

POLITECNICO DI TORINO

Elettromagnetismo Applicato



Tesina

## SyR-e: Analisi Motore Sincrono a Riluttanza

Gruppo 2

Componenti  
Alex Aiello 336698  
Eduardo Cipolletta 346566  
Andrea Campanella 286921

Anno Accademico 2024-2025

# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione a SyR-e</b>	3
1.1	Introduzione al software SyR-e . . . . .	3
1.1.1	Tipologie di macchine sincrone . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Operazioni Preliminari</b>	5
2.1	Creazione della macchina scalata . . . . .	5
2.2	Parametri di scalatura . . . . .	5
2.3	Salvataggio del modello scalato . . . . .	5
2.3.1	Analisi della struttura del polo motore e distribuzione del campo magnetico . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Analisi con SyR-e/FEMM</b>	8
3.1	Calcolo della velocità massima . . . . .	8
3.1.1	Tramite la valutazione “Structural Analysis”, identificare la velocità per cui non ci sono nodi con stress di Von Mises maggiore dello snervamento (450 MPa) . . . . .	8
3.1.2	EXTRA: Identificare la velocità per cui è possibile avere una tolleranza di alcuni punti oltre lo snervamento (e.g. <10) . . . . .	9
3.1.3	EXTRA: La velocità massima della macchina originale è 18 krpm. Ricavare la velocità massima tramite formule analitiche di scalatura	9
3.1.4	EXTRA: È possibile utilizzare 4 template di mesh (FEMM originale e infittita, PDE fitta e grezza). Studiare l'effetto della dimensione della mesh sulla simulazione . . . . .	11
3.2	Calcolo della coppia massima . . . . .	15
3.2.1	Identificazione del punto di MTPA . . . . .	15
3.2.2	EXTRA: Spettro armonico della coppia . . . . .	15
3.3	Calcolo della velocità base . . . . .	17
3.3.1	Calcolare la velocità base a partire dalla tensione massima (550 Vdc) e dal flusso concatenato alla coppia massima. I risultati della simulazione sono quelli del punto precedente . . . . .	17
3.4	Flusso concatenato a vuoto . . . . .	19
3.4.1	Trovare il flusso concatenato a vuoto eseguendo la simulazione del punto di sopra, ma a corrente nulla. In questo caso, il flusso concatenato a statore è quello generato solamente dai magneti permanenti ed allineato con l'asse d . . . . .	19

3.4.2	EXTRA: Calcolare la velocità limite per non avere generazione non controllata in circuito aperto (velocità per cui, a corrente nulla, la tensione di linea è pari alla tensione DC) . . . . .	20
3.5	Calcolo del picco di corrente di corto-circuito . . . . .	20
3.5.1	Utilizzare la modalità “HWC Short-Circuit Current” per stimare il picco di corrente . . . . .	20
3.5.2	EXTRA: Simulare cosa succede se la condizione di pre-guasto è diversa. Provare a eseguire la stessa analisi partendo da corrente nulla . . . . .	21
3.6	Valutazione della smagnetizzazione nei magneti permanenti . . . . .	22
3.6.1	Parametri principali dell’analisi . . . . .	22
3.6.2	Procedura di analisi e interpretazione dei risultati . . . . .	22
3.6.3	Osservazioni e conclusioni . . . . .	23

# Capitolo 1

## Introduzione a SyR-e

### 1.1 Introduzione al software SyR-e

Le macchine elettriche sincrone rappresentano una tecnologia fondamentale nella conversione e nell'utilizzo dell'energia elettrica, con applicazioni che spaziano dalla generazione di energia (alternatori) ai sistemi di propulsione per veicoli terrestri, navali e aerei, oltre a servomotori e applicazioni domestiche. Queste macchine si distinguono per il funzionamento sincronizzato tra la velocità del rotore e la frequenza del campo magnetico statorico, garantendo elevata efficienza e precisione.

#### 1.1.1 Tipologie di macchine sincrone

Le macchine sincrone si suddividono in tre principali categorie:

- **Macchine a campo avvolto (WFSM):** magnetizzazione tramite avvolgimento a corrente continua nel rotore.
- **Macchine a magneti permanenti (PMSM):** utilizzano magneti permanenti per generare il campo magnetico. Si distinguono in:
  - **IPMSM (magneti interni):** magneti posizionati all'interno del rotore.
  - **SPMSM (magneti superficiali):** magneti montati sulla superficie esterna del rotore.
- **Macchine sincrone a riluttanza (SyRM):** basano la magnetizzazione sulla corrente statorica e presentano un rotore anisotropo.

Tra queste, le SyRM e le IPMSM stanno guadagnando popolarità grazie alla semplicità costruttiva, ai costi contenuti e alla densità di potenza elevata.

#### Software SyR-e

SyR-e è un software open-source progettato per la progettazione e l'analisi di motori sincroni, implementato in MATLAB e integrato con FEMM. Offre strumenti per:

1. **Simulazioni FEA (Finite Element Analysis):** essenziali per modellare geometrie complesse, saturazioni magnetiche e comportamenti non lineari, ma con tempi di calcolo elevati.
2. **Progettazione preliminare e ottimizzazione:** per migliorare le prestazioni dei motori.
3. **Analisi automatizzata:** comprendente mappe di flusso, simulazioni termiche e strutturali, oltre a studi sulle prestazioni.

Per superare i limiti delle simulazioni FEA, SyR-e utilizza mappe di flusso pre-calcolate o derivate da misurazioni sperimentali, riducendo i tempi di calcolo e facilitando l'integrazione con strumenti come Simulink e PLECS. Inoltre, semplificazioni geometriche consentono di rappresentare il modello in 2D grazie alla simmetria assiale e periodica della macchina, minimizzando l'uso di risorse computazionali. L'analisi si concentra su una singola sezione della macchina, applicando condizioni di periodicità per rappresentare correttamente l'intero sistema.

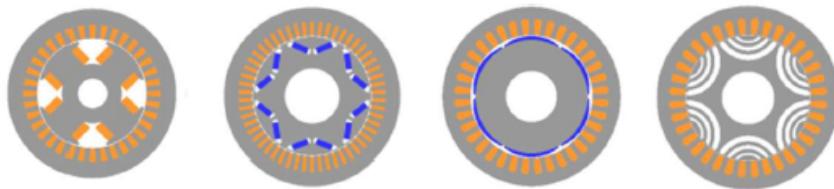


Figura 1.1: Esempio di macchine sincrone.

# Capitolo 2

# Operazioni Preliminari

## 2.1 Creazione della macchina scalata

La prima operazione da eseguire è quella di aprire l'interfaccia grafica principale (comando: `GUI_Syre`) e caricare il modello "ICEM24", presente nella cartella "motorExamples" attraverso il tasto "Load Machine".

Bisogna dunque scalare la macchina in direzione radiale e assiale attraverso i parametri di scalatura definiti in seguito. Ciò è possibile utilizzando il tasto "Scale" e inserendo i nuovi valori all'interno degli opportuni slot, ovvero "Stator outer radius" per  $k_D$  e "Stack lenght" per  $k_L$ .

## 2.2 Parametri di scalatura

$$k_D = 0.75 \cdot \left(1 + \frac{n}{N}\right) \quad (2.1)$$

$$k_L = 2.5 - k_D \quad (2.2)$$

Dove  $n$  è il numero del gruppo e  $N$  è il numero totale di gruppi (23).

Nel caso in questione,  $n = 2$ , dunque i fattori di scalatura saranno:

$$k_D = 0.815 \quad (2.3)$$

$$k_L = 1.685 \quad (2.4)$$

È importante modificare di un fattore  $k_D$  anche due grandezze che non vengono scalate in maniera diretta dal software; esse sono collocate nel menù "Windings" e sono nominate "Conductor width" e "Conductor height".

## 2.3 Salvataggio del modello scalato

Per salvare il nuovo modello scalato, si utilizza il tasto "Save Machine" e si utilizza il nome "ICEM24scaled02"; saranno salvati due file: uno MatLab e uno FEMM.

Si procede con l'analisi della macchina, sviluppando le richieste seguenti.

### 2.3.1 Analisi della struttura del polo motore e distribuzione del campo magnetico

La progettazione e l'analisi di una macchina sincrona richiedono una comprensione approfondita della struttura del polo motore e del comportamento del campo magnetico  $B$ . Nella figura 2.1 è rappresentata la struttura del polo motore generata utilizzando FEMM, evidenziando gli elementi costruttivi principali: avvolgimenti dello statore, lamierini del rotore e magneti permanenti incassati.

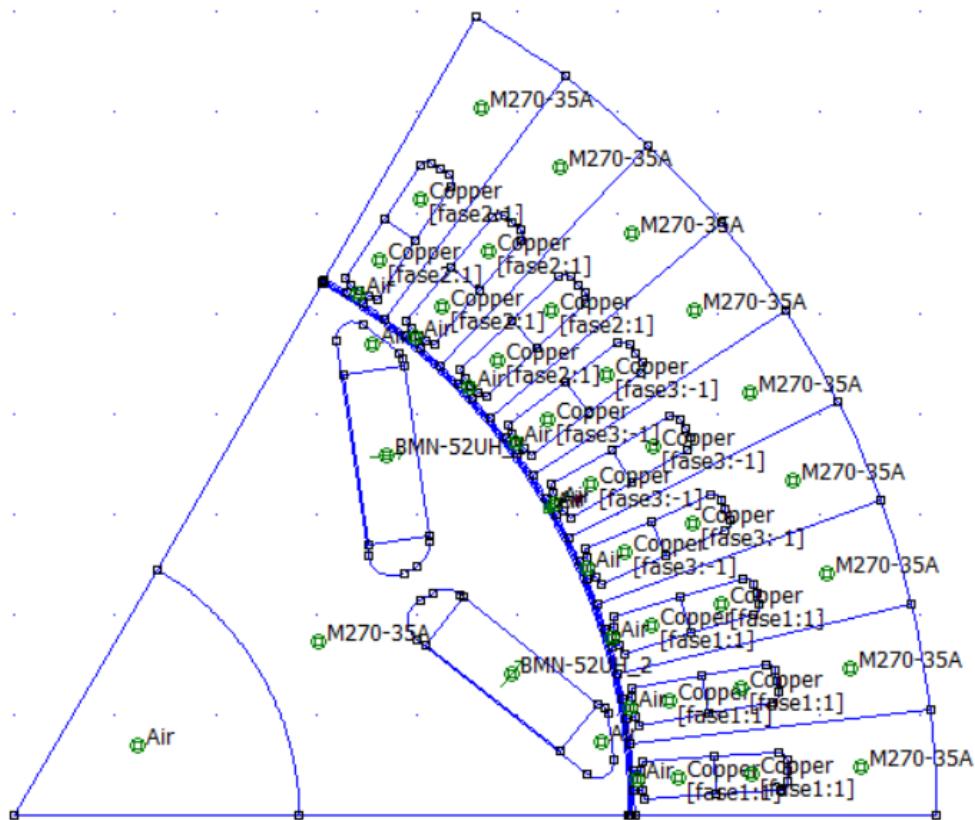


Figura 2.1: Struttura del polo motore generata in FEMM.

La presenza dei magneti permanenti, come evidenziato dalla mappa cromatica del campo magnetico in figura 2.2, gioca un ruolo fondamentale nel guidare il flusso magnetico lungo percorsi preferenziali. Questi magneti, opportunamente posizionati all'interno del rotore, rafforzano la densità di flusso magnetico nelle aree critiche e contribuiscono alla riduzione delle perdite magnetiche, migliorando così l'efficienza complessiva della macchina.

La mappa cromatica mostra la distribuzione della densità del flusso magnetico  $B$ , dove le regioni ad alta densità sono rappresentate dai colori più intensi. È evidente come il flusso magnetico venga convogliato dai magneti permanenti, supportando la creazione di un campo magnetico coerente e ben definito, che ottimizza le prestazioni della macchina.

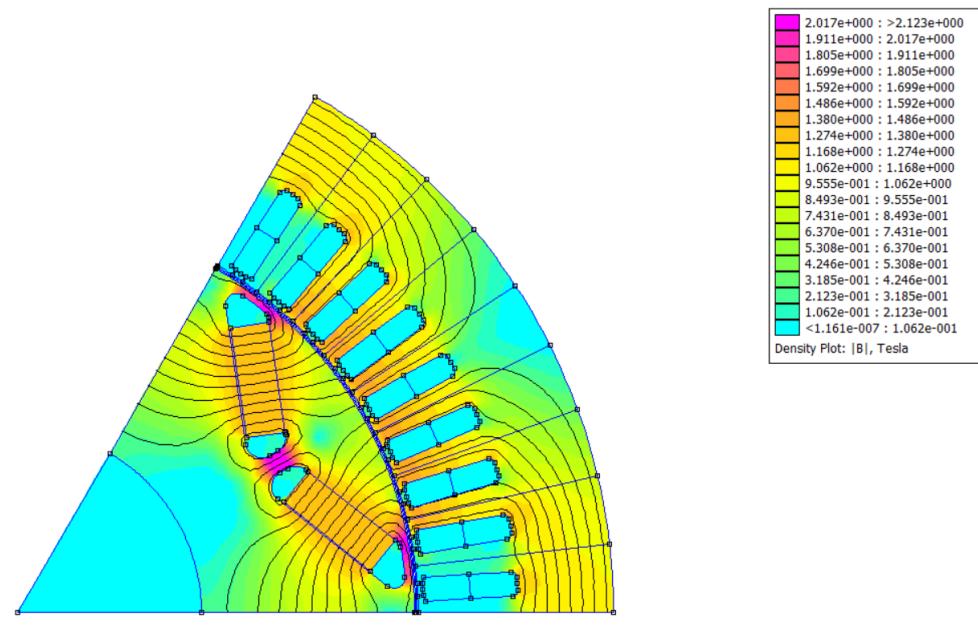


Figura 2.2: Mappa cromatica della densità del flusso magnetico  $B$ .

Questa analisi sottolinea l'importanza della progettazione dei magneti permanenti nella configurazione interna della macchina sincrona, che non solo contribuisce a migliorare le prestazioni, ma consente anche di ottimizzare i parametri geometrici e magnetici per applicazioni specifiche.

# Capitolo 3

## Analisi con SyR-e/FEMM

### 3.1 Calcolo della velocità massima

3.1.1 Tramite la valutazione “Structural Analysis”, identificare la velocità per cui non ci sono nodi con stress di Von Mises maggiore dello snervamento (450 MPa)

Tramite l'analisi strutturale, si è trovato un valore di velocità massima ammissibile di circa  $22086\text{ rpm}$ . Al di sotto di tale valore, nessun punto supera il valore di snervamento di  $450\text{ MPa}$ .

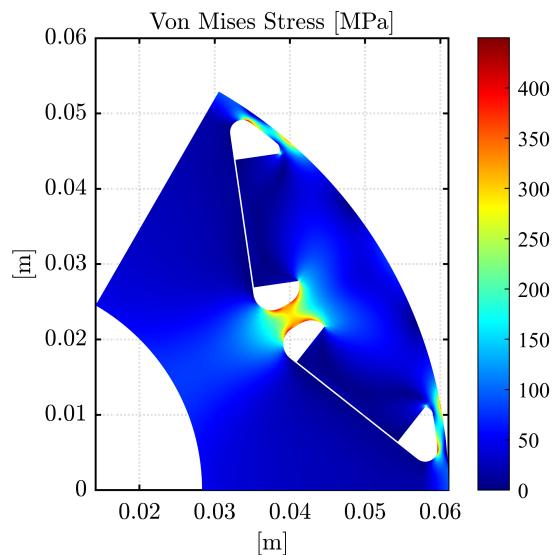


Figura 3.1: Valori di stress a  $22086\text{ rpm}$

### 3.1.2 EXTRA: Identificare la velocità per cui è possibile avere una tolleranza di alcuni punti oltre lo snervamento (e.g. <10)

Si sono svolte poi ulteriori analisi per trovare la velocità che permettesse di avere alcuni punti oltre lo snervamento, ma non più di 9. Il valore trovato corrisponde a circa  $22800\text{rpm}$ , come mostrato dalle figure Fig.3.2 e Fig.3.3.

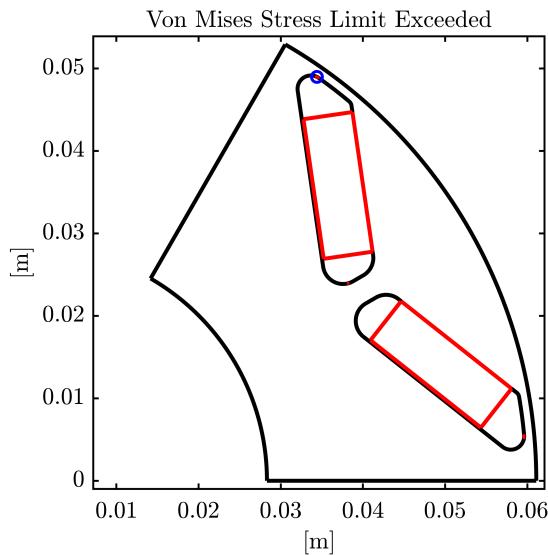


Figura 3.2: Punti in cui avviene lo snervamento

```
9 nodes out of 16715 exceed the maximum material stress.
```

Figura 3.3: Risultato MATLAB

### 3.1.3 EXTRA: La velocità massima della macchina originale è 18 krpm. Ricavare la velocità massima tramite formule analitiche di scalatura

Si parte dall'ipotesi per cui, quando si fa ruotare la macchina alla massima velocità, essa sia anche sottoposta al massimo stress meccanico sopportabile. Per questo motivo, è necessario eguagliare le due espressioni degli stress meccanici (non scalato e scalato) affinché si riesca a ricavare una relazione analitica tra le velocità angolari che risulti conforme con la soluzione fornita da SyRe.

Lo stress meccanico centrifugo in un cilindro rotante (per semplicità la macchina è geometricamente approssimata) è:

$$\sigma = \rho \cdot r^2 \cdot \omega^2 \quad (3.1)$$

in cui  $\rho$  è la densità del ferro,  $r$  è la distanza radiale dal centro e  $\omega$  la velocità angolare. Esso è ricavabile attraverso la seguente:

$$\sigma = \frac{F_{tot}}{A} \quad (3.2)$$

in questo caso,  $F_{tot}$  è la forza centrifuga totale agente sul cilindro, mentre  $A$  rappresenta la superficie laterale dello stesso. Inoltre, la massa complessiva del motore è data da:

$$M = \rho \cdot V = \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot L \quad (3.3)$$

Si parte, dunque con il calcolo della forza  $F_{tot}$ .

$$F_{tot} = \int_V \omega^2 \cdot r \cdot dm \quad (3.4)$$

Sostituendo  $dm$  con  $\rho \cdot dV = \rho \cdot r \cdot dr \cdot d\theta \cdot dz$  si ottiene:

$$F_{tot} = \rho \cdot \omega^2 \cdot L \cdot \int_0^R r^2 \cdot 2\pi dr \quad (3.5)$$

Risolvendo l'integrale si ricava il valore della forza centrifuga complessiva:

$$F_{tot} = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \rho \cdot L \cdot R^3 \cdot \omega^2 \quad (3.6)$$

La superficie  $A$ , invece, è espressa come:

$$A = 2\pi \cdot R \cdot L \quad (3.7)$$

Ovviamente, nel caso di macchina scalata vanno adattate le grandezze  $R$  e  $L$ .

### Macchina non scalata

$$\sigma_1 = \frac{\frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \rho \cdot L \cdot R^3 \cdot \omega_1^2}{2\pi \cdot R \cdot L} = \frac{\rho}{3} \cdot \omega_1^2 \cdot R^2 \quad (3.8)$$

### Macchina scalata

$$\sigma_2 = \frac{\frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \rho \cdot L \cdot k_L \cdot \omega_2^2 \cdot R^3 \cdot k_D^3}{2\pi \cdot k_D \cdot R \cdot k_L \cdot L} = \frac{\rho}{3} \cdot \omega_2^2 \cdot R^2 \cdot k_D^2 \quad (3.9)$$

A questo punto si egualano le espressioni  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  appena ricavate:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{\rho}{3} \cdot \omega_1^2 \cdot R^2 = \frac{\rho}{3} \cdot \omega_2^2 \cdot R^2 \cdot k_D^2 \quad (3.10)$$

Si conclude che, dati  $n_1 = 18000 rpm$  e  $k_D = 0.815$ :

$$n_2 = n_{max} = \frac{n_1}{k_D} = \frac{18000}{0.815} = 22086 rpm \quad (3.11)$$

Da notare che l'uguaglianza è scritta direttamente con i valori di velocità in  $rpm$ , perché i fattori moltiplicativi usati per la conversione si semplificano tra loro.

### 3.1.4 EXTRA: È possibile utilizzare 4 template di mesh (FEMM originale e infittita, PDE fitta e grezza). Studiare l'effetto della dimensione della mesh sulla simulazione

La macchina è stata successivamente analizzata utilizzando i 4 template di mesh proposti.

#### FEMM originale

Il template FEMM originale presenta una mesh poco fitta, come mostrato in Fig.3.4; ciò permette di avere tempi di simulazione al di sotto del minuto, ma i risultati ottenuti, mostrati in Fig.3.5 , sono poco lineari e poco precisi.

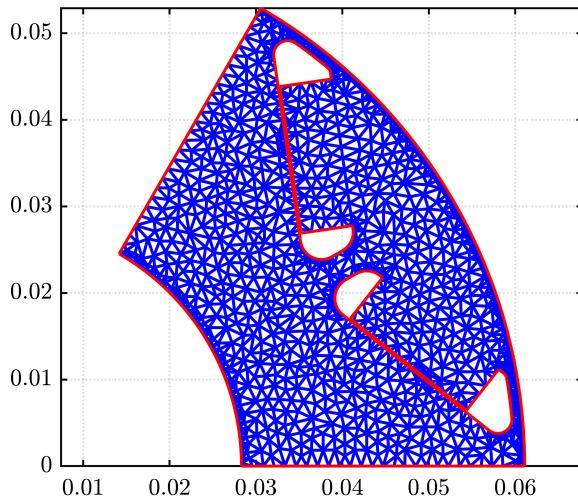


Figura 3.4: Mesh FEMM originale

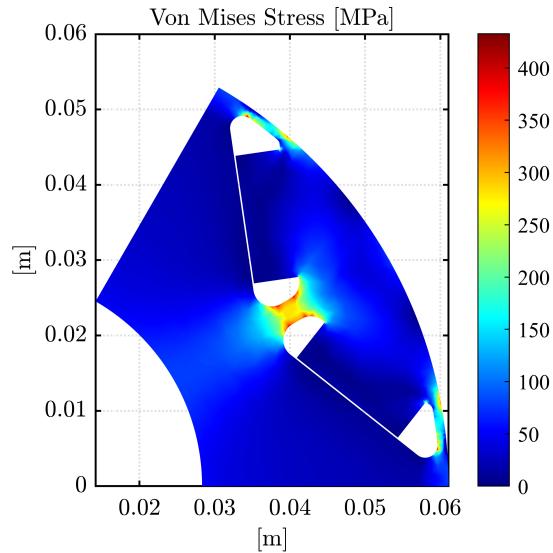


Figura 3.5: Stress FEMM originale

### FEMM infittita

La struttura FEMM infittita presenta il maggior numero di nodi, come mostrato in Fig.3.6, ma è anche quella che necessita di più tempo per la simulazione (circa 5-6 minuti). Rispetto alla versione di FEMM originale mostra dei risultati più accurati e precisi.

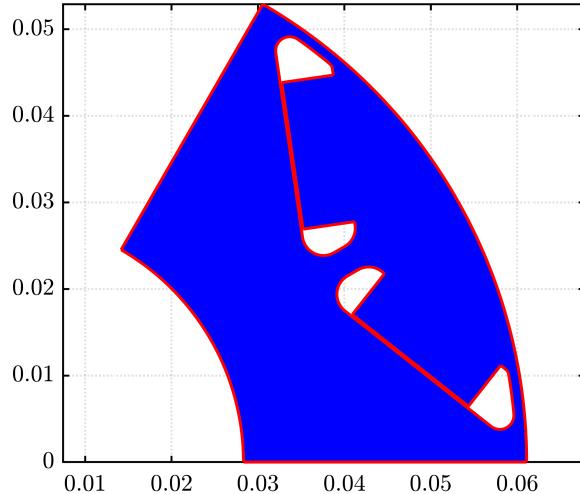


Figura 3.6: Mesh FEMM infittita

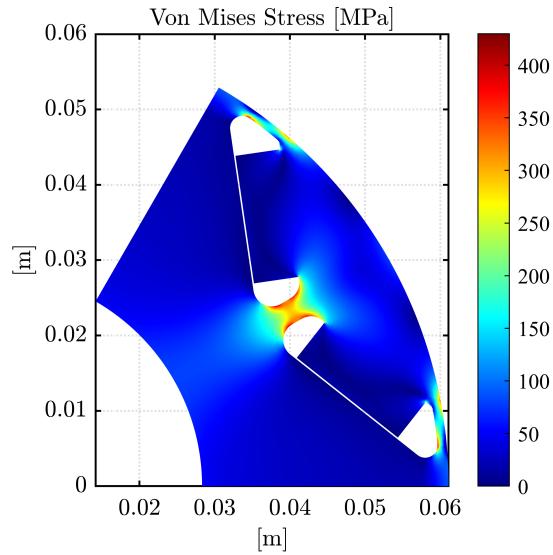


Figura 3.7: Stress FEMM infittita

### PDE grezza

La struttura PDE grezza, mostrata in Fig.3.8, è simile alla FEMM originale; i tempi di simulazione si attestano intorno ai 40 secondi, ma in compenso i risultati ottenuti Fig.3.9 hanno una risoluzione migliore.

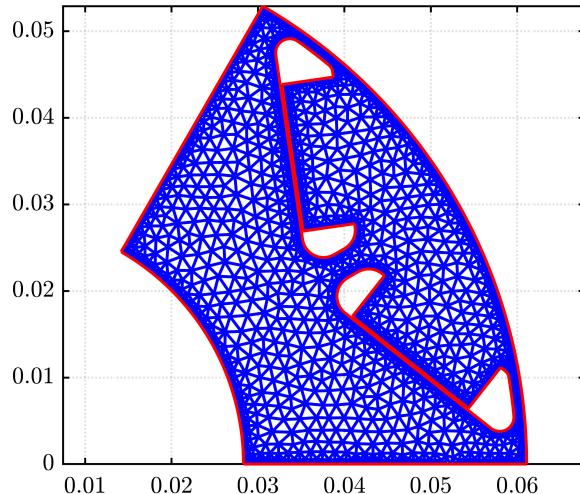


Figura 3.8: Mesh PDE grezza

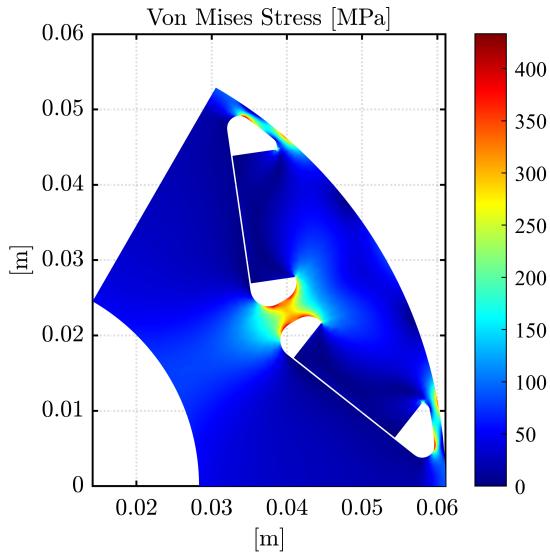


Figura 3.9: Stress PDE grezza

### PDE fitta

L'ultima struttura è la PDE fitta, che è il giusto compromesso tra tempi di calcolo e risultati. Infatti presenta una mesh molto fitta (Fig.3.10); ciò permette di avere dei tempi di simulazione leggermente superiori rispetto la PDE grezza (di qualche decina di secondi). Al contempo, si riesce ad approssimare meglio la condizione reale del modello.

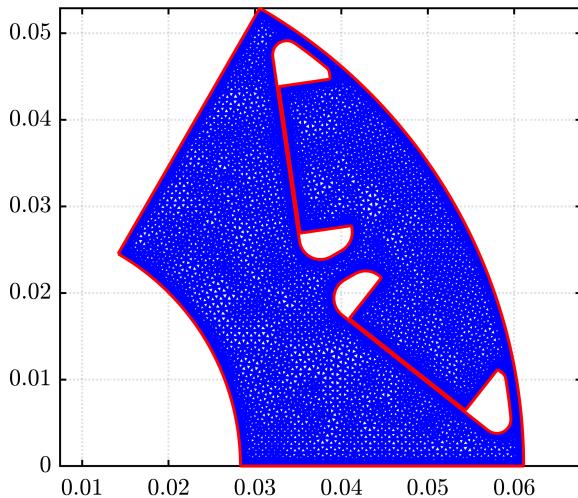


Figura 3.10: Mesh PDE fitta

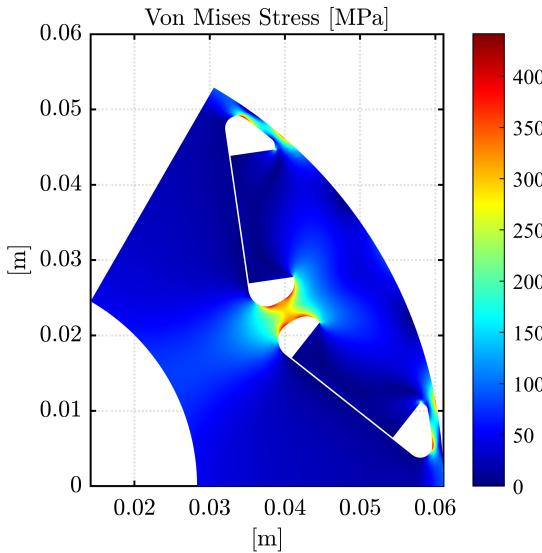


Figura 3.11: Stress PDE fitta

## 3.2 Calcolo della coppia massima

### 3.2.1 Identificazione del punto di MTPA

Per l'identificazione del punto di *Maximum Torque per Ampere* (MTPA), è stata eseguita una prima simulazione variando l'angolo di corrente in un intervallo definito da `linspace(90, 180, 5)`, mantenendo il valore di corrente costante a 600 Apk. Tale simulazione è stata eseguita utilizzando 30 posizioni del rotore. L'obiettivo era identificare approssimativamente l'intervallo in cui si verificava la massima coppia generata dal motore.

Dai risultati della prima simulazione, è stato osservato che il massimo valore di coppia si trovava in un intorno di 135° di angolo di corrente. Di conseguenza, è stata eseguita una seconda simulazione con un'intervallo di angolo più ristretto, definito da `linspace(130, 160, 6)`, per ottenere una maggiore precisione. Inoltre, il numero di posizioni del rotore è stato aumentato da 30 a 60, migliorando così la risoluzione dei risultati.

Grazie a questa seconda simulazione, è stato possibile identificare con maggiore precisione l'angolo di corrente corrispondente alla coppia massima, che si è rivelato essere pari a 142°. Questa informazione è stata fondamentale per definire il punto di lavoro ottimale del motore.

### 3.2.2 EXTRA: Spettro armonico della coppia

Lo spettro armonico della coppia è stato analizzato utilizzando la funzione di MATLAB `plot_singt_FFT`. Per l'analisi, è stato selezionato un angolo di corrente pari a 142°, specifico per il punto di lavoro desiderato.

La funzione ha generato un grafico che mostra l'ampiezza delle armoniche di coppia in funzione del loro ordine, consentendo di identificare le principali componenti armoniche presenti e il loro impatto sulle prestazioni della macchina

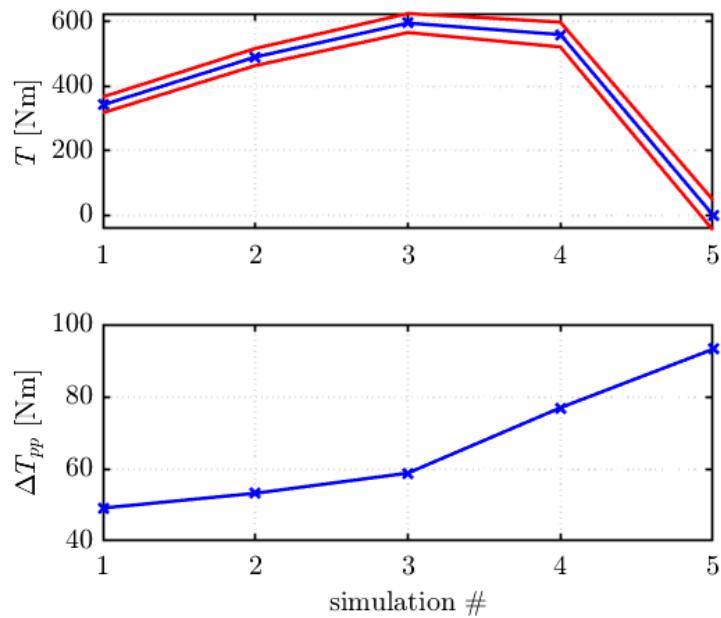


Figura 3.12: Intervallo di angolo tra  $90^\circ$  e  $180^\circ$  per MTPA

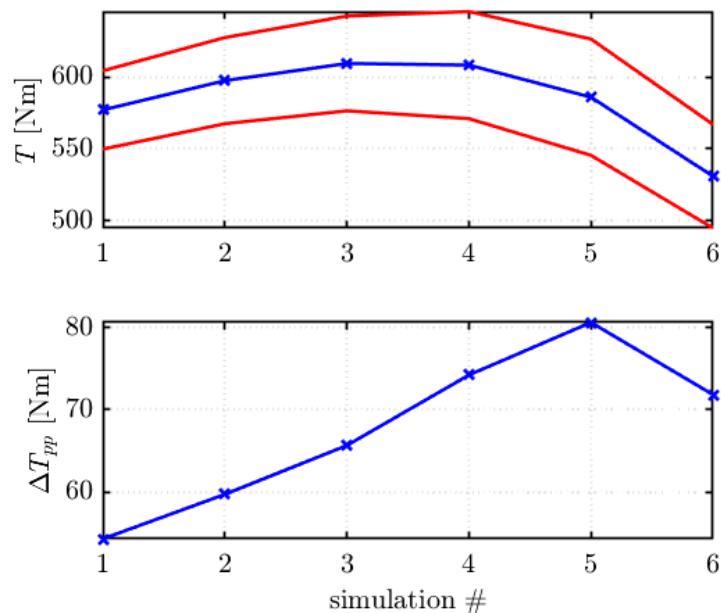


Figura 3.13: Intervallo di angolo tra  $130^\circ$  e  $160^\circ$  per MTPA

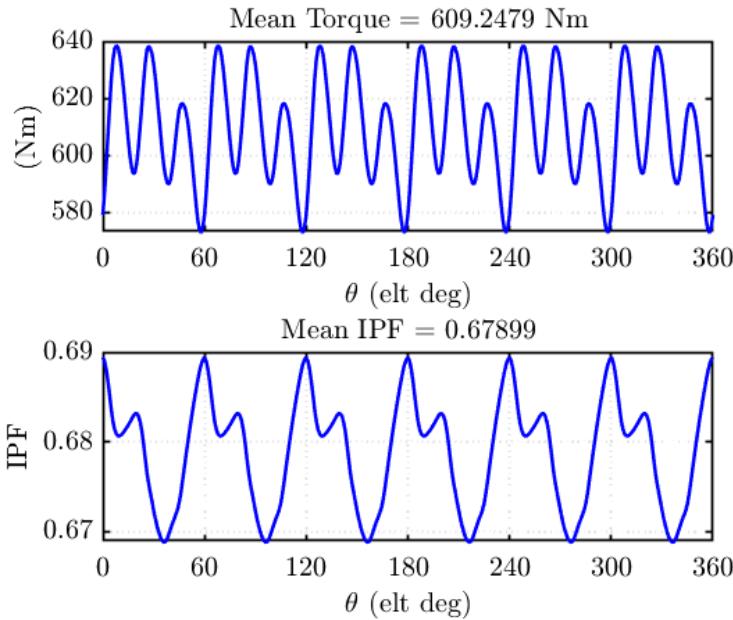


Figura 3.14: Coppia massima rilevata a  $142^\circ$  di angolo di corrente

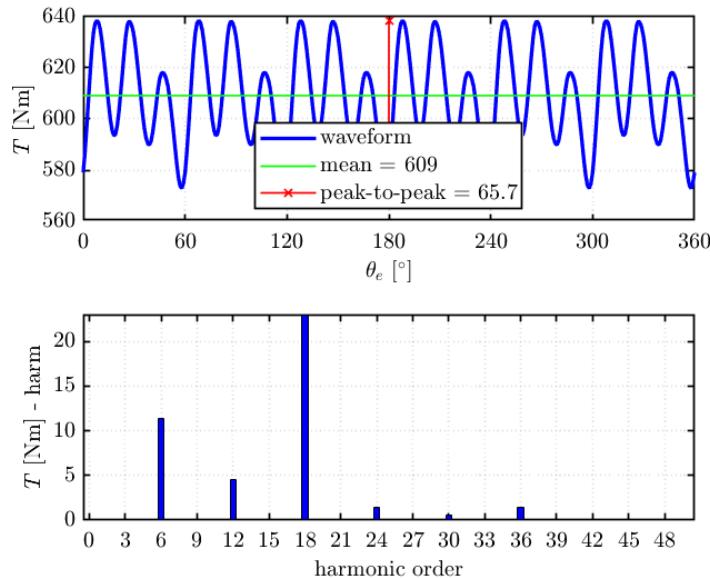


Figura 3.15: Spettro Armonico della Coppia a 142 gradi di corrente

### 3.3 Calcolo della velocità base

#### 3.3.1 Calcolare la velocità base a partire dalla tensione massima (550 Vdc) e dal flusso concatenato alla coppia massima. I risultati della simulazione sono quelli del punto precedente

Essendo una macchina sincrona, la velocità base in questo caso è strettamente legata a  $\omega$ , ovvero la pulsazione elettrica delle grandezze coinvolte.

Si riporta il circuito equivalente che permette di ricavare la velocità base con le relative formule utili. Si noti che la derivata del flusso rispetto al tempo risulta essere nulla in quanto l'analisi è svolta in condizioni di regime. Inoltre, la tensione  $v_{dq}$  è posta al valore massimo, uguale a  $\frac{500}{\sqrt{3}}V$  e la resistenza di statore  $R_s = 0.039\Omega$ . I paia poli  $p$  sono 3.

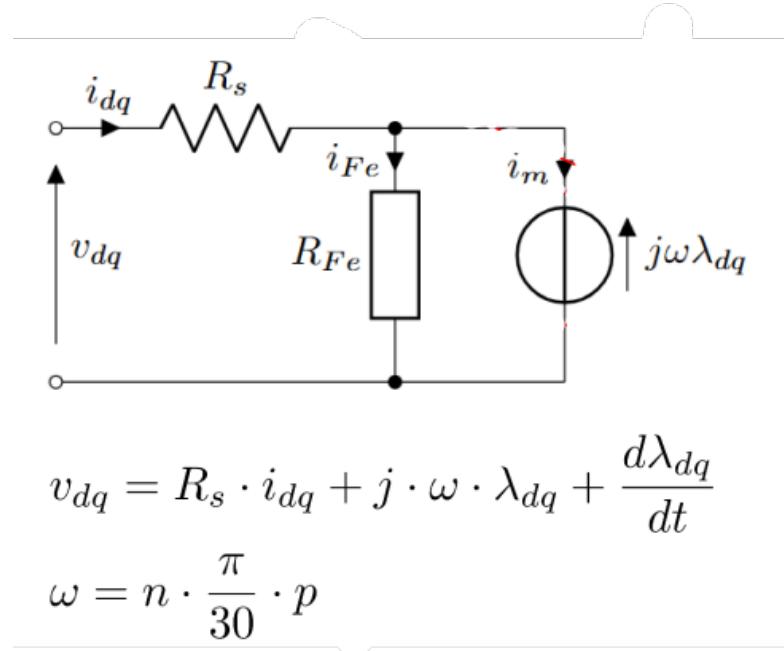


Figura 3.16: Circuito equivalente macchina

Risulta necessario calcolare le grandezze  $i_{dq}$  e  $\lambda_{dq}$  come moduli risultanti dalle componenti delle grandezze riportate di seguito (cerchiate in verde) corrispondenti alla misurazione numero 3 della simulazione svolta in precedenza.

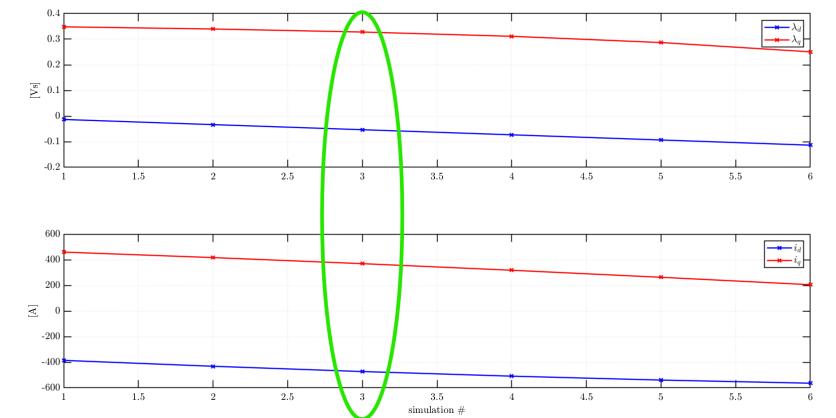


Figura 3.17: Valori di  $i_d$ ,  $i_q$ ,  $\lambda_d$ ,  $\lambda_q$

$$i_{dq} = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} = \sqrt{(-472.806)^2 + (369.397)^2} = 600A \quad (3.12)$$

$$\lambda_{dq} = \sqrt{\lambda_d^2 + \lambda_q^2} = \sqrt{(-0.053)^2 + (0.328)^2} = 0.332Vs \quad (3.13)$$

Sostituendo nelle equazioni, si ottiene:

$$\omega_{base} = \frac{\sqrt{v_{dq}^2 - (R_s \cdot i_{dq})^2}}{\lambda_{dq}} = 954 \frac{rad}{s} \quad (3.14)$$

$$n_{base} = \omega_{base} \cdot \frac{30}{\pi \cdot p} = 3036 rpm \quad (3.15)$$

## 3.4 Flusso concatenato a vuoto

**3.4.1 Trovare il flusso concatenato a vuoto eseguendo la simulazione del punto di sopra, ma a corrente nulla. In questo caso, il flusso concatenato a statore è quello generato solamente dai magneti permanenti ed allineato con l'asse d**

Eseguendo la simulazione a vuoto, si ricava il valore del flusso concatenato a vuoto, dato dall'asse d. In questo caso  $\lambda_{do} = 0.1835 Vs$ .

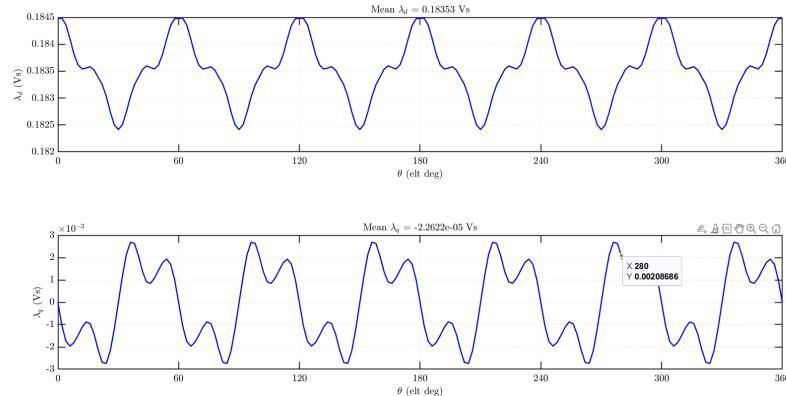


Figura 3.18: Flusso concatenato a vuoto

Tale flusso, attraverso la simulazione a vuoto, risulta essere lo stesso sia alla velocità base, sia a quella massima calcolata in precedenza.

Si trovano dunque le tensioni di linea nei due casi.

$$v_{dqbase} = \sqrt{3 \cdot (\omega_{base} \cdot \lambda_{do})^2} = 303V \quad (3.16)$$

$$v_{dqmax} = \sqrt{3 \cdot (n_{max} \cdot \frac{\pi \cdot p}{30} \cdot \lambda_{do})^2} = 2205V \quad (3.17)$$

### 3.4.2 EXTRA: Calcolare la velocità limite per non avere generazione non controllata in circuito aperto (velocità per cui, a corrente nulla, la tensione di linea è pari alla tensione DC)

Per riuscire a calcolare la velocità limite tale da non avere generazione non controllata in circuito aperto, si utilizza la stessa formula applicata nei punti precedenti, ma imponendo una tensione pari a  $\frac{550}{\sqrt{3}}V$  e ovviamente il flusso  $\lambda_{do}$ .

$$\omega_{lim} = \frac{\sqrt{v_{dq}^2}}{\lambda_{do}} = 1730 \frac{rad}{s} \quad (3.18)$$

$$n_{lim} = \omega_{lim} \cdot \frac{30}{\pi \cdot p} = 5508 rpm \quad (3.19)$$

## 3.5 Calcolo del picco di corrente di corto-circuito

### 3.5.1 Utilizzare la modalità “HWC Short-Circuit Current” per stimare il picco di corrente

Per il calcolo del picco di corrente di corto-circuito, trascurando le cadute resistive, si è utilizzata la modalità HWC Short-Circuit Current impostando una corrente massima di 600A di picco e l'angolo MTPA precedentemente trovato di 142°. In Fig.3.19 è riportato il valore della corrente massima di corto circuito, che è di circa 1320A, più del doppio della corrente massima della macchina. Mentre in Fig.3.20 sono rappresentate le iterazioni eseguite. Tale grafico mostra sull'asse orizzontale l'andamento della corrente da 600 A fino a 1320 A e sull'asse verticale invece si ha il flusso concatenato.

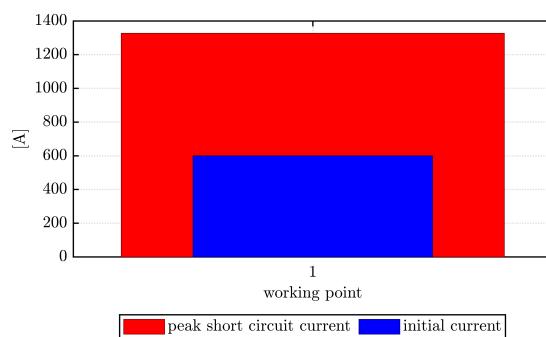


Figura 3.19: Corrente massima di corto-circuito

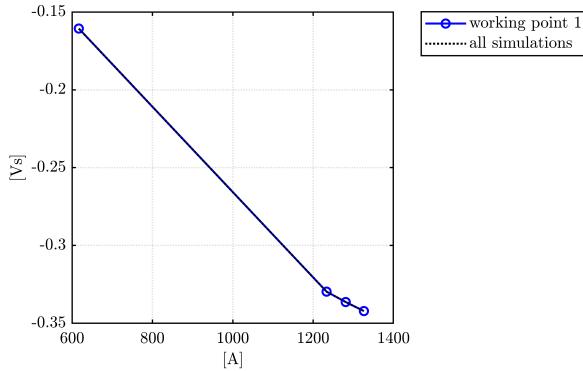


Figura 3.20: Iterazioni

### 3.5.2 EXTRA: Simulare cosa succede se la condizione di pre guasto è diversa. Provare a eseguire la stessa analisi partendo da corrente nulla

Si è eseguita poi un’ulteriore simulazione in cui abbiamo una corrente di pre guasto diversa, in particolare si è partiti da corrente nulla invece dei precedenti 600 A di picco. Da tale simulazione si ottiene il risultato mostrato in Fig.3.21.

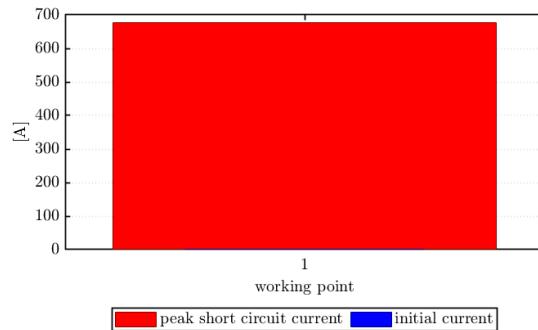


Figura 3.21: Corrente massima partendo da corrente nulla

In questo caso si ottiene una corrente di corto circuito massima più bassa, circa 680 A, dato che si ha un’energia magnetica immagazzinata inferiore rispetto al caso precedente. Questo caso indica una condizione di stress inferiore per la macchina rispetto al precedente dove la corrente iniziale era più elevata.

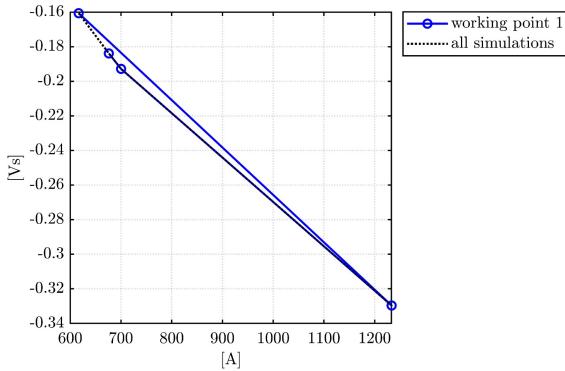


Figura 3.22: Iterazioni con corrente nulla

## 3.6 Valutazione della smagnetizzazione nei magneti permanenti

Il software SyR-e offre la possibilità di analizzare in dettaglio la smagnetizzazione delle macchine sincrone a magneti permanenti, un elemento chiave per comprendere il comportamento del motore in condizioni operative estreme. Questa analisi consente di determinare se i magneti permanenti possono subire danni irreversibili, ad esempio a causa di elevate correnti di cortocircuito o di temperature particolarmente alte.

### 3.6.1 Parametri principali dell’analisi

L’analisi di smagnetizzazione viene condotta definendo due parametri fondamentali:

- **Corrente di fase:** l’intensità della corrente è fissata al valore HWC calcolato precedentemente, rappresentando lo scenario operativo più critico, cioè il cortocircuito. Per adottare un approccio conservativo, l’angolo di fase della corrente viene impostato a 180°, simulando una condizione in cui la corrente è completamente opposta al campo del magnete, aumentando così il rischio di smagnetizzazione.
- **Temperatura del magnete:** la resistenza del magnete alla smagnetizzazione dipende in modo significativo dalla temperatura. All’aumentare di quest’ultima, il campo coercitivo del magnete diminuisce, rendendolo più vulnerabile. Per l’analisi, la temperatura è impostata a 80° Celsius.

### 3.6.2 Procedura di analisi e interpretazione dei risultati

Durante l’analisi, SyR-e individua il punto critico nella curva BH del magnete permanente, noto come “ginocchio”, e confronta l’induzione magnetica in quel punto con i valori calcolati per ciascun elemento della mesh attraverso simulazioni FEA. Se l’induzione in un determinato punto risulta inferiore a quella al ginocchio, quel punto viene classificato come smagnetizzato. L’analisi considera esclusivamente l’induzione magnetica lungo la direzione di magnetizzazione.

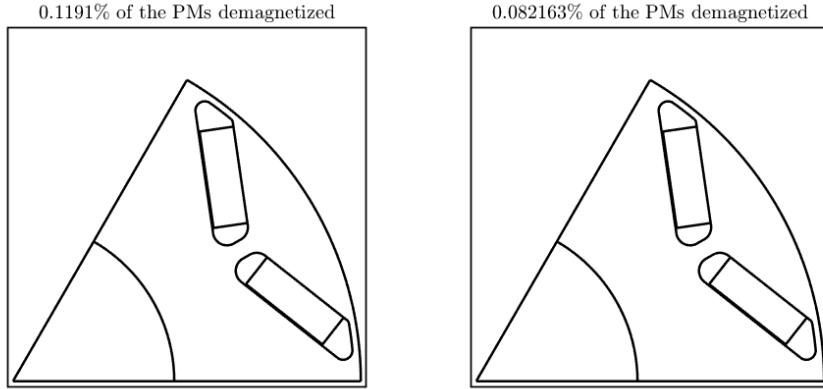


Figura 3.23: Visualizzazione dei risultati dell’analisi di smagnetizzazione del rotore.

La figura 3.23 mostra i risultati per due scenari distinti: nel primo caso, l’asse del magnete permanente è allineato con il dente dello statore, mentre nel secondo è allineato con la cava. Anche se a prima vista non sembrano esserci aree smagnetizzate, un’analisi ingrandita di regioni specifiche, come indicato nella zona A, rivela alcuni elementi della mesh in cui si verificano fenomeni di smagnetizzazione.

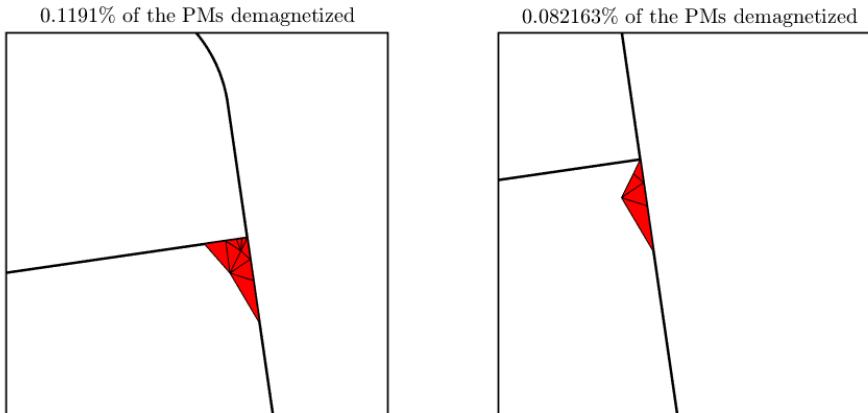


Figura 3.24: Dettaglio angolo superiore destro del magnete con elementi della mesh soggetti a smagnetizzazione.

### 3.6.3 Osservazioni e conclusioni

I risultati dell’analisi mostrano che la percentuale di smagnetizzazione è estremamente bassa in entrambi gli scenari analizzati: circa 0.1191% nel primo caso e 0.082163% nel secondo. Questi valori sono nettamente inferiori al limite accettabile dell’1% del volume totale del magnete. Pertanto, si può concludere che il design del magnete permanente è altamente affidabile e ottimizzato per evitare danni significativi anche in condizioni operative difficili.