Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale
Corso di Laurea in Ingegneria dell'Energia

Gestione della coppia elettrica in una macchina elettrica a flusso assiale mediante controllo della forma d'onda della corrente di alimentazione

Tutor: Prof. Mauro Andriollo

Laureando: *Gabriele Rossi*

Padova, 20/03/2026

www.dii.unipd.it

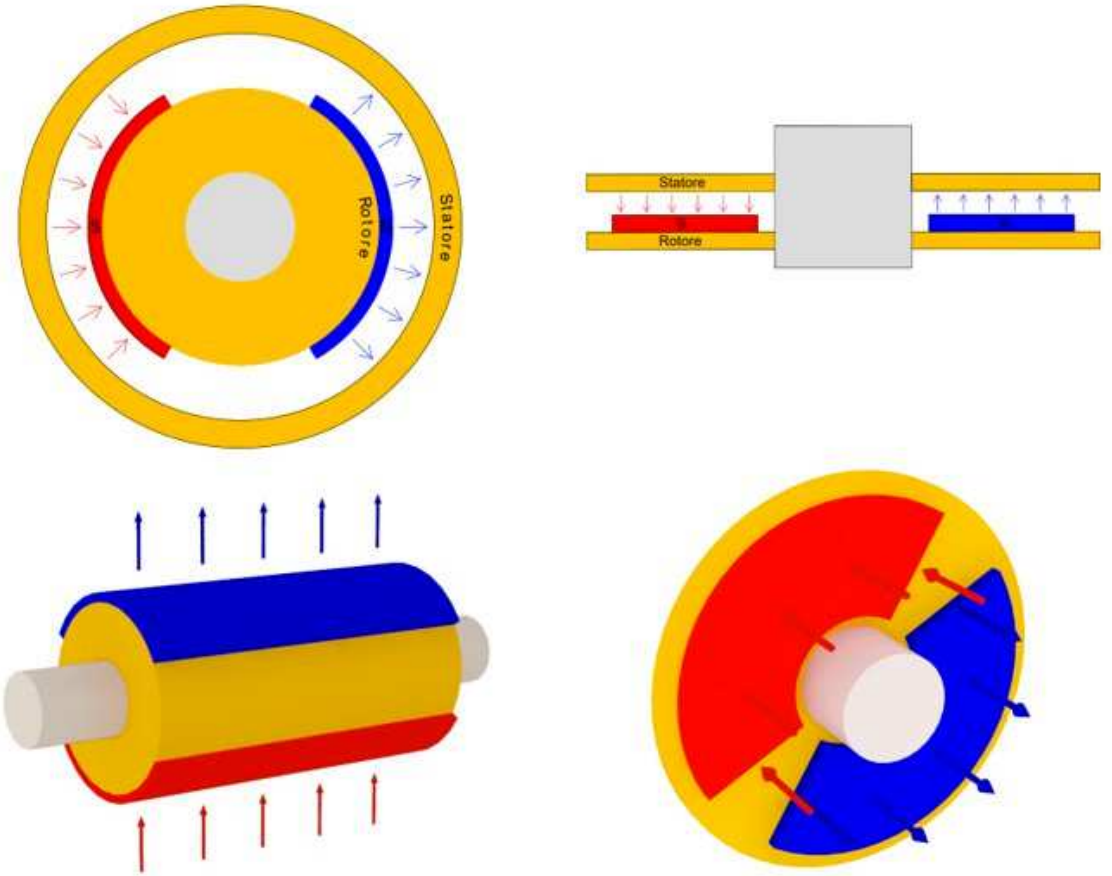
Macchine elettriche a flusso assiale

Vantaggi:

- Elevata compattezza
- Sistema di raffreddamento efficace
- Elevata densità di coppia
- Elevato rapporto tra la potenza generata e le dimensioni
- Ampio range di velocità operativa
- Possibilità di inserire più moduli in serie per ottenere più potenza

Svantaggi:

- Alta forza centrifuga
- Alta forza di attrazione tra rotore e statore



www.dii.unipd.it

OBIETTIVI DEL LAVORO

Generare una forma d'onda di corrente di alimentazione in grado di ridurre al minimo i seguenti parametri:

$$Oscillazione_{pk-pk\ \%} = \frac{\max(T_e) - \min\ (T_e)}{mean(T_e)} \cdot 100$$

$$THD_{\%} = \frac{\sqrt{rms(T_e)^2 - mean\,(T_e)^2}}{mean(T_e)} \cdot 100$$

Coppia elettromagnetica:

$$T_e = \frac{\sum_{k=1,2,3}\ e_k \cdot\ i_k}{w_n}$$

$$Ripple\ Standard\ Deviation\ \ (RSD)_{\%} = \frac{\sqrt{T_6^2 + T_{12}^2 + T_{18}^2 + \ldots + T_n^2}}{T_0} \cdot 100$$

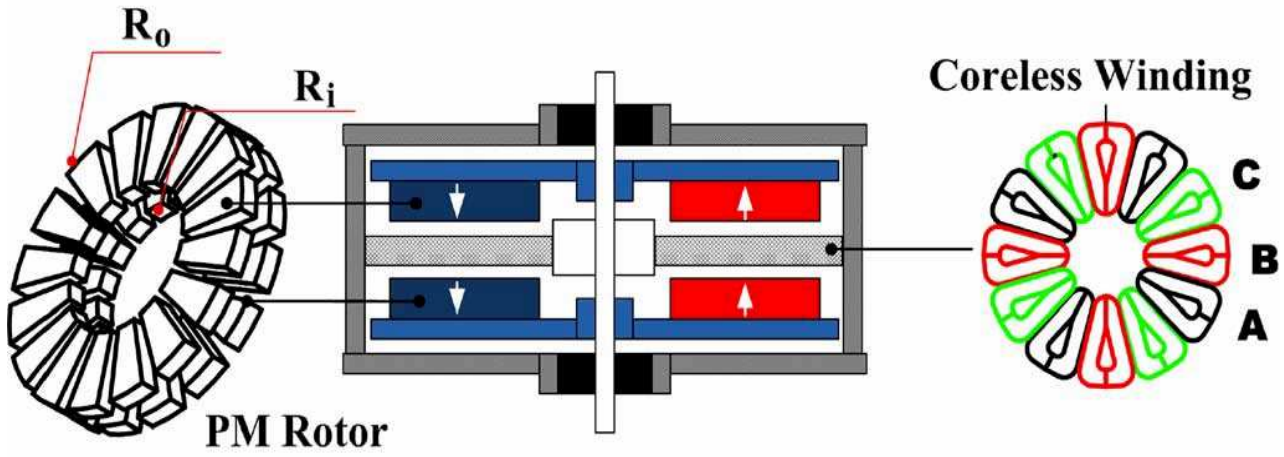
T_0 → Coppia prodotta con corrente continua

www.dii.unipd.it

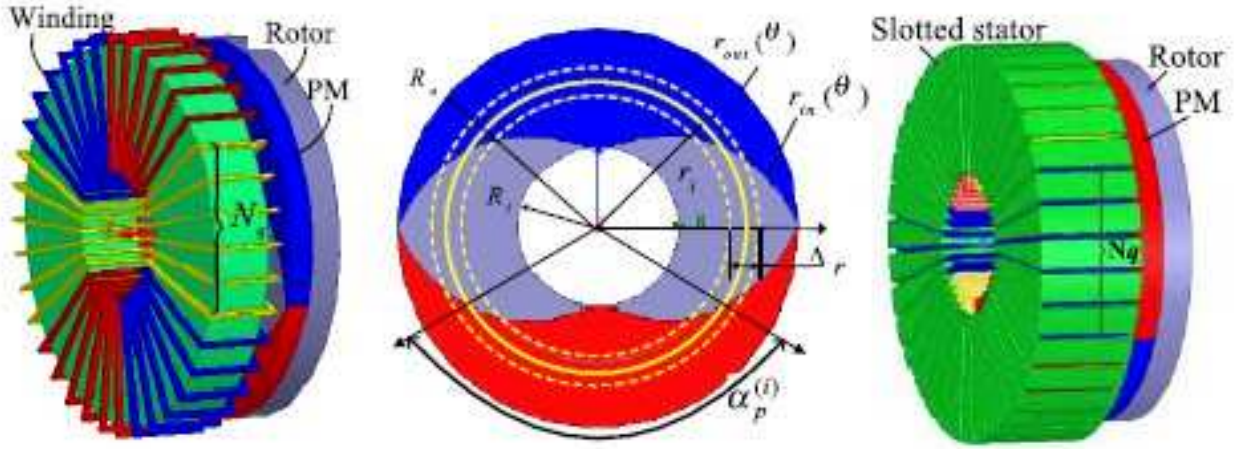
MACCHINE ANALIZZATE

www.dii.unipd.it

Coreless : doppio rotore con PM e statore senza nucleo ferromagnetico con avvolgimenti concentrati



Slotless: singolo rotore e singolo statore con gli avvolgimenti avvolti toroidalmente attorno al nucleo di statore



Slotted: singolo rotore e singolo statore con gli avvolgimenti inseriti in cave del nucleo e avvolti toroidalmente attorno ad esso

INDUZIONE MAGNETICA B_z (1/2)

www.dii.unipd.it

Utilizzo di un'approssimazione 2-D sulla superficie dello statore per considerare l'espansione radiale e angolare della bobina

$$M_n = \frac{4\,B_r}{n\pi\mu_0} \cdot \sin\frac{n\pi\alpha_p}{2}$$

Distribuzione spaziale dei PM

$$B_{z,\,n}(\vartheta,z) = \sum_{n=1,3,\ldots}^{\infty} \mu_0 \cdot \frac{M_n}{\Delta_n} \cdot \cosh\frac{n\pi z}{\tau} \cdot \sinh\frac{n\pi h_m}{\tau} \cdot \cos n\vartheta$$

$$\Delta_n = \mu_r \cdot \cosh\frac{n\pi h_m}{\tau} \cdot \sinh\frac{n\pi\,(L-h_m)}{\tau} + \cosh\frac{n\pi\,(L-h_m)}{\tau} \cdot \sinh\frac{n\pi h_m}{\tau}$$

Forma che assume l'induzione tra i due PM dei due rotori o tra i PM e il nucleo ferromagnetico

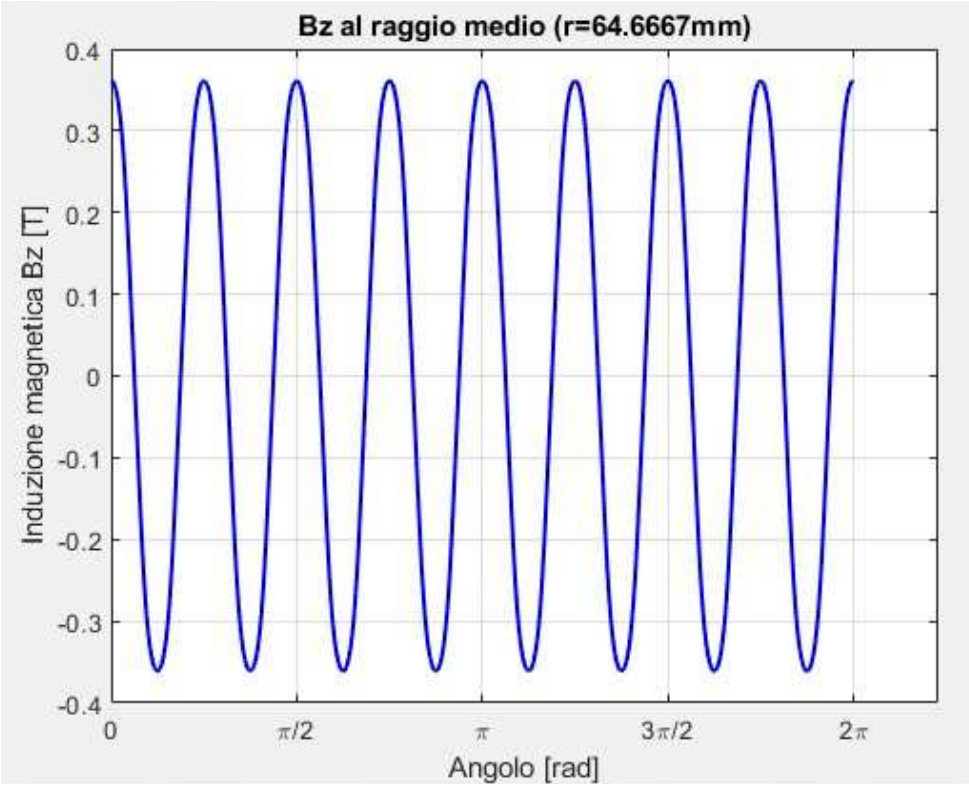
INDUZIONE MAGNETICA B_z (2/2)

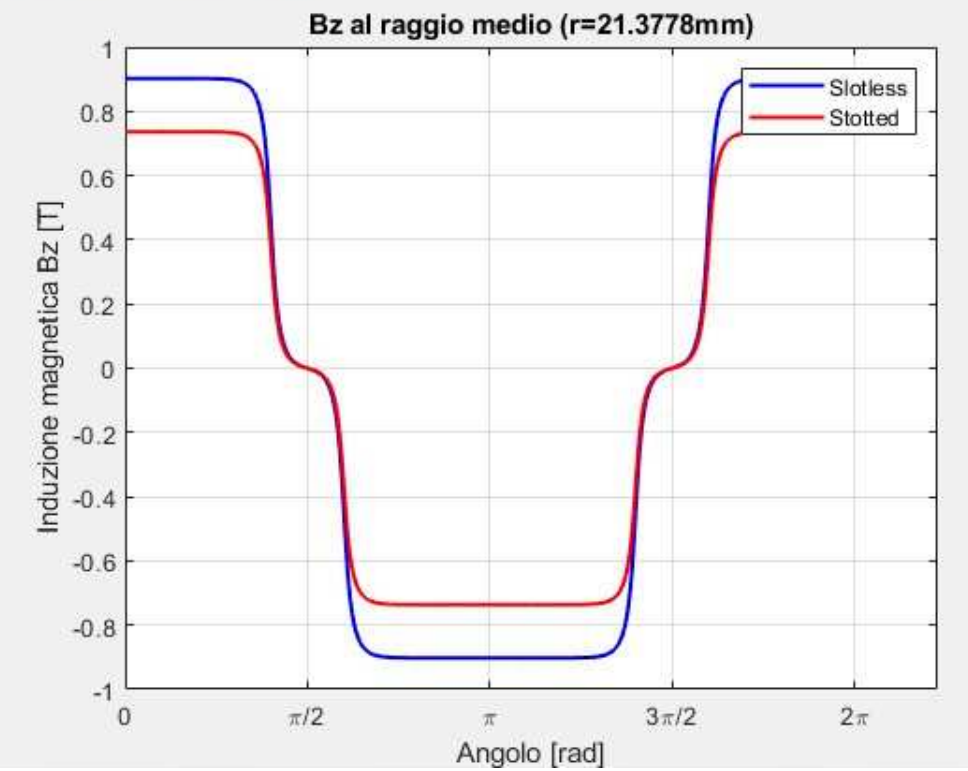
Coefficiente di permeanza che simula l'effetto dei denti di ferro:

$$\lambda(\vartheta) = \frac{1}{K_c} \cdot (1 - \beta \cdot \cos(N_s \vartheta))$$

Ampiezza dell'oscillazione dell'induzione magnetica a causa dell'apertura della cava

Coefficiente di Carter, rappresenta il rapporto tra il traferro effettivo e il traferro fisico





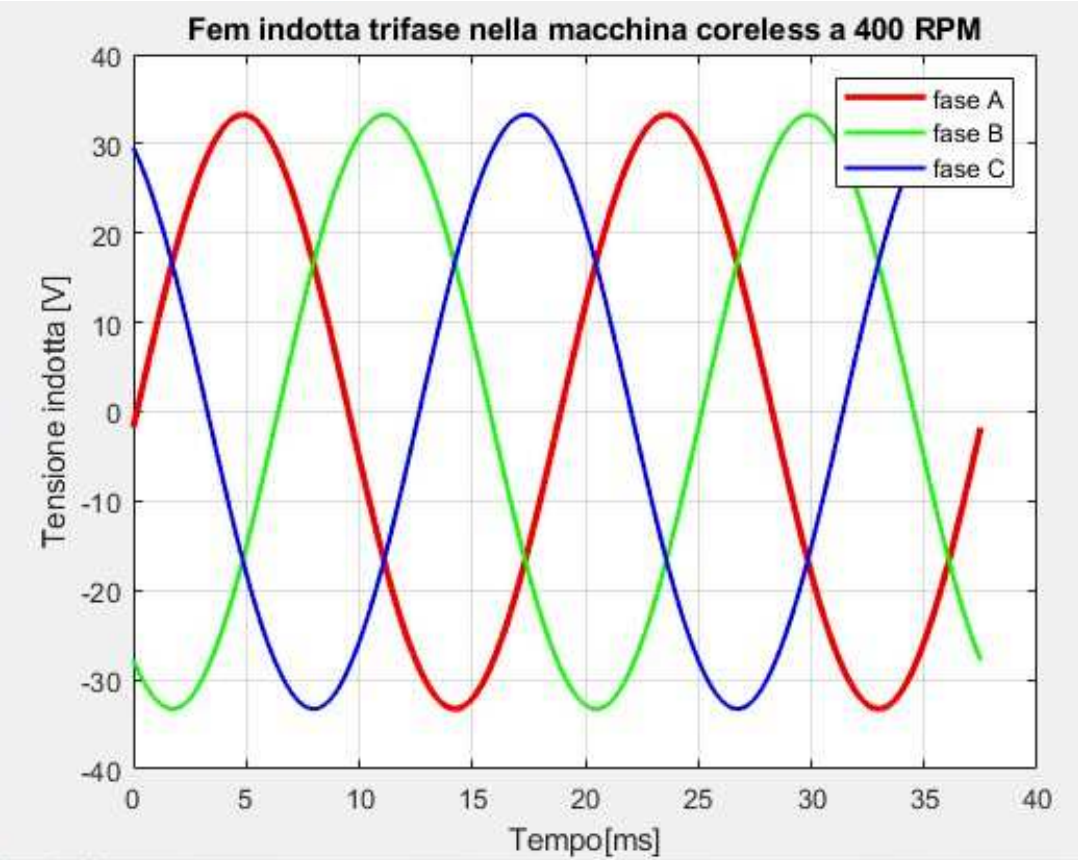
www.dii.unipd.it

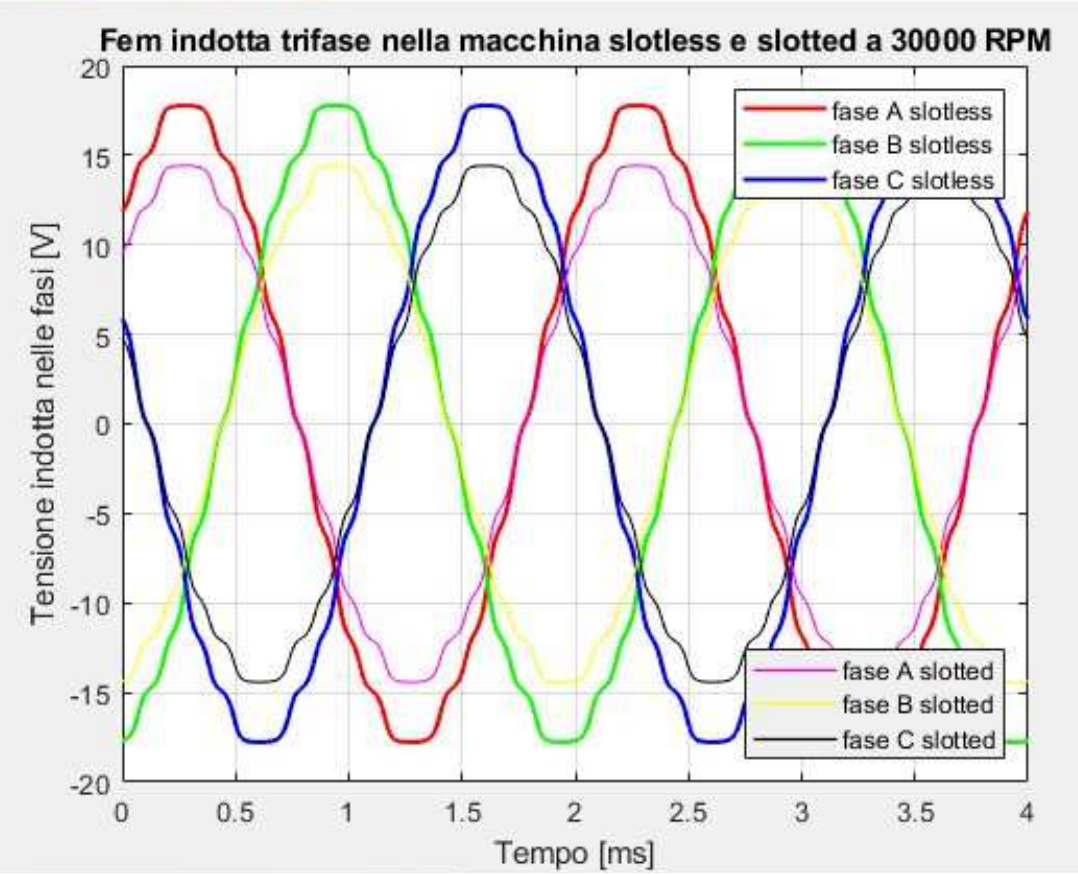
FEM INDOTTA NEGLI AVVOLGIMENTI

www.dii.unipd.it

Utilizzo di un'approssimazione 2-D sulla superficie dello statore per considerare l'espansione radiale e angolare della bobina

$$e = \sum_{n=1,3,\ldots}^{\infty} 2 \cdot N_s \cdot (R_o - R_i) \cdot \Omega \cdot B_{z,n}(t) \cdot \sin nwt$$



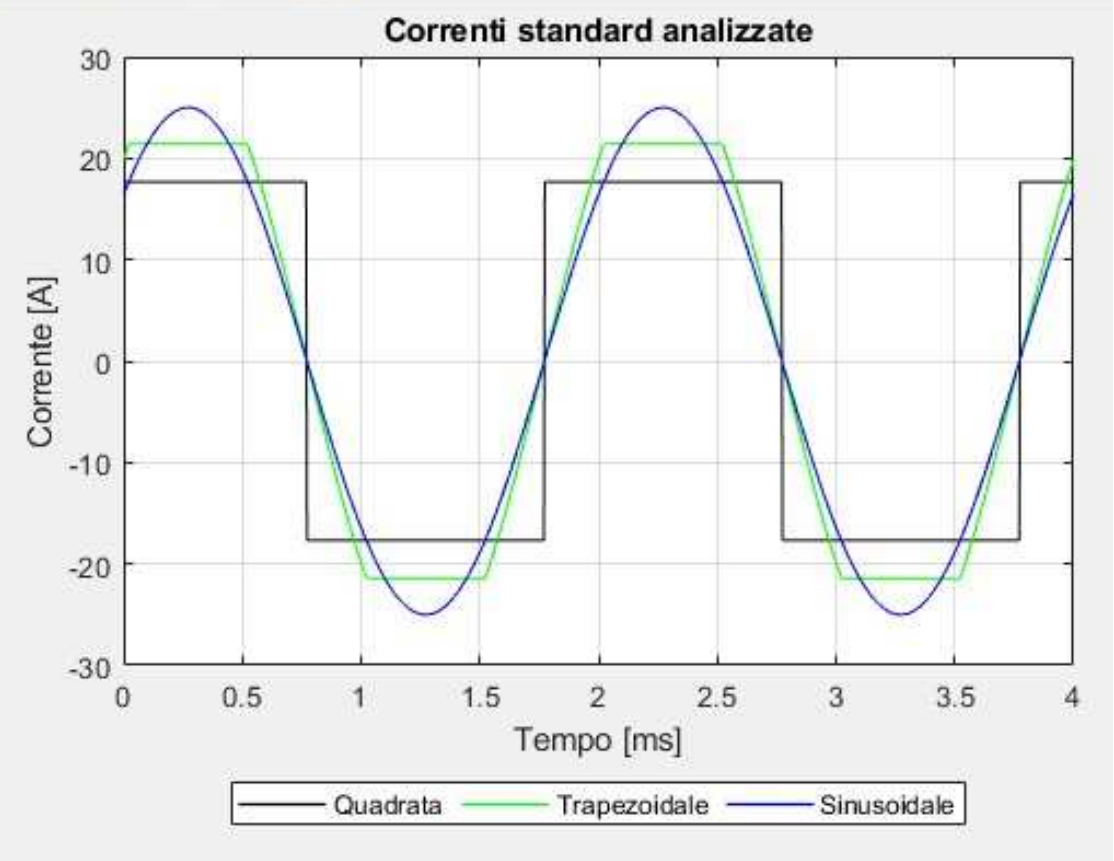


CORRENTI ANALIZZATE

www.dii.unipd.it

A parità di valore efficace $I_{rms} = \frac{I_{picco}}{\sqrt{2}}$ sono state analizzate le seguenti forme di corrente:

- Quadrata
- Trapezoidale (angolo della rampa = 45°)
- Sinusoidale
- Matching-fem (per ottenere la coppia massima)
- Smoothing (per ridurre le oscillazioni della coppia)



CONFRONTO PRESTAZIONALE

Forma d'onda	Oscillazione [%]	THD [%]	RSD [%]	Rendimento [%]	
Quadrata	14.30	4.31	6.10	99.3	coreless
Trapezoidale	3.42	0.93	1.31	99.23	
Sinusoidale	0.38	0.13	0.18	99.11	
Matching-fem	0.70	0.25	0.34	99.11	
Smoothing	0.01	0.00	0.00	99.12	
Quadrata	16.77	5.75	8.14	99.06	slotless
Trapezoidale	6.73	1.96	2.77	99.14	
Sinusoidale	4.68	1.48	2.09	99.15	
Matching-fem	9.47	2.91	4.12	99.15	
Smoothing	0.00	0.00	0.018	98.75	
Quadrata	44.74	12.54	17.74	98.81	slotted
Trapezoidale	33.64	10.33	14.61	98.92	
Sinusoidale	32.04	10.16	14.37	98.93	
Matching-fem	9.60	2.95	4.18	98.93	
Smoothing	1.60	0.28	0.40	98.43	

www.dii.unipd.it

COPPIA AL VARIARE DELLA CORRENTE (1/3)

www.dii.unipd.it

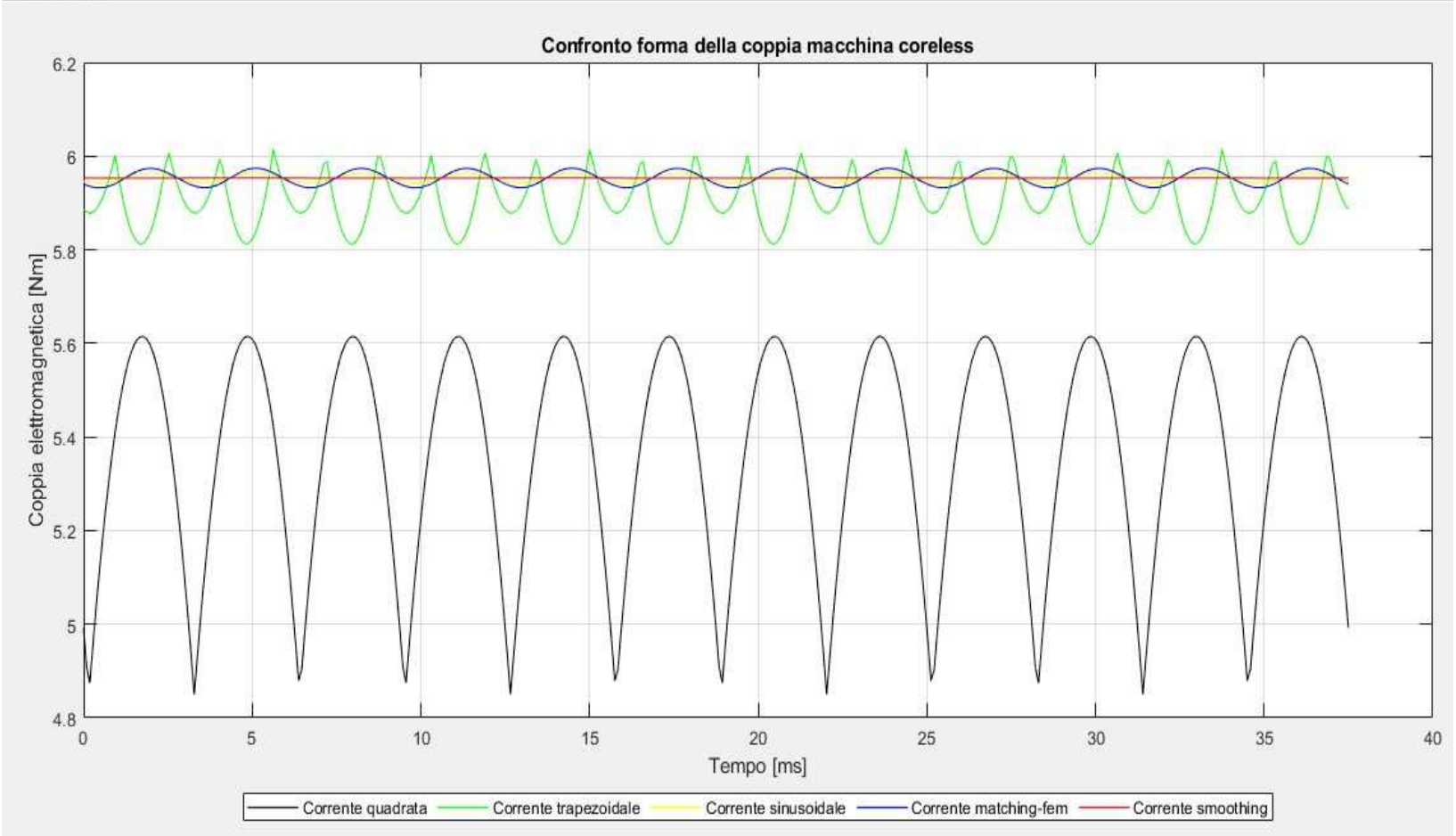
Macchina coreless

Vantaggi:

- Oscillazioni limitate
- Gestione semplice della coppia
- Perdite nel ferro trascurabili
- Ideale per operazioni di precisione

Svantaggi:

- Elevato numero di avvolgimenti per avere alte prestazioni



COPPIA AL VARIARE DELLA CORRENTE (2/3)

www.dii.unipd.it

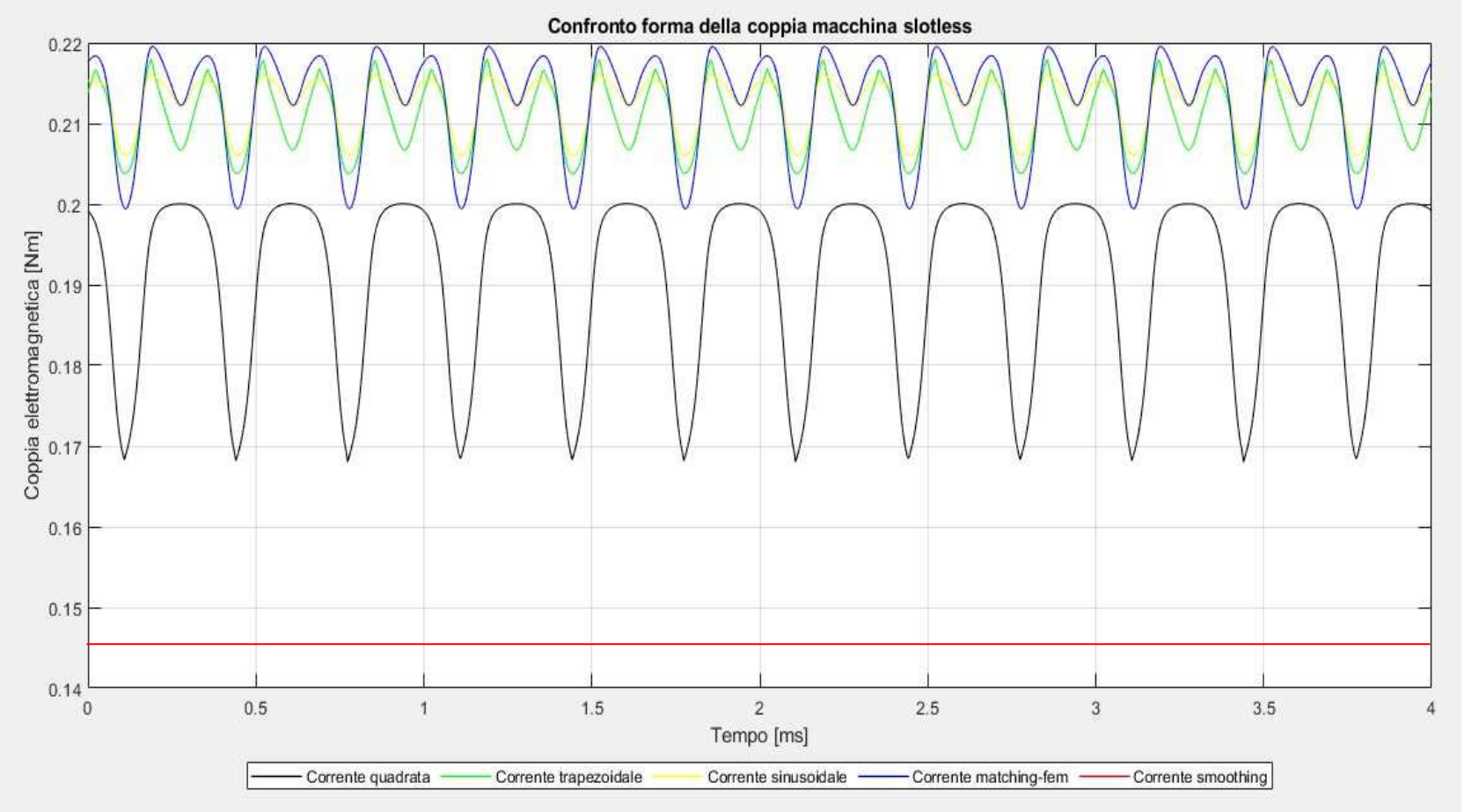
Macchina slotless

Vantaggi:

- Rapporto tra i valori di induzione e fem sul numero di avvolgimenti elevato
- Assenza della coppia di cogging
- Semplice gestione della coppia
- Perdite nel ferro ridotte
- Alto rendimento

Svantaggi:

- Coppia media bassa con corrente smoothing



COPPIA AL VARIARE DELLA CORRENTE (3/3)

www.dii.unipd.it

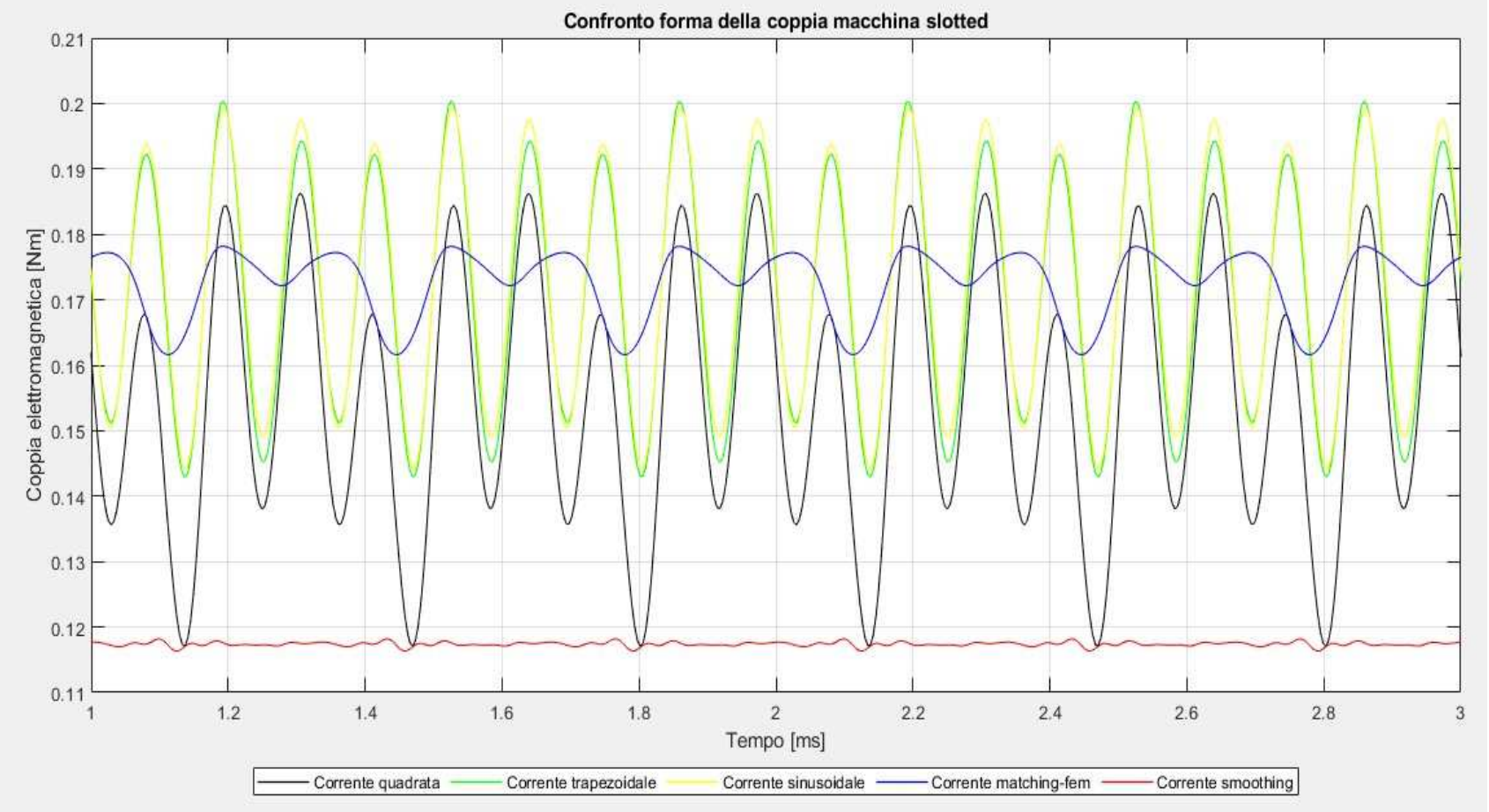
Macchina slotted

Vantaggi:

- Rapporto tra i valori di induzione e fem sul numero di avvolgimenti elevato

Svantaggi:

- Coppia di cogging
- Oscillazioni della coppia elevate
- Difficile gestione della coppia
- Elevate perdite nel ferro
- Rendimento inferiore



www.dii.unipd.it

Grazie per l'attenzione