Infatti in questo caso estremo, con il primo controllo si ottiene un rotore infattibile, Figura 2.4 (a). I due strati sono sovrapposti perché nel rotore non c'è sufficiente spazio per i magneti che sono troppo spessi in relazione alla posizione. Dalla Tabella 2.1 si evidenzia come il controllo (a) modifica solo l'inclinazione della seconda barriera ossia quella più interna. Come è evidente dalla figura, è stata assegnata l'inclinazione limite che risulta comunque insufficiente per la realizzabilità del rotore con tali valori. Il nuovo controllo (b) cambia non solo l'inclinazione della seconda barriera, ma anche lo spessore del primo magnete. Se questo accade è perché anche modificando l'inclinazione non si è creata abbastanza distanza tra le barriere e perciò si è ridotta la dimensione del magnete esterno.

2.3 Scelta delle variabili da ottimizzare

In Tabella 2.2 ci sono le impostazioni utilizzate per il lancio dell'ottimizzazione. Come descritto nei paragrafi precedenti oltre alle variabili che si vuole ottimizzare bisogna specificare anche caratteristiche utili per il procedimento di ottimizzazione.

Il numero di generazioni e di individui per popolazione deve essere sufficientemente alto per dare il tempo alla popolazione iniziale di evolvere e modificare. Allo stesso tempo eccedere con tali numeri non gioverebbe all'evoluzione perché si aumenterebbe molto la durata del procedimento ma poco la mutazione delle strutture. I valori per l'escursione angolare del rotore e per il numero di posizioni del rotore utilizzati durante l'evoluzione (MODE) sono più piccoli rispetto al momento in cui si rivalutano le macchine appartenenti al fronte di Pareto. In questo modo si riduce la durata dell'ottimizzazione accettando in una prima fase dei risultati più grezzi e in seguito aumentando l'accuratezza.

I parametri interessati dall'ottimizzazione ridefiniscono la geometria di rotore. C'è la posizione e l'inclinazione delle barriere; lo spessore dei magneti; e la forma dei ponticelli tangenziali. Attraverso gli intervalli di valori scelti per ogni variabile si cerca di includere ogni possibile configurazione per il rotore. In questo senso per la posizione della prima barriera si ha un limite inferiore di 0,25 p.u. e un massimo di 0,5 p.u. Un valore più piccolo come limite inferiore risulterebbe poco idoneo, un valore di 0,25 p.u. come posizione del primo strato comporta una barriera già molto stretta. Un valore maggiore del limite superiore ostacolerebbe il posizionamento del secondo strato. Il valore della posizione della seconda barriera è misurato a partire dalla fine del primo strato e non dal centro del polo. Così un valore più basso di 0,2 p.u. implicherebbe due strati troppo vicini, mentre un valore maggiore di 0,5 p.u. sarebbe attuabile solo se al primo strato fosse assegnato il valore minimo. Guardando i valori possibili per lo spessore del magnete, è un intervallo che dal valore iniziale di AVALON-base uguale a 6,5 p.u. ammette un escursione di circa 3 p.u. in salita e in discesa.

Tabella 2.2: Impostazioni ottimizzazione

Grandezza	Simbolo	Unità	Valore
Numero di generazioni			60
Numero di individui per popolazione			60
Escursione angolare rotore (MODE)		$elt°$	30
Numero di posizioni rotore (MODE)			5
Escursione angolare rotore (rivalutazione)		$elt°$	60
Numero di posizioni rotore (rivalutazione)			20
Posizione prima barriera	α_1	$p.u.$	$0{,}25 - 0{,}5$
Posizione seconda barriera	α_2	$p.u.$	$0{,}20 - 0{,}5$
Spessore barriera	hc	$p.u.$	$3 - 10$
Forma ponticello tangenziale			$0 - 1$
Inclinazione barriera	β	$p.u.$	$0 - 1$
Angolo di fase della corrente	γ	$°$	$90 - 145$
Target di coppia	T	Nm	140
Target di ondulazione di coppia	$\Delta T_{p_k p_k}$	Nm	14

La forma del ponticello tangenziale può essere circolare o poligonale. L'una o l'altra è assegnata in seguito al valore della variabile, in modo che la forma risulti circolare se è stato assegnato un valore inferiore a 0,5 mentre poligonale in caso contrario per valori da 0,5 ad 1.

Un altro parametro che varia durante l'ottimizzazione è l'angolo di fase della corrente utilizzato per le simulazioni elettromagnetiche. Non avendo informazioni a priori delle strutture che si otterranno durante l'esecuzione, è impreciso assegnare un valore costante dell'angolo di fase della corrente. Si ammettono come estremi dell'intervallo per la variabile, 90 ° per una geometria teoricamente isotropa e 145 ° per un rotore molto anisotropo.

Infine si scelgono i target delle funzioni obiettivo che influenzeranno le penalizzazioni degli individui durante il corso dell'evoluzione. Anche se la specifica di coppia è 145 Nm è bene utilizzare un target minore in modo da non escludere rigidamente macchine che producono delle coppie di poco inferiori alla richiesta. Come ondulazione di coppia picco-picco si ricerca un valore pari al 10% della coppia media prodotta.

2.4 Risultati ottimizzazione

Attraverso la sezione in SyR-e "Optimization" si esegue l'ottimizzazione del modello progettato AVALON-base. Le impostazioni per lo svolgimento sono quelle descritte nel paragrafo precedente.

In seguito si illustreranno i risultati di tre diverse ottimizzazioni. Ciascuno svolgimento ha le stesse impostazioni e lo stesso modello di partenza, appunto AVALON-base. In genere è utile eseguire più volte l'algoritmo perché sebbene ci siano le stesse condizioni di partenza, la componente aleatoria può condurre ad un diverso sviluppo del problema, ed a trovare diversi minimi locali come soluzioni.

Al termine della prima ottimizzazione si ottiene il fronte di Pareto in Figura 2.5. Non deve confondere il valore di coppia negativo in ascissa, perché è solo un espediente matematico per risolvere meglio il problema dell'ottimizzazione. L'algoritmo infatti cerca di minimizzare le funzioni obiettivo, di conseguenza prova a riprodurre macchine caratterizzate da una minore ondulazione di coppia e una minore coppia negativa. Il valore di coppia è reso negativo quindi per ottenere una funzione obiettivo coppia coerente con la logica di minimizzazione, ma leggendo i valori in ascissa si guarda il modulo.

Dal grafico è chiaro il significato di fronte di Pareto, alla sinistra del tratto raffigurato non sono presenti punti e questo graficamente equivale al concetto di soluzioni non-dominate. Viceversa alla destra del tratto sarebbero presenti molti altri punti che per chiarezza non sono stati riportati. Inoltre si evince come le migliori soluzioni sono il migliore compromesso fra le due funzioni obiettivo. Le due funzioni obiettivo sono in conflitto, all'aumentare della coppia erogabile da una macchina peggiora anche la qualità della coppia stessa, in questo senso le soluzioni ottime rappresentano un compromesso tra i due obiettivi.

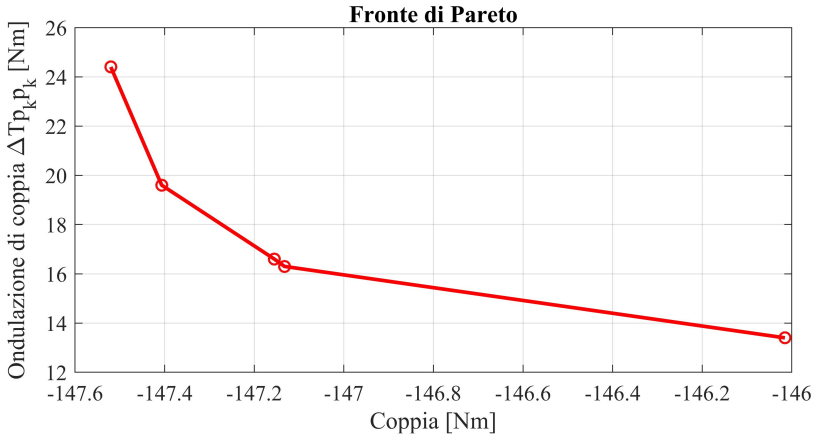

Figura 2.5: MODE 1. Fronte di Pareto

Il risultato della prima ottimizzazione è positivo. C'è un netto miglioramento del valore di ondulazione di coppia picco-picco che si riduce dal valore di 45 Nm a possibili valori compresi fra 24 Nm e 12 Nm. Contemporaneamente si soddisfa la richiesta di coppia di 145 Nm, sebbene non sembra esserci la possibilità di aumentare il suo valore. Non sono state create macchine che producono una coppia di valore

molto più elevato del target fissato. Da questo risultato si deduce che già attraverso il progetto preliminare si è ottenuta una buona densità di coppia.

Il fronte di Pareto racchiude cinque individui ed ognuno è da considerarsi una soluzione ottimale. L'escursione del parametro in ascissa è molto più piccola di quella in ordinata e per questo motivo si dà più peso alla variabile in ordinata e la scelta del modello si orienta a seconda di quest'ultima. Così si sceglie la soluzione che presenta il minore valore di ondulazione di coppia picco-picco.

Per maggiore chiarezza, in riferimento al primo lancio dell'algoritmo "MODE 1", si riportano anche altri risultati oltre al fronte di Pareto. Al termine di un'ottimizzazione l'algoritmo costruisce anche tanti diagrammi a barre quanti i geni scelti per lo svolgimento. Ciascun diagramma mostra come varia il rispettivo parametro fra gli individui migliori ottenuti dall'evoluzione. Ma soprattutto il grafico può evidenziare un valore specifico in relazione al quale c'è stata una omologazione, ossia un tratto genetico risultato dominante. Con individui migliori ci si riferisce all'insieme di cromosomi ottenuto al termine dell'evoluzione, che nel caso di "MODE 1" sono 81. Tra questi si costruisce il fronte di Pareto evidenziando tra gli 81 individui solo le 5 soluzioni non dominate.

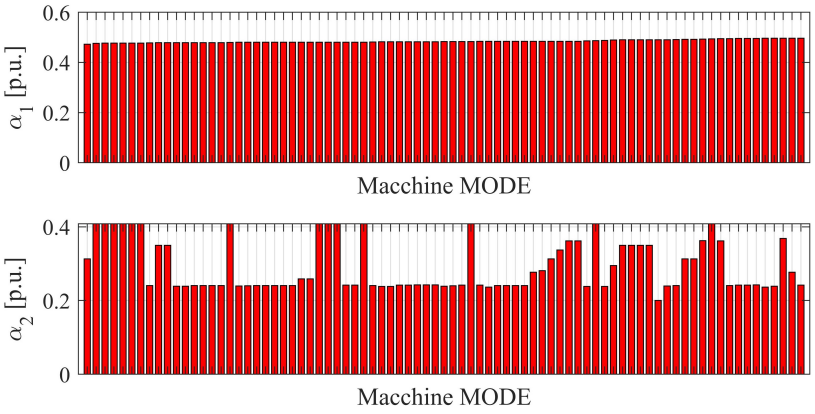

Figura 2.6: MODE 1. Valori delle posizioni delle barriere di flusso caratterizzanti i migliori individui del processo di ottimizzazione

In Figura 2.6 ci sono i due diagrammi a barre che descrivono come variano le due variabili α_1 e α_2 che identificano le posizioni delle due barriere di flusso e quindi dei due strati di magnete. Ciascun diagramma è costruito in modo tale da avere in ordinata il valore normalizzato del parametro e in ascissa il numero identificativo della macchina corrispondente. Per ottenere dei grafici più chiari sono state rimosse le etichette dell'asse delle ascisse perché non si vuole porre attenzione su una macchina in particolare, ma sull'andamento globale della variabile. Tutti gli individui hanno la barriera esterna circa nella stessa posizione, dal valore di 0,48 p.u.; la posizione della barriera interna manifesta una variabilità maggiore, ma si può comunque sottolineare un valore più diffuso pari a 0,25 p.u.

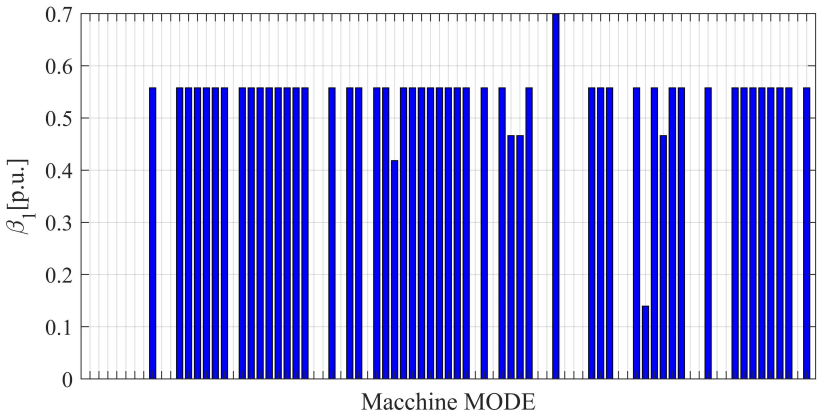

Figura 2.7: MODE 1. Valori di inclinazione della barriera esterna caratterizzanti i migliori individui del processo di ottimizzazione

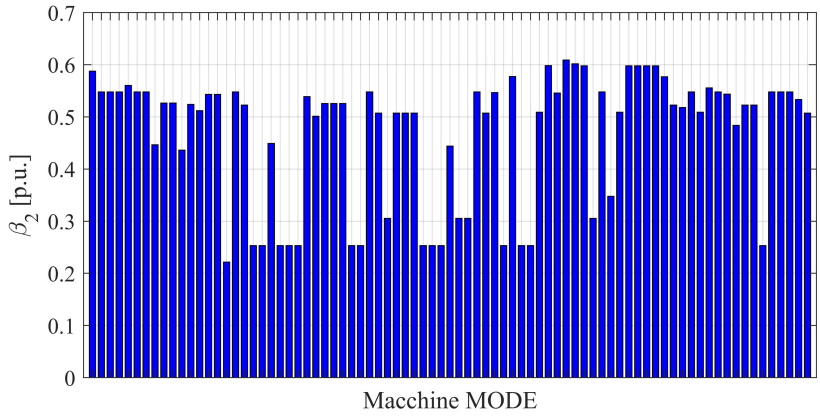

Figura 2.8: MODE 1. Valori di inclinazione della barriera interna caratterizzanti i migliori individui del processo di ottimizzazione

Un secondo parametro per cui si può evidenziare un valore in particolare è l'inclinazione della barriera esterna β_1, in Figura 2.7. Dal grafico si nota come molte macchine sono caratterizzate da una barriera esterna avente un'inclinazione di 0,55 p.u. All'inclinazione della barriera interna invece, in Figura 2.8, non si può attribuire nessun valore caratteristico o dominante. Inoltre ricordando i criteri con cui si disegna il rotore, l'inclinazione del secondo strato deve essere più bassa del primo a meno che le due barriere siano sufficientemente distanti. In questo caso i due strati sono in genere vicini, come testimonia il valore α_2. Perciò quando si legge dal grafico un valore normalizzato di β_2 basso, difficilmente questo sarà poi effettivamente assegnato alla barriera interna, a meno che il primo strato non abbia un valore β_1 normalizzato nullo o più basso del secondo. Per questo motivo il valore di β_2 riportato nel grafico può non essere verificato.

Non sono riportati i diagrammi a barre che descrivono lo spessore dei magneti, la forma del ponticello tangenziale o la fase della corrente elettrica utilizzata per le simulazioni ad elementi finiti durante lo svolgimento dell'ottimizzazione. Il motivo è che non si identificano degli andamenti chiari per queste variabili. Solo per la fase della corrente si può assumere un valore dominante di circa 130 °.

Con i grafici delle variabili si vuole dare una prova dell'azione evolutiva dell'ottimizzazione. E di come la popolazione iniziale sia mutata verso una configurazione ottimale e i diversi individui abbiano così acquisito delle caratteristiche simili. In particolare questo fenomeno è evidente tra i cinque individui appartenenti al fronte di Pareto che risultano quasi uguali se non per lievi differenze di inclinazione delle barriere o spessore dei magneti.

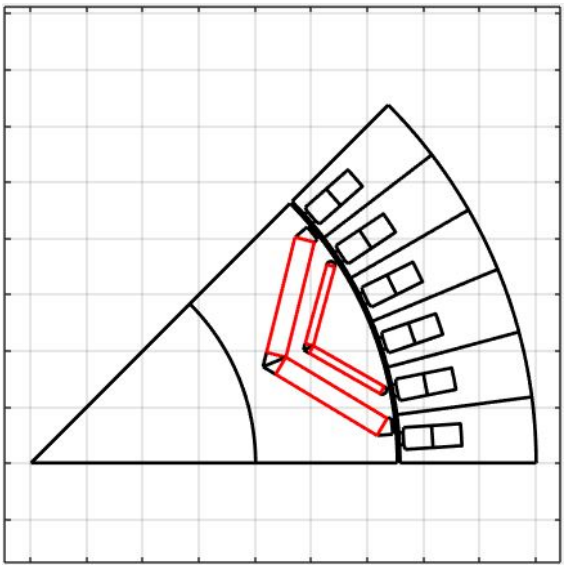

Figura 2.9: AVALON-mode1

In Figura 2.9 si può osservare la geometria del motore denominato AVALON-mode1 ottenuto dall'ottimizzazione mentre in Tabella 2.3 sono descritte le sue principali caratteristiche. Come già evidenziato dal fronte di Pareto, tramite l'ottimizzazione si sono ottenuti dei miglioramenti. La coppia prodotta dalla macchina ottima, pari a 146 Nm, soddisfa la richiesta dell'applicazione e l'ondulazione si è ridotta di molto rispetto al modello di partenza AVALON-base, passando da un valore di 45 Nm a 13,4 Nm. La corrente caratteristica con un valore di 252 A è inferiore al valore del modello base di 290 A.

Si aggiunge una caratteristica che in un primo momento è stata trascurata ossia la corrente di smagnetizzazione. Se per il motore AVALON-base questa è uguale a 220 A, per il modello ottimizzato AVALON-mode1 si riduce a meno di 100 A. La corrente smagnetizzante è calcolata tramite SyR-e. Attraverso la sezione "simulation" è possibile selezionare una o più temperature alla quale

Tabella 2.3: Principali caratteristiche AVALON-mode1

Grandezza	Simbolo	Unità	Valore
Posizione 1° barriera	α_1	°	10,80
Spessore 1° magnete	hc_1	mm	1,50
Inclinazione 1° barriera	β_1	°	52,50
Forma 1° ponticello tangenziale			circolare
Posizione 2° barriera	α_2	°	5,80
Spessore 2° magnete	hc_2	mm	3,55
Inclinazione 2° barriera	β_2	°	53,50
Forma 2° ponticello tangenziale			poligonale
Peso totale dei magneti		kg	1,18
Coppia	T	Nm	146
Corrente nominale	i_0	A	135
Corrente caratteristica	i_{ch}	A	252
Corrente smagnetizzante	i_{demag}	A	92
Ondulazione di coppia picco-picco	$\Delta T_{p_k p_k}$	Nm	13,4
Fattore di potenza	IPF		0,97

si vuole effettuare la simulazione, i risultati menzionati sono alla temperatura di $180°C$.

Il modo con cui SyR-e calcola la corrente smagnetizzante è conservativo ed anche per questo il valore caratterizzante il motore AVALON-mode1 è così basso. Il valore di corrente smagnetizzante ottenuto dalla simulazione corrisponde alla condizione in cui in almeno un punto dei due strati di magnete è presente un valore di induzione magnetica minore del limite di smagnetizzazione. L'induzione magnetica si calcola lungo la direzione di magnetizzazione del magnete e non in valore assoluto. É un metodo cautelativo perché la corrente così definita potrebbe smagnetizzare una piccola porzione di pochi punti percentuali dell'area totale dei magneti. Ma si accetta il criterio perché garantisce un'alta resilienza del magnete alla smagnetizzazione.

Le zone critiche dei magneti che più facilmente si smagnetizzano sono quelle più vicine al traferro. Per cui si riduce la lunghezza dei magneti, a svantaggio delle prestazioni meccaniche, in modo da aumentarne la distanza dal traferro. Si accorciano così di tre millimetri entrambi gli strati di magnete. La coppia si riduce a 132 Nm, anche il valore di corrente caratteristica diminuisce a 200 A mentre la corrente smagnetizzante aumenta al valore di 325 A. Se da un lato la modifica migliora le caratteristiche elettriche della macchina dall'altro ne peggiora le prestazioni meccaniche e comunque non risulta sufficiente per ottenere degli alti standard di resilienza del motore ad un eventuale guasto.

Il secondo lancio dell'ottimizzazione "MODE 2" produce il risultato in Figura 2.10. Il fronte di Pareto racchiude un numero di soluzioni ottime maggiore rispetto al

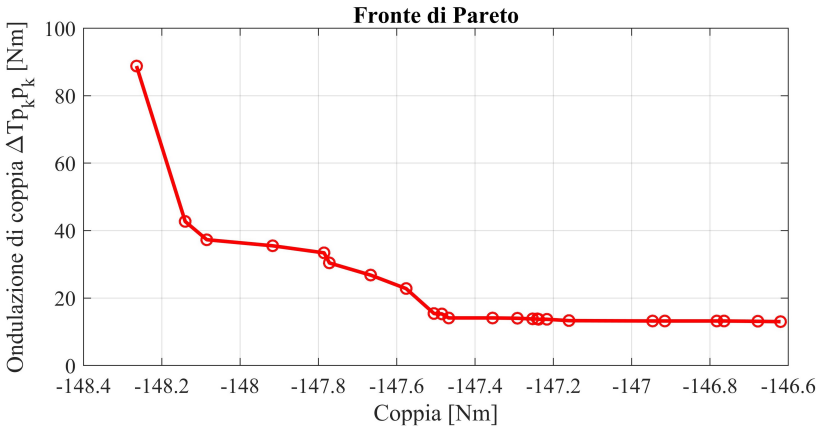

Figura 2.10: MODE 2. Fronte di Pareto

primo procedimento. L'intervallo di coppia producibile, rappresentato in ascissa anche ora risulta stretto. La caratteristica di ondulazione invece ha un intervallo più esteso rispetto "MODE 1". In relazione al secondo lancio dell'ottimizzazione così come per le prove che si descrivono in seguito, non si riportano i diagrammi che mostrano come variano i diversi geni tra i migliori individui del processo di ottimizzazione. In precedenza si sono illustrati tali risultati per rafforzare l'idea che le diverse strutture al termine di un ottimizzazione sono simili coerentemente alla teoria del metodo evolutivo. Ma in seguito si vuole porre attenzione sul solo fronte di Pareto e sul motore scelto tra le soluzioni ottime.

Il fronte di Pareto ottenuto da "MODE 2" presenta un intervallo più ampio di valori in ordinata, questo è dovuto in particolare ad un individuo, che come mostrato dal grafico in Figura 2.10 si distingue maggiormente dal resto dell'insieme, con un'ondulazione di coppia picco-picco maggiore di 80 Nm. Analizzando le caratteristiche di quest'ultimo si noterebbe come sia l'unica tra le soluzioni ottime ad avere due strati più distanti. É l'unico individuo nel fronte di Pareto con un valore di α_2 diverso, e maggiore di 0,25 p.u. Da ciò si deduce l'importanza della posizione dei magneti.

Allo stesso modo della prima ottimizzazione, si sceglie il motore con un valore di ondulazione di coppia picco-picco più basso possibile. La struttura del motore scelto è illustrata in Figura 2.11.

La geometria del modello AVALON-mode2 risulta una configurazione limite. Gli estremi radiali dei due strati sono infatti al limite della distanza reciproca. Si verifica ciò perché durante la fase evolutiva è stato assegnato un valore di inclinazione alla barriera interna maggiore del valore di inclinazione della barriera esterna ed essendo i due strati vicini si ottiene tale configurazione. Le funzioni obiettivo corrispondenti sono risultate comunque vantaggiose e questo ha portato alla sopravvivenza e diffusione di tale cromosoma.

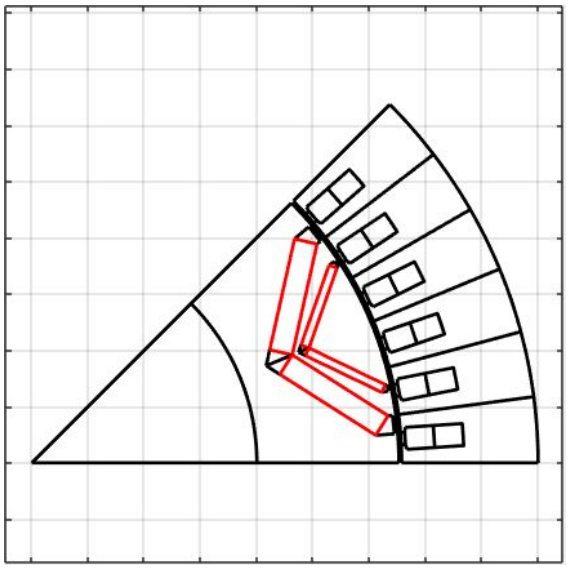

Figura 2.11: AVALON-mode2

Tabella 2.4: Principali caratteristiche AVALON-mode2

Grandezza	Simbolo	Unità	Valore
Posizione 1° barriera	α_1	°	10,62
Spessore 1° magnete	hc_1	mm	1,50
Inclinazione 1° barriera	β_1	°	48,82
Forma 1° ponticello tangenziale			poligonale
Posizione 2° barriera	α_2	°	5,87
Spessore 2° magnete	hc_2	mm	4,10
Inclinazione 2° barriera	β_2	°	54,90
Forma 2° ponticello tangenziale			poligonale
Peso totale dei magneti		kg	1,29
Coppia	T	Nm	147
Corrente nominale	i_0	A	135
Corrente caratteristica	i_{ch}	A	268
Corrente smagnetizzante	i_{demag}	A	104
Ondulazione di coppia picco-picco	$\Delta T_{p_k p_k}$	Nm	13,3
Fattore di potenza	IPF		0,94

Tra le principali caratteristiche del motore AVALON-mode2 riportate in Tabella 2.4 si evidenziano i valori di coppia e ondulazione di coppia picco-picco soddisfacenti ai fini dell'applicazione. Anche questo modello però ha un valore di corrente smagnetizzante inaccettabile, che risulta anche inferiore della corrente nominale. É necessario accorciare i magneti in modo da eliminare le zone che

risultano facilmente smagnetizzabili. Accorciando i due strati di magnete di tre millimetri in modo da distanziare il magnete dal traferro, si aumenta il valore della corrente di smagnetizzazione a 340 A e il valore di corrente caratteristica diminuisce a 220 A. Per effetto delle modifiche decresce anche il valore di coppia erogabile a 133 Nm.

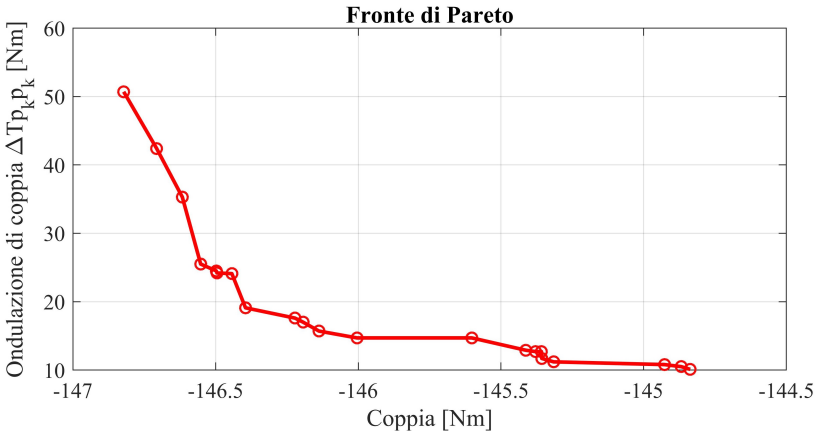

Figura 2.12: MODE 3. Fronte di Pareto

Il risultato del terzo lancio dell'ottimizzazione "MODE 3" è in Figura 2.12. I guadagni ottenuti per le due funzioni obiettivo non si distaccano dai primi due svolgimenti. Non ci sono soluzioni che manifestano una caratteristica di coppia molto più elevata del target fissato. Ci sono invece buone possibilità di ridurre l'ondulazione picco-picco fino valori di 10 Nm. Tra le soluzioni racchiuse nel fronte di Pareto, ma in genere in tutti gli individui migliori dell'ottimizzazione, emerge una caratteristica geometrica corrispondente all'inclinazione della barriera esterna tale da orientarla in modo perpendicolare all'asse di simmetria del polo.

Il modello scelto tra le soluzioni ottime e denominato AVALON-mode3 è in Figura 2.13. Dall'immagine si riconosce la geometria di rotore anticipata, con lo strato esterno piatto. In Tabella 2.5 sono descritte le principali caratteristiche del motore. Ancora una volta sono presenti delle buone qualità meccaniche, in riferimento alle quantità di coppia e ondulazione. Con le stesse motivazioni dei modelli ottimi precedenti è necessario accorciare i magneti per ottenere un valore di corrente smagnetizzante meno critico. Una volta accorciati di tre millimetri entrambi gli strati di magnete si ha un valore di corrente di smagnetizzazione pari a 320 A, mentre la corrente caratteristica si riduce a 226 A e la coppia erogabile diventa 130 Nm.

Confrontando i valori in tabella dei tre modelli AVALON-mode1, AVALON-mode2, AVALON-mode3 ottenuti rispettivamente dai tre processi di ottimizzazione si riconoscono delle analogie: la posizione delle barriere α_1 e α_2 è circa la stessa in tutti e tre i modelli; il peso totale dei magneti utilizzato non cambia; il valore di

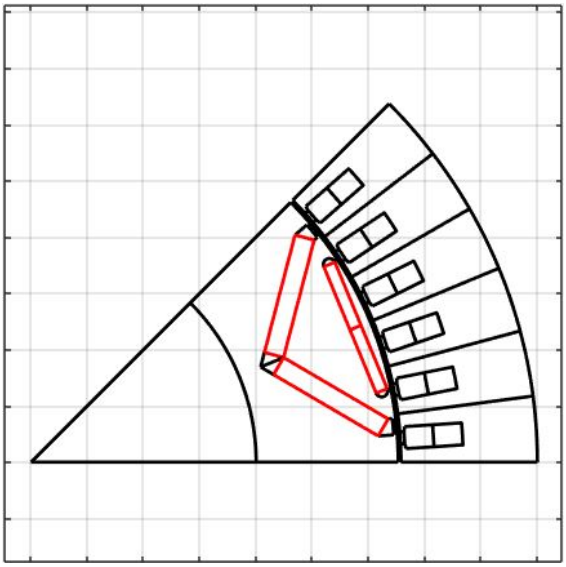

Figura 2.13: AVALON-mode3

Tabella 2.5: Principali caratteristiche AVALON-mode3

Grandezza	Simbolo	Unità	Valore
Posizione 1° barriera	α_1	°	10,93
Spessore 1° magnete	hc_1	mm	2,12
Inclinazione 1° barriera	β_1	°	90
Forma 1° ponticello tangenziale			circolare
Posizione 2° barriera	α_2	°	5,83
Spessore 2° magnete	hc_2	mm	3,52
Inclinazione 2° barriera	β_2	°	53,00
Forma 2° ponticello tangenziale			poligonale
Peso totale dei magneti		kg	1,24
Coppia	T	Nm	145
Corrente nominale	i_0	A	135
Corrente caratteristica	i_{ch}	A	272
Corrente smagnetizzante	i_{demag}	A	113
Ondulazione di coppia picco-picco	$\Delta T_{p_k p_k}$	Nm	10
Fattore di potenza	IPF		0,95

coppia e di ondulazione è buono per tutti e tre i motori senza evidenziare un modello in particolare. Mentre si apprezzano differenze nelle inclinazioni delle barriere, o nella forma dei ponticelli tangenziali o negli spessori del magnete esterno ed interno. Una prima osservazione relativa al rotore di un motore IPM è che la posizione delle barriere è una caratteristica molto influente sull'ondulazione di coppia. E quindi

le tre strutture dedotte dalle ottimizzazioni sebbene abbiano delle differenze, sono accomunate dalla caratteristica dominante della posizione α dei due strati.

Si può scegliere un modello migliore tra i tre in funzione del fattore di potenza, prediligendo perciò il primo motore AVALON-mode1. Ma questa non può essere una struttura definitiva perché presenta un valore di corrente smagnetizzante basso. Anche distanziando i magneti dal traferro il valore non cresce abbastanza da garantire un'adeguata resilienza del motore. Bisogna intervenire sulle dimensioni dei magneti, infatti aumentando lo spessore, aumenta il valore di corrente necessario a smagnetizzarlo. Ma piuttosto che agire direttamente sul modello si preferisce eseguire una nuova ottimizzazione cambiando i valori di input delle variabili da ottimizzare.

2.5 Modifica input ottimizzazione

I valori in input per il nuovo lancio dell'ottimizzazione sono uguali ai primi utilizzati e descritti in Tabella 2.2, ma si cambia l'intervallo relativo allo spessore dei magneti.

Tabella 2.6: Nuove impostazioni ottimizzazione

Grandezza	Simbolo	Unità	Valore
Numero di generazioni			60
Numero di individui per popolazione			60
Escursione angolare rotore (MODE)		$elt°$	30
Numero di posizioni rotore (MODE)			5
Escursione angolare rotore (rivalutazione)		$elt°$	60
Numero di posizioni rotore (rivalutazione)			20
Posizione prima barriera	α_1	$p.u.$	$0{,}25 - 0{,}5$
Posizione seconda barriera	α_2	$p.u.$	$0{,}20 - 0{,}5$
Spessore barriera	hc	$p.u.$	$6 - 12$
Forma ponticello tangenziale			$0 - 1$
Inclinazione barriera	β	$p.u.$	$0 - 1$
Angolo di fase della corrente	γ	$°$	$90 - 145$
Target di coppia	T	Nm	140
Target di ondulazione di coppia	$\Delta T_{p_k p_k}$	Nm	14

In Tabella 2.6 si elencano i parametri utilizzati per l'ottimizzazione. Il limite minimo ammesso per lo spessore è raddoppiato, cercando in questo modo di ottenere delle macchine caratterizzate da magneti più grandi. Il resto delle variabili non cambia, il numero di generazioni analizzate e il numero di individui per popolazione

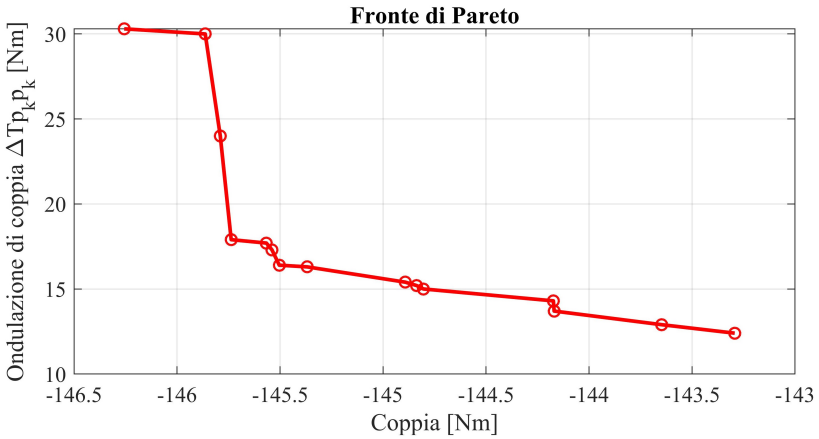

Figura 2.14: MODE 4. Fronte di Pareto

sono gli stessi, così come per i target delle funzioni obiettivo, 140 Nm per la funzione coppia e 14 Nm per l'obiettivo del valore di ondulazione di coppia picco-picco.

Il fronte di Pareto che si ottiene come risultato è in Figura 2.14. Anche questa quarta ottimizzazione del modello AVALON-base produce dei miglioramenti significativi dell'ondulazione di coppia. Dal valore di partenza di 45 Nm si può ottenere un valore inferiore ai 15 Nm picco-picco. La coppia erogabile, in ascissa, è sufficiente per la richiesta dell'applicazione di 145 Nm sebbene ci siano alcuni valori lievemente inferiori. Si sceglie il modello ottimo tra le soluzioni racchiuse nel fronte di Pareto al fine di ridurre il più possibile l'ondulazione di coppia, la struttura è in Figura 2.15.

Il modello AVALON-mode4 presenta una geometria familiare, i magneti sono configurati come per AVALON-mode3. La differenza fra i due è il loro spessore ed in particolare di quello dello strato più esterno che per il modello mode4 risulta più grande. In Tabella 2.7 si leggono le caratteristiche del motore ottimo. Grazie alle maggiori dimensione del magnete, testimoniate anche dal peso maggiore del materiale magnetico, si è ottenuto un aumento del valore di corrente smagnetizzante. Cercando di aumentarne ulteriormente il valore, in analogia con le prime tre ottimizzazioni, si valutano gli effetti dell'accorciamento aumentando così la distanza del materiale magnetico dal traferro.

Dopo aver ridotto la lunghezza di entrambi gli strati di magnete di tre millimetri, il valore di corrente di smagnetizzazione aumenta a 350 A, la corrente caratteristica diventa pari a 230 A e la coppia decresce a 125 Nm. Concentrandosi esclusivamente sulle quantità di corrente, sono molto simili a quelle ottenute per i modelli precedenti dopo le modifiche.

In Tabella 2.8 si riassumono la corrente caratteristica e la corrente smagnetizzante per i quattro modelli descritti fino ad ora. Si fa riferimento ai risultati che si ottengono dopo l'accorciamento dei magneti. Dai valori in tabella è più evidente che i motori ottenuti ammettono un limite di corrente smagnetizzante equiparabile.

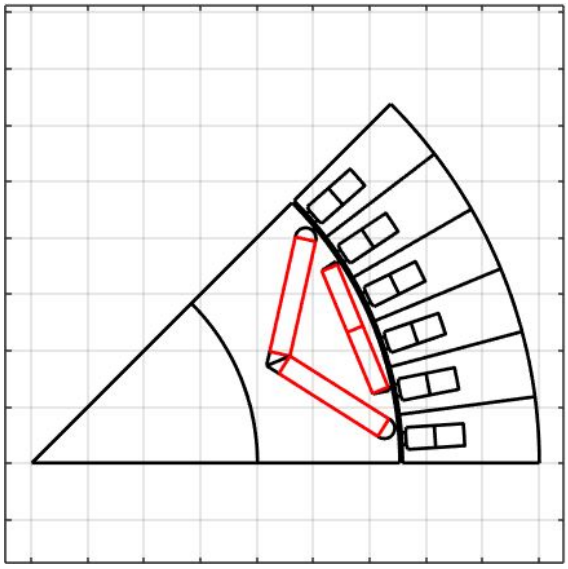

Figura 2.15: AVALON-mode4

Tabella 2.7: Principali caratteristiche AVALON-mode4

Grandezza	Simbolo	Unità	Valore
Posizione 1° barriera	α_1	°	10,80
Spessore 1° magnete	hc_1	mm	3,00
Inclinazione 1° barriera	β_1	°	90,00
Forma 1° ponticello tangenziale			poligonale
Posizione 2° barriera	α_2	°	6,07
Spessore 2° magnete	hc_2	mm	3,70
Inclinazione 2° barriera	β_2	°	54,90
Forma 2° ponticello tangenziale			circolare
Peso totale dei magneti		kg	1,34
Coppia	T	Nm	142
Corrente nominale	i_0	A	135
Corrente caratteristica	i_{ch}	A	285
Corrente smagnetizzante	i_{demag}	A	220
Ondulazione di coppia picco-picco	$\Delta T_{p_k p_k}$	Nm	14
Fattore di potenza	IPF		0,96

Tutte le strutture ottimizzate presentano una corrente di smagnetizzazione di valore circa 1,5 volte la corrente caratteristica.

Il cambio dei valori in input per il nuovo procedimento evolutivo non ha indirizzato la ricerca verso una struttura diversa da quelle ottenute precedentemente. Occorre procedere con una diversa strategia per incrementare il valore di corrente

smagnetizzante. Quest'ultimo dovrebbe essere circa tre volte il valore di corrente caratteristica. In questo modo si avrebbe un motore più sicuro, che a seguito di un guasto, ad esempio, non rischia di danneggiarsi in modo irreversibile a causa della smagnetizzazione dei magneti.

Tabella 2.8: Caratteristiche modelli ottimi in seguito all'accorciamento dei magneti

Grandezza	Simbolo	Unità	AVALON-mode			
			1	2	3	4
Corrente caratteristica	i_{ch}	A	200	220	226	230
Corrente smagnetizzante	i_{demag}	A	325	340	320	350

2.6 Confronto fra le geometrie ottime

Per comparare in modo più diretto i risultati ottenuti dalle diverse ottimizzazioni e le caratteristiche del modello ottenuto dal progetto preliminare, le si rappresenta in un unico grafico in Figura 2.16. Il contrassegno blu indica la misura di coppia e ondulazione del modello AVALON-base, in rosso invece sono evidenziate le soluzioni ottime scelte dal rispettivo fronte di Pareto.

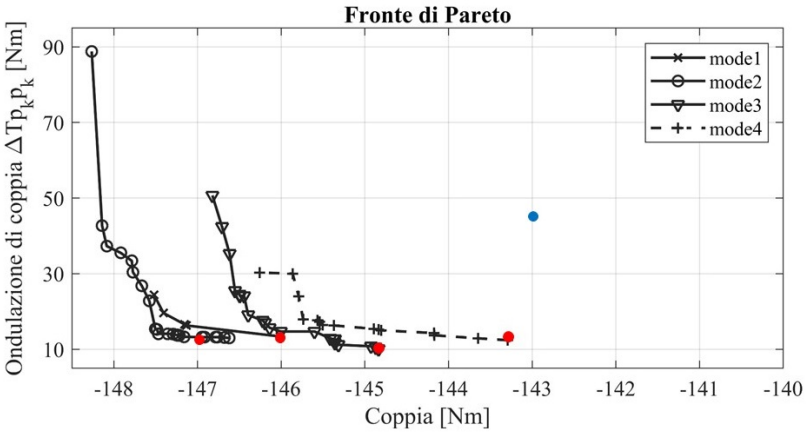

Figura 2.16: Fronti di Pareto delle diverse ottimizzazioni

Si sintetizzano così le diverse prestazioni e considerazioni esposte precedentemente. Una prima considerazione è sull'efficacia dell'ottimizzazione; è chiaro come i motori ottimi sono soluzioni dominanti rispetto il modello base. Si nota anche come l'evoluzione delle diverse ottimizzazioni sia simile, in termini di caratteristiche dei motori ottimi. In accordo agli intervalli di valori utilizzati per il procedimento

evolutivo si può concludere che non si riesce ad aumentare la densità di coppia che già si presentava con AVALON-base. Mentre si riduce in modo significativo l'ondulazione di coppia, ma si deve almeno ammettere una variazione di coppia picco-picco del 10% del valor medio.

In Tabella 2.9 si riportano nuovamente le misure principali delle geometrie e delle prestazioni dei motori in analisi. L'evidente differenza tra il modello base e i modelli ottimi risulta l'ondulazione di coppia picco-picco. Poi è possibile notare una differenza di ampiezza della corrente smagnetizzante tra il primo gruppo di soluzioni ottime e il risultato dell'ultima ottimizzazione mode4. Quest'ultimo si affianca molto più alla caratteristica del modello di partenza. Lo stesso vale, se pur per differenze minori, per la corrente caratteristica.

Le quantità appena descritte sono il riflesso dei cambiamenti della geometria di rotore. Il parametro decisivo per l'oscillazione di coppia risulta essere la posizione dei magneti. E le macchine ottime hanno in pratica i magneti nelle stesse posizioni. La seconda variabile per importanza sembra essere lo spessore dei magneti, il quale differenzia come visto il primo gruppo di risultati e il secondo, in relazione anche alla misura di corrente di smagnetizzazione. Successivamente l'inclinazione delle barriere e la forma del ponticello tangenziale possono migliorare la qualità della macchina. A riguardo dell'inclinazione, contrariamente a quanto dedotto dall'analisi globale dei migliori individui della prima ottimizzazione, è la barriera più interna ad ammettere un valore comune per i diversi modelli. Nelle soluzioni ottime è dominante la presenza di uno strato interno meno acuto rispetto al modello base di partenza.

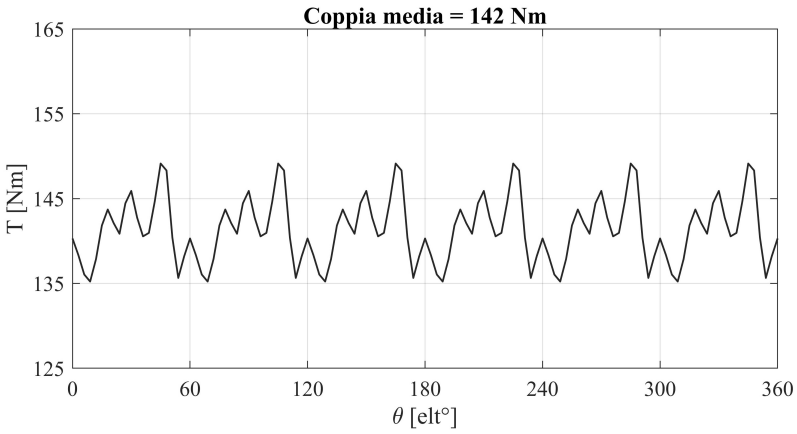

Figura 2.17: Andamento di coppia AVALON-mode4

Si sceglie come motore ottimo il modello AVALON-mode4 perché è caratterizzato da delle buone qualità meccaniche, come mostrato in Figura 2.17, e grazie allo spessore dei magneti presenta un valore di corrente di smagnetizzazione maggiore a

confronto delle prime soluzioni ottime. Come descritto nel paragrafo della rispettiva ottimizzazione, l'ampiezza di corrente smagnetizzante del motore AVALON-mode4 è bassa in relazione alla misura di corrente caratteristica. E l'accorciamento dei magneti non è sufficiente per aumentarne il valore.

Tabella 2.9: Confronto caratteristiche fra il modello di partenza e i modelli ottimi

Grandezza	Simbolo	base	mode			
			1	2	3	4
Posizione 1° barriera (°)	α_1	9,00	10,80	10,62	10,93	10,8
Spessore 1° magnete (mm)	hc_1	3,25	1,50	1,50	2,12	3,00
Inclinazione 1° barriera (°)	β_1	49,50	52,50	48,82	90	90
Forma 1° ponticello		cir.	cir.	polig.	cir.	polig.
Posizione 2° barriera (°)	α_2	9,00	5,80	5,87	5,83	6,07
Spessore 2° magnete (mm)	hc_2	3,25	3,55	4,10	3,52	3,70
Inclinazione 2° barriera (°)	β_2	49,50	53,50	54,90	53,00	54,90
Forma 2° ponticello tangenziale		cir.	polig.	polig.	polig.	cir.
Peso totale dei magneti (kg)		1,42	1,18	1,29	1,24	1,34
Coppia (Nm)	T	143	146	147	145	142
Corrente nominale (A)	i_0	135	135	135	135	135
Corrente caratteristica (A)	i_{ch}	290	252	268	272	285
Corrente smagnetizzante (A)	i_{demag}	220	92	104	113	220
Ondulazione di coppia (Nm)	$\Delta T_{p_k p_k}$	45	13,4	13,3	10	14
Fattore di potenza	IPF	0,96	0,97	0,94	0,95	0,96

Capitolo 3

Affinamenti

Dopo che si è progettato il motore AVALON-base e tramite processi di ottimizzazione ne è stata migliorata la struttura ed in particolare la geometria di rotore, si deve cambiare alcune caratteristiche del modello al fine di aumentarne la resilienza alla smagnetizzazione. Il valore di corrente smagnetizzante che caratterizza il motore base, così come i modelli mode ottimizzati, è basso soprattutto in relazione all'elevato valore di corrente caratteristica.

Un motore che non rischi di danneggiarsi con facilità dovrebbe presentare un valore di corrente smagnetizzante 2,5-3 volte superiore al valore di corrente caratteristica. Nel caso di questa tesi, la specifica di corrente caratteristica non è stringente perché non ci sono particolari esigenze di controllo, ma è comunque adeguato ridurne il più possibile il valore.

3.1 Corrente caratteristica e smagnetizzante

Il primo accorgimento da prendere per ottenere dei risultati diversi è cambiare il materiale magnetico. Ci si orienta verso un materiale più adatto ad un utilizzo in ambienti con alte temperature. I magneti in terre rare samario cobalto risultano idonei per tale scopo, la tecnologia scelta è Recoma 30HE.

Il nuovo materiale è sperimentato per la struttura ottimizzata AVALON-mode4. Prima di rieseguire i test di corrente smagnetizzante si apportano anche alcuni cambiamenti della geometria di rotore.

Considerando la qualità superiore del materiale è possibile ridurre lo spessore dei magneti, così facendo si riduce la corrente caratteristica. Mentre per proteggere meglio da fenomeni di smagnetizzazione lo strato di magneti esterno, si preferisce ad uno strato piatto, uno inclinato di 0,2 p.u. Per quanto concerne la lunghezza dei magneti, anche ora si accorciano, ma non in modo invasivo come nel capitolo precedente. La lunghezza dei magneti in percentuale rispetto alla massima possibile diventa uguale a 86,56% e 91,41% rispettivamente del primo e secondo strato.

Tabella 3.1: Affinamenti del motore AVALON-mode4

Grandezza	Simbolo	Unità	Valore
Spessore 1° magnete	hc_1	mm	1,5
Inclinazione 1° barriera	β_1	°	76,5
Spessore 2° magnete	hc_2	mm	2,0
Materiale			Recoma 30HE
Corrente nominale	i_0	A	135
Corrente caratteristica	i_{ch}	A	164
Corrente smagnetizzante	i_{demag}	A	385

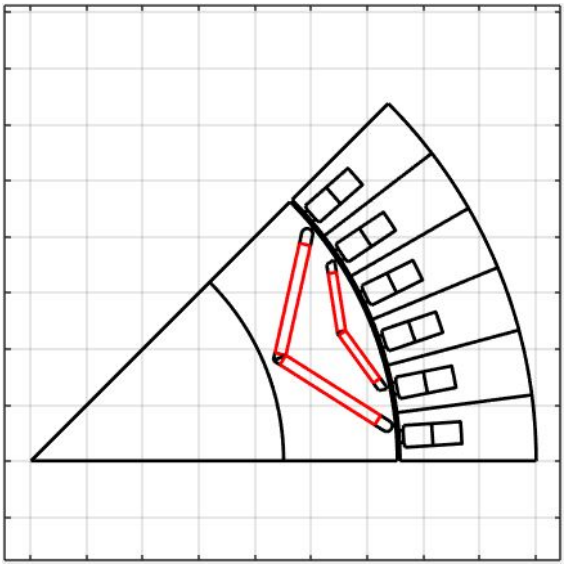

Figura 3.1: AVALON-def1

In Tabella 3.1 sono riassunti i nuovi parametri del motore. In riferimento ai risultati delle simulazioni si nota come, da un lato si è ridotta la corrente caratteristica e dall'altro il valore di corrente smagnetizzante è rimasto elevato.

Infine per massimizzare il rapporto tra corrente smagnetizzante e corrente caratteristica si interviene su un'ulteriore specifica: il target di temperatura dei magneti. Una previsione di $180°C$ può risultare pessimistica, così si riduce il target a $140°C$. É noto come la temperatura influenzi le caratteristiche di un magnete, garantire un ambiente più freddo riduce il pericolo di smagnetizzazione dei magneti. I nuovi valori di corrente smagnetizzante e caratteristica sono 460 A e 170 A per un rapporto di 2,7. Così tramite il diverso materiale e un target di temperatura dei magneti più basso si è risolta la criticità discussa.

3.2 Specifica di coppia

La specifica è stata messa momentaneamente in secondo piano concentrandosi sugli aspetti magnetici.

Il motore produce una coppia di 125 Nm, quindi più bassa della quantità richiesta dall'applicazione. L'abbassamento è dovuto alle modifiche dei magneti, perché lo spessore minore comporta meno flusso al traferro riducendo la prestazione meccanica. Si compensa la quantità di coppia persa aumentando la lunghezza del motore da 100 mm a 115 mm. L'allungamento aumenta la sezione utile per l'induzione magnetica e così ne aumenta il flusso e perciò la coppia.

Un'ulteriore modifica riguarda il coefficiente di riempimento cava. Viene qui citato perché come si evince in (1.8), influenza il valore di corrente nominale. Tale coefficiente rappresenta la capacità di sfruttare l'area cava disponibile, o viceversa la quantità di spazio persa a causa della presenza di isolante dei conduttori. Non ne era stato discusso il valore, introdotto all'inizio del progetto pari a 0,75. Si ritiene opportuno ridurlo a 0,7.

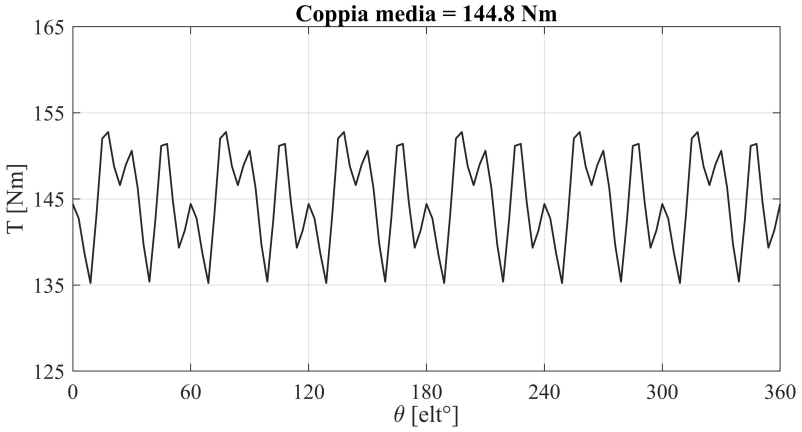

Figura 3.2: Andamento di coppia AVALON-def1

Anche l'allungamento influenza il valore di corrente nominale, ma se questo ne aumenta l'ampiezza, un coefficiente di riempimento cava più piccolo la riduce. Il nuovo valore di corrente nominale è in pratica invariato con un ampiezza di 134,3 A. La coppia risultante è in linea con la specifica di 145 Nm. In Figura 3.2 è riportato il risultato di coppia ottenuto tramite simulazione in SyR-e per un ampiezza di corrente pari al valore nominale. Il valore medio di coppia è precisamente uguale a 144,8 Nm evidenziando un'ondulazione picco-picco di 17,5 Nm. Mentre il fattore di potenza non è illustrato perché in pratica costante con un valore medio uguale a 0,86 che risulta peggiorato rispetto ai modelli ottenuti dalle ottimizzazioni, a causa delle modifiche dei magneti.

3.3 Riavvolgimento motore

É necessario verificare che il numero di spire sia corretto per rendere compatibile la specifica di velocità nominale del motore con la disponibilità di tensione di alimentazione. Se così non fosse si deve riavvolgere il motore. Per il progetto c'è la possibilità di sfruttare la massima tensione concatenata di 650 V del DC-link, in relazione alla velocità nominale di 5900 rpm di un motore con quattro coppie polari. Con questi dati è possibile determinare il target di flusso macchina, tramite l'equazione:

$$\Lambda_T = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{V_{DC}}{n_{nom}} \frac{60}{2\pi\, p} \tag{3.1}$$

Inserendo i relativi valori numerici in (3.1) si ottiene un flusso pari a 0,152 Vs. L'attuale motore AVALON-def1 ha un numero di spire in serie per fase N_s pari a 44. In figura si riportano i relativi valori di flusso in assi d e q ottenuti tramite simulazione in SyR-e per il valore di corrente nominale.

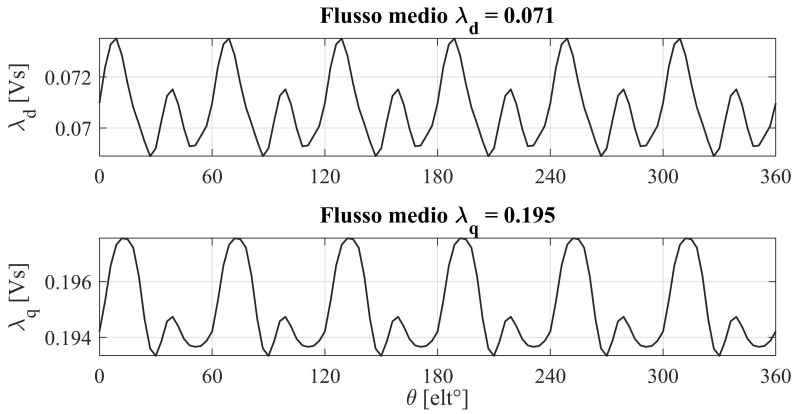

Figura 3.3: Flusso in asse d e in asse q AVALON-def1

Il modulo del flusso Λ_1 relativo ai valori medi in asse d e q, riportati in Figura 3.3, corrisponde a 0,207 Vs. Per alimentare questo flusso alla velocità nominale occorrerebbe una tensione maggiore di quella disponibile. Per questo motivo bisogna diminuire il numero di spire in serie per fase N_s in modo da ridurre il flusso concatenato. Il fattore di proporzionalità con cui definire il nuovo numero di spire dipende dal rapporto del flusso target e di quello attuale:

$$N_s' = N_s \cdot \frac{\Lambda_T}{\Lambda_1} \tag{3.2}$$

Il nuovo numero di spire che si determina utilizzando (3.2) è pari a 32. Il risultato esatto dell'equazione può non essere un numero intero, è chiaro che il numero di

spire in serie per fase deve invece esserlo, così si arrotonda. N_s deve anche risultare un multiplo di 8, equivalente al prodotto del numero di cave per polo per fase q pari a 2 e del numero di coppie polari p pari a 4. L'avvolgimento non prevede un doppio strato.

Si decide di riavvolgere il motore con un numero di spire più basso e pari a 24 perché è presente anche una richiesta di sovraccarico. In seguito tramite le analisi più dettagliate delle mappe di flusso del motore si controlla la compatibilità tra la tensione disponibile e la velocità nominale richiesta.

3.4 AVALON-def1

Il modello AVALON-def1 raffigurato in Figura 3.1, dopo essere stato allungato e riavvolto, è descritto in Tabella 3.2.

Lo statore è lo stesso progettato dal "Preliminary Design" del modello AVALON-base. La geometria del rotore in gran parte eredita i parametri dal modello ottimizzato AVALON-mode4, mentre per gli aspetti magnetici si è intervenuto in modo mirato come descritto nel paragrafo precedente. L'allungamento della macchina ne aumenta il peso anche se si allarga il raggio d'albero snellendo in modo lieve il rotore. Il peso dei magneti come si intuisce dalle dimensioni si è ridotto molto rispetto i modelli precedenti. Questo si riflette in un guadagno economico perché il materiale magnetico è un materiale pregiato e costoso, perciò l'utilizzo di una quantità minore risulta meno dispendioso.

A causa del riavvolgimento si notano valori più elevati di corrente. L'ampiezza nominale cresce con lo stesso fattore di proporzionalità con cui si è ridotto il numero di spire in serie per fase, perché il prodotto $N_s \cdot i_0$ è costante. La corrente smagnetizzante e la corrente caratteristica mantengono lo stesso rapporto di 2,7 del modello con 44 spire. Così come il valore caratteristico rispetto quello nominale. Si noti inoltre come l'allungamento del motore non influenza questi due aspetti. Il fenomeno di smagnetizzazione è studiato in modo bidimensionale, mentre la corrente caratteristica dipende da due variabili, flusso concatenato prodotto dai magneti e induttanza in asse d, funzioni lineari della lunghezza e di conseguenza il loro rapporto ne risulta indipendente.

Il riavvolgimento non influenza la prestazione della coppia, Figura 3.2, perché il prodotto $N_s \cdot i_0$ è costante. L'ondulazione è quasi il 10% del valore di coppia media. In una seconda fase progettuale c'è la possibilità di ridurre ancora l'oscillazione di coppia tramite metodi costruttivi di "skewing", ovvero torsione del rotore in modo da inclinare in senso assiale i magneti.

In tabella si possono leggere anche i valori di tensione a carico e tensione a vuoto di fase. Trascurando le cadute resistive queste tensioni coincidono con la tensione ai morsetti del motore. Non si sfrutta a pieno la massima tensione di fase disponibile pari a 375 V perché il numero di spire N_s con cui è stato riavvolto il motore ha

aumentato il valore di velocità base e per la velocità nominale è sufficiente una tensione più bassa.

Tabella 3.2: Parametri AVALON-def1

Grandezza	Simbolo	Unità	Valore
Raggio esterno di rotore	r	mm	65,25
Raggio d'albero		mm	45,00
Lunghezza rotore	L	mm	115
Lunghezza dente	l_t	mm	11,08
Larghezza dente	w_t	mm	4,81
Posizione 1° barriera	α_1	°	10,80
Spessore 1° magnete	hc_1	mm	1,50
Inclinazione 1° barriera	β_1	°	76,50
Posizione 2° barriera	α_2	°	6,07
Spessore 2° magnete	hc_2	mm	2,00
Inclinazione 2° barriera	β_2	°	54,90
Peso macchina		kg	18,20
Peso magnete		kg	0,85
Numero di spire in serie per fase	N_s		24
Magnete			Recoma 30HE
Target temperatura magnete	θ_{PM}	$°C$	140
Coppia	T	Nm	145
Corrente nominale	i_0	A	245
Corrente caratteristica	i_{ch}	A	305
Corrente smagnetizzante	i_{demag}	A	850
Tensione a carico di fase	E_0	V	280
Tensione a vuoto di fase	E	V	200
Ondulazione di coppia picco-picco	$\Delta T_{p_k p_k}$	Nm	17,50
Fattore di potenza	IPF		0,86

3.5 Modello alternativo

Una diversa strategia di progetto conduce ad un modello alternativo a quello appena discusso. Si fissa la scelta iniziale del materiale N40EH, magnete in terre rare del tipo "Neo" (Neodimio Ferro Boro). E ci si chiede se sia possibile ottenere un rapporto più elevato tra la corrente smagnetizzante e la corrente caratteristica. La struttura iniziale corrisponde al modello AVALON-base, e la si cambia sia in accordo ai risultati delle ottimizzazioni sia in modo mirato cercando di soddisfare gli obiettivi preposti.

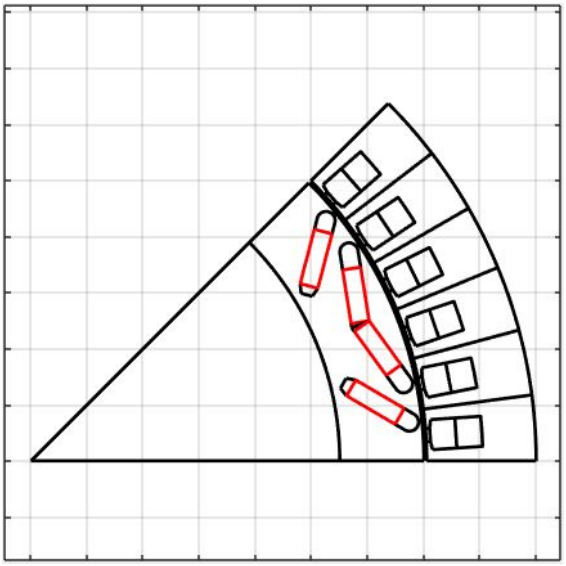

Figura 3.4: AVALON-def2

Si fa riferimento ai modelli ottimizzati per scegliere le caratteristiche delle barriere quali posizione e inclinazione. Infatti dal procedimento evolutivo si sono evidenziati due valori dominanti per le posizioni dei due strati, 0,5 p.u. e 0,25 p.u. rispettivamente per il primo e il secondo. Ed anche per l'inclinazione, in analogia ai modelli ottimizzati, si assegna un valore di 0,2 p.u. e 0,55 p.u. rispettivamente per la prima e la seconda barriera. Il valore normalizzato di β_1 deriva dalla geometria mode-3 in cui lo strato esterno risulta piatto; si inclina poi di pochi punti p.u. in modo da proteggere maggiormente il magnete da fenomeni di smagnetizzazione.

In seguito si agisce sulla lunghezza dei magneti, che viene ridotta in modo da ridurre le zone più critiche per la smagnetizzazione, ovvero le parti più vicine al traferro. Mentre lo spessore è inalterato. L'utilizzo di magneti spessi e corti garantisce un buon valore di corrente smagnetizzante, ma è alta anche l'ampiezza di corrente caratteristica. I modelli ottimizzati sono stati un esempio, anche in quel caso si è ridotta la lunghezza dei magneti per garantire dei valori più alti di corrente smagnetizzante.

Per ottenere una corrente caratteristica più bassa si interviene sulla configurazione del rotore, attraverso il taglio di uno strato. Il taglio dello strato più interno è forzato allargando il raggio d'albero. In accordo alla procedura con cui è disegnato il rotore, assegnati i parametri delle barriere, se c'è intersezione tra una barriera e l'albero si taglia la parte eccedente dello strato. Da alcune simulazioni si osserva come questo cambiamento comporti una netta riduzione dell'ampiezza in questione. Il guadagno si può attribuire alla minore riluttanza presente in asse d dove non ci sono più due barriere di flusso bensì una.

Si cambia anche la geometria di statore, si aumenta il raggio al traferro rendendo così il giogo più sottile, e per questo si riduce anche l'altezza del dente e il suo spessore. Il risultato che si vuole ottenere è uno statore più leggero, e allo stesso tempo una distribuzione di densità di flusso che caratterizzi il dente con valori di induzione magnetica maggiori rispetto al giogo.

Così ci si distacca dalla geometria propriamente detta V-type doppio strato progettata dal "Preliminary Design" e si ottiene una struttura in cui uno strato è diviso in due parti isolate. Il motore dimostra delle buone caratteristiche in riferimento agli aspetti magnetici, ma peggiorano quelle meccaniche. Per aumentare nuovamente la coppia prodotta si allunga il motore.

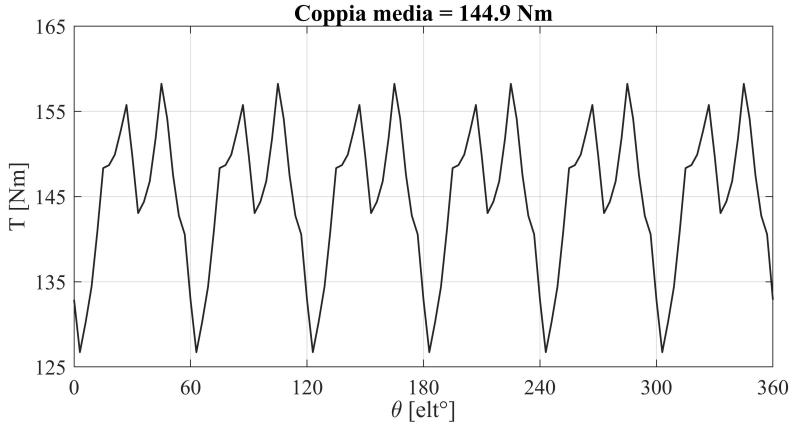

Figura 3.5: Andamento di coppia AVALON-def2

3.6 AVALON-def2

In Figura 3.4 è riportata la struttura ottenuta dalle modifiche del modello AVALON-base. Le caratteristiche del motore denominato AVALON-def2 sono riassunte in Tabella 3.3.

I parametri relativi alla geometria di statore e rotore sono in linea con i cambiamenti descritti. Un raggio di rotore e d'albero più grandi rendono la sezione del motore meno massiccia, tuttavia l'allungamento impatta in misura maggiore sul peso, aumentandolo ad un totale di 20 kg. A statore sono evidenti le cave più larghe di conseguenza alla riduzione dello spessore del dente. In relazione alle cave, anche ora si riduce il coefficiente di riempimento cava a 0,7.

A rotore è presente una configurazione caratterizzata dalla barriera più interna divisa in due magneti isolati. Inoltre la lunghezza dei magneti in percentuale rispetto alla massima possibile è uguale al 76,3% e 83,3% rispettivamente del primo e del

Tabella 3.3: Parametri AVALON-def2

Grandezza	Simbolo	Unità	Valore
Raggio esterno di rotore	r	mm	70
Raggio d'albero		mm	55,00
Lunghezza rotore	L	mm	150
Lunghezza dente	l_t	mm	10,00
Larghezza dente	w_t	mm	4,00
Posizione 1° barriera	α_1	°	10,80
Spessore 1° magnete	hc_1	mm	3,25
Inclinazione 1° barriera	β_1	°	76,50
Posizione 2° barriera	α_2	°	5,85
Spessore 2° magnete	hc_2	mm	3,25
Inclinazione 2° barriera	β_2	°	52,90
Peso macchina		kg	20,00
Peso magnete		kg	1,15
Numero di spire in serie per fase	N_s		24
Magnete			N40EH
Target temperatura magnete	θ_{PM}	$°C$	180
Coppia	T	Nm	145
Corrente nominale	i_0	A	265
Corrente caratteristica	i_{ch}	A	215
Corrente smagnetizzante	i_{demag}	A	720
Tensione a carico di fase	E_0	V	270
Tensione a vuoto di fase	E	V	150
Ondulazione di coppia picco-picco	$\Delta T_{p_k p_k}$	Nm	31,50
Fattore di potenza	IPF		0,83

secondo strato. Magneti molto corti per evitare che smagnetizzino. Un vantaggio è il peso dei magneti, che si abbassa da 1,42 kg del modello base a 1,15 kg.

Le motivazioni che hanno condotto a questa geometria sono state quelle di avere un motore che resista ad un eventuale guasto senza danneggiarsi. Dai risultati riportati in tabella si può essere fiduciosi che ciò avvenga. La corrente smagnetizzante ha un valore più alto della corrente caratteristica di oltre tre volte. La corrente caratteristica risulta persino inferiore dell'ampiezza nominale.

Da un punto di vista prestazionale l'ondulazione di coppia si è ridotta rispetto il modello base, ma non è diminuita quanto i modelli ottimizzati. Si evidenzia anche un fattore di potenza più basso rispetto i modelli precedenti. In Figura 3.5 si osserva l'andamento di coppia ottenuto da una simulazione in SyR-e per il valore di corrente nominale pari a 265 A. La coppia media è pari a 144,9 Nm con un ondulazione picco-picco di 31,5 Nm. Il fattore di potenza medio invece è uguale a 0,83.

Così come il modello AVALON-def1, si riavvolge il motore con 24 spire. Con il nuovo numero di spire non si riesce a sfruttare a pieno tutta la tensione disponibile, come evidenziato dall'ampiezza di tensione a carico riportata in tabella uguale a 270 V a fronte della massima possibile di 375 V. La tensione a vuoto più bassa rispetto il modello def1 dimostra un flusso inferiore prodotto dai magneti. Il decremento del flusso concatenato prodotto dai magneti è l'effetto della diversa geometria di rotore e anche un motivo per cui si riduce la corrente caratteristica.

3.7 Confronto fra la geometria ottima e definitiva

I progetti AVALON-def1 e AVALON-def2 sono due soluzioni alle richieste poste dall'applicazione. Tra le due risulta migliore la prima struttura, producendo una coppia con quasi la metà di ondulazione picco-picco.

In Tabella 3.4 si riassumono i dati dei due modelli finali ed anche le caratteristiche del modello ottimo mode4 dal quale si è originata la struttura definitiva def1. Oltre le considerazioni geometriche e elettromeccaniche sulle diverse strutture già anticipate nei paragrafi precedenti si può evidenziare un peggioramento della densità di coppia nei modelli finali. Infatti sia def1 che def2 a parità di coppia pesano di più del modello mode4. Nessuna delle macchine comunque rispetta il limite di peso di 12 kg.

In Figura 3.6 si rappresentano gli andamenti di coppia per i tre motori descritti in tabella. La migliore caratteristica appartiene al motore AVALON-mode4 e peggiora tanto più ci si distacca da tale configurazione. L'oscillazione più grande corrisponde al motore AVALON-def2. I progetti finali hanno un fattore di potenza più basso a confronto di mode4, come si legge dalla tabella. I due sono migliori in termini di resistenza alla smagnetizzazione, motivo centrale nella loro realizzazione.

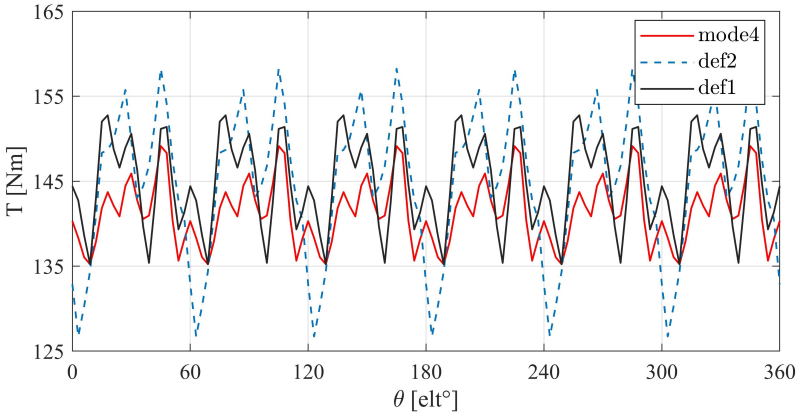

Figura 3.6: Andamento di coppia del modello ottimo e dei modelli finali

Tabella 3.4: Caratteristiche modello ottimo AVALON-mode4 e modello definitivo AVALON-def1 e AVALON-def2

Grandezza	Simbolo	mode4	def1	def2
Raggio esterno di rotore (mm)	r	65,25	65,25	70,00
Raggio d'albero (mm)		40,00	45,00	55,00
Lunghezza rotore (mm)	L	100	115	150
Lunghezza dente (mm)	l_t	11,08	11,08	10,00
Larghezza dente (mm)	w_t	4,81	4,81	4,00
Posizione 1° barriera (°)	α_1	10,80	10,80	10,80
Spessore 1° magnete (mm)	hc_1	3,00	1,50	3,25
Inclinazione 1° barriera (°)	β_1	90,00	76,50	76,50
Forma 1° ponticello		polig.	polig.	circ.
Posizione 2° barriera (°)	α_2	6,07	6,07	5,85
Spessore 2° magnete (mm)	hc_2	3,70	2,00	3,25
Inclinazione 2° barriera (°)	β_2	54,90	54,90	52,90
Forma 2° ponticello		circ.	circ.	circ.
Peso macchina (kg)		17,00	18,20	20,00
Peso magnete (kg)		1,34	0,85	1,17
Numero di spire in serie per fase	N_s	44	24	24
Magnete		N40EH	Rec. 30HE	N40EH
Target temperatura magnete ($°C$)	θ_{PM}	180	140	180
Coppia (Nm)	T	142	145	145
Corrente nominale (A)	i_0	135	245	265
Corrente caratteristica (A)	i_{ch}	285	305	215
Corrente smagnetizzante (A)	i_{demag}	220	850	720
Tensione a carico di fase (V)	E_0	450	280	270
Tensione a vuoto di fase (V)	E	350	200	150
Ondulazione di coppia (Nm)	$\Delta T_{p_k p_k}$	14,00	17,50	31,50
Fattore di potenza	IPF	0,96	0,86	0,83

Capitolo 4

Analisi motori

Con analisi motori ci si riferisce ad alcuni test necessari per identificare le caratteristiche elettriche e meccaniche dei modelli. I test sono simulazioni eseguite attraverso SyR-e, ma anche tramite un secondo programma chiamato Magnet. In questo capitolo si definiscono variabili utili per il controllo e si determina l'efficienza dei modelli progettati. Per valutare il rendimento si calcolano perciò le perdite connesse al funzionamento.

La prima simulazione che si esegue è la mappa di flusso della rispettiva macchina. Dalla mappa si stabiliscono i valori utili per il controllo. Questa informazione è importante per utilizzare al meglio il motore, estraendone le migliori prestazioni. Inoltre è possibile dedurre il comportamento della macchina per diverse condizioni operative. Ciascun punto di funzionamento equivale ad un valore di coppia e ondulazione di coppia, ma anche di flusso appunto. Dai dati ottenuti da questa prima simulazione si prevedono anche delle caratteristiche legate alla velocità e alla potenza del motore.

Una seconda simulazione riguarda le perdite legate all'effetto pelle e alla frequenza di esercizio. Si descrive il modo con cui si prevede di avvolgere il motore in relazione alle dimensioni fisiche del singolo conduttore e alle modalità di avvolgimento dei conduttori hairpin.

Un'ulteriore analisi è dedicata alle perdite nel ferro. Il calcolo di queste perdite avviene tramite Magnet. Anche in questo caso, come per la prima simulazione, i risultati sono sotto forma di mappa tridimensionale, in modo da poter esaminare diversi punti di lavoro in funzione della corrente imposta.

Infine si riassumono le informazioni ottenute in mappe di efficienza. É possibile stimare il rendimento del motore per diverse condizioni operative, ma in particolare per la condizione nominale.

Attraverso questi test da una parte si vuole confermare le caratteristiche dei progetti precedentemente esposte, in termini di coppia e corrente nominale, d'altra parte si estende lo studio dalla condizione nominale ad un'osservazione globale del funzionamento di macchina.

4.1 Test AVALON-def1

I modelli in esame sono due, si crede più chiaro esporre i risultati separatamente. In seguito sono proposte le analisi condotte sul progetto AVALON-def1.

4.1.1 Mappe di flusso

Una mappa è l'insieme di valori di flusso magnetico che caratterizzano una macchina elettrica. In accordo al modello magnetico del motore si definisce una mappa di flusso tridimensionale per ciascun asse, d e q. Così per ogni coppia di componenti d e q di corrente è associato il flusso d e q corrispondente. Note le misure del flusso e della corrente lo è anche quella della coppia.

Il beneficio dato dalle mappe è un controllo migliore del motore. Ed un controllo migliore equivale a delle prestazioni vantaggiose. Il controllo, in funzione della coppia che si desidera, si traduce nell'assegnare dei valori adeguati di componenti d e q della corrente. Il vantaggio, è ridurre le perdite per effetto Joule, perché a parità di coppia richiesta il motore assorbe una corrente più bassa. Questo principio è espresso dal luogo dei punti definito MTPA (maximum torque per Ampere), letteralmente massima coppia per Ampere. E la curva MTPA si ricava una volta nota la mappa di flusso della macchina. Esiste anche un secondo luogo di punti definito MTPV (maximum torque per Voltage), massima coppia per tensione, che è meno rilevante per questa applicazione perché non è prevista una zona operativa in elevato deflussaggio. La curva MTPV è legata con il deflussaggio perché indica i punti che permettono di ottenere la massima coppia con il minimo flusso.

In SyR-e è possibile determinare la mappa di flusso di un motore tramite la pagina dedicata alle simulazioni. Selezionando l'opzione mappa di flusso, per eseguire l'analisi sono richieste le variabili: di escursione angolare e numero di posizioni del rotore; il massimo valore di corrente da verificare; il numero di punti per l'intervallo di ciascuna componente di corrente; ed infine la temperatura target dei magneti. Per le analisi svolte in questa tesi si è scelto un intervallo di venti valori, perciò la mappa si costruisce con 400 punti. Ciascun punto corrisponde ad una coppia di componenti d e q della corrente. Ciascuna componente varia da zero al massimo in venti incrementi. E' sufficiente ammettere un massimo di corrente pari ad 1,5 l'ampiezza nominale.

Il risultato non è solo la mappa di flusso in un riferimento dq, ma anche la misura di coppia, dell'ondulazione di coppia picco-picco e della variazione di coppia rispetto il valore medio. Tutte le informazioni sono in forma di mappe tridimensionali in funzione delle componenti d e q di corrente.

Piuttosto che illustrare le mappe di flusso si ritiene che sia più inerente per il progetto evidenziare le caratteristiche lungo la curva MTPA ed MPTV. SyR-e dà la possibilità di manipolare le mappe di flusso e da queste costruire i due luoghi dei punti citati. Note queste due traiettorie utili per il controllo di un motore, SyR-e

costruisce alcuni grafici in modo da evidenziare come variano le grandezze rilevanti di macchina.

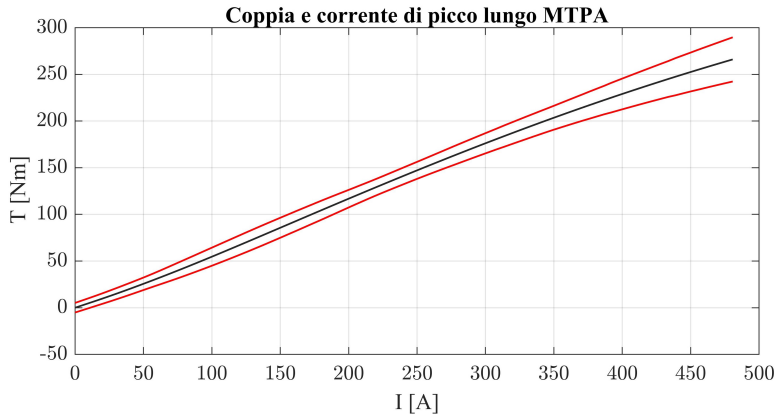

Figura 4.1: Misura di coppia in funzione della corrente di fase; in rosso l'ondulazione di coppia picco-picco. AVALON-def1

Il primo grafico, in Figura 4.1, mostra la coppia e l'ondulazione in funzione della corrente di fase. Il grafico è costruito in accordo al luogo dei punti di massimo guadagno MTPA. In figura si osserva come la qualità della coppia prodotta, in termini di ondulazione di coppia picco-picco, si mantiene circa costante per un intervallo esteso. Un peggioramento, dimostrato da un allargamento della banda delimitata dai due tratti rossi, avviene per coppie maggiori di 200 Nm.

É positivo il modo in cui la banda si stringe per valori di coppia nominali sebbene si allarghi tendendo a valori maggiori. Per una coppia pari a 145 Nm è presente un'ondulazione di 18 Nm e la corrente di picco corrispondente è 245 A con un angolo di fase di 132°. Questi dati confermano i risultati ottenuti dalla simulazione del singolo punto operativo in cui si era iniettata la corrente nominale con un angolo di fase di 130°. Studiando invece il comportamento della macchina in sovraccarico, si determina che per ottenere una coppia di 194 Nm il motore assorbe 335 A. L'angolo di fase della corrente è 136° e si verifica un'oscillazione di coppia di 24 Nm picco-picco. In sovraccarico è presente una maggiore oscillazione di coppia, ma aumenta anche il valore medio prodotto. In termini percentuali il valore $\Delta T_{p_k p_k}$ è uguale al 12% del valore medio, così come in condizioni nominali.

Nel paragrafo relativo al riavvolgimento del motore si è descritto il legame tra il valore del flusso e la tensione disponibile di alimentazione. Si è riavvolto il motore a seguito di una simulazione condotta per il valore di corrente nominale leggendone il flusso corrispondente. Ora attraverso i risultati illustrati si verifica ulteriormente la fattibilità dell'avvolgimento e quindi del numero di spire in serie per fase. Il punto di funzionamento da valutare non è la condizione nominale, ma la condizione di sovraccarico perché presuppone un'ampiezza di flusso più grande per una uguale

velocità di rotazione del motore. Una seconda precisazione è relativa all'angolo di fase di corrente che convenientemente deve essere regolato in accordo al MTPA.

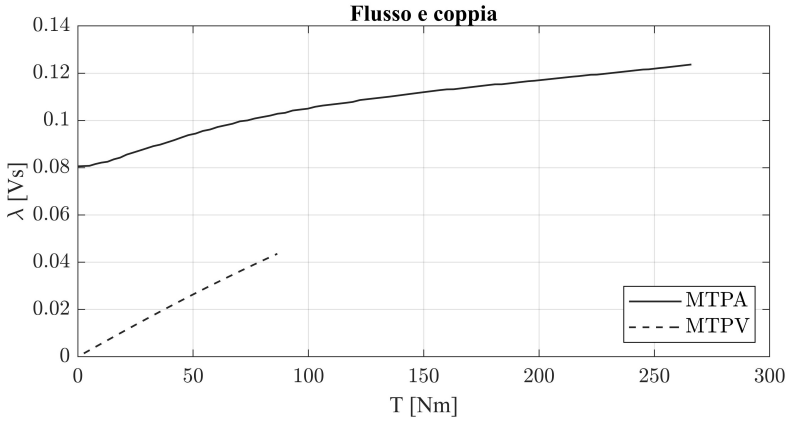

Figura 4.2: Ampiezza di flusso in funzione della coppia prodotta. AVALON-def1

In Figura 4.2 è illustrato l'andamento dell'ampiezza del flusso di macchina in funzione della coppia prodotta. Sono rappresentate due curve, una indica l'ampiezza del flusso in accordo al MTPA, mentre l'altra tratteggiata indica l'ampiezza secondo il controllo MTPV.

Il flusso che si legge lungo MTPA, per una coppia prodotta di 194 Nm, è uguale a 0,116 Vs. Ricordando la misura di flusso target di 0,152 Vs si conclude che il numero di spire è accettabile, anzi potrebbe sembrare opportuno aumentarlo. Il problema sorge da un numero ideale di spire di poco inferiore a 32, il che significherebbe non poter garantire in modo esatto il flusso di macchina in condizioni di sovraccarico. Si sceglie perciò di mantenere il numero di spire a 24.

Il flusso nominale è pari a 0,112 Vs con un angolo di fase di 70°. Attraverso il controllo migliore di macchina si ottiene un fattore di potenza pari a 0,88 che risulta maggiore di quello stimato dalla singola condizione operativa.

Dalle informazioni relative al controllo del motore è possibile prevedere il comportamento meccanico della macchina. Anche questo è eseguito da SyR-e in modo automatico, una volta che si sono svolte le analisi nominate della mappa di flusso e delle traiettorie di controllo. L'aspetto meccanico è descritto dal valore di coppia erogabile in funzione della velocità di rotazione del motore in Figura 4.3.

Si riporta il grafico anche se può sembrare poco significativo essendo l'andamento costante sia per la caratteristica nominale che per il sovraccarico. La coppia non decresce per velocità maggiori di 5900 rpm come auspicato dal target in Figura 1.1, perché la tensione di DC-link comporta una velocità base più alta di quella nominale. Con velocità base ci si riferisce alla misura in cui la tensione di linea raggiunge la massima ampiezza pari a 650 V. In condizioni nominali perciò come anticipato dalle simulazioni nel capitolo precedente, è presente una tensione a carico minore del

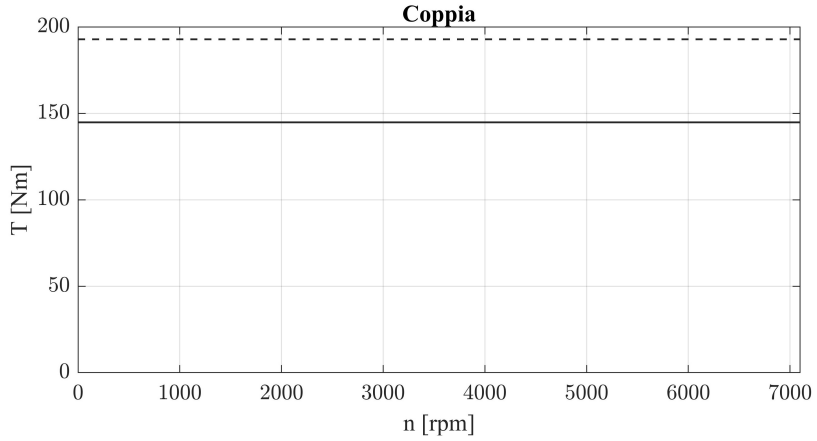

Figura 4.3: Caratteristica meccanica AVALON-def1: la linea continua indica il funzionamento nominale; la linea a tratti indica il funzionamento in sovraccarico

totale possibile, e il margine di tensione permette di garantire una coppia costante anche per velocità più alte. Ma in questo modo aumenta anche la potenza assorbita dal motore.

Erogare una coppia nominale di 145 Nm alla velocità di 7100 rpm equivale a sovradimensionare il motore in relazione alla potenza nominale target di 90 kW. Lo stesso vale per la coppia di sovraccarico la quale è richiesta per una velocità nominale di 5900 rpm e una rispettiva potenza di 120 kW. Per conformare la potenza disponibile alla richiesta si deve ridurre la tensione utilizzata.

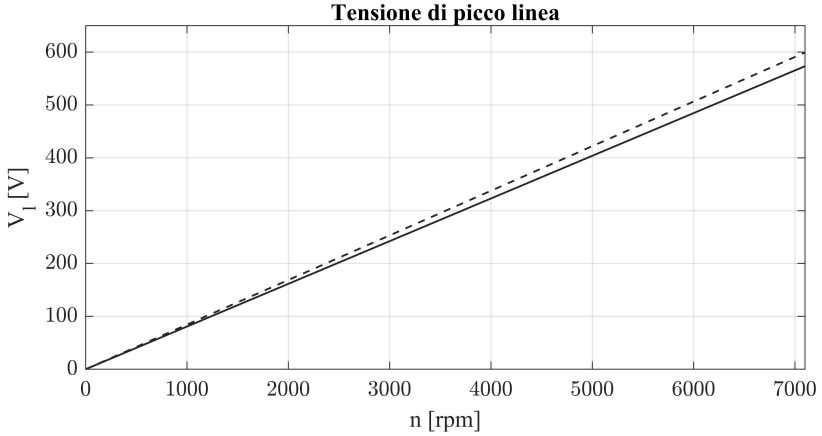

Figura 4.4: Ampiezza di picco della tensione di linea AVALON-def1: la linea continua indica il funzionamento nominale; la linea a tratti indica il funzionamento in sovraccarico

In Figura 4.4 è rappresentata l'ampiezza di picco della tensione di linea trascurando le perdite, al crescere della velocità meccanica. In accordo a quanto detto,

nell'intervallo di velocità relative al funzionamento, non si sfrutta correttamente la tensione massima del DC-link di 650 V. Sarebbe conveniente un andamento della tensione che raggiunga l'ampiezza massima di 650 V per la velocità nominale di 5900 rpm e sia costante per velocità maggiori. Ma anche se non si riesce ad utilizzare tutti i Volt possibili bisogna ammettere comunque un andamento simile.

Dal grafico si può definire il limite di tensione da assumere per l'applicazione e la rispettiva richiesta di potenza. La tensione anziché crescere costantemente deve saturare per velocità superiori a 5900 rpm. Il massimo valore equivale alla tensione necessaria a garantire il flusso di sovraccarico per la velocità nominale, dalla figura si evince che il valore massimo corrisponde a circa 500 V. In questo modo si limita la potenza assorbita dal motore al valore massimo raggiunto alla velocità nominale. Per velocità maggiori la potenza è idealmente costante e la coppia decresce in modo inversamente proporzionale alla velocità.

4.1.2 Effetto pelle

La frequenza nominale di esercizio per l'applicazione è 400 Hz perciò bisogna tenere in conto della presenza dell'effetto pelle. La densità di corrente all'interno dei conduttori non è costante ma tende ad aumentare ai bordi. Così ci sono zone del conduttore che sono caratterizzate da picchi di corrente più alti rispetto ad altre zone dello stesso conduttore.

Per esaminare il fenomeno è necessario sviluppare un progetto di avvolgimento più approfondito del solo numero di spire in serie per fase. In SyR-e si può dimensionare il singolo conduttore in cava in modo da ottenere il disegno della cava completo dell'avvolgimento. Nel primo capitolo della tesi, descrivendo l'interfaccia grafica si era sorvolato sulla sottosezione dedicata all'effetto pelle. Per il modello cava sono richiesti:

- tipo conduttore;
- spessore isolamento;
- numero di conduttori;
- raggio conduttore;
- larghezza conduttore;
- altezza conduttore;
- vettore frequenza;

Tutte le variabili sono relative alla geometria del conduttore esclusa l'ultima che si riferisce alle frequenze alle quali si eseguono le simulazioni per le analisi del fenomeno in esame. L'impatto dell'effetto pelle è valutato tramite simulazioni ad elementi finiti, dopo che si è definito il disegno della cava.

La tipologia del conduttore è "hairpin" quindi rettangolare o quadrata, questo tipo di avvolgimento richiede un numero pari di conduttori in cava. Il numero di conduttori è funzione del numero di spire in serie per fase, ma c'è un grado di libertà

dato dalla possibilità di effettuare dei paralleli tra conduttori, nella stessa cava o in cave diverse, appunto paralleli interni o esterni.

Lo statore di macchina è caratterizzato da 16 cave per fase ed è stato definito un numero di spire in serie per fase pari a 24. Se ogni spira equivale a due conduttori si ha 48 conduttori in serie per fase e il numero di conduttori in serie per cava è uguale a 3. Per ottenere un numero pari si sceglie di eseguire due paralleli così da raddoppiare i conduttori fisici in cava a 6, ma da un punto di vista del funzionamento elettrico sono equivalenti a tre conduttori in serie.

Stabilito un possibile numero di conduttori, date le dimensioni della cava, si stabiliscono le misure del singolo cavo in modo da sfruttare al meglio lo spazio disponibile. Si ammette uno spessore di isolamento di 0,1 mm e si cerca di ottenere un coefficiente di riempimento cava uguale a quello stabilito a priori di 0,7. La grandezza del conduttore è data dall'altezza e dalla larghezza, una volta scelta la tipologia quadrata il raggio conduttore non è più necessario.

In Tabella 4.1 si riassumono le scelte di progetto del modello cava:

Tabella 4.1: Scelte di progetto cava AVALON-def1

Grandezza	Unità	Valore
Tipo conduttore		quadrato
Numero di conduttori		6
Spessore isolamento	*mm*	0,10
Larghezza conduttore	*mm*	3,40
Altezza conduttore	*mm*	1,40
Coefficiente di riempimento cava		0,71

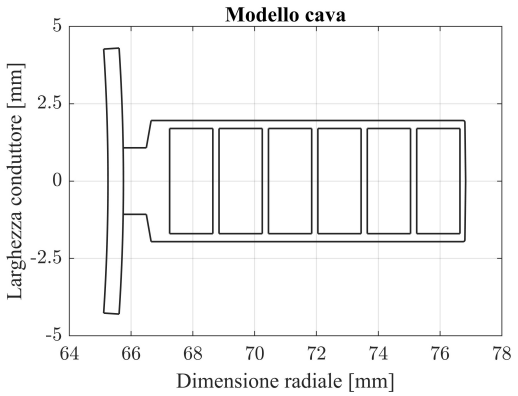

Figura 4.5: Modello cava AVALON-def1

In Figura 4.5 è rappresentato il modello ottenuto in funzione dei valori scelti per le dimensioni del conduttore. Lo stesso disegno è soggetto delle simulazioni ad elementi finiti. Le analisi sono eseguite per un valore di frequenza minimo uguale a 0 fino ad un valore massimo pari a 500 Hz. L'intervallo di frequenza copre la zona di funzionamento prevista per il progetto, la quale comporta una frequenza di 473 Hz alla velocità massima.

Il risultato della prova è in Figura 4.6. All'aumentare della frequenza la resistenza equivalente aumenta e in modo proporzionale crescono le perdite per effetto Joule. In corrente continua la resistenza R_{DC} vale 28,6 $m\Omega$, in condizioni nominali si calcola un aumento del 4%, perciò anche le perdite crescono della stessa percentuale rispetto al funzionamento in corrente continua. L'incremento è contenuto perché le dimensioni dei conduttori sono ridotte. Dalla Tabella 4.1 si legge un'altezza del conduttore di 1,4 mm per una larghezza di 3,4 mm. Inoltre le valutazioni sono condotte assumendo una temperatura del rame di 180°C, condizione che riduce ulteriormente l'influenza dell'effetto pelle sul funzionamento.

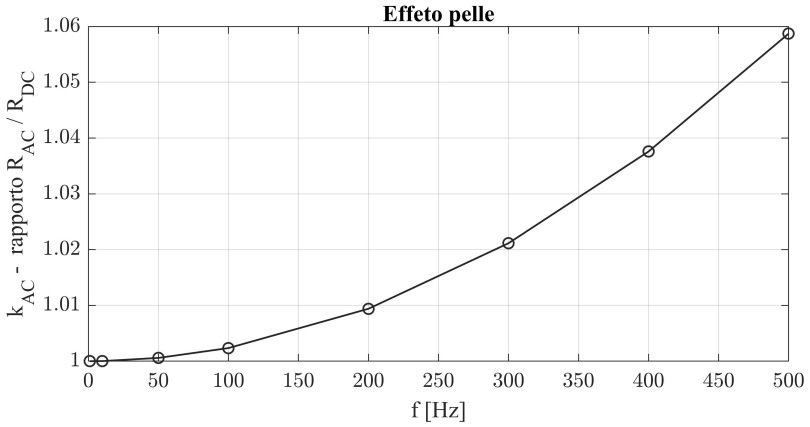

Figura 4.6: Effetto pelle AVALON-def1

4.1.3 Perdite nel ferro

Le perdite nel ferro sono legate al materiale ferromagnetico del nucleo di statore e di rotore. In esse si includono sia le perdite per correnti parassite sia le perdite per ciclo di isteresi. Entrambe sono legate alla variazione del campo magnetico che attraversa il materiale.

Nel caso del motore sincrono idealmente le perdite a rotore sono nulle poiché il flusso è appunto sincrono e costante per il rotore. Nella realtà si verificano a causa di campi armonici di spazio. Per ridurre gli effetti parassiti si ricorre all'utilizzo di ferro laminato sia per il rotore che per lo statore. In questo progetto sono stati utilizzati lamierini di tecnologia M250-35A spessi 0,35 mm.

La mappa di perdita nel ferro è calcolata in Magnet, ma è eseguibile anche tramite SyR-e. Si preferisce l'utilizzo del primo perché le stime di perdita valutate dai due programmi sono diverse. Le due mappe sono simili, ossia hanno la stessa forma, ma la potenza persa calcolata da Magnet è maggiore circa del 15% rispetto al valore determinato in SyR-e. La simulazione in Magnet è comunque gestita tramite l'interfaccia SyR-e, dalla quale si esegue l'export del modello del motore nel secondo programma, e in seguito al lancio della simulazione si visualizzano i risultati.

Le impostazioni dell'analisi sono le stesse di una mappa di flusso con l'aggiunta della variabile di velocità di rotazione del motore. I punti simulati per costruire l'andamento di perdita sono minori in numero a confronto della mappa di flusso. Ma ogni punto è analizzato con maggiore precisione assegnando alla variabile di escursione del rotore un angolo giro e un numero di posizioni analizzate pari a 180. Il numero di incrementi per le due componenti di corrente è uguale ad 8, impostando un massimo da analizzare doppio rispetto al valore nominale.

In Figura 4.7 c'è il risultato dell'analisi, la mappa di perdita è calcolata alla velocità nominale di 5900 rpm. La lettura della potenza dissipata in funzione dei valori di corrente non è facile, ma come anticipato, è integrata in SyR-e un'opzione di manipolazione dati che costruisce dei grafici più chiari relativi a diverse grandezze incluse le perdite nel ferro. Inoltre non si riesegue il calcolo di perdita per altre velocità poiché la stessa opzione di manipolazione rielabora i valori per diverse velocità. Attraverso il risultato in figura si vuole illustrare la forma della mappa tridimensionale.

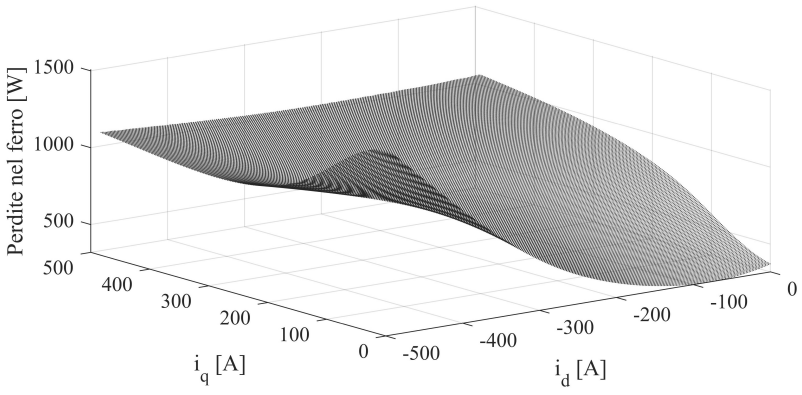

Figura 4.7: Mappa di perdita nel ferro AVALON-def1

4.1.4 Mappe di efficienza

Le mappe di efficienza al pari delle mappe di perdita o di tensione, sono una chiave di lettura chiara del funzionamento globale del motore. Tramite le analisi

svolte fino ad ora si hanno tutte le informazioni relative al modello AVALON-def1 che permettono di controllare il motore e calcolarne il rendimento. Attraverso le mappe di flusso si è affinato il controllo della macchina grazie alla determinazione della traiettoria di controllo MTPA e così stabilendo il miglior valore di angolo di fase della corrente con l'adeguata ampiezza, sia in condizione nominale che di sovraccarico. In seguito alle ulteriori prove si tiene in conto delle perdite per effetto pelle e delle perdite nel ferro.

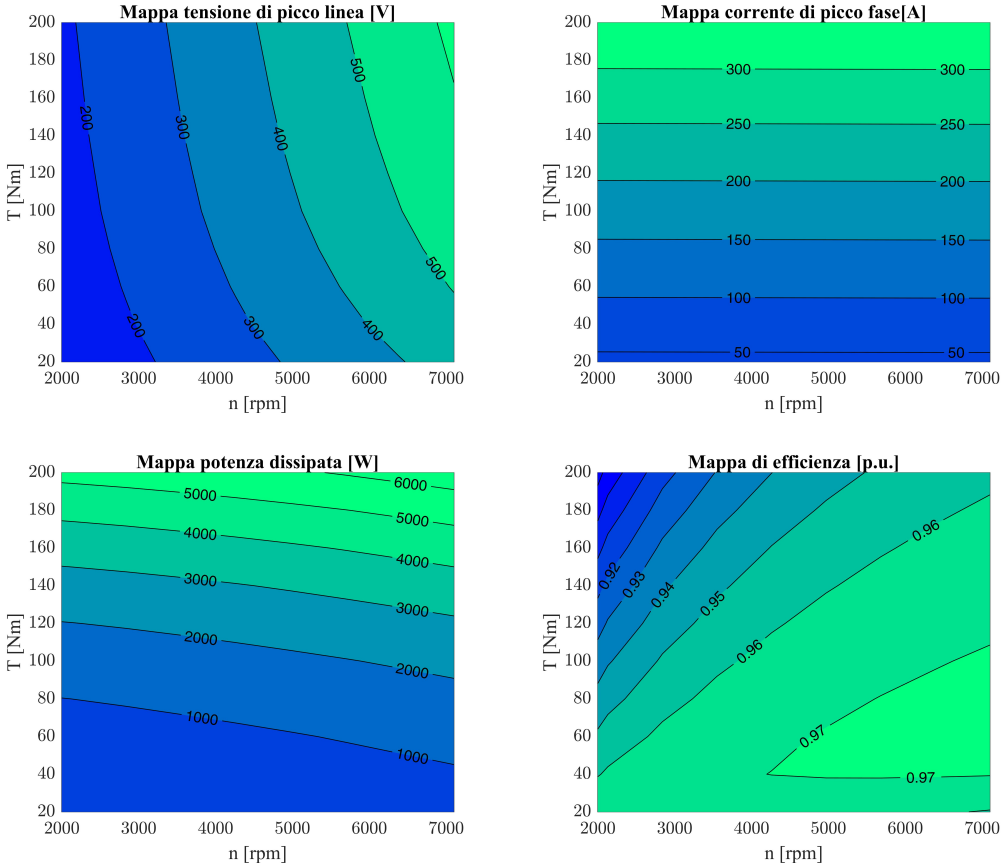

Figura 4.8: Mappe AVALON-DEF1

Note le informazioni del modello in analisi, relative alle mappe di flusso, alle perdite e alle strategie di controllo, si calcolano le mappe di diverse grandezze. Questo è eseguito in SyR-e attraverso un'opzione alla quale si dà in input i dati sul motore.

In Figura 4.8 sono illustrate le mappe: dell'ampiezza di picco della tensione di linea; dell'ampiezza di picco della corrente di fase; la potenza totale dissipata nel funzionamento; il rendimento del motore. I valori in ascissa ed ordinata di velocità e coppia rispettivamente non includono lo zero o valori molto bassi, questo perché

si vuole analizzare soprattutto il funzionamento nominale, in sovraccarico e ad alta velocità. Inoltre le stime per misure di coppia circa nulle o basse non sono accurate.

Si può riconoscere un'analogia tra la mappa di tensione ed il grafico in Figura 4.4. La differenza sostanziale è che ora si tiene in conto delle perdite nel funzionamento, e si valutano diversi punti operativi oltre le due condizioni nominale e di sovraccarico. Un'analogia c'è anche per la mappa di corrente ed il grafico in Figura 4.3.

Dalla mappa della potenza dissipata si leggono i valori complessivi di perdita, quindi tenendo in conto delle perdite nel rame e nel ferro. Non si può apprezzare il contributo delle perdite nel ferro o delle perdite per effetto pelle alle perdite Joule, questa ulteriore distinzione sarà specificata per le singole condizioni operative. Ma è evidente che il fattore principale che origina dissipazione è l'effetto Joule e quindi l'ampiezza di corrente, funzione diretta della misura di coppia. Al crescere della velocità si ha poi un incremento più significativo anche delle perdite aggiuntive citate.

Infine si ottiene il rendimento del motore AVALON-def1. É possibile calcolarne il valore sia per la condizione nominale che per il sovraccarico. Anche visivamente dalla mappa si può stimare dei valori buoni di efficienza compresi tra 0,97 e 0,95. In linea con la teoria, più ci si allontana dalla condizione nominale più l'efficienza della macchina peggiora.

In Tabella 4.2 sono descritti i due punti di lavoro principali. In riferimento alla condizione continuativa il motore presenta un rendimento pari a 0,96 e come prevedibile il contributo maggiore di potenza dissipata è dato dall'effetto Joule. Le perdite nel ferro equivalgono a più del 20% del totale dissipato, con un valore di 750 W. L'effetto pelle influisce poco, ma è sensibilmente presente causando una perdita di 100 W. Allo stesso modo le perdite nel rotore non sono nulle, ma contribuiscono alla dissipazione di potenza con un valore di 140 W. Le perdite nel ferro contribuiscono ad aumentare l'ampiezza di corrente nominale a 250 A.

In condizioni di sovraccarico il rendimento si riduce a 0,95. Le perdite nel ferro aumentano e sommate all'effetto pelle incrementano la potenza dissipata di 1 kW. In percentuale della potenza persa totale equivalgono al 15%, un'influenza minore di quanto visto per i valori nominali. La tensione massima legata al sovraccarico è di 515 V.

4.2 Test AVALON-def2

Il secondo modello in esame è AVALON-def2. Si ripetono le analisi descritte per il primo progetto anche per questo secondo motore.

4.2.1 Mappe di flusso

Si segue la stessa procedura del primo progetto. Si calcolano le mappe di flusso del motore AVALON-def2, in questo modo si può controllare nel miglior modo

Tabella 4.2: Grandezze caratteristiche e misure di perdita AVALON-def1

Grandezza	Simbolo	Unità	Valore	
			Nominale	Sovraccarico
Velocità	n	rpm	5900	5900
Coppia	T	Nm	145	194
Efficienza	η		0,96	0,95
Potenza	P	kW	89	120
Perdite totali	P_d	W	3500	5800
Perdite Joule	P_{Joule}	W	2750	4970
Perdite Joule DC	$P_{J_{DC}}$	W	2650	4795
Perdite Joule AC	$P_{J_{AC}}$	W	100	180
Perdite nel ferro	P_{Fe}	W	750	840
Perdite nel ferro di statore	P_{Fes}	W	610	680
Perdite nel ferro di rotore	P_{Fer}	W	140	160
Corrente di fase	I	A	250	335
Tensione di linea	V_l	V	490	515
Fattore di potenza	IPF		0,88	0,83

la macchina. Una volta note le traiettorie di controllo MTPA e MTPV, SyR-e costruisce alcuni grafici di grandezze relative al funzionamento del modello.

In Figura 4.9 si mostra l'andamento della misura di coppia e dell'ondulazione picco-picco che la caratterizza, in funzione dell'ampiezza di picco della corrente di fase. I risultati sono in accordo al luogo dei punti MTPA, così massimizzando il guadagno di corrente. La caratteristica è meno buona del primo motore, essa presenta un'oscillazione crescente al crescere del valore medio prodotto, ma non in modo proporzionale. In condizioni nominale il motore produce una coppia di 145 Nm con un valore picco-picco di 31 Nm, assorbendo una corrente di 265 A avente un angolo di fase pari a 130°. In sovraccarico per una richiesta di coppia uguale a 194 Nm si inietta una corrente di 355 A e un angolo di fase di 134°. L'oscillazione di coppia diventa 46 Nm, ossia il 24% del valor medio anziché il 21% manifestato per condizioni continuative.

Trascurando i valori di coppia più bassi, l'oscillazione di coppia picco-picco è molto marcata per l'intero intervallo di lavoro e peggiora rapidamente per valori crescenti di coppia.

Anche per il motore AVALON-def2 è bene confermare la fattibilità dell'avvolgimento. In Figura 4.10 è rappresentata l'ampiezza di flusso a seconda della coppia richiesta, in riferimento alle traiettorie MTPA e MTPV.

É possibile determinare il flusso che si verifica in condizioni di sovraccarico in base al controllo MTPA; esso ha un'ampiezza di 0,116 Vs. Anche in questo caso non si cambia il numero di spire, poiché con 32 spire si genera un flusso incompatibile con

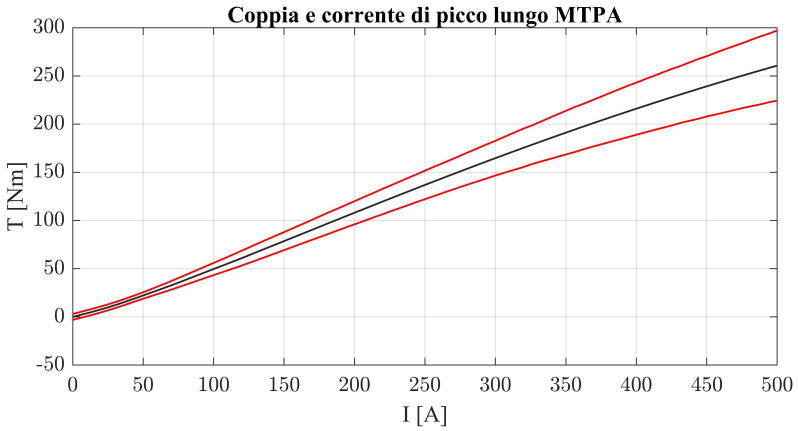

Figura 4.9: Misura di coppia in funzione della corrente di fase; in rosso l'ondulazione di coppia picco-picco. AVALON-def2

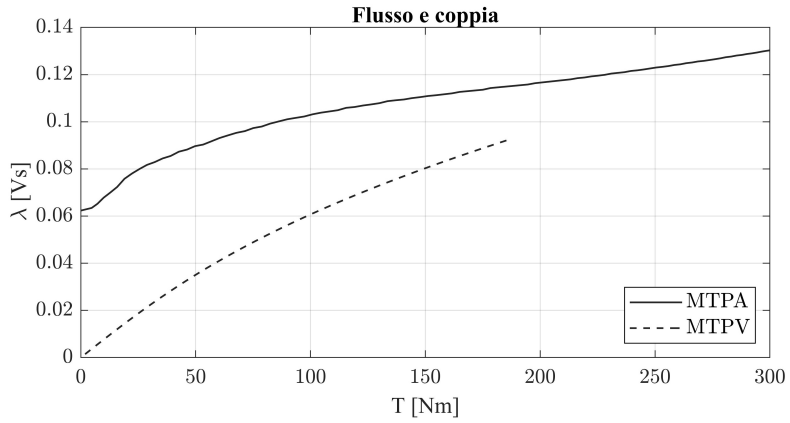

Figura 4.10: Ampiezza di flusso in funzione della coppia prodotta. AVALON-def2

la tensione massima disponibile. Per quanto riguarda la caratteristica continuativa, l'ampiezza del flusso nominale corrisponde a 0,11 Vs caratterizzato da un angolo di fase di 74°. Il fattore di potenza conseguente a tale controllo non cambia da quello precedentemente determinato di 0,83. Si può anche notare come la curva che rappresenta l'ampiezza del flusso secondo un controllo MTPV, sia più estesa in confronto a quanto visto per il primo motore. Questo perché il valore di corrente caratteristica del motore AVALON-def2 è più basso rispetto al modello def1.

Per completezza si riportano in Figura 4.11 la caratteristica meccanica e in Figura 4.12 la caratteristica elettrica in funzione del numero di giri al minuto del motore. Ma i due grafici sono in pratica analoghi a quelli del motore AVALON-def1. Infatti i due motori hanno un flusso nominale che differisce di pochi mVs, questo fa

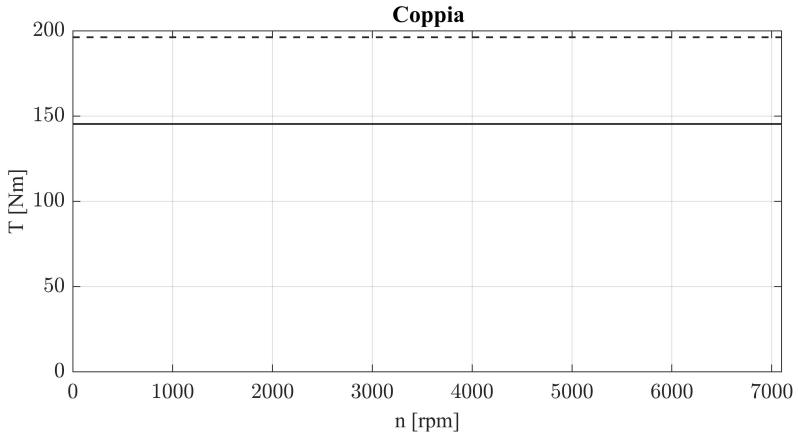

Figura 4.11: Caratteristica meccanica AVALON-def2: la linea continua indica il funzionamento nominale; la linea a tratti indica il funzionamento in sovraccarico

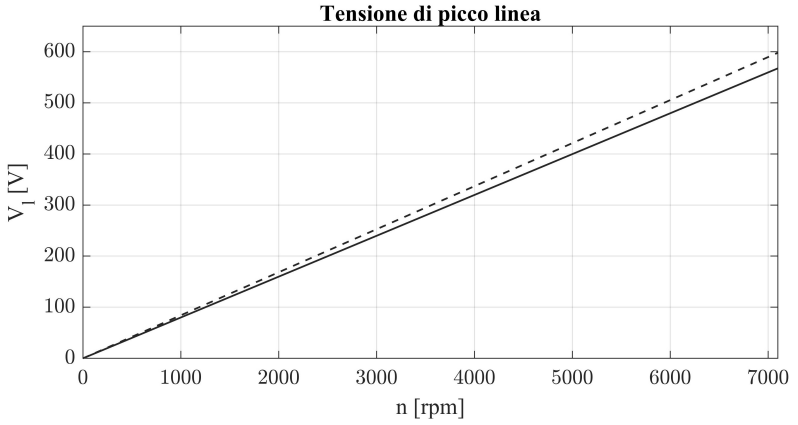

Figura 4.12: Ampiezza di picco della tensione di linea AVALON-def2: la linea continua indica il funzionamento nominale; la linea a tratti indica il funzionamento in sovraccarico

sì che la tensione corrispondente differisca di pochi Volt. E come visto, per entrambi i progetti la tensione di 650 V del DC-link è maggiore del valore necessario alla condizione nominale o di sovraccarico. Perciò dai grafici si nota come l'andamento di coppia è costante e la tensione cresce per tutto l'intervallo di velocità.

Per non sovradimensionare il motore si stima, idealmente, un limite massimo di tensione di 500 V. Tale ampiezza è funzione del valore di flusso in sovraccarico e deve rimanere costante per velocità maggiori della nominale. In questo modo anche la potenza non cambia dal valore massimo raggiunto per la velocità nominale, mentre la coppia deve decrescere in funzione della velocità.

4.2.2 Effetto pelle

Per calcolare la potenza dissipata a causa dell'effetto pelle si crea il modello cava percorsa dai conduttori.

Tabella 4.3: Scelte di progetto cava AVALON-def2

Grandezza	Unità	Valore
Tipo conduttore		quadrato
Numero di conduttori		6
Spessore isolamento	mm	0,10
Larghezza conduttore	mm	4,80
Altezza conduttore	mm	1,20
Coefficiente di riempimento cava		0,70

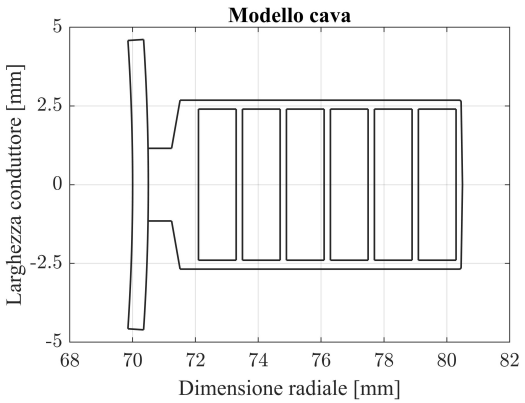

Figura 4.13: Modello cava AVALON-def2

Il numero di spire in serie per fase del motore AVALON-def2 pari a 24 è uguale a quello del primo progetto, così anche per questo modello si sceglie un numero di conduttori in cava pari a 6. Le dimensioni del singolo cavo non sono le stesse perché è diversa la cava di statore, in Tabella 4.3 sono descritte le misure del conduttore in cava.

Si dimensiona il conduttore in modo da ottenere un coefficiente di riempimento cava uguale a 0,7. In funzione della geometria di cava, si ottiene un filo più basso in senso radiale e più largo, in confronto alla misura del primo motore. Tale configurazione riduce l'effetto pelle.

In Figura 4.14 si può vedere il risultato della simulazione. In corrente continua la resistenza R_{DC} misura 27,7 $m\Omega$, per una frequenza di 400 Hz si prevede un

incremento del 2%. Se per il primo motore il contributo dell'effetto pelle alla potenza dissipata era piccolo, ora risulta anche dimezzato.

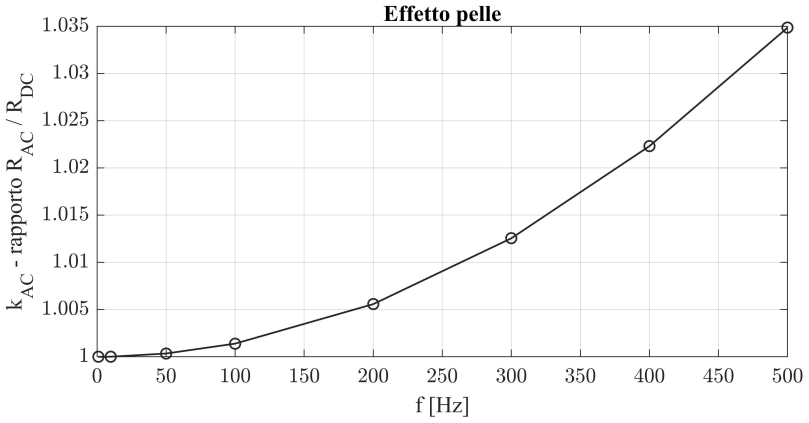

Figura 4.14: Effetto pelle AVALON-def2

4.2.3 Perdite nel ferro

In Figura 4.15 è illustrata la mappa delle perdite nel ferro alla velocità nominale del motore AVALON-def2. La simulazione è eseguita in Magnet e le impostazioni sono analoghe a quelle usate per il primo progetto. Oltre la lettura delle perdite connesse al singolo punto di funzionamento che è rimandata al paragrafo successivo, si può ora osservare l'andamento globale della funzione.

Dal risultato si evince che il valore di perdita dipende da entrambe le componenti così come accadeva per il motore AVALON-def1. Ma nel complesso la mappa è più variabile in confronto al motore precedente. Infatti riesaminando il primo risultato in Figura 4.7 la superficie presenta meno increspature. Viceversa in Figura 4.15 emerge una zona della mappa, per valori di corrente i_d minori di $-300\,\mathrm{A}$ e al variare di i_q, in cui l'andamento è fortemente non lineare. Tra le due mappe di perdita c'è questa differenza perché il motore AVALON-def2 manifesta effetti maggiori di non linearità magnetica e fenomeni di saturazione incrociata rispetto al motore AVALON-def1. Comunque le zone più critiche della mappa, in cui le perdite aumentano rapidamente, si verificano per valori di correnti che non interessano il funzionamento della macchina.

4.2.4 Mappe di efficienza

Si procede con la definizione della mappa di efficienza e di altre grandezze caratteristiche del modello AVALON-def2. In Figura 4.16 sono riportate le mappe delle principali grandezze del motore.

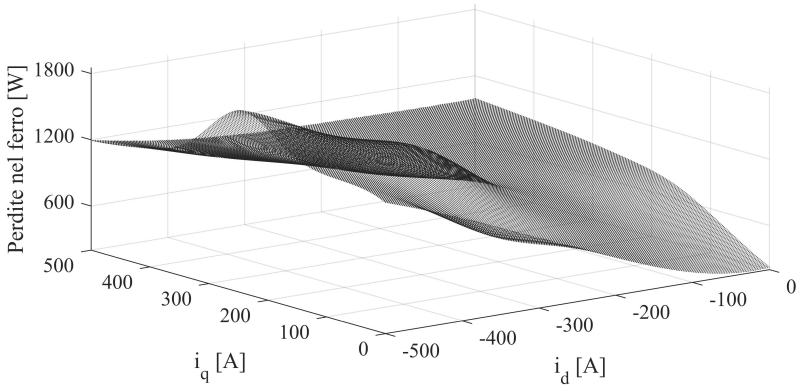

Figura 4.15: Mappa di perdita nel ferro AVALON-def2

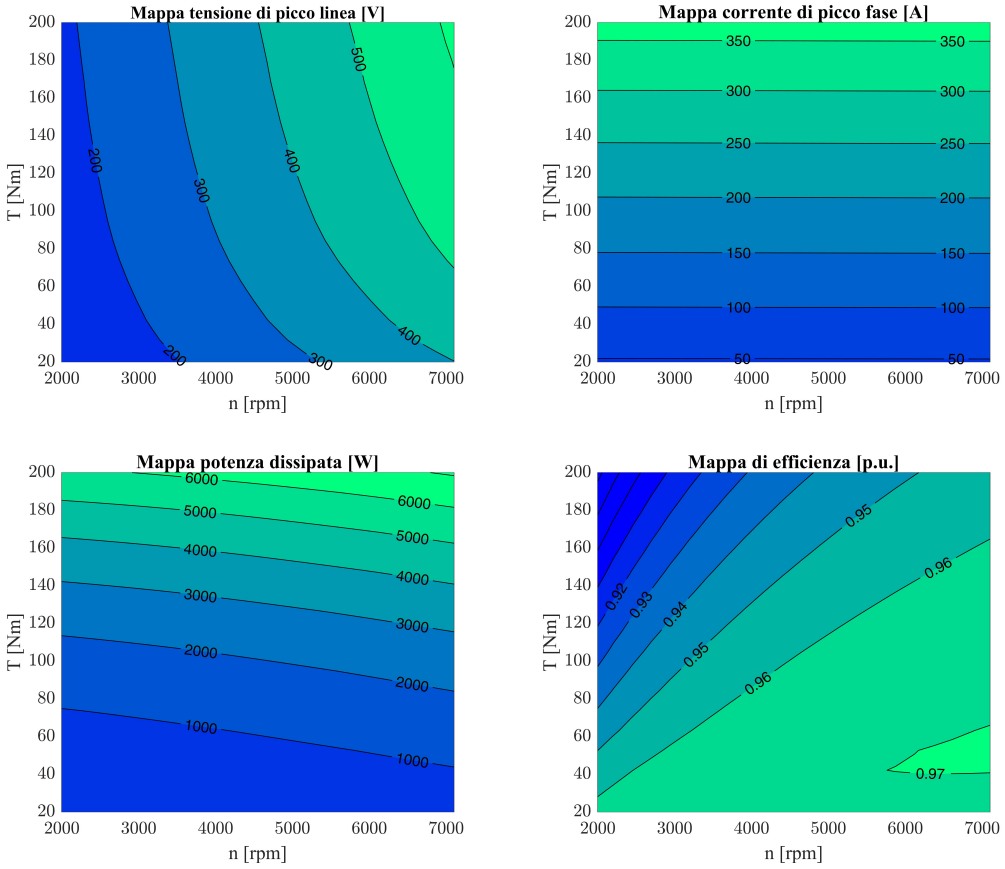

Figura 4.16: Mappe AVALON-DEF2

I valori relativi alle condizioni nominale e di sovraccarico sono leggibili in Tabella 4.4. Il progetto AVALON-def2 presenta un ottimo rendimento in entrambi i punti di lavoro. Dal punto di vista delle perdite nel rame, l'effetto pelle è quasi trascurabile a fronte delle elevate perdite Joule $P_{J_{DC}}$ connesse al solo valore di resistenza R_{DC}. Lo stesso non si può affermare per le perdite nel ferro, che in condizione nominale corrispondono al 22% delle perdite totali, mentre in sovraccarico prevalgono le perdite nel rame, ma le seconde consistono comunque in quasi il 15% del totale.

Considerando l'elevato valore di corrente di fase e un'imprecisione del 2% sulla sua misura, a causa di interpolazione lineare dei dati, non si apprezza una variazione dell'ampiezza dopo aver tenuto in conto della presenza delle perdite nel ferro. Viceversa la tensione di linea nominale che ora include anche le cadute resistive, più marcate delle perdite nel ferro, cresce di oltre 10 V rispetto l'ampiezza determinata trascurando le componenti dissipative.

Tabella 4.4: Grandezze caratteristiche e misure di perdita AVALON-def2

Grandezza	Simbolo	Unità	Valore	
			Nominale	Sovraccarico
Velocità	n	rpm	5900	5900
Coppia	T	Nm	145	194
Efficienza	η		0,96	0,95
Potenza	P	kW	89	120
Perdite totali	P_d	W	3870	6370
Perdite Joule	P_{Joule}	W	3020	5440
Perdite Joule DC	$P_{J_{DC}}$	W	2955	5325
Perdite Joule AC	$P_{J_{AC}}$	W	65	115
Perdite nel ferro	P_{Fe}	W	850	930
Perdite nel ferro di statore	P_{Fes}	W	700	755
Perdite nel ferro di rotore	P_{Fer}	W	150	175
Corrente di fase	I	A	265	360
Tensione di linea	V_l	V	485	510
Fattore di potenza	IPF		0,83	0,80

4.3 Confronto fra le geometrie definitive

In seguito alle analisi condotte sulle due strutture a confronto, sono fissate le caratteristiche elettriche e le prestazioni meccaniche corrispondenti. La descrizione dei motori è stata completata con il calcolo delle principali perdite connesse al reale funzionamento di una macchina elettrica e così dell'efficienza. In Tabella 4.5 sono

racchiusi i dati nominali delle macchine e le voci di perdita relative al funzionamento continuativo e in sovraccarico.

I due motori a parità di potenza meccanica erogata presentano la stessa efficienza per entrambi i punti di lavoro osservati. La tensione di fase è equivalente per i due modelli, mentre l'ampiezza di corrente e il fattore di potenza differiscono. Per gli stessi valori di rendimento e tensione, un'ampiezza di corrente più bassa per il motore AVALON-def1 si riflette in un fattore di potenza più alto rispetto al secondo modello.

Viceversa il motore AVALON-def2 presenta delle perdite nel rame maggiori perché assorbe più corrente. Comunque a fronte dell'elevata potenza nominale questa differenza di perdite non si traduce in una differenza di rendimento. Anche le perdite nel ferro per il secondo modello sono più alte rispetto al primo perché ha una lunghezza longitudinale maggiore e perciò più materiale ferromagnetico.

Tra i due motori come anticipato nel capitolo precedente è preferibile il modello AVALON-def1. In primo luogo presenta una densità di coppia più alta e un'oscillazione picco-picco inferiore. Soprattutto l'ondulazione di coppia si mantiene costante anche per un valore di coppia in sovraccarico, anzichè peggiorare come nel caso del modello def2. Inoltre la geometria Spoke rotor, a causa dei magneti isolati e non più uniti in uno strato, è in genere più affetta da fenomeni di dispersione di flusso magnetico, i quali possono riflettersi in un abbassamento di coppia.

Tabella 4.5: Caratteristiche progetti AVALON-def1 e AVALON-def2

Grandezza	Simbolo	def1		def2	
		Nom.	Sovra.	Nom.	Sovra.
Coppia (Nm)	T	145	194	145	194
Corrente di fase (A)	I	250	335	265	360
Tensione di fase (V)	V_f	285	300	280	295
Fattore di potenza	IPF	0,88	0,83	0,83	0,80
Efficienza	η	0,96	0,95	0,96	0,95
Perdite Joule (W)	P_{Joule}	2750	4970	3020	5440
Perdite nel ferro (W)	P_{Fe}	750	840	850	930
Ondulazione di coppia (Nm)	$\Delta T_{p_k p_k}$	18	24	31	46

Capitolo 5

Analisi termiche

Per concludere il progetto bisogna condurre le valutazioni termiche. La temperatura è una variabile importante del funzionamento del motore ed è per questo che non può essere trascurata durante la fase progettuale. Ogni componente del modello e del sistema di raffreddamento è caratterizzato da una propria condizione termica e le analisi hanno l'obiettivo di determinare lo stato del sistema e quindi di ciascuna parte della struttura.

In questo capitolo si pone l'attenzione su due componenti del motore: l'avvolgimento e il magnete. La temperatura come è stato già evidenziato nel corso del progetto influenza le caratteristiche elettriche e meccaniche dei due elementi e per questa ragione, SyR-e richiede che sia scelta una temperatura target per i rispettivi materiali. Tramite i test termici si può verificare le temperature effettive raggiunte rispettivamente dall'avvolgimento e dai magneti.

La temperatura condiziona anche l'affidabilità del motore. Il corretto funzionamento della macchina dipende dall'integrità dell'isolamento elettrico dei conduttori, ed è proprio l'isolante ad essere molto sensibile alle escursioni termiche. Gli isolamenti elettrici sono classificati in funzione della loro tolleranza alla temperatura. In questo progetto si utilizza un isolamento di classe H, il quale ha un limite massimo di temperatura uguale a $180°C$.

Si deve verificare la temperatura raggiunta dall'avvolgimento in condizioni nominali, ma anche in seguito al sovraccarico. Per ammettere un'alta affidabilità del motore, ossia la più bassa probabilità di guasto e la più lunga durata di vita del componente, non si dovrebbe verificare una temperatura massima più alta di quella limite.

Le analisi termiche sono eseguite mediante Motor-CAD, un programma commerciale che include oltre al modulo dedicato al progetto elettromagnetico di macchine elettriche anche un modulo termico dedicato al sistema di raffreddamento. La possibilità all'interno dello stesso programma di poter progettare sia il modello elettromagnetico che quello termico è la risposta all'esigenza diffusa di dover considerare gli aspetti termici già durante le prime fasi progettuali.

5.1 Caratteristiche del sistema di raffreddamento

Per ciascun motore sotto test si esporta il modello da SyR-e nel secondo programma e si procede nel disegnare il sistema di raffreddamento le cui caratteristiche sono in Tabella 5.1.

É prevista una giacca di raffreddamento a spirale con fluido refrigerante composto da acqua ed etilene, la portata scelta è di 15 l/min. Si prevede una temperatura del fluido in ingresso di $85°C$ e un temperatura ambiente di $25°C$. Si utilizza tutto lo spazio disponibile in senso radiale, assegnando una diametro esterno dell'housing di 210 mm. La giacca di raffreddamento copre non solo le parti attive, ma anche le testate, che inoltre sono avvolte da una resina che favorisce la trasmissione di calore. Il sistema di raffreddamento è uguale per tutti i motori che si analizza in seguito. La geometria assiale completa del sistema di raffreddamento del progetto AVALON-def1 è in Figura 5.1.

Una volta definita la struttura del motore completa del sistema di raffreddamento il programma Motor-CAD associa ad essa un modello termico 3D a parametri concentrati. Ogni componente della macchina corrisponde ad una resistenza e una capacità termica, e le perdite equivalgono a generatori di corrente. Risolvendo il circuito termico equivalente si stimano le temperature di ogni parte della struttura per una condizione di regime o per un transitorio.

Tabella 5.1: Principali caratteristiche del sistema di raffreddamento

Grandezza	Unità	Valore
Housing		Giacca a spirale
Diametro esterno housing	mm	210
Temperatura ambiente	$°C$	25
Portata del fluido	l/min	15
Temperatura di ingresso	$°C$	85
Proprietà del fluido		Acqua,Etilene 50/50

5.2 Input e risultati simulazione

I punti di funzionamento principali che si vogliono analizzare sono la condizione nominale e di sovraccarico. Le due modalità di lavoro sono studiate simultaneamente, nel senso che la richiesta di sovraccarico segue una condizione nominale. Inizialmente si caratterizza il regime termico associato al funzionamento nominale del motore e da questa condizione iniziale si avvia un transitorio in sovraccarico.

I dati richiesti in input per lanciare la simulazione, relativi alle perdite connesse al funzionamento, sono stati ricavati in SyR-e. Si precisa che Motor-CAD richiede

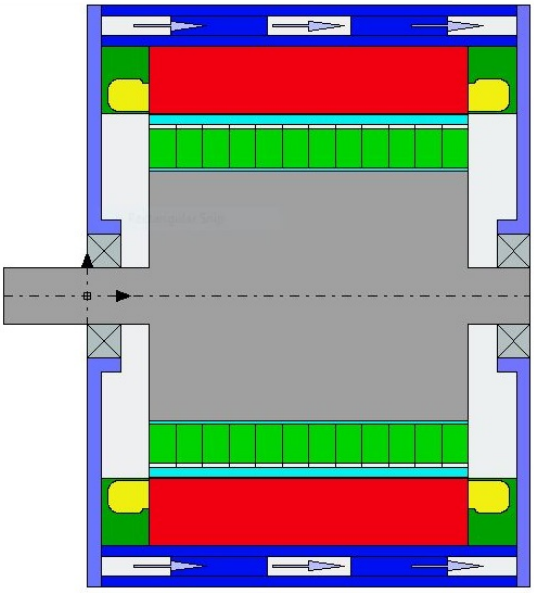

Figura 5.1: Geometria assiale AVALON-def1

un'ulteriore suddivisione della voce di perdite nel ferro, in perdite nel ferro del dente di statore e perdite nel ferro del giogo di statore, classificazione non presente in SyR-e. Si procede attribuendo le perdite nel ferro di statore ai due diversi componenti, in funzione del rispettivo peso percentuale a fronte del peso totale di statore. Le perdite nel ferro per unità di peso saranno le stesse per i due componenti. Per quanto riguarda le perdite Joule in input, esse racchiudono anche le perdite per effetto pelle.

In seguito si illustrano i risultati della simulazione termica prima per il progetto AVALON-def1 e poi per il motore AVALON-def2.

Tabella 5.2: Input e risultati analisi termica AVALON-def1

Grandezza	Unità	Valore		
		Nom.	Sovra.	Corto.
Perdite Joule	W	2750	4970	4010
Perdite nel ferro del giogo di statore	W	430	480	460
Perdite nel ferro del dente di statore	W	180	200	195
Perdite nel ferro di rotore	W	140	160	150
Temperatura massima dell'avvolgimento	$°C$	192	223	237
Temperatura magneti	$°C$	160	160	175

In Tabella 5.2 sono riportati gli input dell'analisi termica del modello AVALON-def1 e i risultati relativi della simulazione termica. Si legge la temperatura massima raggiunta dall'avvolgimento e la temperatura dei magneti, per le diverse condizioni operative. Il valore di perdita corrispondente al cortocircuito si riferisce all'ampiezza di corrente caratteristica.

In Figura 5.2 è rappresentato l'andamento nel tempo della temperatura per i due componenti. L'origine temporale sull'asse delle ascisse è di 7800 s perché si trascura il transitorio termico iniziale e si osserva l'andamento dopo un tempo sufficiente al raggiungimento del regime termico. Dopo che in condizioni nominali si è a regime, a partire da 8100 s si sviluppa un transitorio termico relativo al sovraccarico. Il valore di temperatura in tabella per la condizione di sovraccarico si riferisce ad una durata di 30 s, corrispondente al primo punto evidenziato nel grafico dopo l'inizio del transitorio. Dalla Figura 5.2 è possibile notare anche l'evoluzione termica successiva per una durata totale di 5 min, ma non è prevista dal funzionamento del motore.

Il punto critico dell'avvolgimento sono le testate, qui si raggiungono le temperature più alte. Il valore massimo in condizioni nominali è di $192°C$, una temperatura superiore di quella garantita dalla classe d'isolamento. Un aumento continuativo di $10°C$ provoca il dimezzamento della vita del componente. Mediamente l'avvolgimento ha una temperatura di $170°C$, minore del target di $180°C$ imposto per il progetto in SyR-e. Perciò la resistenza elettrica sarà minore di quella stimata e così anche le perdite a parità di corrente. In relazione alla classe dell'isolamento, o si accetta una durata di vita più corta o si può prendere in considerazione una classe più costosa e quindi che, ad esempio, tolleri $200°C$ come limite massimo di temperatura.

Il sovraccarico rappresenta anche da un punto di vista termico una sollecitazione di forte stress per il motore. Dopo 30 s esso causa un'innalzamento della temperatura media dell'avvolgimento di $20°C$, con picchi di temperatura di $223°C$. Il valore massimo di temperatura raggiunto dall'avvolgimento eccede il limite massimo dell'isolamento di classe H, più di quanto già avviene in condizioni nominali. Il carattere transitorio riduce lo stress termico, ma l'elevata temperatura è comunque un fattore di infragilimento dell'isolante che in questo modo avrà una minore durata di vita.

Il secondo componente descritto dalle analisi termiche è il magnete. La temperatura in condizioni nominali è di $160°C$ e non cambia conseguentemente al sovraccarico. La potenza dissipata a rotore è inferiore rispetto quella di statore, ma il calore qui prodotto è anche più difficilmente estraibile. La differenza di temperatura con il target utilizzato per il progetto si riflette in particolare sul fenomeno della smagnetizzazione, ma le buone qualità del materiale Recoma garantiscono allo stesso modo una buona affidabilità del magnete.

In riferimento all'ampiezza di corrente caratteristica, il valore di temperatura in tabella si riferisce ad una durata del transitorio di 20 min. Così come per il sovraccarico le condizioni iniziali sono quelle nominali. Tale durata del transitorio

è sufficiente per l'avvolgimento a raggiungere una temperatura di regime. La temperatura massima raggiunta è di circa 240°C.

Tabella 5.3: Input e risultati analisi termica AVALON-def2

Grandezza	Unità	Valore	
		Nom.	Sovra.
Perdite Joule	W	3020	5440
Perdite nel ferro del giogo di statore	W	480	520
Perdite nel ferro del dente di statore	W	220	235
Perdite nel ferro di rotore	W	150	175
Temperatura massima dell'avvolgimento	°C	185	208
Temperatura magneti	°C	145	145

Successivamente si ripetono le analisi termiche per il modello AVALON-def2. In Tabella 5.3 sono descritti gli input della simulazione e i rispettivi risultati. Non è presente la sezione relativa alla corrente caratteristica perché la sua ampiezza è più bassa del valore di corrente nominale, perciò verificando la condizione nominale si analizza indirettamente anche la prima. L'andamento temporale della temperatura dell'avvolgimento e dei magneti è in Figura 5.3.

Il motore è più freddo del primo perché presenta un valore del coefficiente di carico termico inferiore. Infatti il modello def2 ha delle perdite Joule maggiori rispetto il def1, ma ha anche una superficie esterna di statore più estesa. Entrambi i progetti hanno un diametro esterno di statore uguale a 180 mm, ma il modello def1 ha una lunghezza di 115 mm mentre il modello def2 di 150 mm.

L'avvolgimento del motore AVALON-def2 è mediamente più freddo di 10°C rispetto al primo. La temperatura massima raggiunta dall'avvolgimento in condizioni nominali o in sovraccarico è comunque superiore al limite di temperatura garantito dall'isolamento di classe H. Sarebbe più adeguato un isolante elettrico caratterizzato da un limite di 200°C.

La temperatura dei magneti risulta di 145°C, un valore inferiore del target di 180°C utilizzato in SyR-e. Un ambiente più freddo è un vantaggio per il materiale magnetico che così sarà più resistente alla smagnetizzazione. In relazione alla corrente caratteristica si può prevedere che possa essere tollerato un transitorio dalla durata di 20 min senza causare un surriscaldamento critico della macchina.

Una prima considerazione sui risultati qui esposti riguarda l'isolante elettrico. Per entrambi i modelli la classe H risulta insufficiente, di conseguenza bisogna ammettere un isolamento di classe più elevata. In riferimento alle temperature massime, in particolare del modello def1, per garantire una durata di vita dell'isolamento più lunga si dovrebbe scegliere una classe che tolleri anche 220°C.

Una seconda considerazione è sulla differenza dello stato termico dei due progetti. Una riduzione del coefficiente di carico termico comporta un motore più freddo,

mantenendo inalterato il sistema di raffreddamento. Così una ulteriore scelta può essere quella di ridurre il coefficiente di carico termico, in modo da rispettare la temperatura massima dell'isolamento classe H.

Infine si potrebbe rivalutare il progetto del sistema di raffreddamento cercando di aumentarne l'efficienza. La portata del fluido refrigerante è già elevata, perciò si dovrebbe agire sulla configurazione della giacca termica.

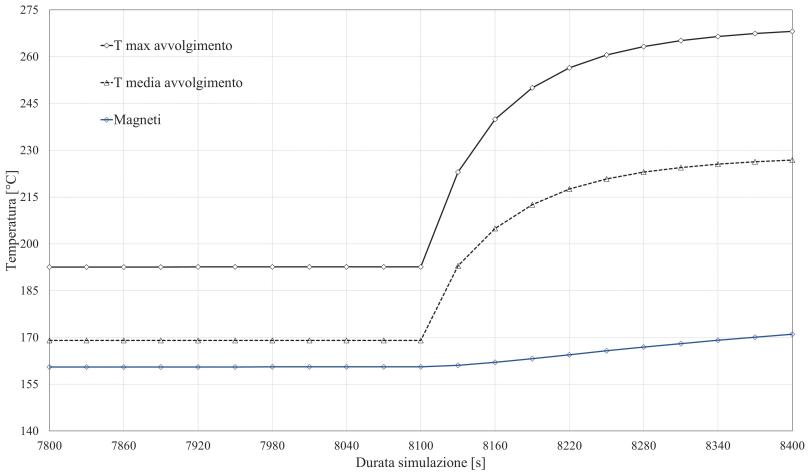

Figura 5.2: Simulazione termica AVALON-def1

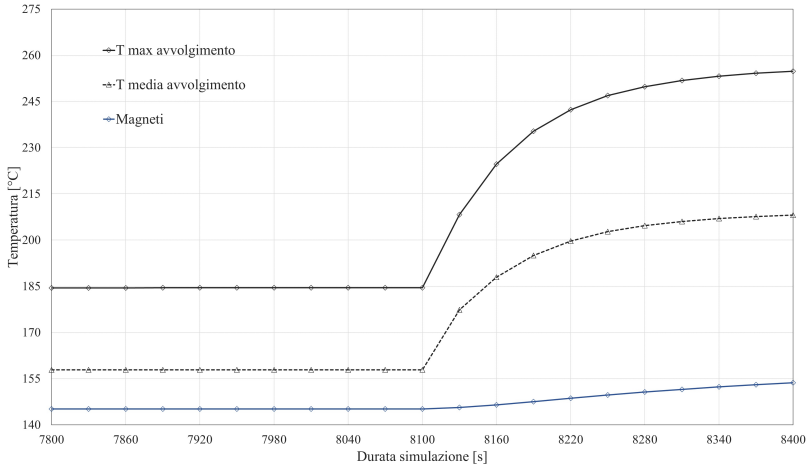

Figura 5.3: Simulazione termica AVALON-def2

5.3 AVALON-def3

Si prova a cambiare alcune scelte di progetto per ottenere un motore che sia più freddo in modo da non superare la massima temperatura garantita dall'isolamento di classe H. Si prende in esame il modello AVALON-def1 e si riduce il coefficiente di carico termico di progetto da $40\,kW/m^2$ a $25\,kW/m^2$. Di conseguenza decresce la corrente nominale (1.8) e così la coppia (1.10). La struttura fisica del motore è fin qui inalterata, ma mediante la GUI di SyR-e si cambia in input il valore k_j e così l'ampiezza di corrente nominale i_0.

Occorre allungare il motore da 115 mm a 140 mm per aumentare la coppia prodotta corrispondente al valore di i_0. In questo modo si ottiene un motore che ha delle prestazioni molto simili al motore def1, in termini di coppia e ondulazione di coppia, ma risulterà più freddo.

Tabella 5.4: Parametri AVALON-def3

Grandezza	Simbolo	Unità	Valore
Raggio esterno di rotore	r	mm	65,25
Raggio d'albero		mm	45,00
Lunghezza rotore	L	mm	140
Lunghezza dente	l_t	mm	11,08
Larghezza dente	w_t	mm	4,81
Posizione 1° barriera	α_1	°	10,80
Spessore 1° magnete	hc_1	mm	1,50
Inclinazione 1° barriera	β_1	°	76,50
Posizione 2° barriera	α_2	°	6,07
Spessore 2° magnete	hc_2	mm	2,00
Inclinazione 2° barriera	β_2	°	54,90
Peso macchina		kg	22,00
Peso magnete		kg	1,00
Numero di spire in serie per fase	N_s		24
Magnete			Rec. 30HE
Target temperatura magnete	θ_{PM}	$°C$	140
Coppia	T	Nm	145
Corrente nominale	i_0	A	205
Corrente caratteristica	i_{ch}	A	305
Corrente smagnetizzante	i_{demag}	A	850
Tensione a carico di fase	E_0	V	325
Tensione a vuoto di fase	E	V	245
Ondulazione di coppia picco-picco	$\Delta T_{p_k p_k}$	Nm	22,00
Fattore di potenza	IPF		0,9

In Tabella 5.4 è descritto il motore così come è stato fatto per i due progetti definitivi a seguito degli affinamenti. Il modello AVALON-def3 eredita completamente la geometria radiale del modello AVALON-def1. L'allungamento del motore produce un aumento di peso che raggiunge i 22 kg di cui i magneti contribuiscono con 1 kg.

La macchina ha un flusso nominale più alto a confronto con gli altri due progetti e questo si evidenzia dal valore di tensione di fase a vuoto uguale a 245 V. I valori di corrente caratteristica e smagnetizzante sono gli stessi del progetto def1 e la misura di ondulazione di coppia picco-picco non peggiora in modo significativo, l'oscillazione aumenta di 4 Nm.

Tabella 5.5: Grandezze caratteristiche e misure di perdita AVALON-def3

Grandezza	Simbolo	Unità	Valore	
			Nominale	Sovraccarico
Velocità	n	rpm	5900	5900
Coppia	T	Nm	145	194
Efficienza	η		0,97	0,96
Potenza	P	kW	89	120
Perdite totali	P_d	W	2965	4680
Perdite Joule	P_{Joule}	W	2120	3735
Perdite Joule DC	$P_{J_{DC}}$	W	2045	3600
Perdite Joule AC	$P_{J_{AC}}$	W	75	135
Perdite nel ferro	P_{Fe}	W	845	945
Perdite nel ferro di statore	P_{Fes}	W	690	770
Perdite nel ferro di rotore	P_{Fer}	W	155	175
Corrente di fase	I	A	205	270
Tensione di linea	V_l	V	575	600
Fattore di potenza	IPF		0,9	0,88

In Tabella 5.5 sono racchiusi i dati relativi alle potenze dissipate durante il funzionamento reale del motore AVALON-def3. Le informazioni sono ricavate a seguito delle analisi di mappa di flusso, perdita nel ferro e mappa di efficienza. Non serve rieseguire lo studio delle perdite per effetto pelle perché la geometria di cava è la stessa del motore AVALON-def1. La resistenza elettrica R_{DC} $(180°C)$ aumenta a 32,3 mΩ a causa della lunghezza maggiore del tratto attivo, valore di resistenza che cresce ulteriormente per effetto pelle del 4%.

L'efficienza risulta più alta di un punto percentuale sia in condizioni nominali che in condizioni di sovraccarico. Questo guadagno è dovuto alle minori perdite per effetto Joule, diretta conseguenza dell'abbassamento del valore del coefficiente di carico termico. Si nota un aumento delle perdite nel ferro perché in seguito all'allungamento del motore la struttura ha più materiale ferromagnetico.

Dal valore massimo di tensione di linea di 600 V, condizione che si verifica in sovraccarico, si deduce che si sfrutta una maggiore quota della tensione del DC-link disponibile per il progetto. La corrente assorbita in sovraccarico è di 270 A e la coppia prodotta presenta un'oscillazione picco-picco di 24 Nm. L'ondulazione di coppia in condizioni nominali risulta invece 22 Nm. C'è un miglioramento del fattore di potenza sia per la condizione nominale e soprattutto per quella in sovraccarico.

Si procede in Motor-CAD con le simulazioni termiche del motore per le diverse condizioni operative. Gli input dei test e i relativi risultati sono in Tabella 5.6. Il sistema di raffreddamento è lo stesso descritto inizialmente in Tabella 5.1. In Figura 5.4 è rappresentato l'andamento nel tempo della temperatura dell'avvolgimento e dei magneti.

Tabella 5.6: Input e risultati analisi termica AVALON-def3

Grandezza	Unità	Valore		
		Nom.	Sovra.	Corto.
Perdite Joule	W	2120	3735	4536
Perdite nel ferro del giogo di statore	W	485	540	555
Perdite nel ferro del dente di statore	W	205	230	240
Perdite nel ferro di rotore	W	155	175	180
Temperatura massima dell'avvolgimento	$°C$	165	180	240
Temperatura magneti	$°C$	145	145	170

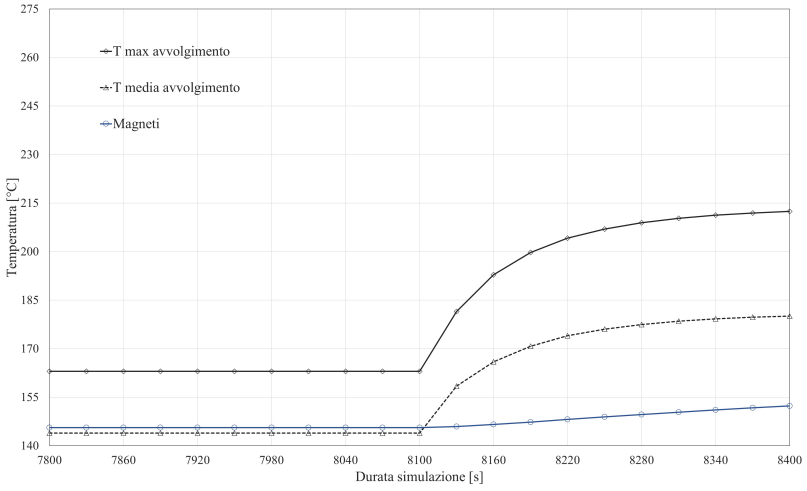

Figura 5.4: Simulazione termica AVALON-def3

Il motore risulta effettivamente più freddo rispetto i primi due progetti. La temperatura massima raggiunta dall'avvolgimento in seguito ad un transitorio in sovraccarico di una durata di 30 s è $180°C$, mentre in condizioni nominali risulta $165°C$. In questo modo aumenta l'affidabilità e la durata di vita del componente isolante. Mediamente l'avvolgimento ha una temperatura di $145°C$, stessa temperatura dei magneti. Mentre in sovraccarico cresce a $160°C$ a differenza della temperatura del magnete che rimane in pratica costante.

La condizione di cortocircuito rimane critica. Da una condizione iniziale di regime termico nominale, dopo 20 min le perdite associate all'ampiezza di corrente caratteristica causano un surriscaldamento dell'avvolgimento che raggiunge i $240°C$. In questa condizione la temperatura dei magneti diventa $170°C$.

Escludendo l'evento del guasto le analisi termiche del motore AVALON-def3 portano a dei risultati positivi. Le temperature massime raggiunte dall'avvolgimento per un funzionamento sano della macchina sono tollerate dall'isolamento di classe H. L'abbassamento del coefficiente termico non ha influenzato in modo marcato le caratteristiche meccaniche, invece l'allungamento del motore necessario per soddisfare il target di coppia aumenta ulteriormente il peso della struttura.

5.4 Principali parametri modelli definitivi

Di seguito si riassumono le principali caratteristiche dei tre motori progettati AVALON-def1, AVALON-def2 e AVALON-def3.

In Tabella 5.7 si descrivono i dati elettrici e di funzionamento. Quindi si confrontano le prestazioni nominali delle tre macchine. I valori di corrente e tensione sono valori di picco. Si riprende anche la corrente massima associata al sovraccarico e l'ampiezza di corrente caratteristica normalizzata rispetto la corrente nominale. La misura di ondulazione di coppia picco-picco è espressa in termini percentuali del valore nominale. Nel caso del modello def2 o def3 i due valori indicano la condizione nominale e di sovraccarico, mentre nel caso del modello def1 la caratteristica non cambia. Il modello def3 manifesta l'oscillazione minore in sovraccarico.

In Tabella 5.8 si descrivono invece le caratteristiche meccaniche strutturali dei diversi progetti. La misura della dimensione longitudinale totale comprende anche il sistema di raffreddamento. Il rispettivo valore, allo stesso modo del peso totale, è calcolato in Motor-CAD dopo che è stato definito il modello termico. Se la lunghezza totale rientra ampiamente nel limite imposto dalle specifiche di 300 mm, il peso totale è fuori dal target di 18 kg. Le temperature in tabella si riferiscono al valore massimo raggiunto dall'avvolgimento in condizione di regime nominale e dopo un sovraccarico dalla durata di 30 s.

Tenendo conto del limite di peso imposto dalle specifiche dell'applicazione finale, si deve prediligere il modello AVALON-def1 perché risulta essere la struttura più leggera. Perciò si deve anche prevedere l'utilizzo di una classe di isolamento elettrico più alta della tipologia H, in modo da tollerare le massime temperature raggiunte

dall'avvolgimento. Se il limite del peso non risultasse rigoroso il modello AVALON-def3 sarebbe una valida alternativa. Esso sfrutta in quota maggiore la tensione disponibile traendone un guadagno in termini di corrente, che si riduce notevolmente. Inoltre presenta un'efficienza migliore e un fattore di potenza più alto.

Tabella 5.7: Caratteristiche elettromeccaniche

Grandezza	Simbolo	Unità	Valore		
			def1	def2	def3
Velocità nominale	n_{nom}	rpm	5900	5900	5900
Coppia nominale	T_n	Nm	145	145	145
Corrente nominale	i_0	A	250	265	205
Corrente massima	i_{max}	A	335	360	270
Corrente caratteristica	i_{ch}/i_0	$p.u.$	1,24	0,81	1,49
Tensione di fase nominale	V_f	V	285	280	330
Tensione di fase a vuoto	E	V	200	150	245
Efficienza	η		0,96	0,96	0,97
Fattore di potenza	IPF		0,88	0,83	0,9
Ondulazione di coppia	$\Delta T_{p_k p_k}$	%	12,4	21,4-23,7	15,2-12,4

Tabella 5.8: Caratteristiche meccaniche

Grandezza	Unità	Valore		
		def1	def2	def3
Diametro housing	mm	210	210	210
Raggio statore	mm	90,00	90,00	90,00
Raggio rotore	mm	65,25	70,00	65,25
Lunghezza rotore	mm	115	150	140
Lunghezza totale	mm	160	220	185
Peso macchina	kg	18,20	20,00	22,00
Peso totale	kg	22	26	27
Temperatura nominale	$°C$	192	185	165
Temperatura sovraccarico	$°C$	223	208	180

Conclusioni

Il progetto di un motore elettrico IPM si dimostra articolato in diverse fasi. La prima fase, in cui si definiva la macchina IPM a singolo strato, è stata il nucleo della progettazione. L'aggiunta di un secondo strato di magneti ha ricondotto alla configurazione proposta dalla tesi e migliorato la qualità della coppia riducendo l'oscillazione. Così si è ottenuto un motore elettrico IPM V-type doppio strato dimensionato in funzione della coppia nominale di 145 Nm richiesta dall'applicazione. Il tool di progetto preliminare è efficace perché dimensiona in modo automatico un motore IPM V-type a singolo strato in funzione del target di coppia. La geometria di statore risulta ben progettata come si nota dalla distribuzione di densità di campo magnetico. Però la caratteristica meccanica del motore non è ottimale manifestando un'elevata oscillazione di coppia.

La seconda fase ha avuto l'obiettivo di ridurre l'oscillazione di coppia. Per raggiungere tale scopo si è ottimizzato il modello AVALON-base mediante analisi multi-obiettivo. Si è così definito il modello ottimo AVALON-mode4 caratterizzato da un'oscillazione picco-picco di coppia del 10% del valore medio prodotto. L'algoritmo di ottimizzazione su cui si sviluppa la seconda fase è funzionale per riprogettare il rotore della macchina. Tra le diverse caratteristiche del rotore quella della posizione degli strati di magnete risulta essere la più rilevante. In definitiva mediante l'ottimizzazione del modello base, da un lato si migliora in modo netto la qualità della coppia riducendone l'oscillazione, d'altra parte si conferma l'efficacia del dimensionamento del progetto preliminare. Infatti a seguito del risultato ottimo non aumenta la misura di coppia media erogata a parità di peso della macchina, dimostrando come già il modello base sia caratterizzato da un'alta densità di coppia.

Il modello AVALON-mode4 anche se soddisfaceva la richiesta di coppia nominale con una ridotta ondulazione presentava delle criticità relative al materiale magnetico. In questa terza fase sono stati apportati alcuni affinamenti al modello ottimizzato mode4 per renderlo più resiliente alla smagnetizzazione e ottenendo così il progetto definitivo AVALON-def1. L'utilizzo di magneti di tipo Recoma 30HE ha soddisfatto la richiesta di un alto valore di corrente smagnetizzante in relazione all'ampiezza di corrente caratteristica. In parallelo con la stessa motivazione, ma con una diversa strategia, è stata modificata la struttura AVALON-base definendo un modello alternativo AVALON-def2. Quest'ultimo conservava il materiale di inizio progetto

N40EH, ma presentava una geometria di rotore meno coerente con la tipologia V-type. Si miglioravano le caratteristiche magnetiche in analisi, ma il modello def2 risultava una macchina meno performante a confronto con il modello def1, avendo una densità di coppia più bassa e un'ondulazione di coppia più alta. I motori IPM V-type a doppio strato sono caratterizzati da un'elevata corrente caratteristica che in relazione alla corrente smagnetizzante può compromettere l'affidabilità del motore. La scelta del tipo di materiale magnetico diventa fondamentale, soprattutto in una applicazione in cui sono previste alte temperature operative, le quali possono influenzare molto le caratteristiche magnetiche dei magneti. Equivalentemente è molto importante la temperatura di esercizio dei magneti.

SyR-e agevola la progettazione del motore IPM V-type a doppio strato. Un notevole vantaggio deriva dal tool del "Preliminary Design" e dalle analisi di ottimizzazione che semplificano il compito del progettista, il primo determinando in modo automatico una geometria base dimensionata in funzione del target di coppia, la seconda permettendo di migliorare le prestazioni del motore in analisi in accordo alle funzioni obiettivo selezionate. Mediante SyR-e è anche semplice caratterizzare il modello progettato attraverso simulazioni ad elementi finiti. Ed un ulteriore punto di forza del programma sono le analisi relative alle traiettorie di controllo motore o alle caratteristiche elettromeccaniche. Il programma è in corso di sviluppo e in continuo aggiornamento. Questo è sì un vantaggio, ma richiede all'utente un'elasticità maggiore a confronto dell'utilizzo di un programma commerciale predefinito. L'uso di alcune opzioni in SyR-e come l'analisi dell'effetto pelle può risultare all'utente meno lineare di altre opzioni, ma questo è giustificabile se si considera la mole di dati che il programma gestisce e la difficoltà conseguente.

Infine in relazione al risultato del progetto AVALON-def1, 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 discreto fattore di potenza pari a 0,88. Si prevede di conseguenza alla richiesta di sovraccarico una corrente massima di ampiezza 1,34 il valore nominale. A seguito delle analisi termiche si considera insufficiente un isolamento elettrico di classe H, imponendo invece un isolamento che tolleri la temperatura massima di $220°C$. Il modello risulta troppo pesante, superando il limite imposto da specifiche di 18 kg raggiungendo il totale di 22 kg. A tal proposito si pensa che si potrebbe riprogettare il sistema di raffreddamento in modo da estrarre più calore dalla macchina così da aumentare il coefficiente di carico termico e quindi la densità di coppia.

Bibliografia

[1] F. Cupertino, G. Pellegrino, and et al., “SyR-e: Synchronous Reluctance (machines) - evolution,” accessed 24-January-2019. [Online]. Available: https://sourceforge.net/projects/syr-e/

[2] S. Ferrari, G. Pellegrino, M. Z. M. Jaffar e I. Husain, "Computationally Efficient Design Procedure for Single-Layer IPM Machines."

[3] S. Ferrari e G. Pellegrino, "FEAfix: FEA Refinement of Design Equations for Synchronous Reluctance Machines."

[4] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal and T.Meyarivan, "A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II".