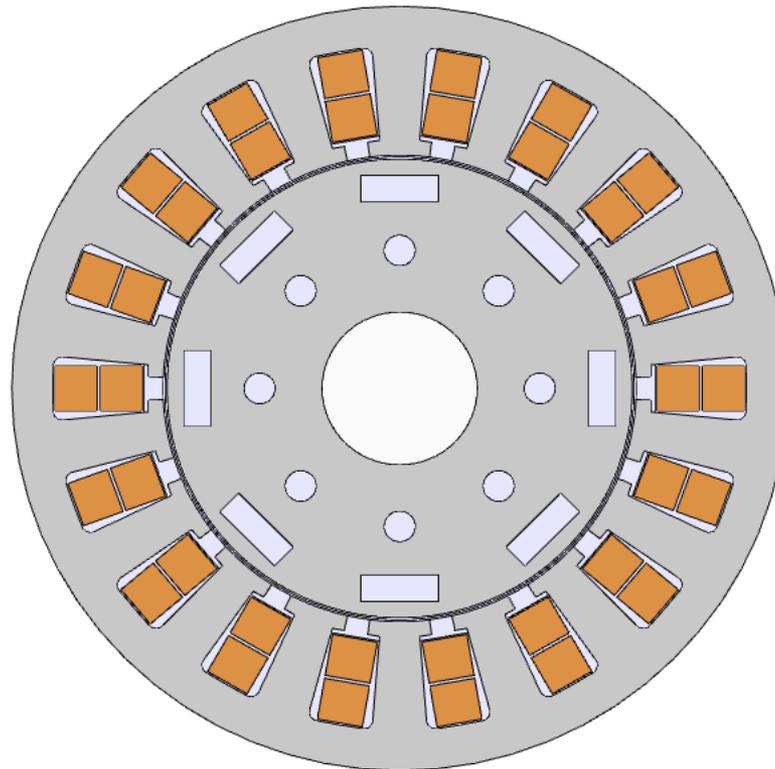


MOTORE SINCRONO A MAGNETI PERMANENTI

- Gruppo di lavoro:

- Andrea Cremasco *matr. N° 414557*
- Davide Spelta *matr. N° 413852*

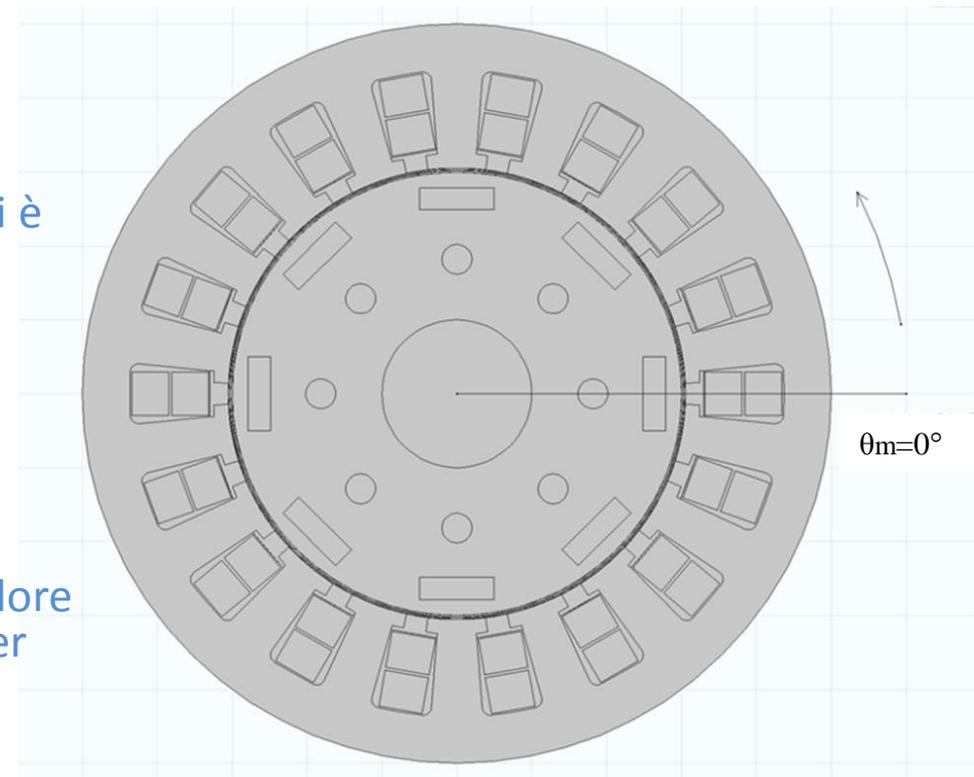
MOTORE SINCRONO A MAGNETI PERMANENTI



DESCRIZIONE MOTORE

Le principali caratteristiche costruttive della macchina sono:

- **Statore:**
 - 18 cave semi-chiuse
 - 2 strati di conduttori per cava: la densità di corrente j nei conduttori è stata scelta pari a 5 A/mm^2
 - Avvolgimenti a passo raccorciato
- **Rotore:**
 - Rotore liscio
 - 4 paia di poli
 - 8 magneti permanenti immersi: i magneti immersi richiedono un valore di induzione residua più elevato per concatenare il flusso di rotore con quello di statore
 - 8 cave di ventilazione



OBIETTIVO DELLE SIMULAZIONI

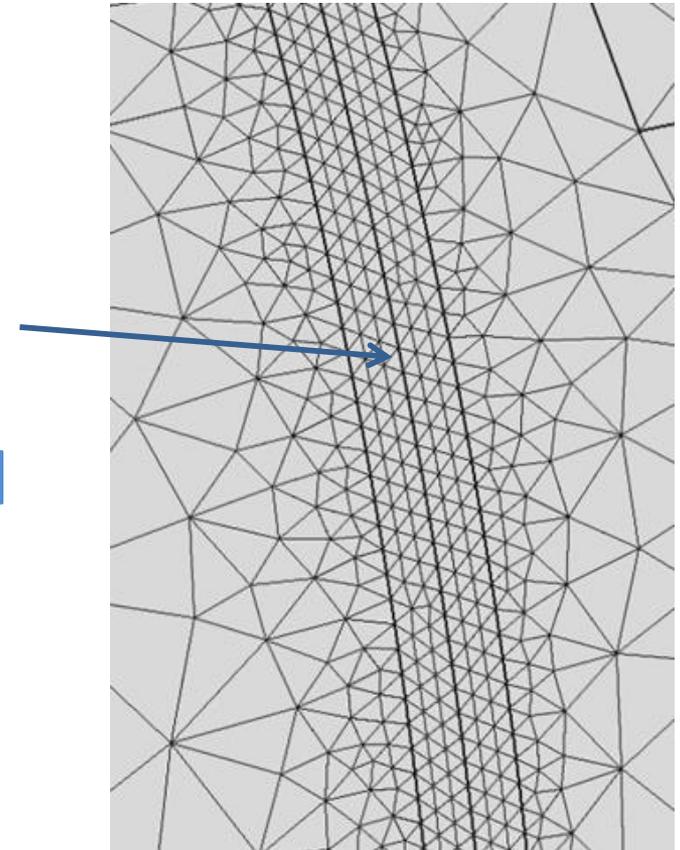
- **Coppia Meccanica.** In particolare:
 - *Coppia di impuntamento;*
 - *Caratteristica statica di coppia;*
 - *Coppia a carico.*
- **Forza Contro-Elettromotrice:**
 - *f_{cem}*

IL CALCOLO DI COPPIA

La coppia è stata calcolata con il metodo del Tensore di Maxwell, integrato rispetto alla superficie intermedia di trasferimento corrispondente a Γ nel caso bi-dimensionale.

Nel caso 2D il Tensore di Maxwell è definito come:

$$\bar{\bar{T}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(H_x B_x - H_y B_y) & H_x B_y \\ H_y B_x & \frac{1}{2}(H_y B_y - H_x B_x) \end{bmatrix}$$



FUNZIONAMENTO DA MOTORE: IL CALCOLO DI COPPIA

$$\bar{\bar{T}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(H_x B_x - H_y B_y) & H_x B_y \\ H_y B_x & \frac{1}{2}(H_y B_y - H_x B_x) \end{bmatrix}$$

La forza applicata sul lato di un elemento infinitesimo adiacente alla linea di integrazione può essere calcolata come il prodotto scalare fra tensore e versore normale alla linea:

$$d\bar{F} = \bar{\bar{T}} \cdot \bar{n}_{d\Gamma} d\Gamma = \bar{\bar{T}} \cdot \begin{bmatrix} n_{x,d\Gamma} \\ n_{y,d\Gamma} \end{bmatrix} d\Gamma$$

Il contributo infinitesimo di coppia è esprimibile come:

$$d\bar{C} = \bar{r}_{d\Gamma} \times d\bar{F}$$

Dove:

- $d\bar{C}$ è la coppia infinitesima calcolata rispetto all'asse del motore
- $d\Gamma$ è il lato dell'elemento infinitesimo adiacente alla superficie di integrazione (superficie intermedia al traferro)
- $\bar{r}_{d\Gamma}$ è il braccio della forza infinitesima applicata in $d\Gamma$ rispetto all'asse

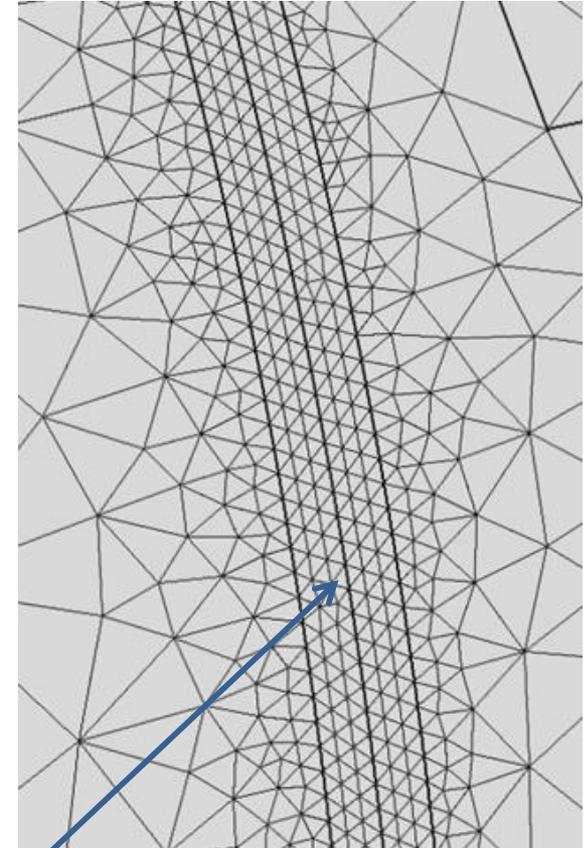
FUNZIONAMENTO DA MOTORE: IL CALCOLO DI COPPIA

$$d\bar{C} = \bar{r}_{d\Gamma} \times d\bar{F}$$

La coppia complessiva può essere calcolata integrando la coppia infinitesima sulla linea Γ e moltiplicando il valore ottenuto per la profondità del motore:

$$\bar{C} = L_m \int_{\Gamma} \bar{r} \times (\bar{T} \cdot \bar{n}) d\Gamma$$

Avendo assunto uniforme il campo lungo la componente z .



Γ

FUNZIONAMENTO DA MOTORE: IL CALCOLO DI COPPIA

$$\bar{C} = L_m \int_{\Gamma} \bar{r} \times (\bar{T} \cdot \bar{n}) d\Gamma$$

L'espressione utilizzata per il calcolo agli elementi finiti è stata:

```
Rmm.fcall.intop1((rmm.rx*rmm.nTY_torque - ...
                 rmm.ry*rmm.nTX_torque)*rmm.motor_length
```

In cui si evidenziano **in rosso** le componenti x e y del prodotto scalare tra il tensore e il versore normale alla linea di integrazione $\bar{T} \cdot \bar{n}$, **in verde** le componenti x e y del braccio della forza calcolato rispetto all'asse del motore.

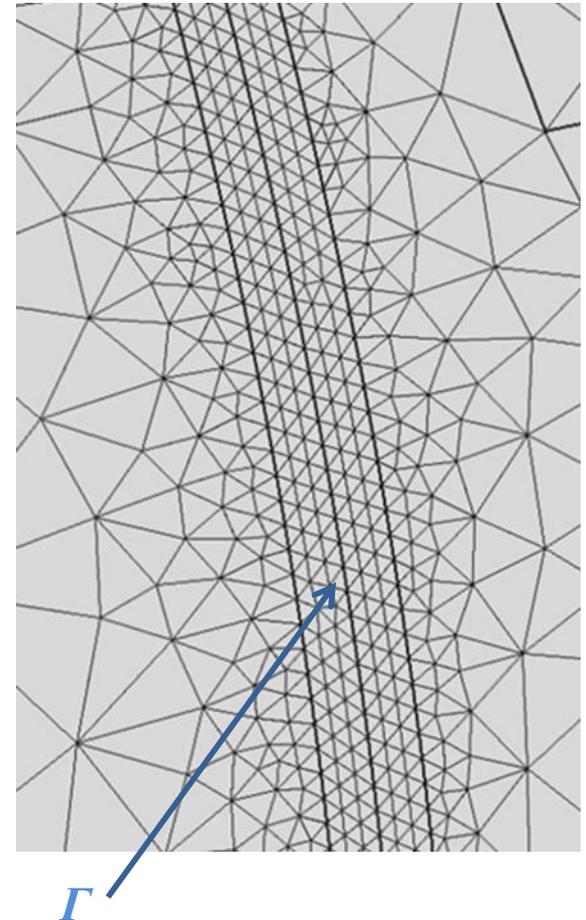
$$\bar{C}_j = L_m \cdot \sum_i \bar{r}_i \times (\bar{T}_i \cdot \bar{n}_i) l_i$$

Dove:

- \bar{C}_j è la coppia calcolata nella posizione *j-esima* di rotore
- \bar{r}_i è il braccio della forza applicata nell'elemento *i-esimo*
- $\bar{T}_i \cdot \bar{n}_i$ è il prodotto scalare calcolato nell'elemento *i-esimo*
- l_i è il lato dell'elemento *i-esimo*, compreso nella linea di integrazione che, agli elementi finiti, è discretizzata come un poligono

IL CALCOLO DI COPPIA

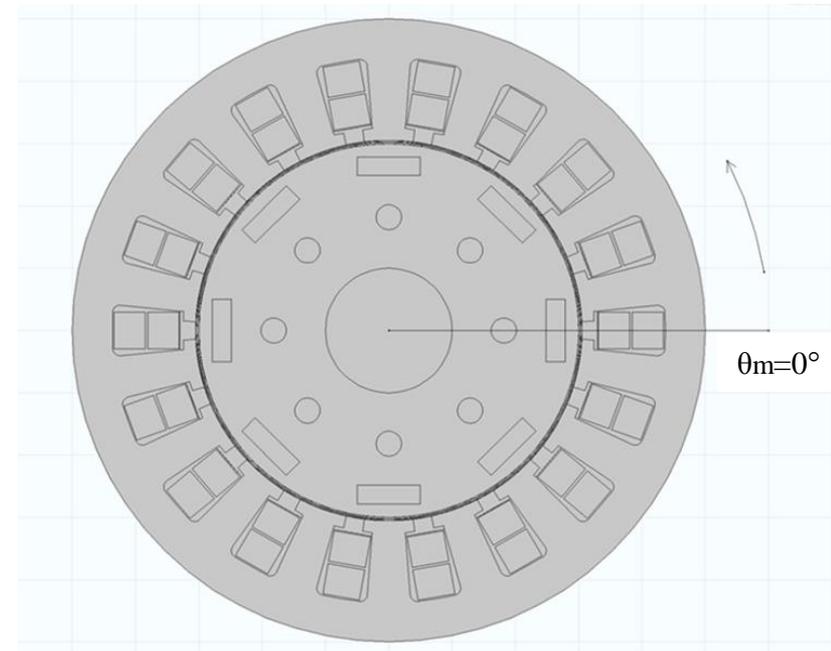
Per il calcolo di coppia, la *mesh* è stata infittita al traferro per garantire che il contorno della linea di integrazione appartenga ad elementi in aria, non confinanti con i domini in ferro: il tensore non è definito ai bordi che separano regioni a permeabilità differente.



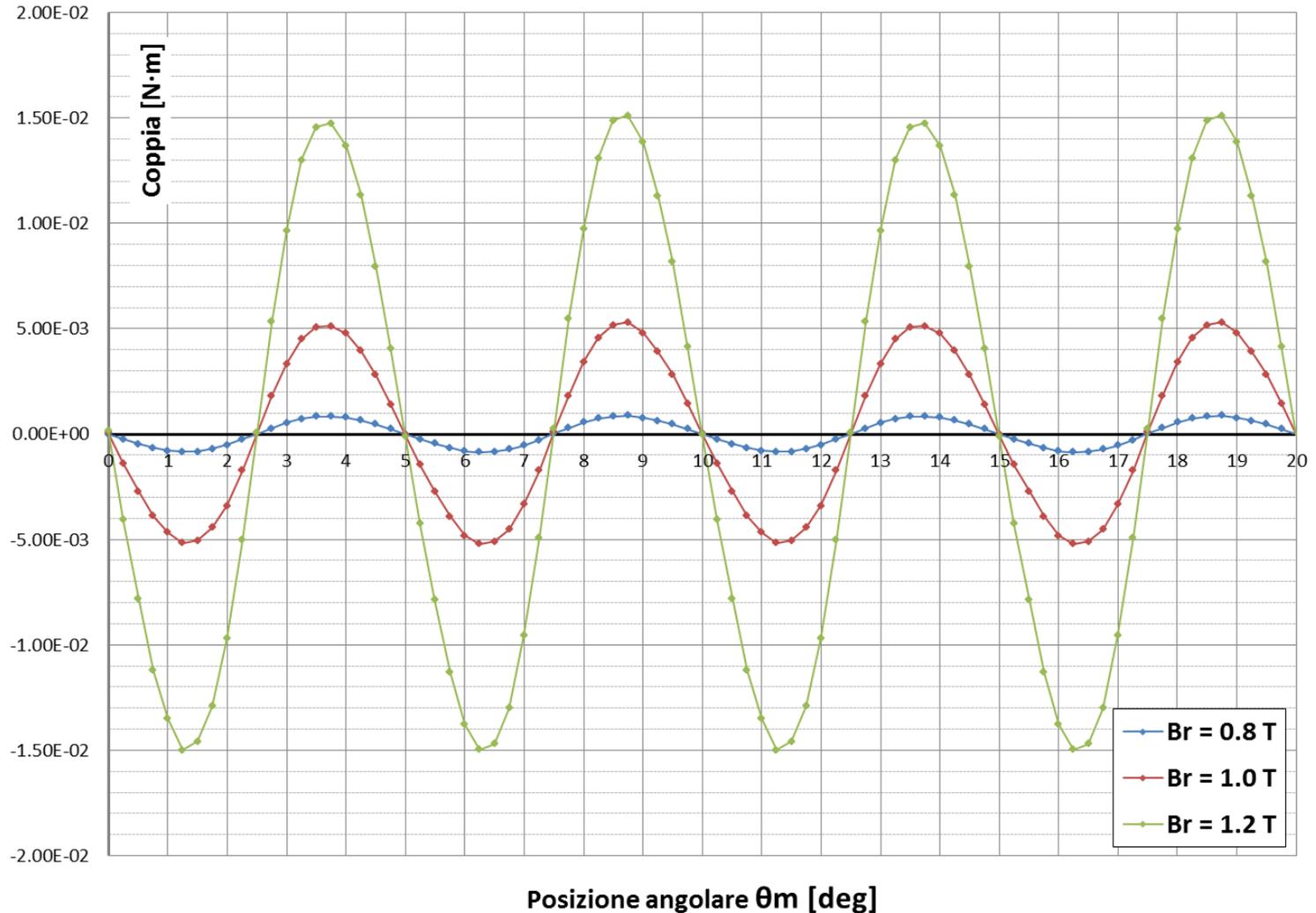
LA COPPIA DI IMPUNTAMENTO

La simulazione è stata effettuata a motore non alimentato, variando la posizione angolare del rotore.

La coppia è stata valutata per diversi valori di induzione residua nei magneti permanenti.



LA COPPIA DI IMPUNTAMENTO

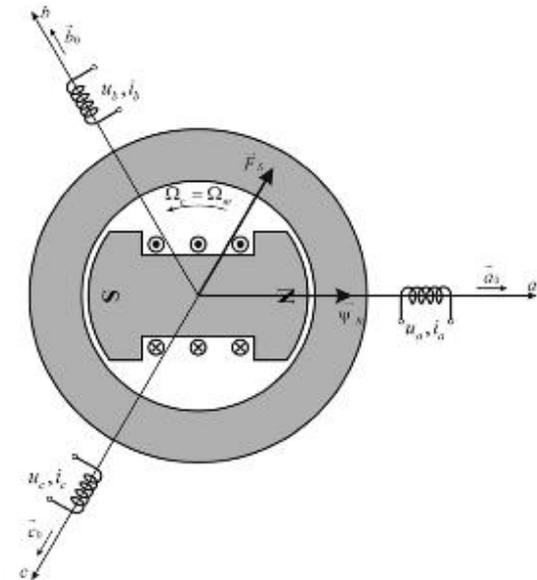


LA CARATTERISTICA STATICA DI COPPIA

La caratteristica riporta l'andamento della coppia al variare dello sfasamento fra i campi di armatura (**campo di statore**) e di eccitazione (**campo di rotore**).

La coppia C di una macchina elettrica rotante può essere espressa come:

$$C = pp k F_s F_r \text{sen}(\delta_{sr})$$

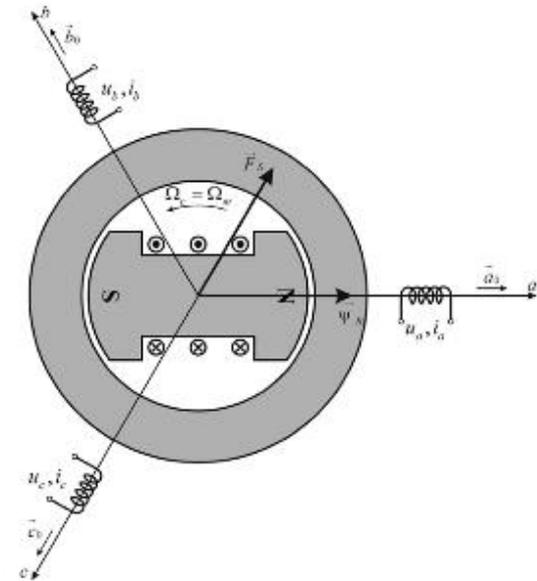


LA CARATTERISTICA STATICA DI COPPIA

$$C = pp k F_s F_r \text{sen}(\delta_{sr})$$

Dove:

- pp è il numero di paia di poli della macchina;
- k è una costante che dipende dalla geometria della macchina (diametro, profondità assiale, traferro)
- F_s è il vettore spaziale rotante della distribuzione di forza magneto-motrice di statore (diretto come il *campo di statore*);
- F_r è il vettore spaziale rotante della distribuzione di *fmm* di rotore (diretto come *campo di rotore*);



LA CARATTERISTICA STATICA DI COPPIA

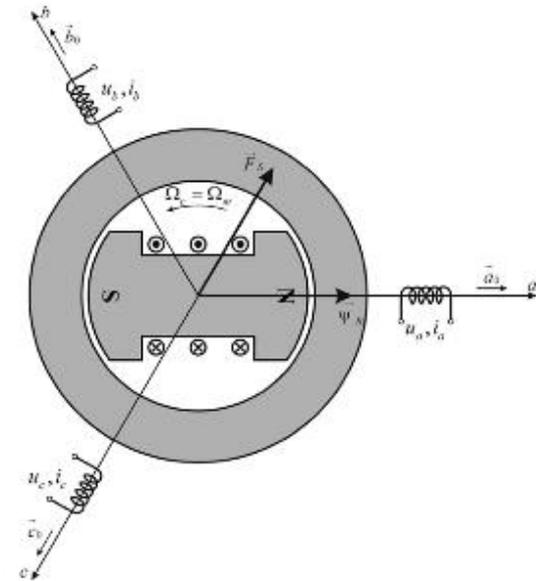
$$C = pp k F_s F_r \text{sen}(\delta_{sr})$$

Dove:

- δ_{sr} è l'**angolo di coppia**, ossia lo sfasamento fra i due vettori spaziali rotanti, espresso in angoli elettrici.

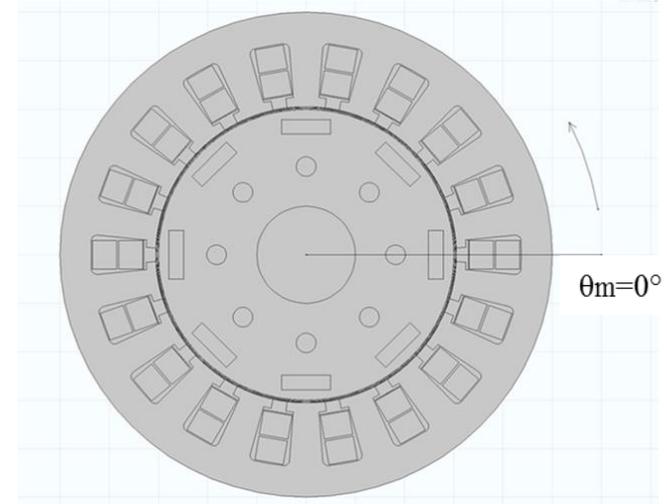
Durante il funzionamento di un motore elettrico il *campo di rotore* tende ad allinearsi al *campo di statore* il quale lo anticipa, ruotando alla velocità di sincronismo.

Uno dei fattori da cui dipende il valore di coppia è lo sfasamento fra il campo di statore e quello di rotore.



LA CARATTERISTICA STATICA DI COPPIA

- La simulazione è stata effettuata considerando il valore istantaneo 0 s per le correnti sinusoidali che alimentano lo statore, mantenute costanti: il campo di armatura è fisso.
- La geometria di rotore è stata progressivamente ruotata: in questo modo si modifica anche lo sfasamento fra il *campo di rotore* (la cui direzione dipende dall'asse dei magneti permanenti, solidali al rotore) e il *campo di statore* (fisso).
- E' stata considerata una induzione residua nei magneti permanenti pari a 1T



LA CARATTERISTICA STATICA DI COPPIA

La caratteristica riporta l'andamento della coppia al variare dello sfasamento fra i campi di statore e di rotore.

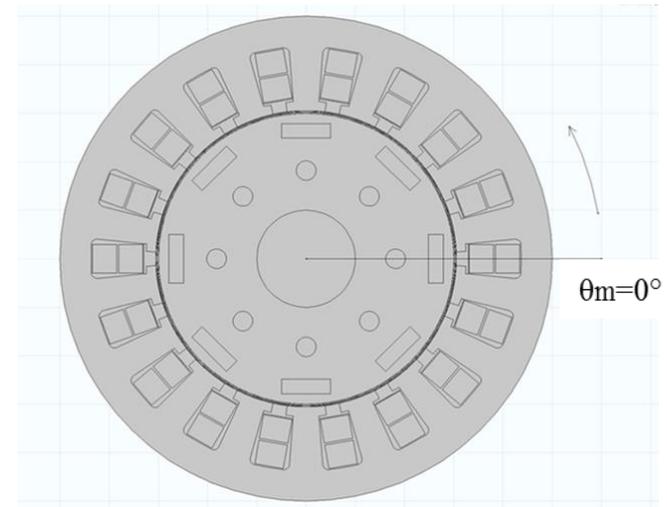
In particolare, lo sfasamento è stato espresso in angoli meccanici in quanto anche il parametro che esprime la posizione di rotore è un angolo meccanico.

Si ricordi che la relazione fra angoli meccanici ed angoli elettrici è:

$$\delta_{sr,el} = p \delta_m$$

Pertanto la periodicità della caratteristica, espressa in angoli meccanici, è:

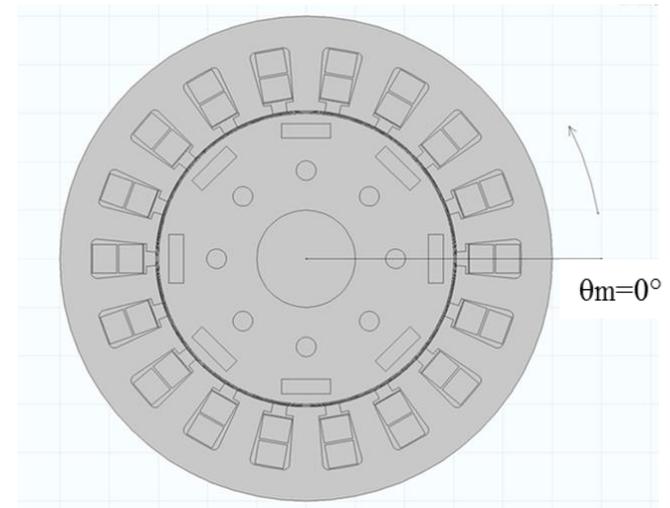
$$T_{\delta,mecc} \frac{360^\circ}{4} = 90^\circ$$



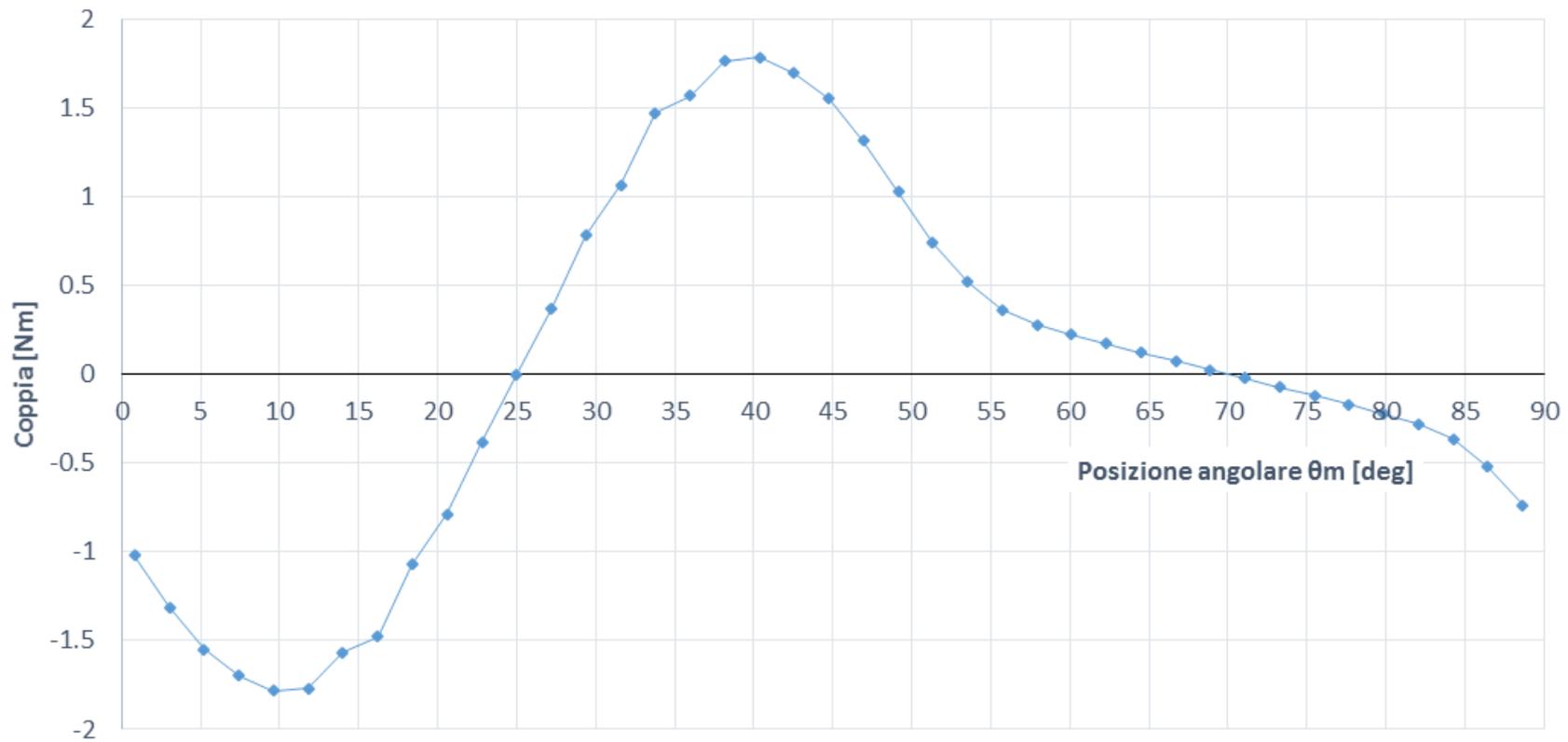
LA CARATTERISTICA STATICA DI COPPIA

Non è immediato individuare la posizione del campo di statore per $t = 0$, vista la complessità degli avvolgimenti di statore pertanto si è proceduto come segue:

1. E' stato effettuato un primo ciclo di simulazioni con *sweep parametrico* facendo variare la posizione angolare di rotore (come descritto nelle slide precedenti) e ottenendo la seguente caratteristica statica di coppia riferita ad angoli meccanici nel riferimento θ_m (vedere figura)



Caratteristica statica di coppia - Riferimento θ_m



LA CARATTERISTICA STATICA DI COPPIA

2. Per osservare l'andamento dei campi di statore e di rotore si è analizzato:
 - Il solo campo di statore in assenza di rotore nella macchina (annullando l'effetto dei magneti permanenti e assumendo unitaria la permeabilità dei domini di rotore)
 - Il solo campo di rotore in assenza di statore (annullando le correnti nei conduttori e considerando tutto il blocco statorico composto da giogo, isolanti e conduttori come aria)

LA CARATTERISTICA STATICA DI COPPIA

I risultati ottenuti sono stati analizzati per determinare in seguito la caratteristica statica di coppia nel riferimento del campo di statore, espresso in angoli elettrici.

Per farlo si ricordi che:

- L'angolo di coppia δ_{sr} descrive lo sfasamento fra campo di statore e campo di rotore
- La caratteristica deve essere centrata nel punto in cui i due campi sono allineati equiversi (angolo di coppia nullo, caso A)

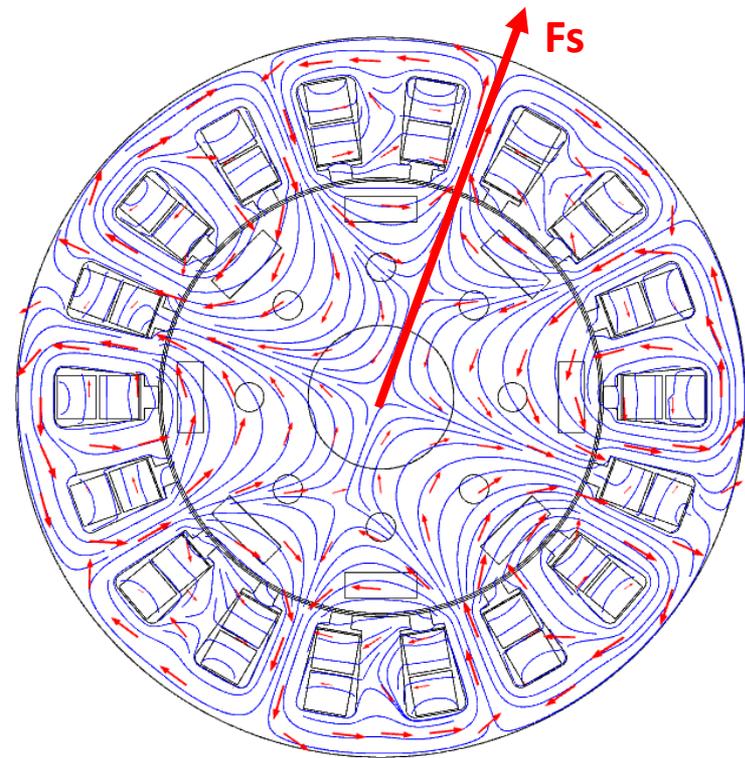
LA CARATTERISTICA STATICA DI COPPIA

In questo riferimento si hanno 4 casi notevoli:

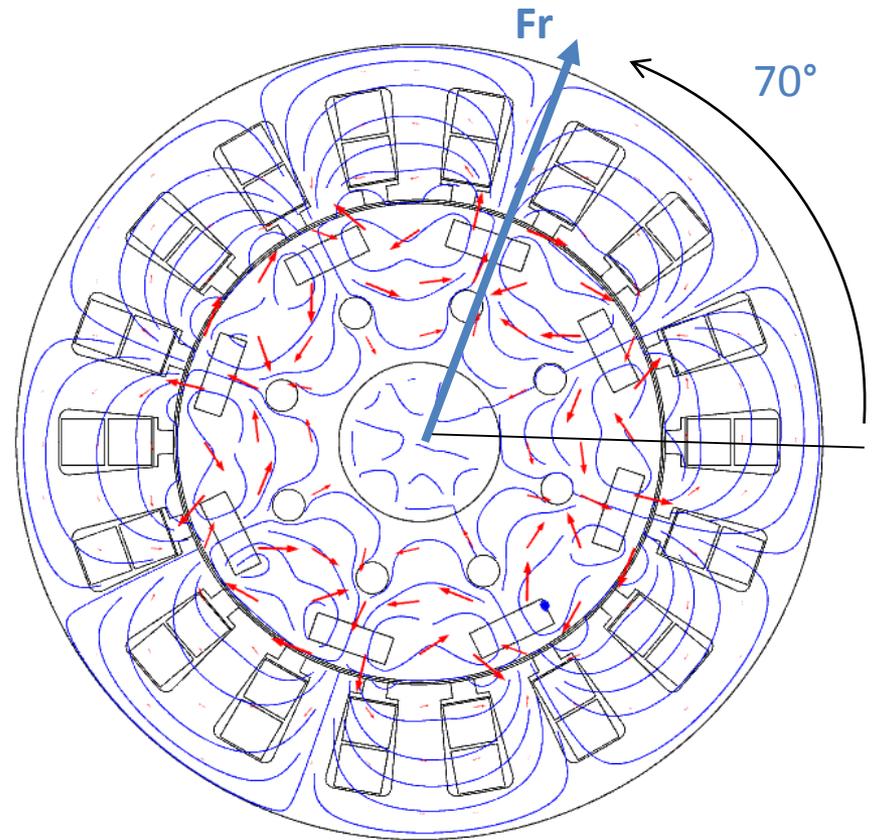
- a) Coppia nulla: il campo di rotore ha uguale direzione e verso del campo di statore (quando $\theta_m \sim 70^\circ$ nel riferimento di angoli meccanici)
- b) Coppia massima positiva: il campo di rotore è in ritardo di circa 90° elettrici rispetto al campo di statore (quando $\theta_m \sim 40^\circ$)
- c) Coppia massima negativa: il campo di rotore è in anticipo di circa 90° elettrici rispetto al campo di statore (quando $\theta_m \sim 10^\circ$ nel riferimento di angoli meccanici)
- d) Coppia nulla: il campo di rotore ha uguale direzione del campo di statore ma verso opposto (quando $\theta_m \sim 25^\circ$ nel riferimento di angoli meccanici)

Nelle figure che seguono si riportano gli andamenti di campo e di flusso di statore ($t = 0$) e di rotore (per i 4 casi), evidenziando in modo qualitativo le posizioni dei vettori di campo.

CASO A – COPPIA NULLA



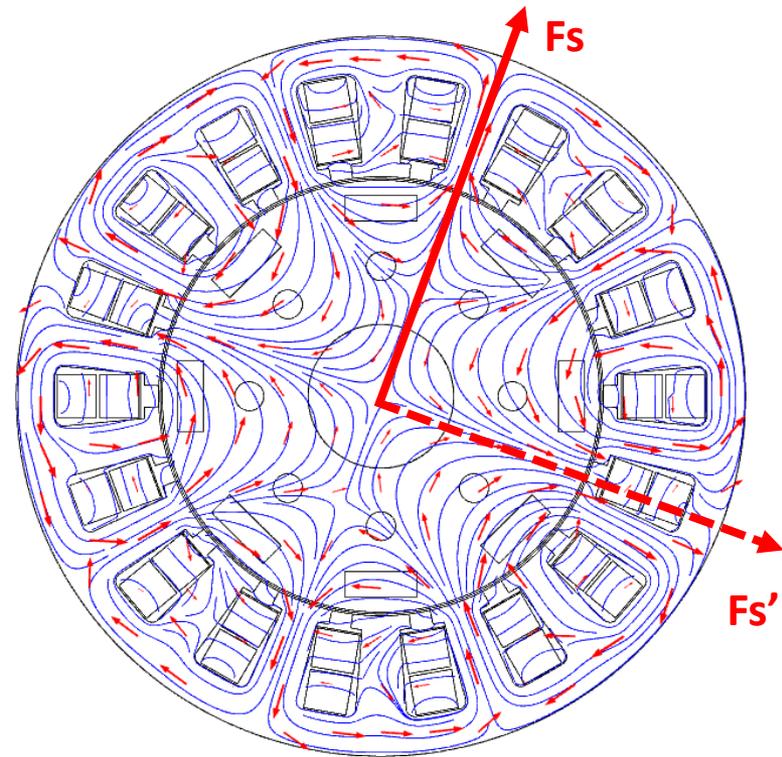
Solo statore



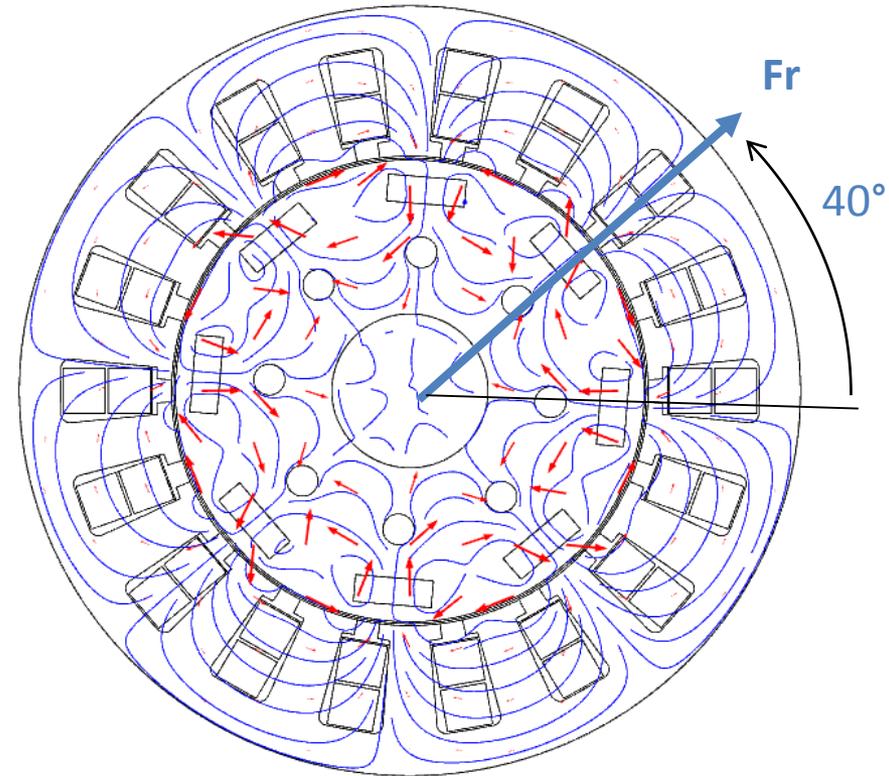
Solo rotore

θ_m	δ_{sr} in gradi elett.
70°	0°

CASO B – COPPIA MAX POSITIVA



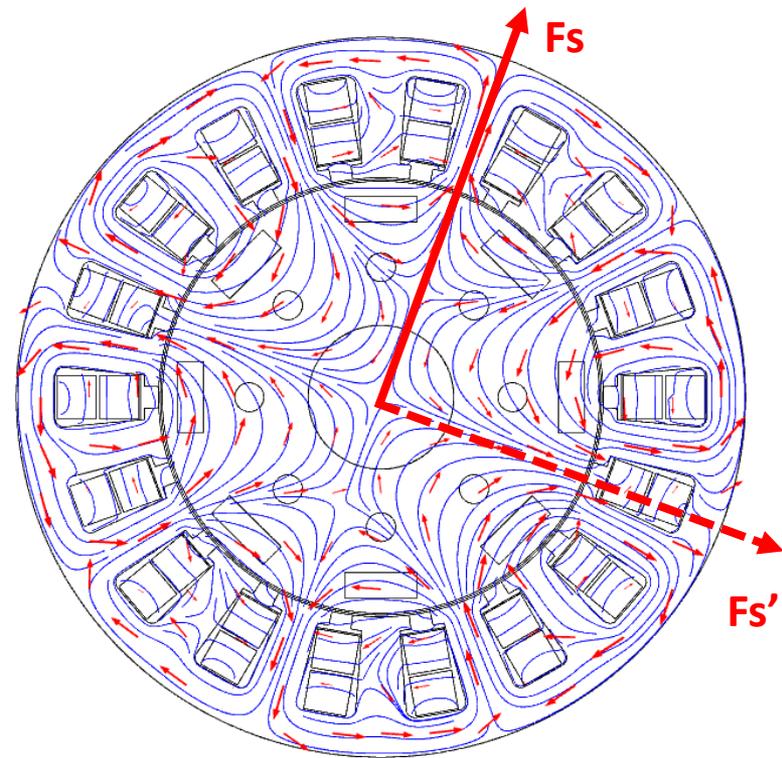
Solo statore



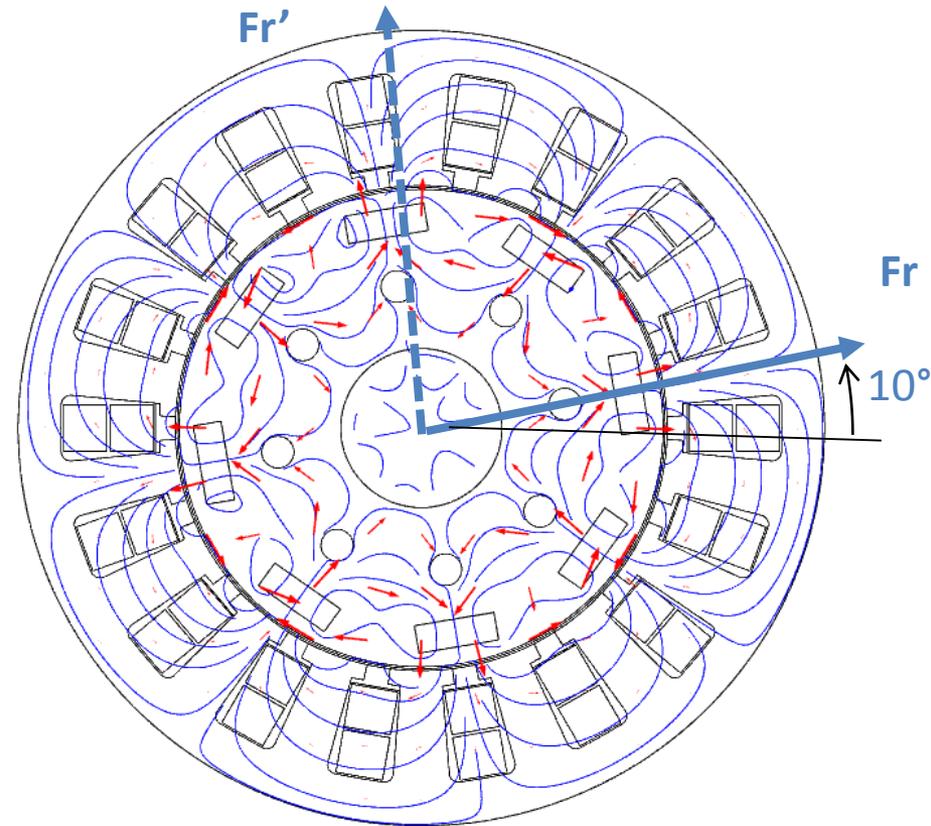
Solo rotore

θ_m	δ_{sr} in gradi elett.
40°	~90°

CASO C – COPPIA MIN NEGATIVA



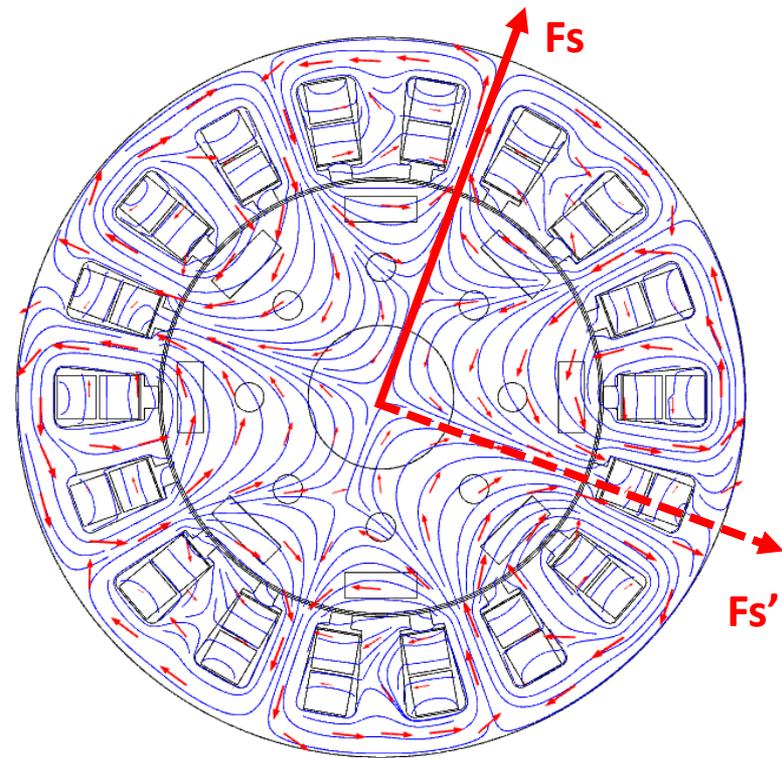
Solo statore



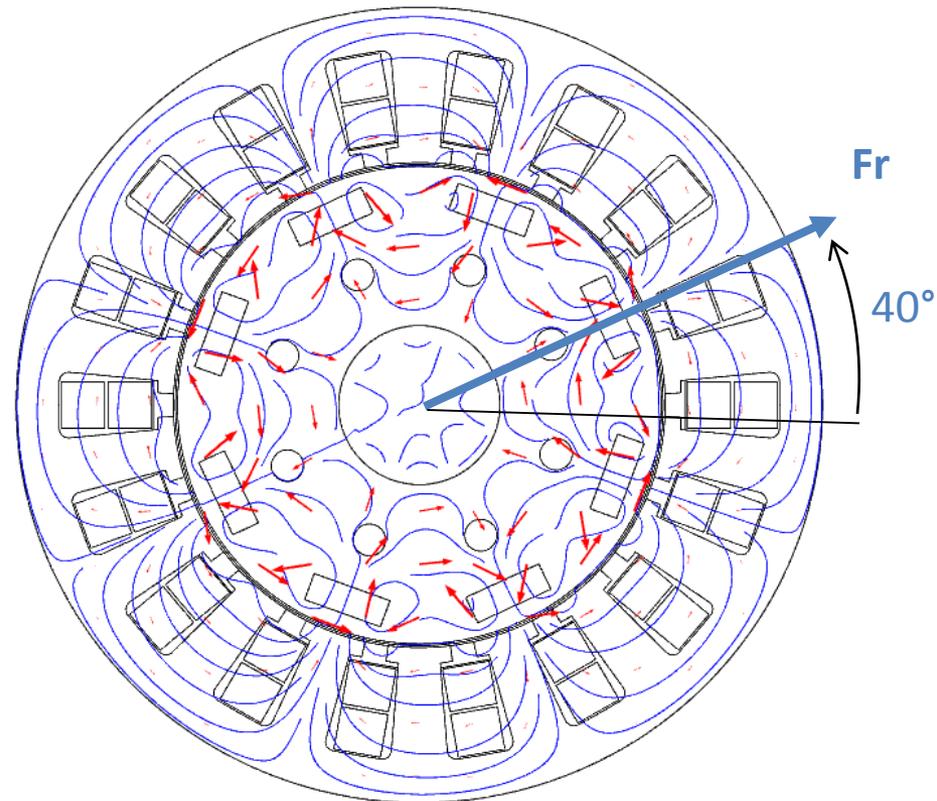
Solo rotore

θ_m	δ_{sr} in gradi elett.
10°	~ -90°

CASO D – COPPIA NULLA



Solo statore



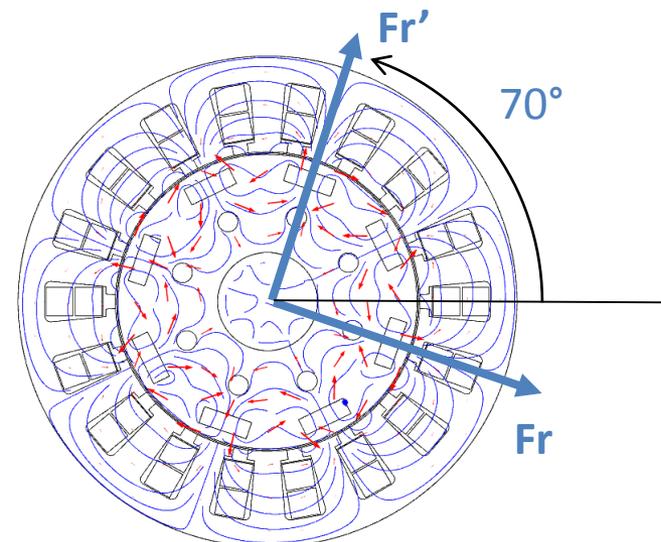
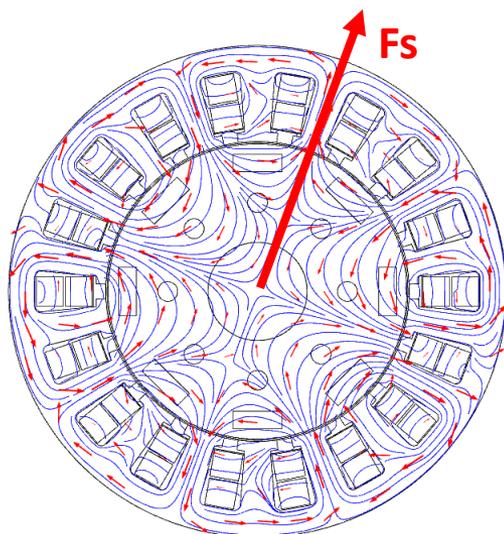
Solo rotore

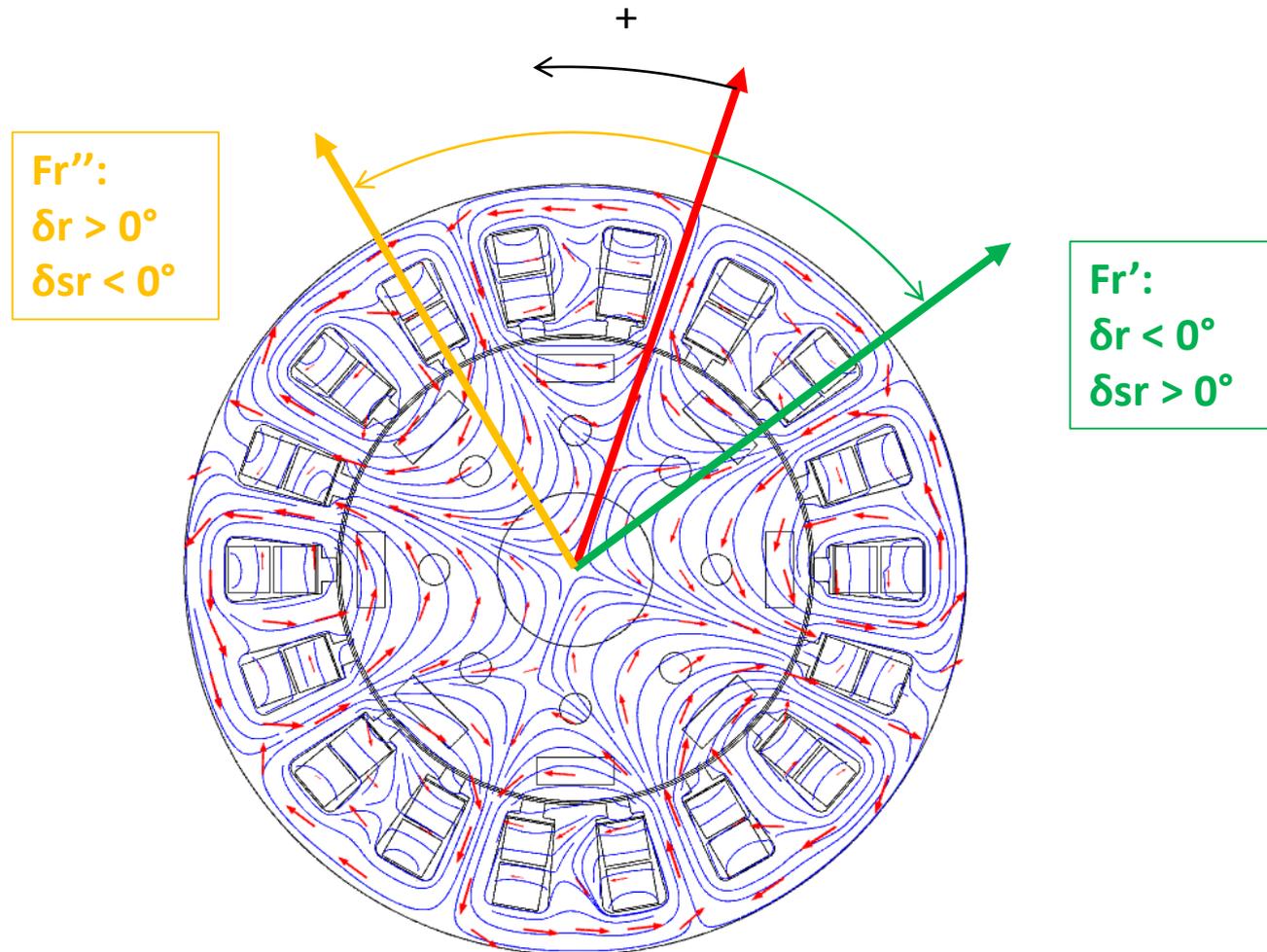
θ_m	δ_{sr} in gradi elett.
25°	180°

LA CARATTERISTICA STATICA DI COPPIA

Nel caso a) i campi di rotore e di statore sono allineati: la fase (in gradi meccanici) del campo di statore $\delta_{s,mecc}$ può essere assunta pari all'angolo geometrico di rotore $\sim 70^\circ$, essendo il campo di rotore solidale con esso (si ricordi che la periodicità dei campi di statore e di rotore, espressa in angoli meccanici, è pari a 90°).

Nel riferimento del campo di statore tale angolo è l'origine, come mostra la slide successiva.





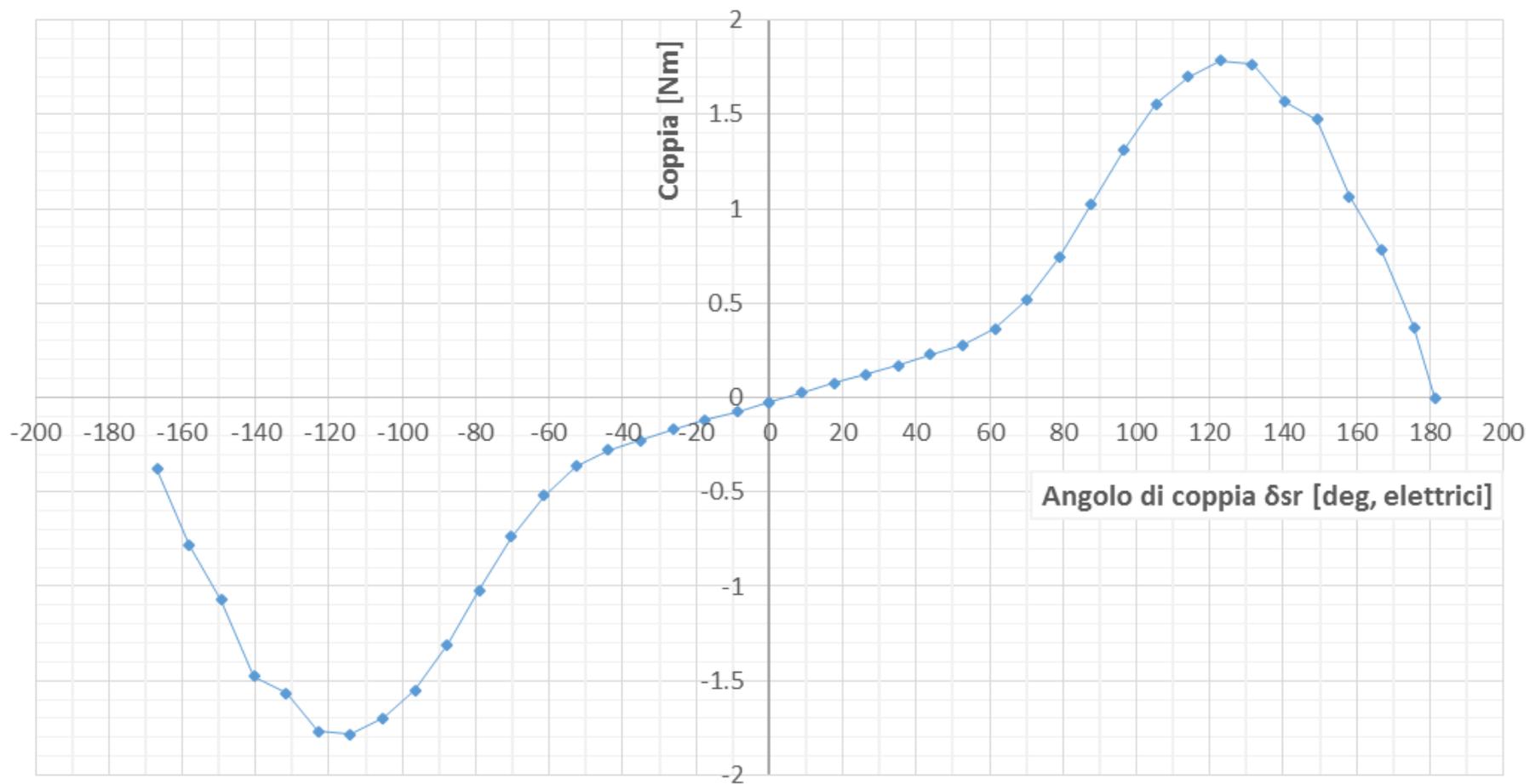
LA CARATTERISTICA STATICA DI COPPIA

Nota la fase (in angoli meccanici) del campo di statore $\delta_{s,mecc}$, l'angolo di coppia $\delta_{sr,mecc}$ espresso in gradi meccanici) per ogni posizione angolare si ottiene sottraendo a $\delta_{s,mecc} = 70^\circ$ il valore dell'angolo meccanico corrispondente alla posizione angolare di ciascun caso.

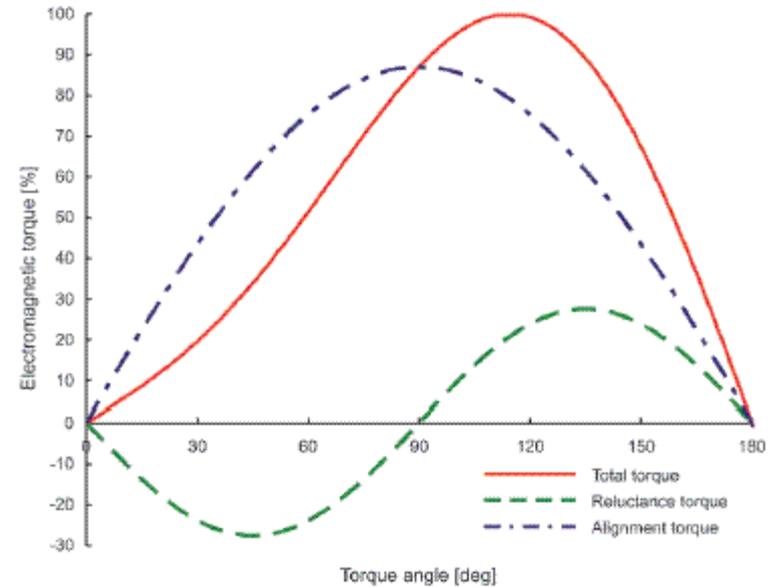
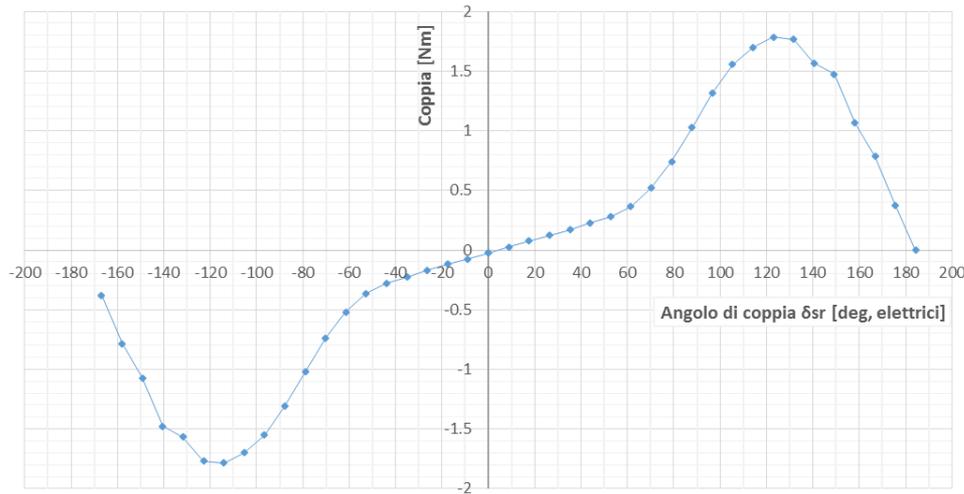
L'angolo di coppia espresso in angoli elettrici δ_{sr} si ricava infine come: $\delta_{sr} = p \delta_{sr,mecc}$

La caratteristica che si ottiene può essere adattata in modo da avere metà periodo per ascisse positive e metà periodo per ascisse negative.

Caratteristica statica di coppia - Riferimento: campo di statore F_s



Caratteristica statica di coppia - Riferimento: campo di statore F_s



La caratteristica statica di coppia non è perfettamente sinusoidale (le ragioni di ciò esulano da questa trattazione, ma si ricordi che la coppia complessiva è data dal contributo della coppia cilindrica e della coppia di riluttanza, che altera l'andamento sinusoidale della coppia totale)

LA COPPIA A CARICO

La coppia a carico è stata calcolata alimentando il motore con una terna trifase di correnti sinusoidali a 50 Hz, per un angolo di coppia δ_{sr} pari a 120° elettrici (coppia massima positiva).

Il rotore si muove alla velocità di sincronismo:

$$\omega_m = 2\pi \frac{f_{el}}{pp} = 2\pi \cdot 12.5 [Hz] \sim 78.6 \frac{[rad]}{s}$$

$$n_m = 750 \text{ rpm}$$

La coppia è stata valutata per diversi valori di induzione residua B_R nei magneti permanenti.

LA COPPIA A CARICO

Il moto del rotore è stato simulato come una successione di posizioni angolari (mediante uno studio *parametric sweep*), discretizzandolo con un passo angolare sufficiente ad ottenere andamenti di coppia regolari, senza richiedere tempo eccessivo per ogni ciclo di simulazioni.

E' stato necessario sincronizzare le variazioni di corrente con le variazioni di angolo di rotore come segue.

LA COPPIA A CARICO

Scelto Δt il passo di discretizzazione temporale, i parametri che vengono fatti variare nello studio sono:

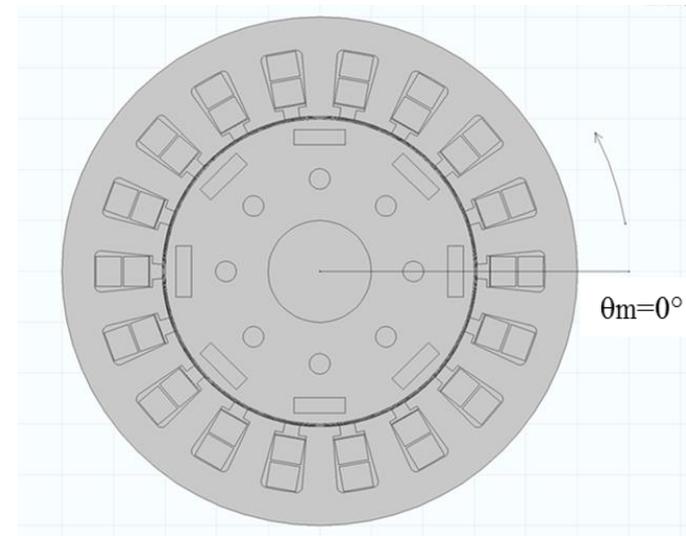
- Il tempo t , da cui dipendono i valori di corrente della terna trifase di statore, è stato considerato a partire dall'istante 0 s con incrementi di Δt ;
- La posizione angolare di rotore (espressa in gradi meccanici nel riferimento θ_m) è stata considerata come segue:
 - a) a partire dal valore iniziale $\theta_{m,0} \sim 40^\circ$ corrispondente all'angolo di coppia scelto (espresso in gradi meccanici)
 - b) con incrementi pari a:

$$\Delta\theta_m = \frac{360^\circ \ 50 \text{ Hz}}{pp} \Delta t$$

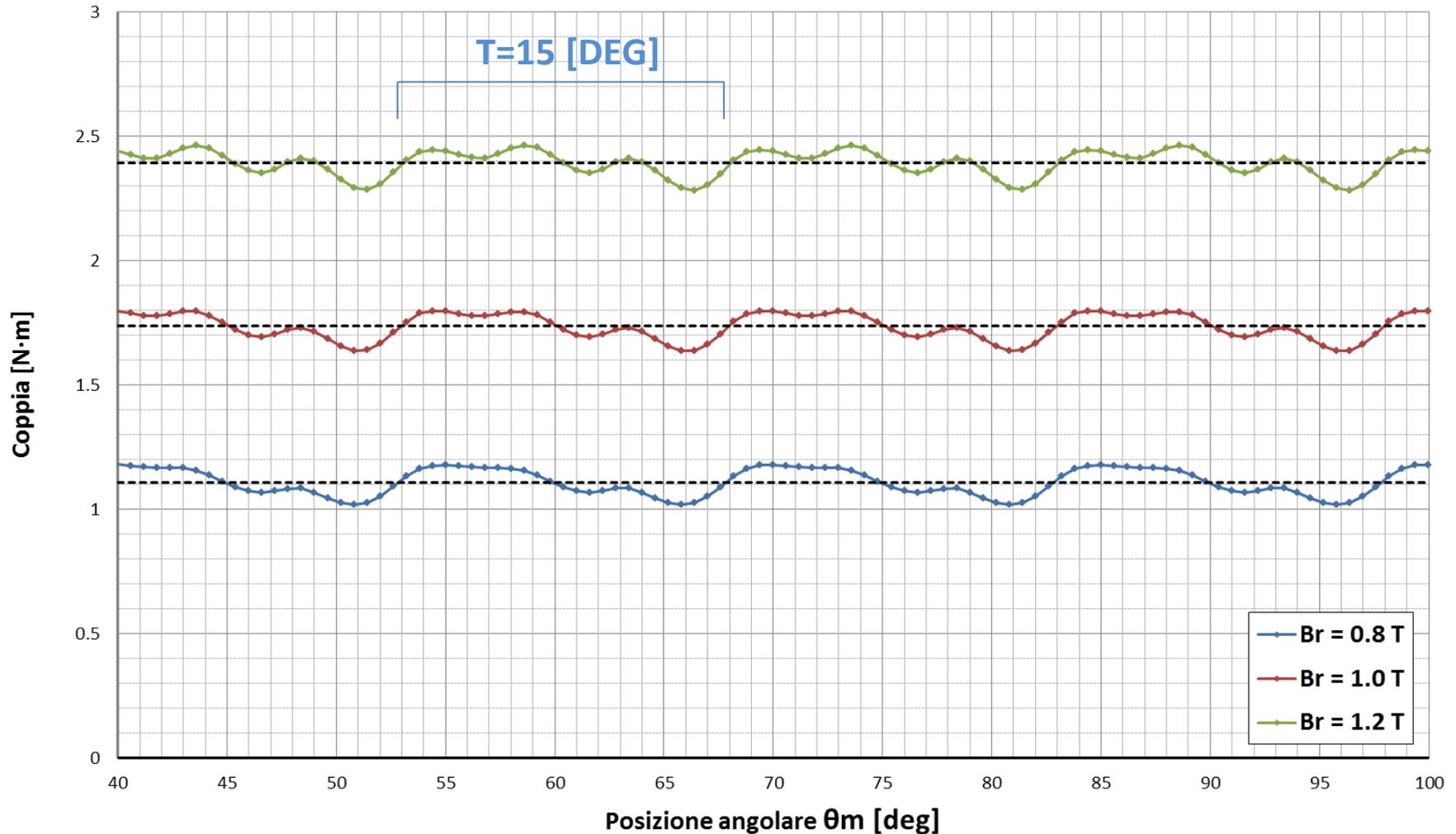
LA COPPIA A CARICO

I parametri della simulazione
i-esima dello studio
parametrico complessivo
variano come segue:

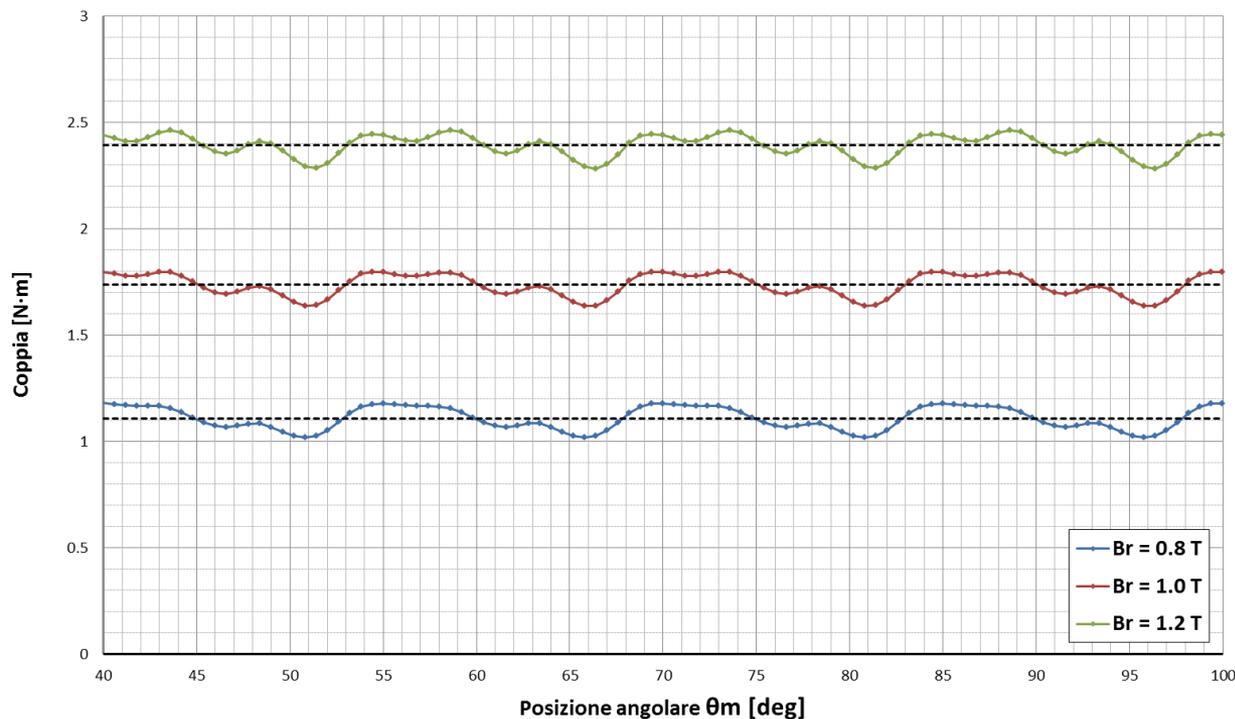
$$\begin{cases} t_i = 0 + \Delta t \cdot (i - 1) \\ \theta_{m,i} = \theta_{m,0} + \Delta\theta_m \cdot (i - 1) \end{cases}$$



LA COPPIA A CARICO $\delta_{sr} = 120$ [deg]



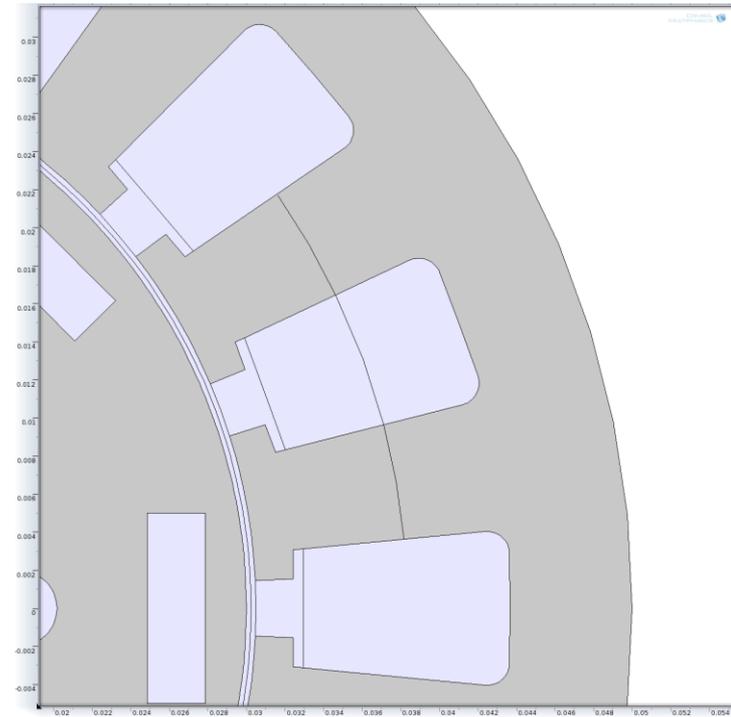
LA COPPIA A CARICO $\delta_{sr} = 120$ [deg]



	Br = 0.8 T	Br = 1.0 T	Br = 1.2 T
Valor medio [N·m]	1.110	1.736	2.393
Max [N·m]	1.181	1.798	2.463
Min [N·m]	1.019	1.637	2.283
Ripple Max %	6.358	3.552	2.916
Ripple Min %	-8.203	-5.700	-4.596

LA TENSIONE INDOTTA A VUOTO

- La tensione indotta è stata determinata a partire dal flusso concatenato con gli avvolgimenti.
- Il flusso è stato calcolato considerando la proiezione 2D della superficie delimitata dagli avvolgimenti
- In queste simulazioni si è considerata una induzione residua nei magneti permanenti $B_R = 1 T$

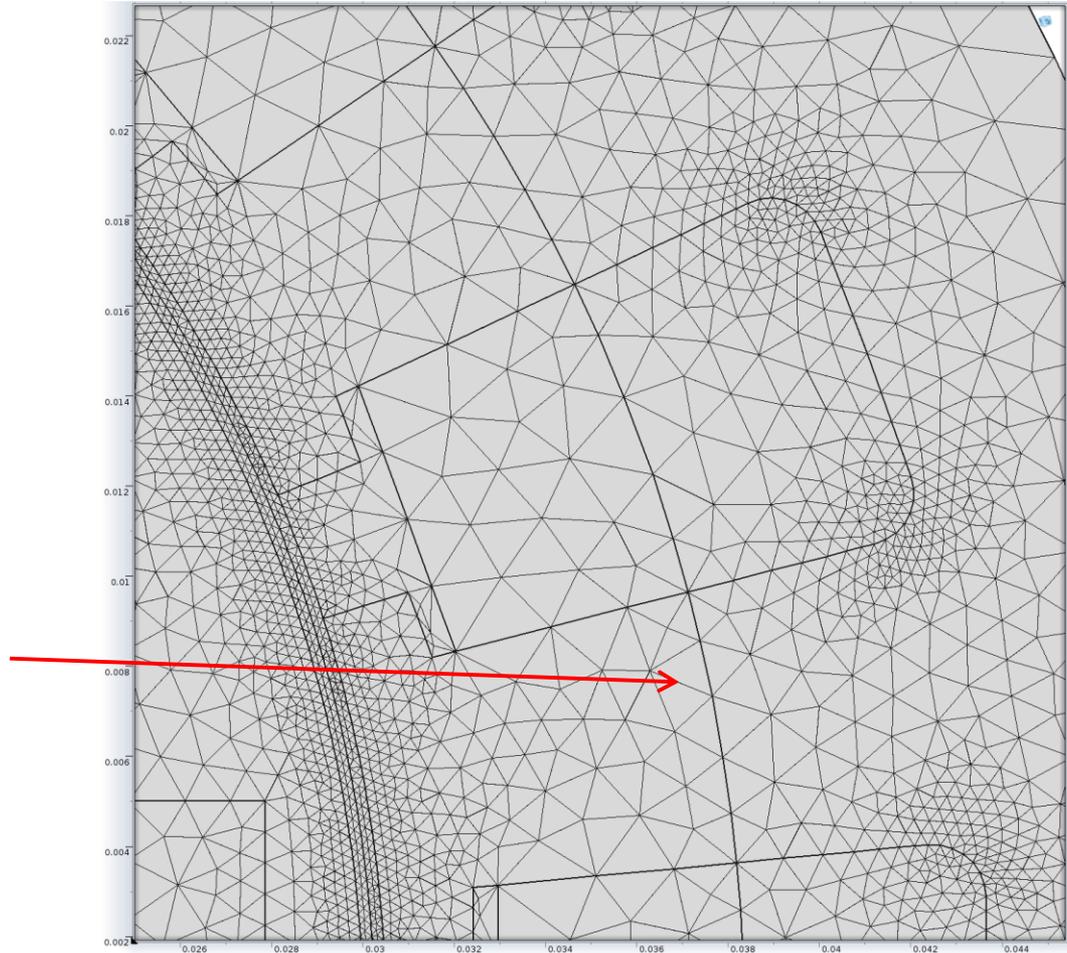


Avvolgimento A

LA TENSIONE INDOTTA A VUOTO

$$\phi_i = L_m \sum_j (\bar{B}_j \cdot \bar{n}_j) l_j$$

- L_m è la profondità del motore
- \bar{B}_j è l'induzione nel baricentro dell'elemento j -esimo
- l_j è la lunghezza del lato dell'elemento j -esimo compreso nella linea di integrazione
- \bar{n}_j è il versore normale a l_j diretto verso l'esterno



LA TENSIONE INDOTTA A VUOTO

Complessivamente si sono ottenuti:

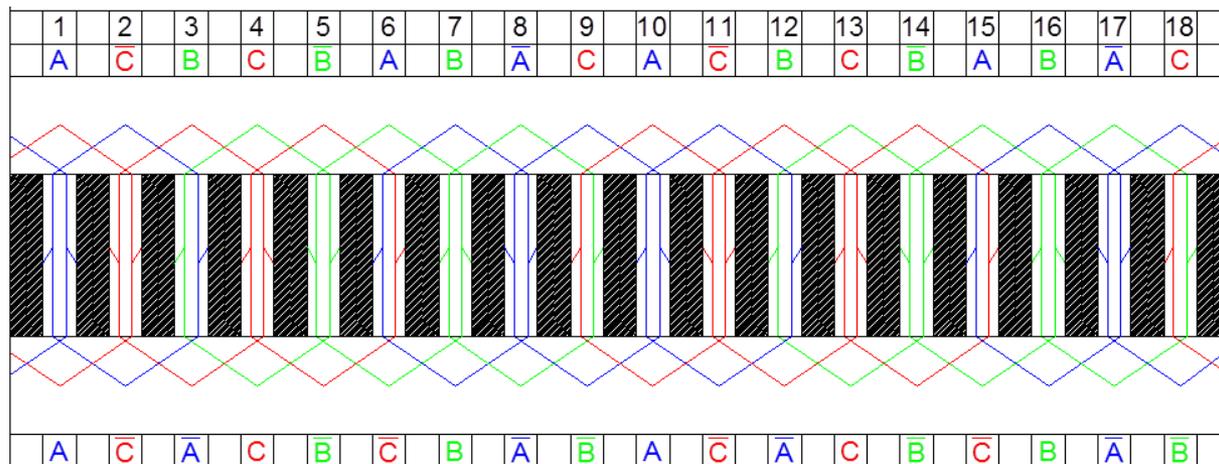
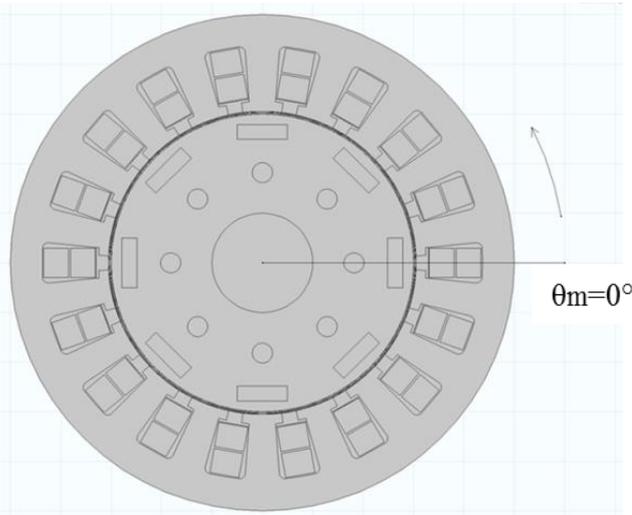
- 3 valori di flusso concatenato alla singola spira (fasi A, B, C)
- Una terna di flussi concatenati per ogni posizione di rotore

LA TENSIONE INDOTTA A VUOTO

Per il calcolo della tensione indotta è stata considerata l'armonica fondamentale di flusso, calcolata mediante l'algoritmo *Fast-Fourier-Transform (FFT)*.

Il valore RMS di tensione della fondamentale è stato ricavato considerando il tipo di avvolgimento della macchina (*fattori di raccorciamento di passo e di distribuzione*) e il coefficiente di stipamento dei lamierini.

AVVOLGIMENTI DELLA MACCHINA



morsetto
fase A



morsetto
fase B



morsetto
fase C



LEGENDA

C: cava

i: avvolgimento inferiore

s: avvolgimento superiore

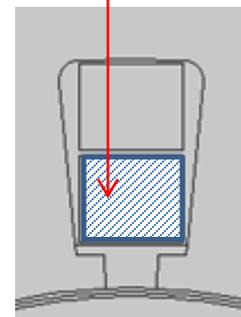
LA TENSIONE INDOTTA A VUOTO

L'espressione completa per il calcolo del valore RMS della fondamentale di tensione è:

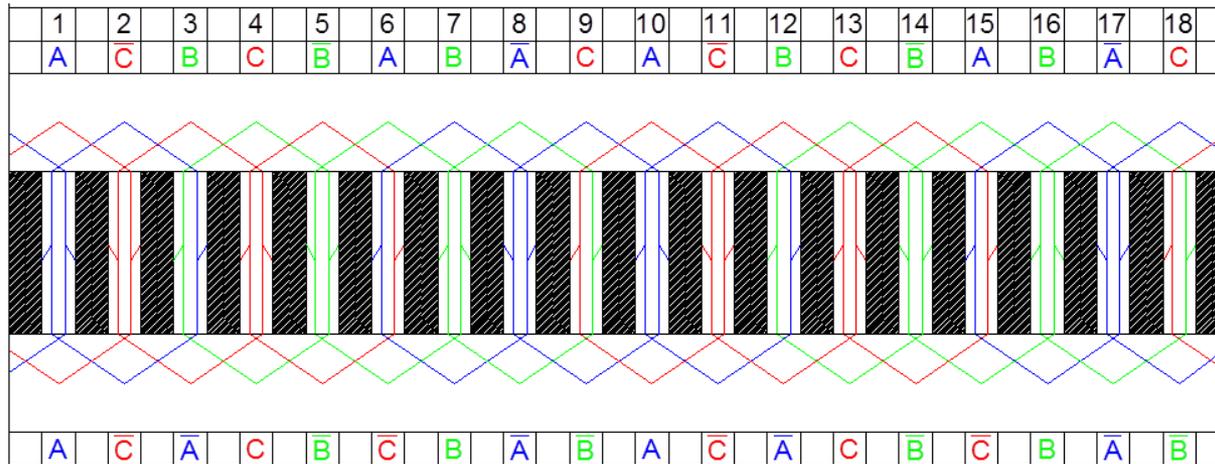
$$E_1 = pp \cdot \omega_m \cdot (N_F N_S \cdot \phi_1) \cdot f_{racc} \cdot f_{distr} \cdot k_{st}$$

Dove:

- pp sono le paia di poli
- $N_F = 6$ è il numero di bobine in serie per fase
- N_S è il numero di avvolgimenti per bobina, calcolato suddividendo l'area a disposizione per l'avvolgimento per la superficie di un singolo conduttore, assunta pari a $A_c = 7 \cdot 10^{-2} \text{ mm}^2$
- ϕ_1 è il valore RMS della fondamentale di flusso concatenato alla singola spira
- $f_{racc} = 0.985$ è il fattore di raccorciamento di passo
- $f_{distr} = 1.04$ è il fattore di distribuzione
- $k_{st} = 0.99$ è il coefficiente di stipamento dei lamierini

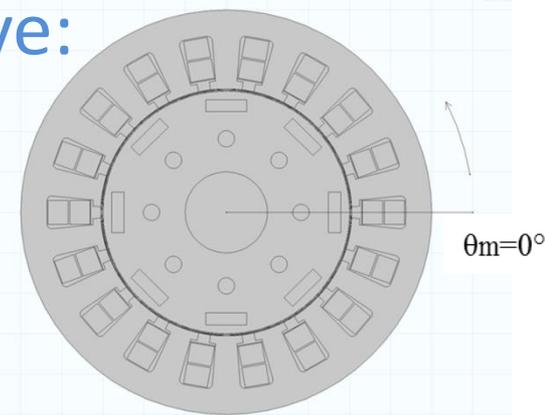


GLI AVVOLGIMENTI

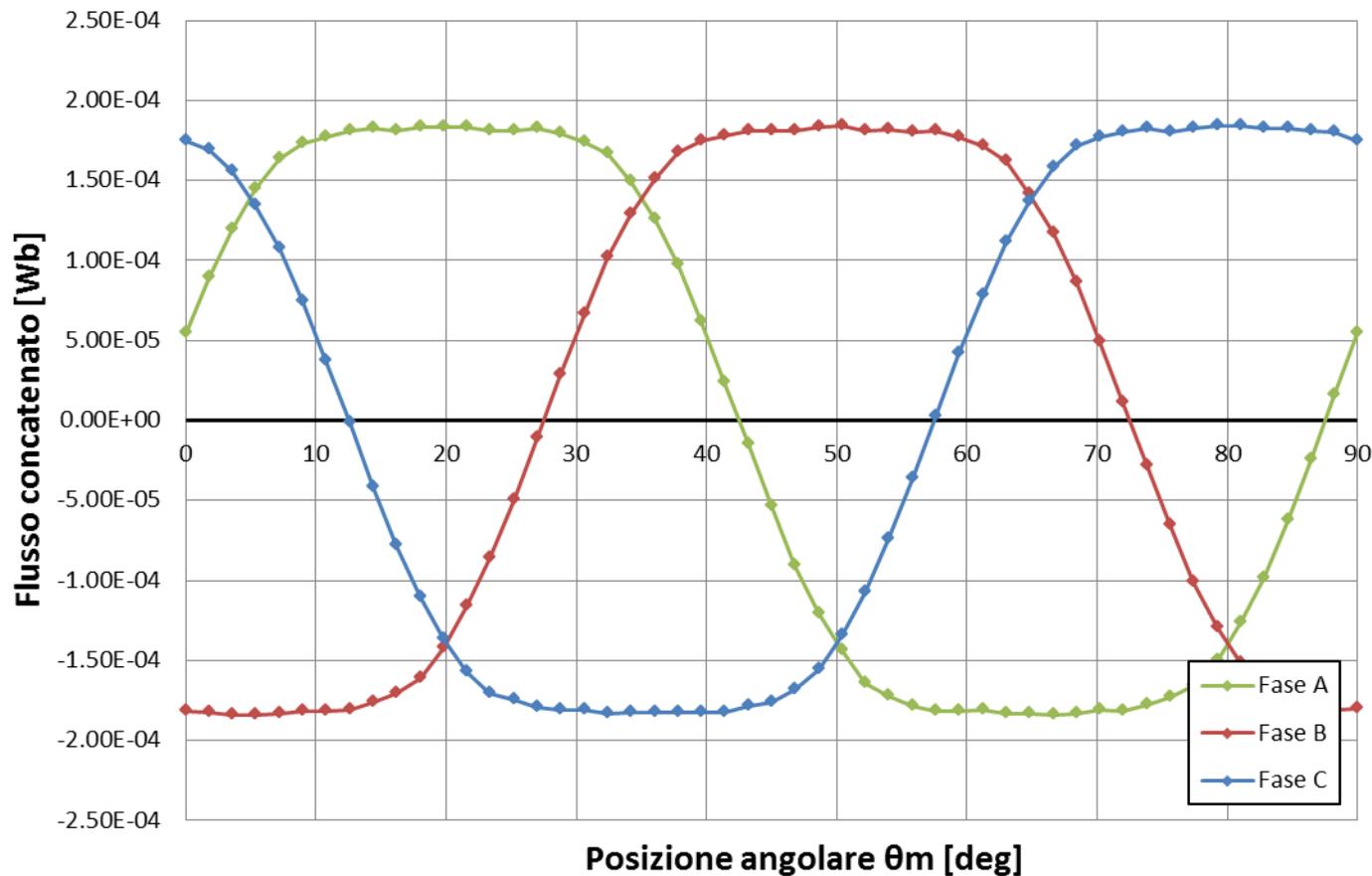


I flussi concatenati dalle tre fasi sono stati calcolati considerando gli avvolgimenti delle cave:

- cava 1 sup. - cava 3 inf. \Rightarrow fase A
- cava 7 sup. - cava 9 inf. \Rightarrow fase B
- cava 4 sup. - cava 6 inf. \Rightarrow fase C

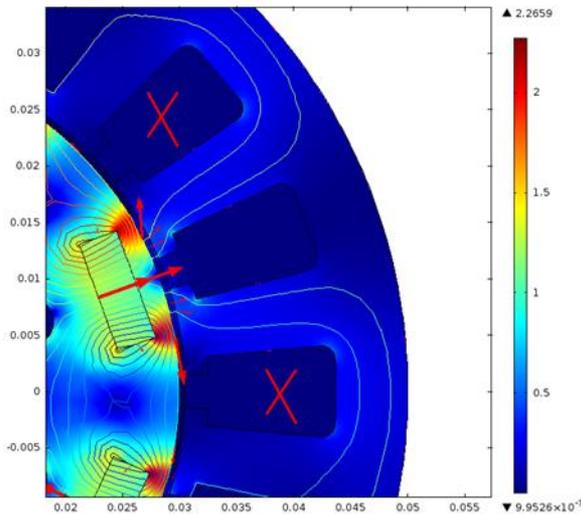


IL FLUSSO CONCATENATO – SINGOLO AVVOLGIMENTO



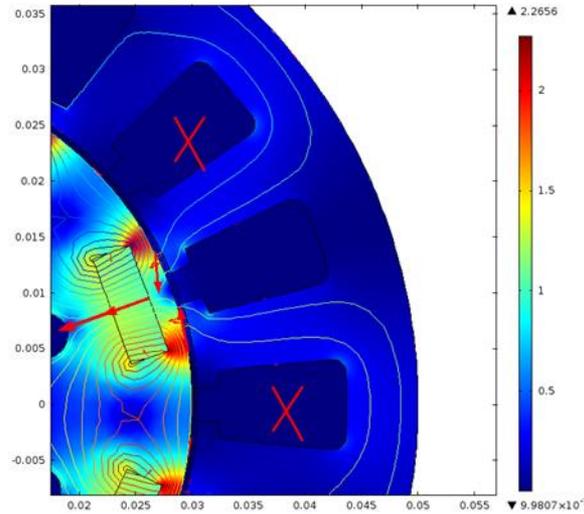
FASE A – CONFRONTO DEI FLUSSI

Superficie: Campo di induzione magnetica, modulo (T)
 Isolinee: Potenziale vettore magnetico, componente Z (Wb/m)
 Freccce su linea: Campo di induzione magnetica (Sul materiale)



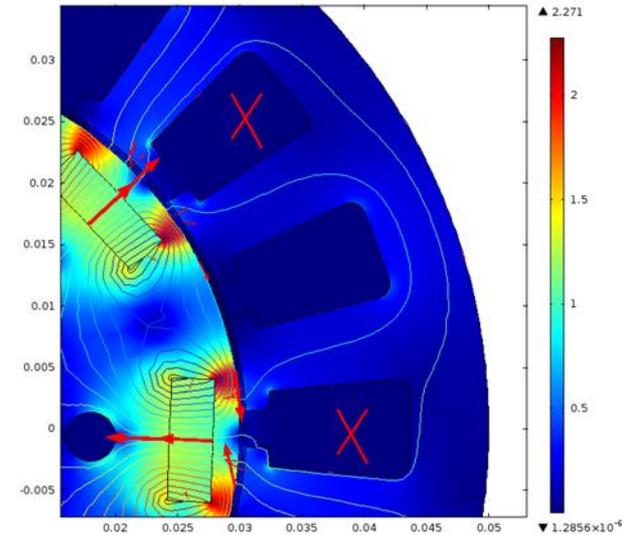
Avvolgimento A - 20 [deg]
 Flusso concatenato elevato
 positivo

Superficie: Campo di induzione magnetica, modulo (T)
 Isolinee: Potenziale vettore magnetico, componente Z (Wb/m)
 Freccce su linea: Campo di induzione magnetica (Sul materiale)



Avvolgimento A – 65 [deg]
 Flusso concatenato elevato
 negativo

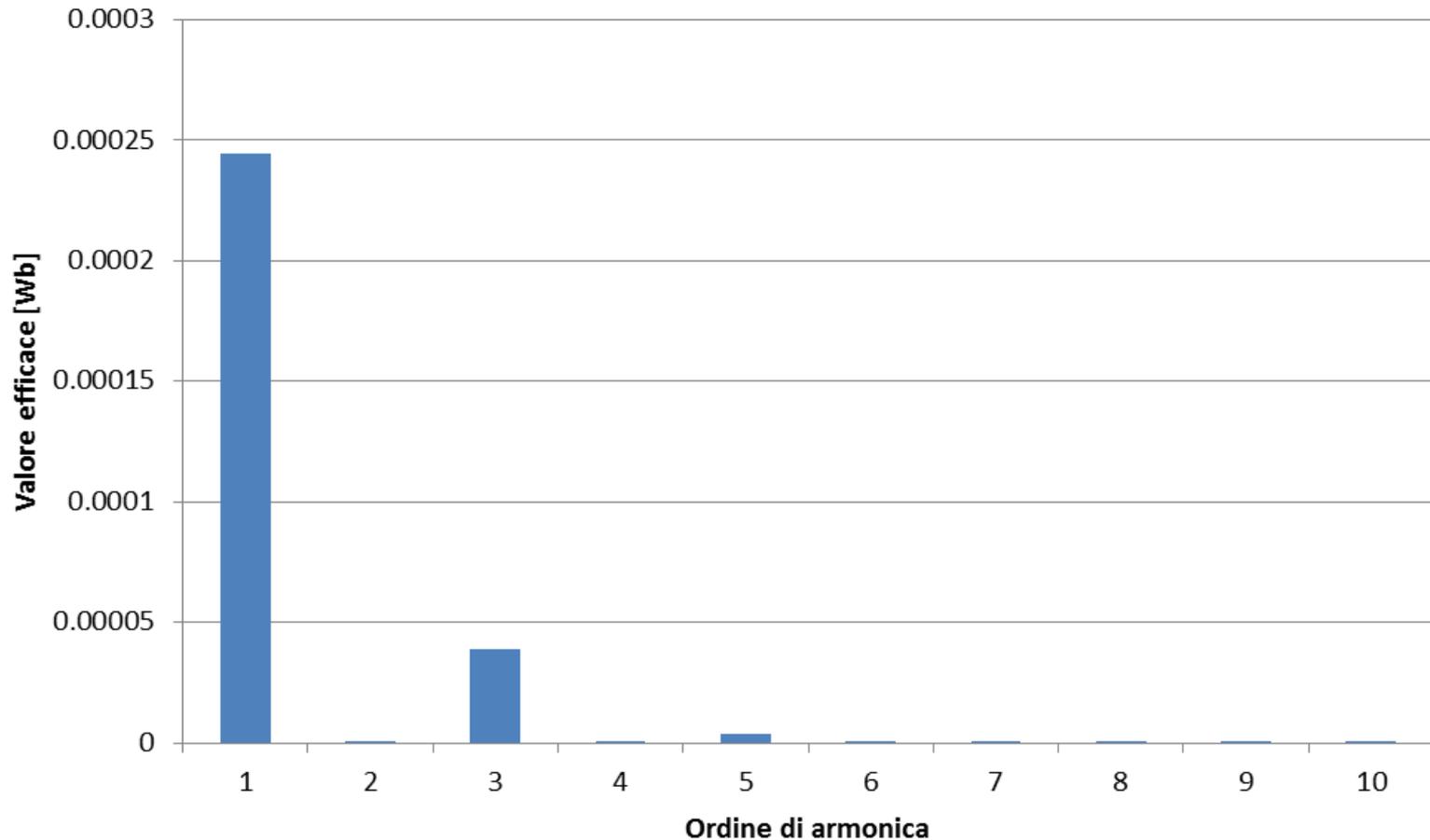
Superficie: Campo di induzione magnetica, modulo (T)
 Isolinee: Potenziale vettore magnetico, componente Z (Wb/m)
 Freccce su linea: Campo di induzione magnetica (Sul materiale)



Avvolgimento A – 43 [deg]
 Flusso concatenato ridotto

Le croci in rosso servono solamente a indicare gli avvolgimenti. Non rappresentano valori di induzione

SPETTRO ARMONICO



LA TENSIONE INDOTTA A VUOTO

$$E_1 = pp \cdot \omega_m \cdot N_F N_S \cdot \phi_1 \cdot f_{racc} \cdot f_{distr} \cdot k_{st} = 193 \text{ V}$$

- $N_F N_S = 6 \cdot 410 = 2460$ avvolgimenti per fase

- *Fattore di raccorciamento di passo:*

$$f_{racc} = 0.985$$

- *Fattore di distribuzione:*

$$f_{distr} = 1.04$$

- $k_{st} = 0.99$