

Progetto di azionamenti e reti elettriche (9 CFU)

Sessione estiva – a.a 2019/2020

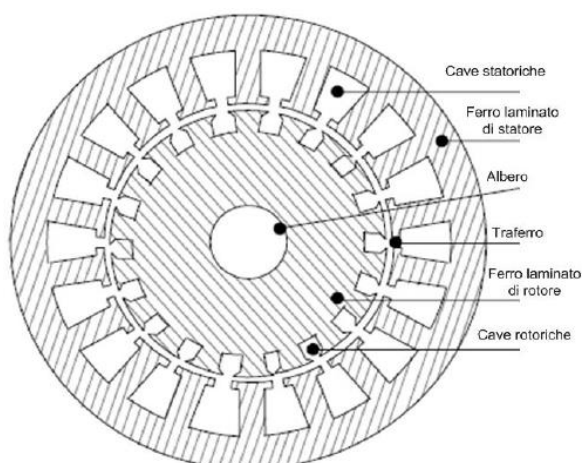
Valerio Pagliarella – matricola: 0287800

Il progetto prevede la caratterizzazione di un azionamento di velocità con motore asincrono a gabbia semplice, al fine di raggiungere i seguenti obiettivi:

- Caratterizzare l'azionamento di velocità nei tratti a coppia massima costante e a potenza massima costante;
- Calcolare velocità base Ω_0 e velocità massima Ω_{\max} ;
- Definire un sistema di controllo in frequenza che tenga conto dello scorrimento;
- Effettuare delle prove di simulazione mediante Matlab/Simulink.

1 Principio di funzionamento del motore asincrono trifase

Un azionamento di velocità è un sistema in grado di controllare il moto connesso ad un carico, sfruttando la velocità come grandezza di controllo. Ogni azionamento è caratterizzato da un motore/attuatore che produce il lavoro connesso al moto. Nel caso in esame, l'attuatore è un motore asincrono trifase, ovvero un motore elettrico in corrente alternata, costituito da due parti principali, lo statore ed il rotore. Lo statore consiste in un avvolgimento a tre bobine (sfalsate di $120/p$ gradi meccanici) alimentate da corrente alternata trifase, inserito all'interno della cave ottenute impiegando lamierini al silicio isolati tra loro, con geometria a corona circolare.



La corrente trifase che scorre negli avvolgimenti genera un campo elettromagnetico rotante, con velocità di rotazione fissa, detta sincrona, dipendente dalla frequenza di alimentazione. La variazione nel tempo del campo elettromagnetico produce una corrente indotta nelle barre conduttrici che costituiscono il rotore (a gabbia di scoiattolo), le quali vengono messe in cortocircuito dagli anelli di estremità. Per favorire l'induzione elettromagnetica, vengono inseriti all'interno del rotore degli strati di lamierini isolati, dello stesso tipo di quelli impiegati nello statore, in modo da limitare al minimo le correnti parassite. Le correnti indotte nelle barre conduttrici generano un campo magnetico rotorico, che si oppone alle variazioni di flusso (cioè è opposto al campo magnetico statorico). L'interazione tra il campo magnetico statorico e rotorico comporta una coppia sull'avvolgimento rotorico, che fa ruotare il rotore.



Rotore a gabbia in alluminio pressofuso

Il rotore ruota ad una velocità inferiore a quella di sincronismo, in quanto nella situazione limite $\Omega_a = \Omega$ si annullerebbero le correnti indotte e la coppia motrice. Viene definito allora il rapporto scorrimento relativo come:

$$s = \frac{\Omega_a - \Omega}{\Omega_a}$$

ed è un indice della differenza tra la velocità di alimentazione e la velocità del motore, la quale è influenzata dall'attrito e dalla coppia resistente applicata all'albero.

2 Caratteristiche statiche

A partire dalle specifiche di progetto, di seguito vengono ricavate le curve caratteristiche del comportamento statico del motore.

DATI			
Coefficiente di attrito	F	Nms	0,06
Inerzia del motore	J	kgm ²	0,02
Numero di coppie polari	p	-	2
Resistenza statorica	Rs	ohm	0,3
Induttanza statorica	Ls	H	0,043
Resistenza rotorica	Rr	ohm	0,2
Induttanza rotorica	Lr	H	0,04
Induttanza magnetizzante	Lm	H	0,037
Tensione statorica nominale	Vs_nom	V	200
Corrente statorica nominale	Is_nom	A	80
Massima corrente statorica	Is_max	A	160
Scorrimento relativo max a P_nom	s_max_p_nom	%	7%
Proporzionalità tra ampiezza e frequenza	K	-	1,765

Dai dati forniti è possibile calcolare le costanti di tempo statorica e rotorica, oltreché i coefficienti di interesse per l'analisi:

$$T_s = \frac{L_s}{R_s} = 0.143 \text{ s} ; \quad T_r = \frac{L_r}{R_r} = 0.200 \text{ s}$$

$$K_s = \frac{L_m}{L_s} = 0.860 ; \quad K_r = \frac{L_m}{L_r} = 0.925$$

$$\sigma = 1 - K_s K_r = 0.204$$

$$L_{\sigma s} = L_s - L_m = 0.060 \text{ H}$$

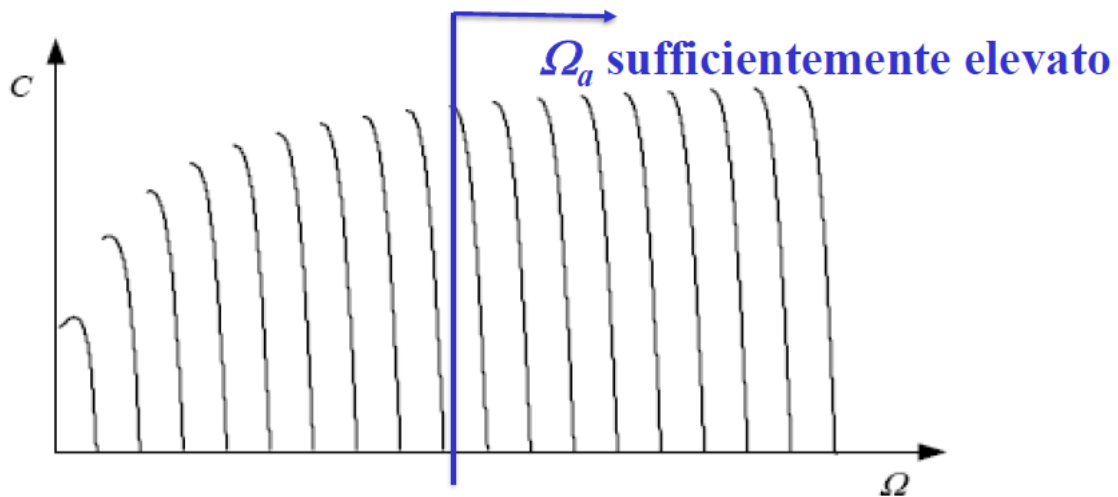
$$L_{\sigma r} = L_r - L_m = 0.030 \text{ H}$$

Per il calcolo dei parametri k_1 , k_2 , k_3 è necessario conoscere la velocità di alimentazione Ω_a .

Dal testo viene assunta come velocità nominale di alimentazione la velocità di base Ω_0 , ovvero la velocità di rotazione a cui corrisponde la fine del tratto a C_{\max} costante (ovvero l'inizio del tratto a potenza massima costante) lungo il quale viene assunta una legge di proporzionalità tra tensione statorica e frequenza di alimentazione del tipo:

$$V_s = K \Omega_a$$

Questo legame di proporzionalità viene utilizzato nel controllo in frequenza del motore al fine di mantenere costante la C_{max} : se Ω_a è sufficientemente elevata, la coppia massima risulta infatti indipendente dalla frequenza di alimentazione. In questo modo le caratteristiche statiche del motore subiscono, al variare di Ω_a , una traslazione:



La velocità di alimentazione, posta uguale a quella base, risulta quindi:

$$\Omega_a = \frac{V_{snom}}{K} = 113.314 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Possiamo calcolare ora i seguenti coefficienti:

$$k_1 = \frac{p K_s T_s^2 T_r (1 - \sigma) \Omega_a}{L_m (1 + T_s^2 \Omega_a^2)} = 0.065$$

$$k_2 = \frac{T_s^2}{L_s^2 (1 + T_s^2 \Omega_a^2)} = 0.042$$

$$k_3 = k_2 T_r^2 \Omega_a^2 = 21.552$$

$$a = \frac{2 T_s T_r (1 - \sigma) \Omega_a^2}{1 + T_s^2 \Omega_a^2} = 2.213$$

$$b = \frac{T_r^2 (1 + T_s^2 \sigma^2 \Omega_a^2) \Omega_a^2}{1 + T_s^2 \Omega_a^2} = 23.245$$

La corrente statorica è legata alla tensione statorica e allo scorrimento attraverso la seguente relazione:

$$I_s = V_s \sqrt{\frac{k_2 + k_3 s^2}{1 + as + bs^2}}$$

Utilizzando quindi i valori nominali della corrente statorica e tensione statorica, è possibile esplicitare la relazione rispetto ad s e risolvere l'equazione di secondo grado associata, ottenendo uno scorrimento relativo nominale pari a:

$$s_{nom} = 0.092$$

La velocità nominale del rotore è allora:

$$\Omega_{nom} = \Omega_a (1 - s_{nom}) = 102.890 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Dallo scorrimento nominale è possibile risalire alla coppia nominale da:

$$C_{nom} = \frac{k_1 s_{nom}}{1 + as_{nom} + bs_{nom}^2} V_{s_{nom}}^2 = 171.061 \text{ Nm}$$

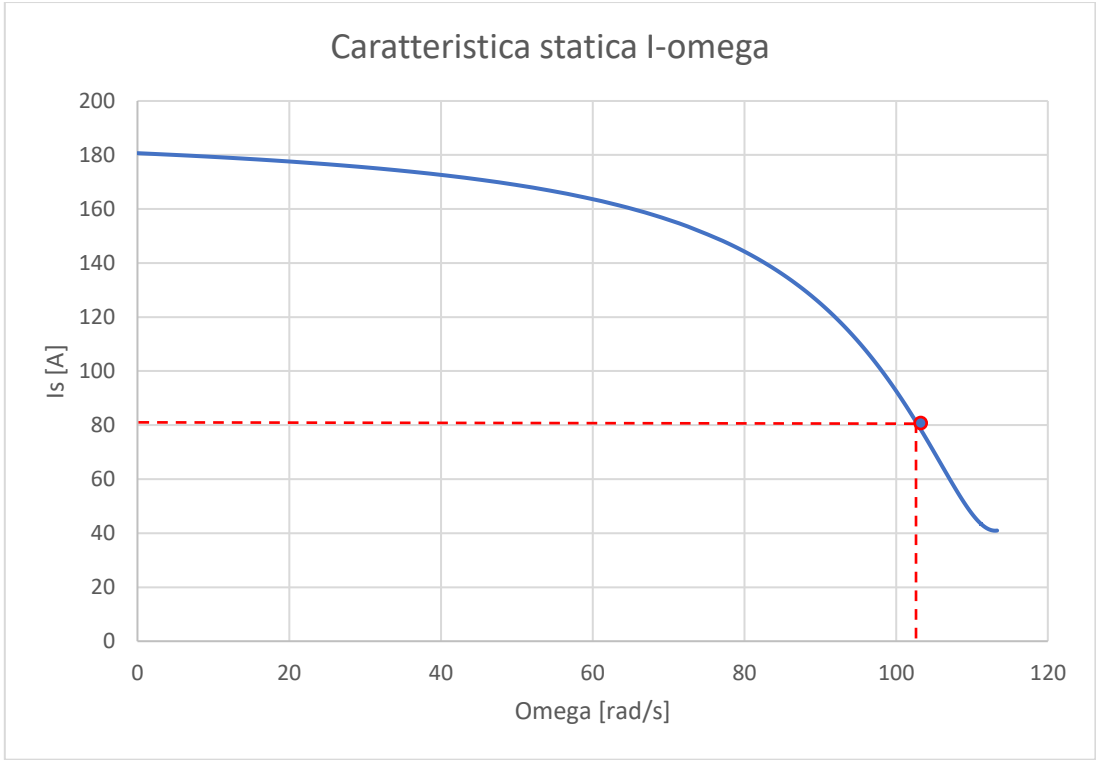
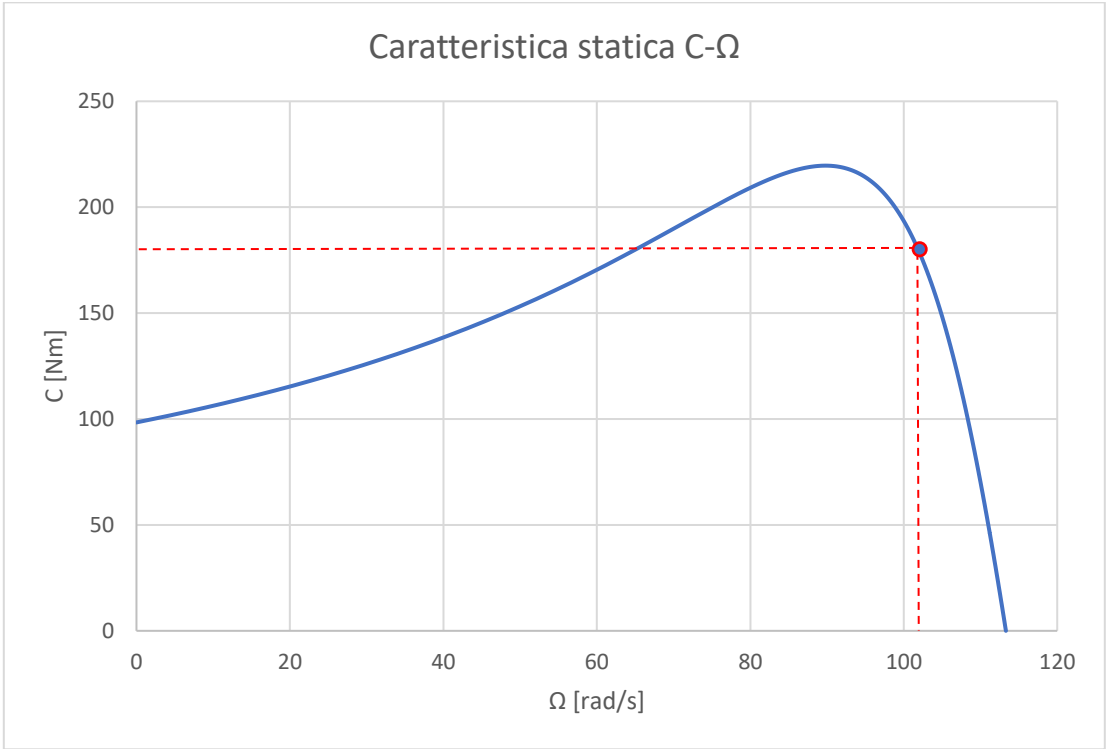
Lo scorrimento di rovesciamento, ovvero lo scorrimento in corrispondenza della coppia massima del motore, è:

$$s_{rov} = \frac{1}{\sqrt{b}} = 0.207 > s_{nom}$$

Essendo lo scorrimento relativo di coppia massima maggiore dello scorrimento nominale, il punto di lavoro si trova nella regione stabile della curva caratteristica. La coppia massima del motore è data dalla legge:

$$C_{max} = \frac{k_1 V_s^2}{a + 2\sqrt{b}} = 219.264 \text{ Nm} > C_{nom}$$

Tramite Excel, fissata la velocità di alimentazione Ω_a , al variare dello scorrimento sono state ricavate le curve caratteristiche coppia-velocità e corrente-velocità:



Come è noto dall'osservazione delle caratteristiche, non è conveniente utilizzare il motore con un valore di scorrimento relativo maggiore di quello di rovesciamento, in quanto a parità di coppia esercitata dal motore si ha un maggior assorbimento di corrente statorica. Di questo aspetto se ne terrà conto nel controllo in frequenza, fissando un valore massimo di soglia per lo scorrimento relativo da rispettare al variare della frequenza di alimentazione. Si può calcolare ora, in condizioni nominali, la potenza trasmessa dallo statore al rotore e la potenza meccanica del motore:

$$P_t = \frac{1}{p} C_{\text{nom}} \Omega_a = 9.691 \text{ kW}$$

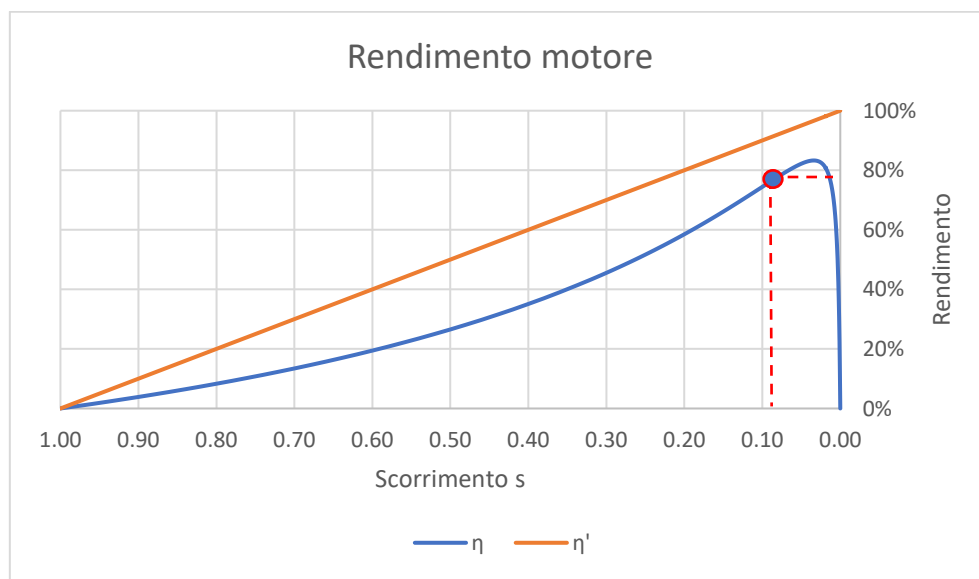
$$P_m = \frac{1}{p} C_{\text{nom}} \Omega_{\text{nom}} = 8.800 \text{ kW}$$

Il rendimento del motore può essere calcolato come:

$$\eta = \frac{P_t(1-s_{\text{nom}})}{P_t + R_s I_s^2} = 75.770 \%$$

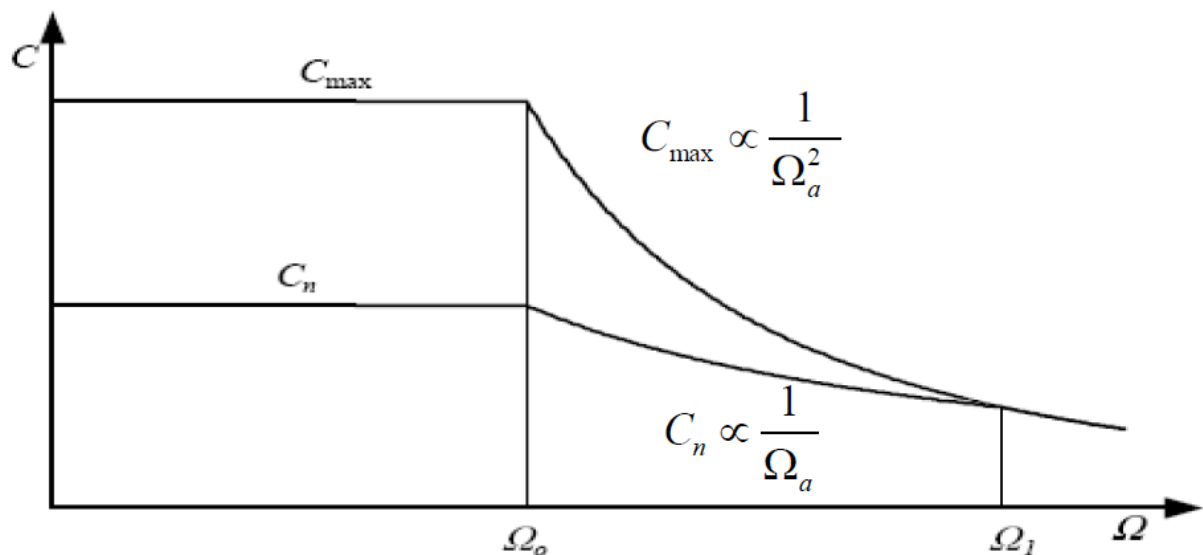
Trascurando la potenza dissipata sulla resistenza statorica, il rendimento del motore diventa:

$$\eta' = \frac{P_m}{P_t} = 90.800 \%$$



2 Controllo in frequenza e modello Simulink

Durante la variazione della velocità di alimentazione del motore si possono distinguere due regioni. La prima, precedentemente introdotta, è quella a C_{\max} costante in cui vale la relazione di proporzionalità tra tensione statorica e frequenza di alimentazione; la seconda si ottiene mantenendo costante V_s (pari al suo valore massimo), in quanto è sufficiente che, per Ω_a sufficientemente elevate, la potenza massima rimanga costante.



Superata la velocità di base Ω_0 la coppia massima risulta inversamente proporzionale al quadrato della velocità di alimentazione. In tale situazione, la velocità massima Ω_1 del motore è pari a:

$$\Omega_{\max} = \Omega_0 \frac{C_{\max}}{C_{\text{nom}}} = 145.477 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Per il controllo in frequenza è stato realizzato un modello in Matlab/Simulink, con il quale è stato ricavato l'andamento della velocità e delle correnti in corrispondenza dei seguenti punti di lavoro:

1. Velocità base Ω_0
2. Velocità massima Ω_{\max}

Un'ulteriore simulazione è ottenuta in risposta a una variazione a gradino della velocità da 0 a Ω_{\max} ed a un carico caratterizzato da una coppia resistente variabile secondo la relazione $C_r = 0.0015 \Omega^2$.

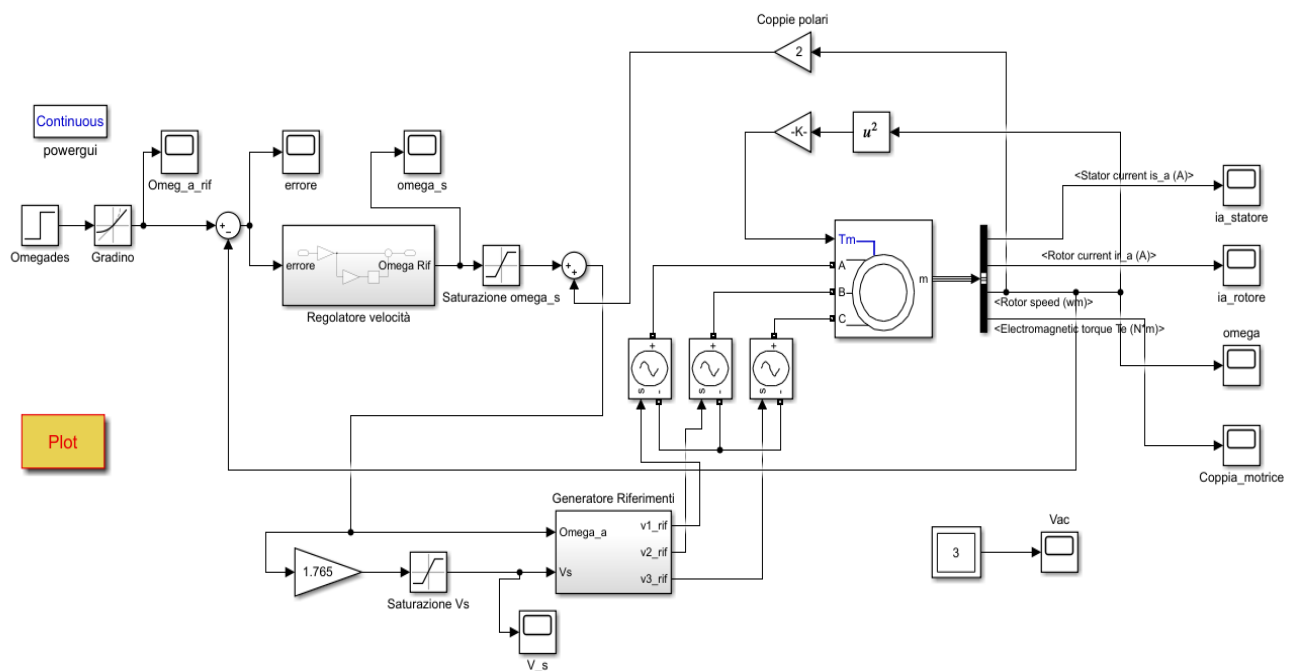
Il sistema di controllo in frequenza tiene conto di uno scorrimento relativo massimo a potenza nominale pari a:

$$s_{\max} = 0.07$$

da cui è possibile ottenere, moltiplicando per la velocità base $\Omega_0 = \Omega_{nom}$, la velocità di scorrimento massima:

$$\Omega_{s_{max}} = s_{max} \Omega_0 = 7.932 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Di seguito è riportato il modello realizzato in Simulink:



Il rate limiter iniziale impone un certo gradino alla velocità di alimentazione, successivamente viene calcolato l'errore riferito alla velocità di scorrimento Ω_s che viene quindi inviato al regolatore di velocità, cioè ad un controllo PI. Attraverso una serie di prove sono stati scelti i valori ottimali per i parametri K_i e K_p del PI ed il segnale in uscita è filtrato da un saturatore per imporre il limite calcolato in precedenza sulla velocità di scorrimento. Un blocco somma calcola la velocità di alimentazione da inviare al gain, il quale impone la legge di proporzionalità da V_s e Ω_a , valida per la regione a coppia massima costante. Il gain è seguito da un ulteriore saturatore, utilizzato solamente nella simulazione con carico con coppia resistente variabile, in modo da tenere costante la tensione statorica una volta raggiunto il suo valore massimo, posto pari a quello nominale di 200 V.

3 Risultati simulazioni

- a) Andamento della velocità e delle correnti a regime permanente in corrispondenza della velocità base Ω_0 e potenza nominale:

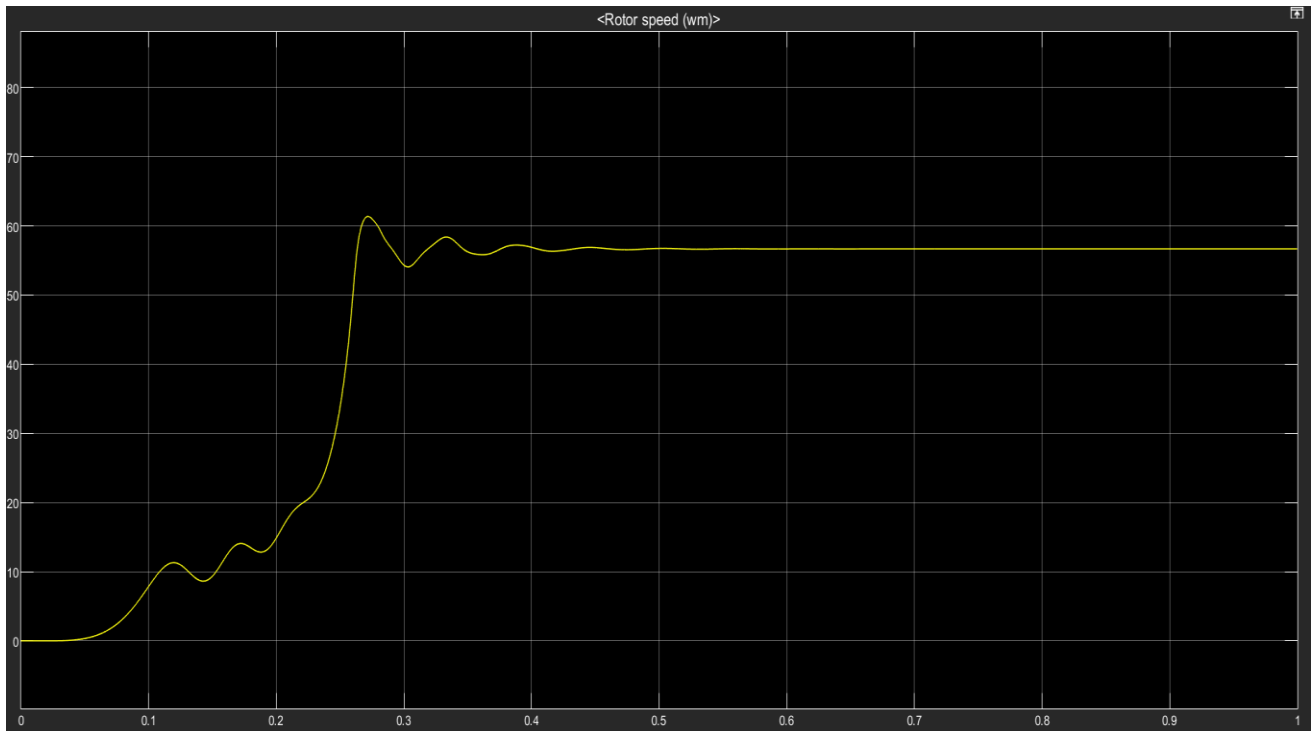


Figura 1: velocità rotore

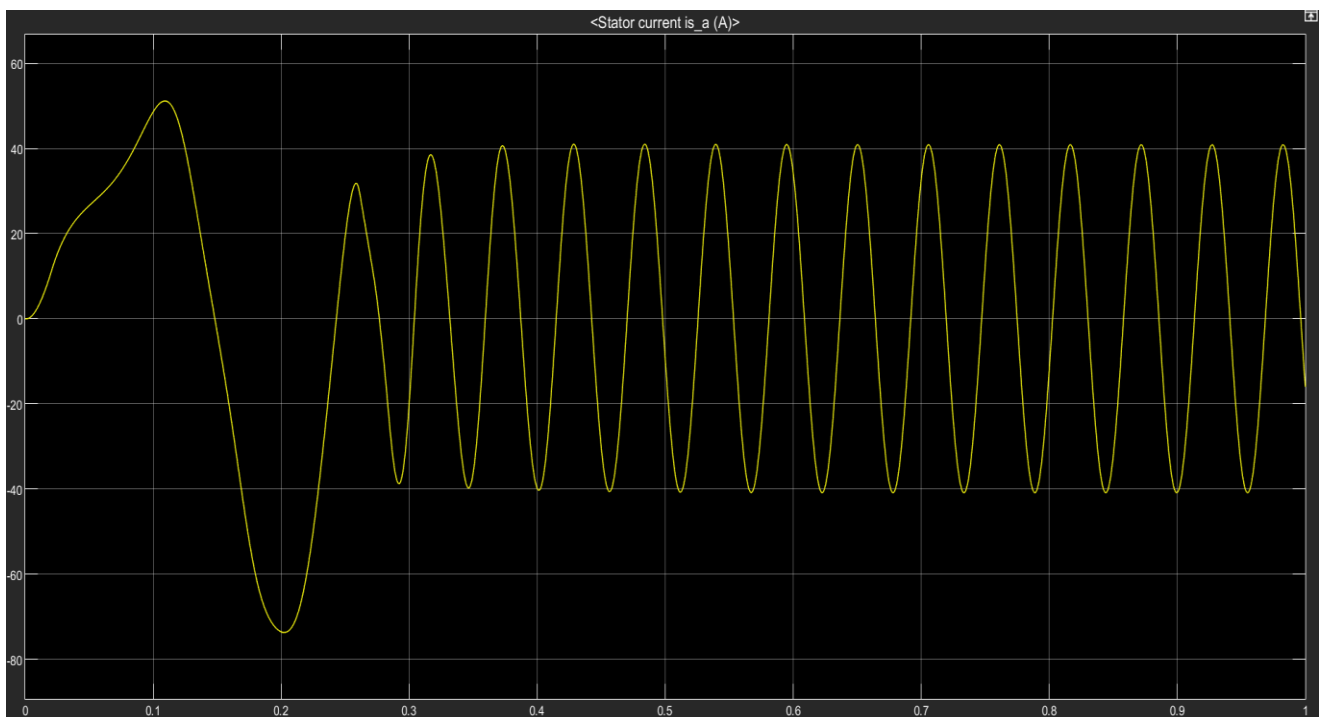


Figura 2: andamento corrente statorica

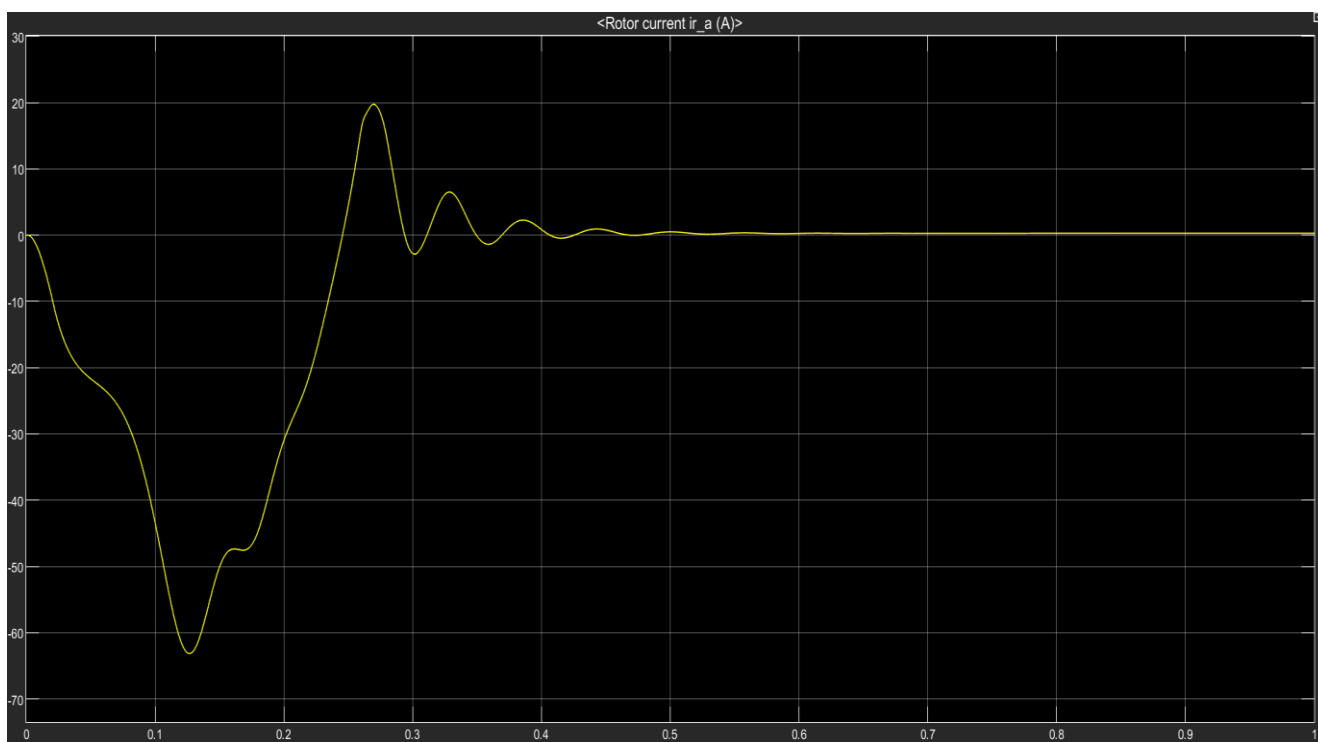


Figura 3: andamento corrente rotorica

- b) Andamento della velocità e delle correnti a regime permanente in corrispondenza della velocità massima Ω_{\max} :

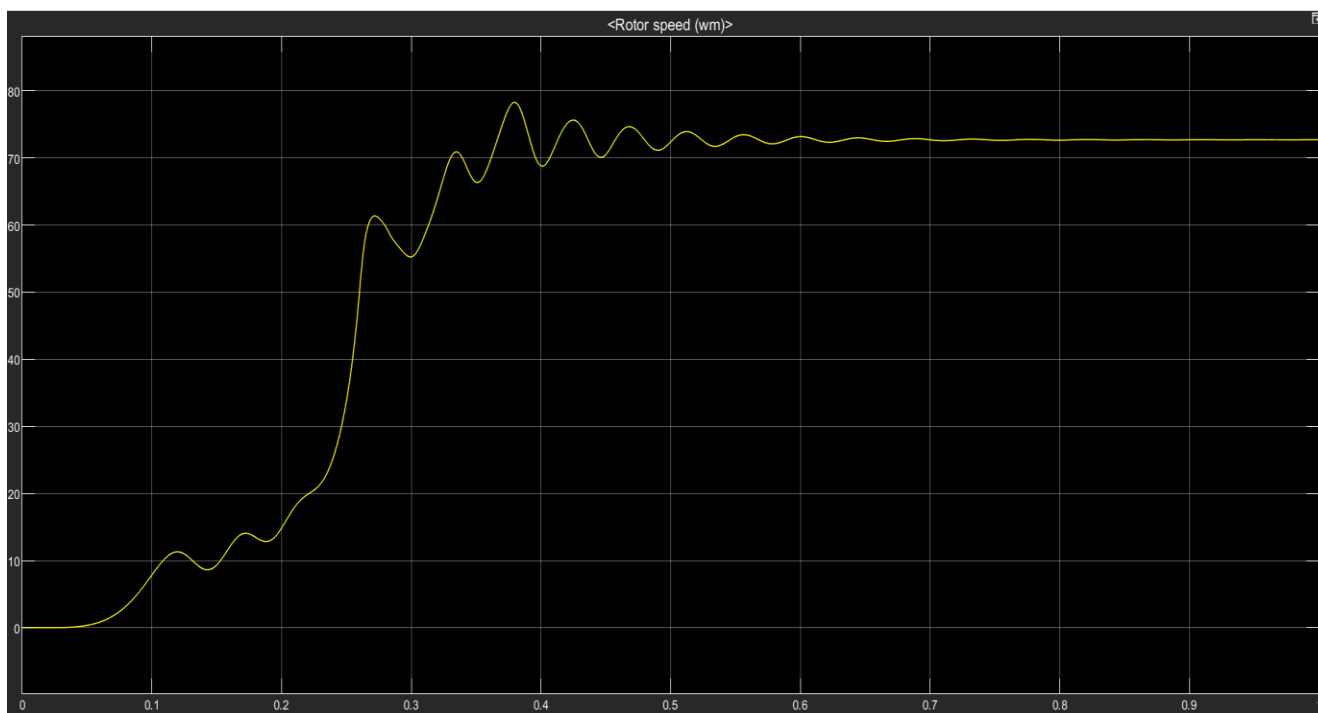


Figura 4: velocità rotore

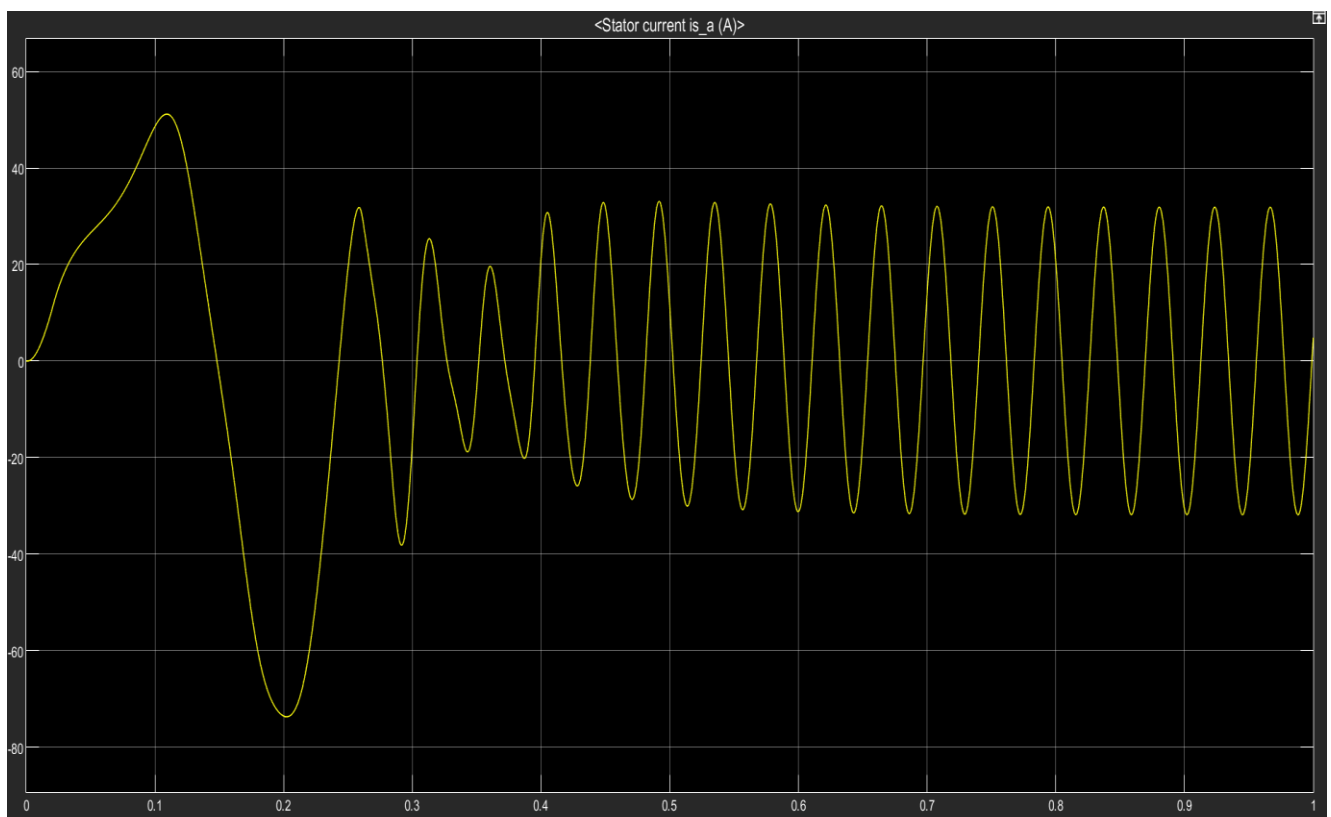


Figura 5: andamento corrente statorica

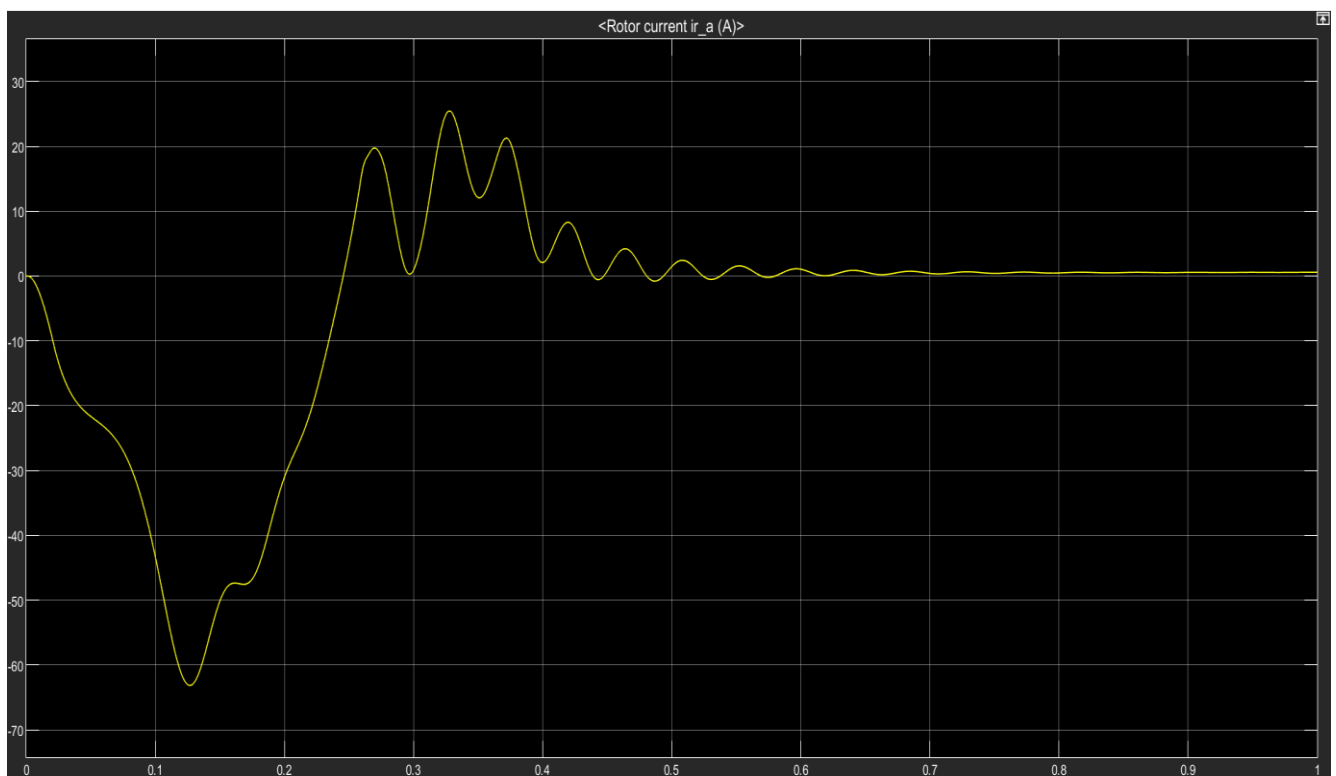


Figura 6: andamento corrente rotorica

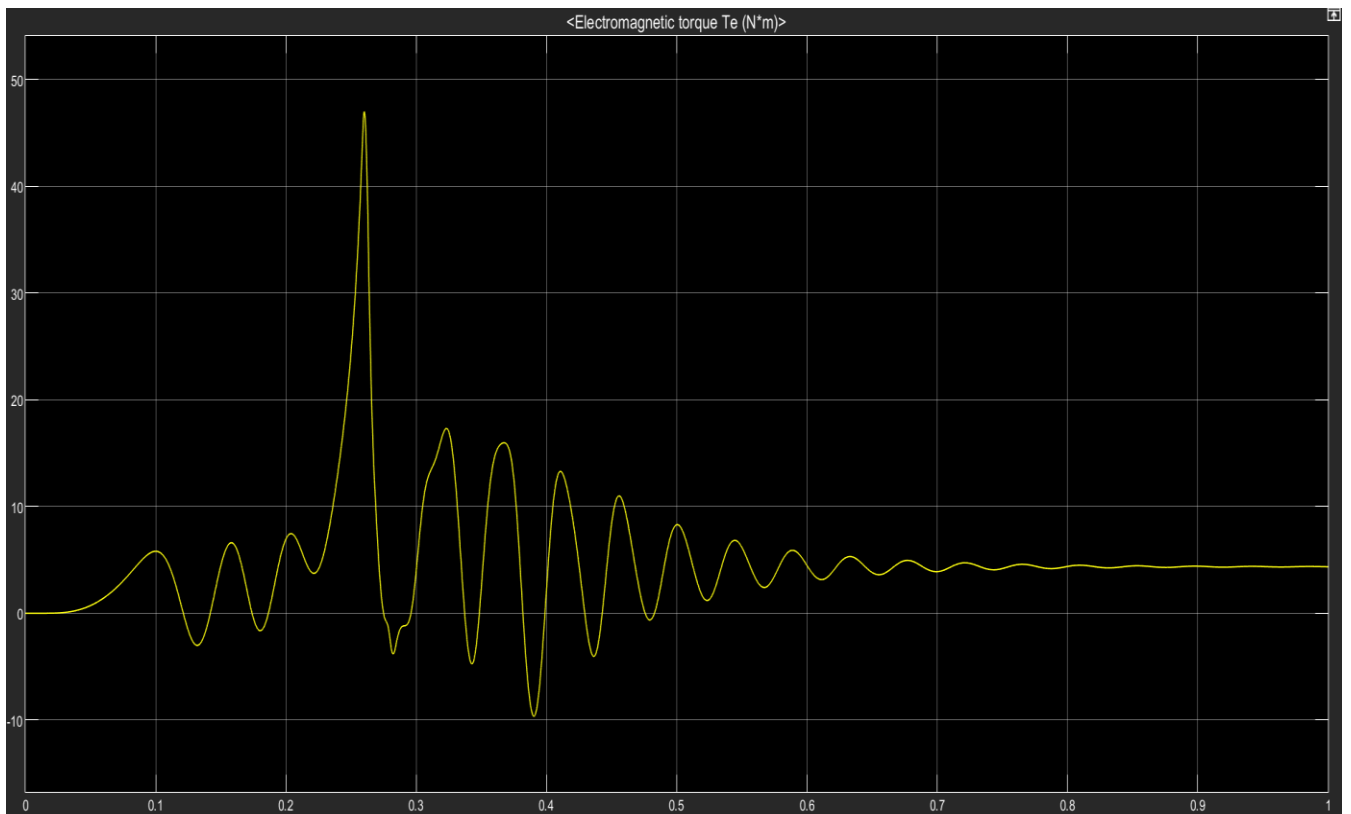


Figura 7: andamento coppia motrice

- c) Risposta ad una variazione a gradino della velocità da 0 a Ω_{\max} ed a un carico caratterizzato da una coppia resistente variabile secondo la relazione $C_r = 0.0015 \Omega^2$

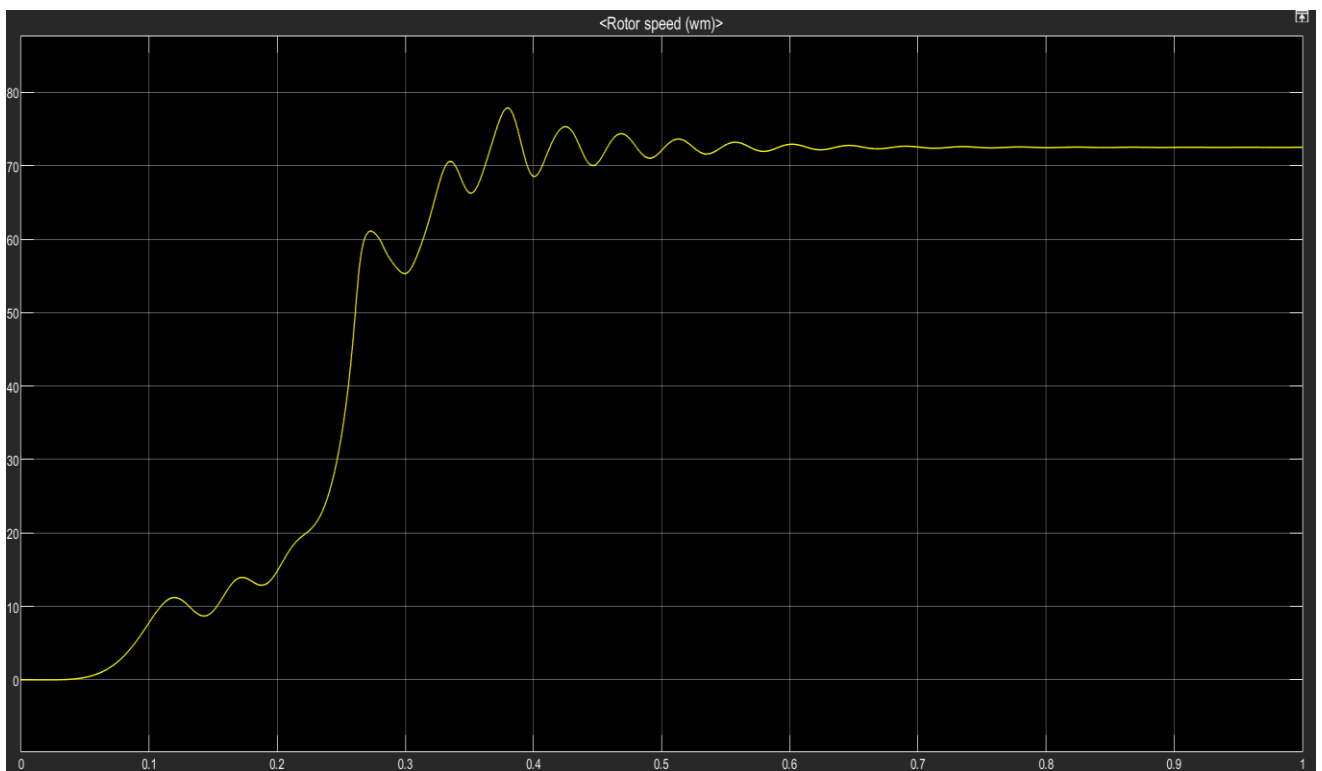


Figura 8: velocità rotore

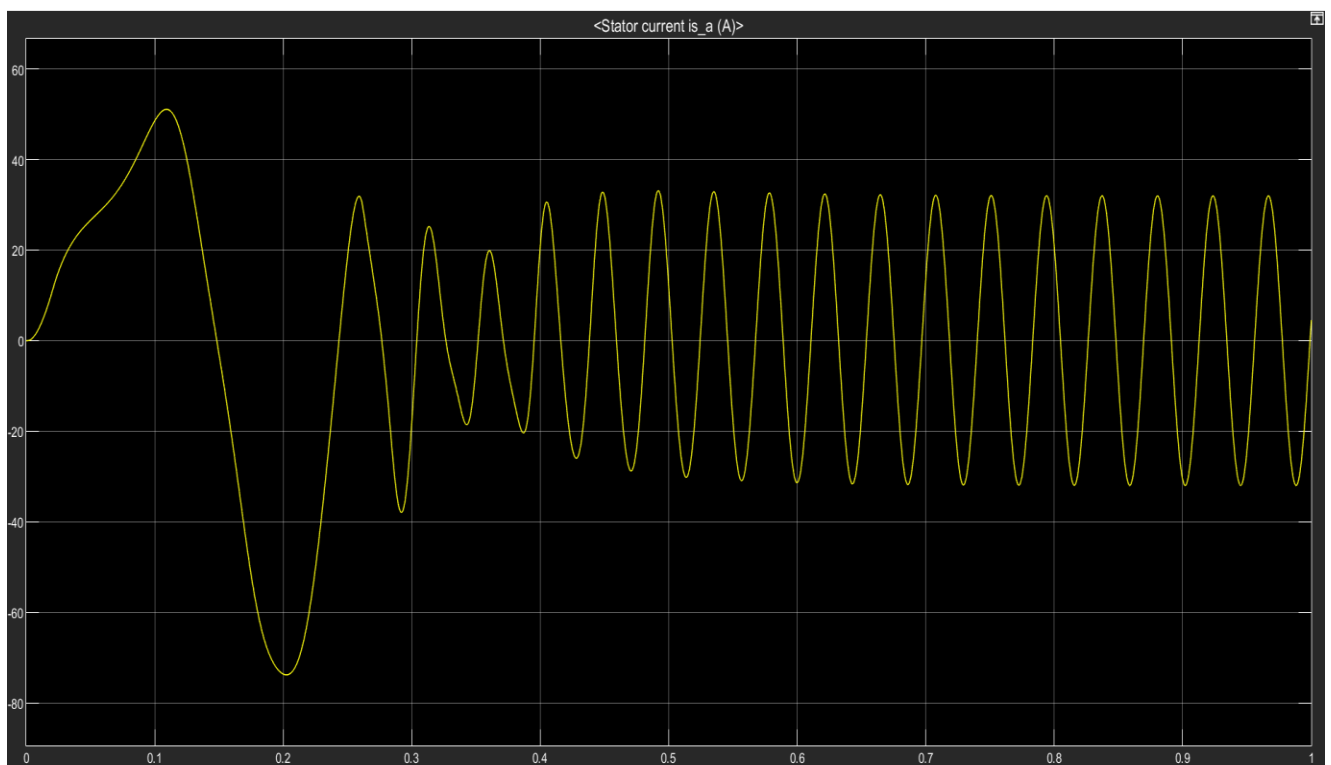


Figura 9: andamento corrente statorica

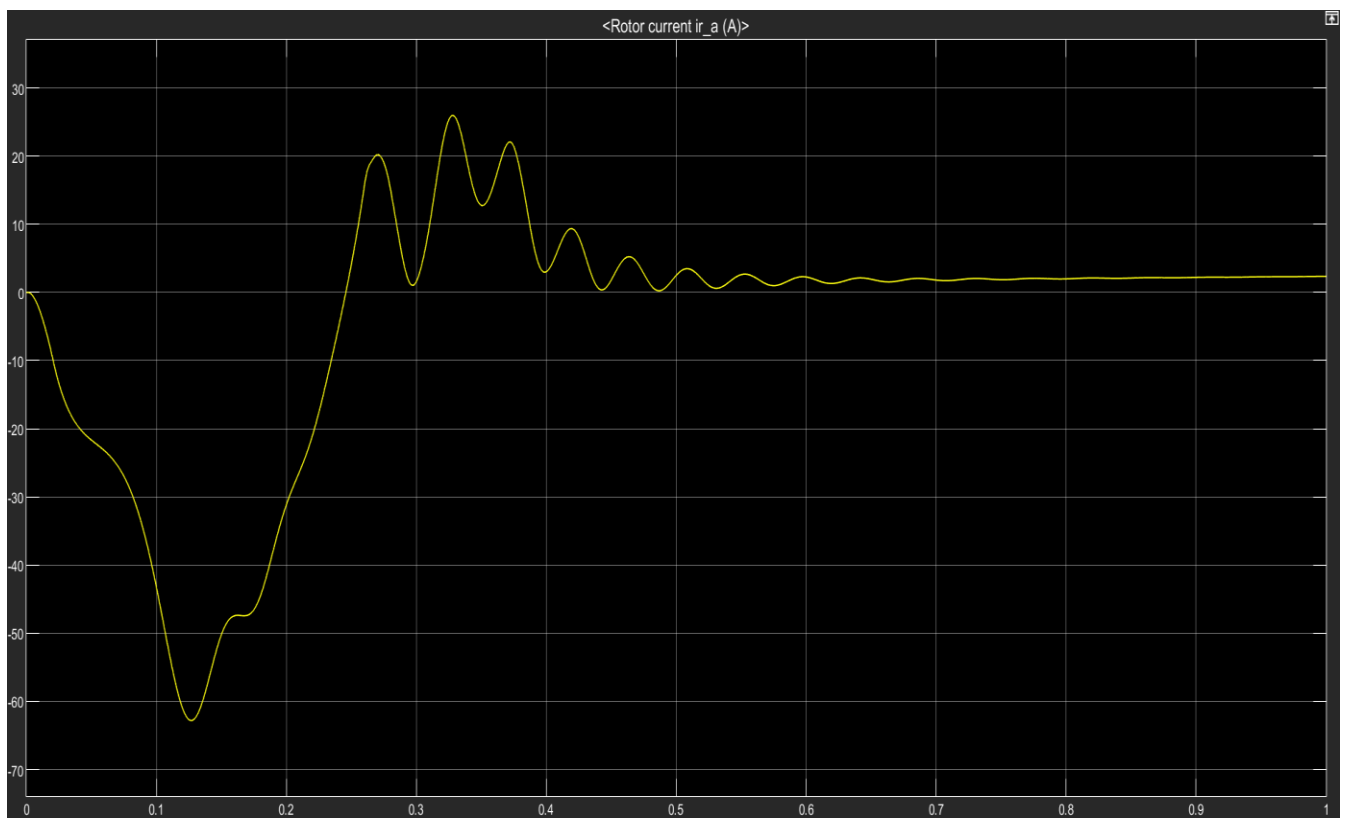


Figura 10: andamento corrente rotorica

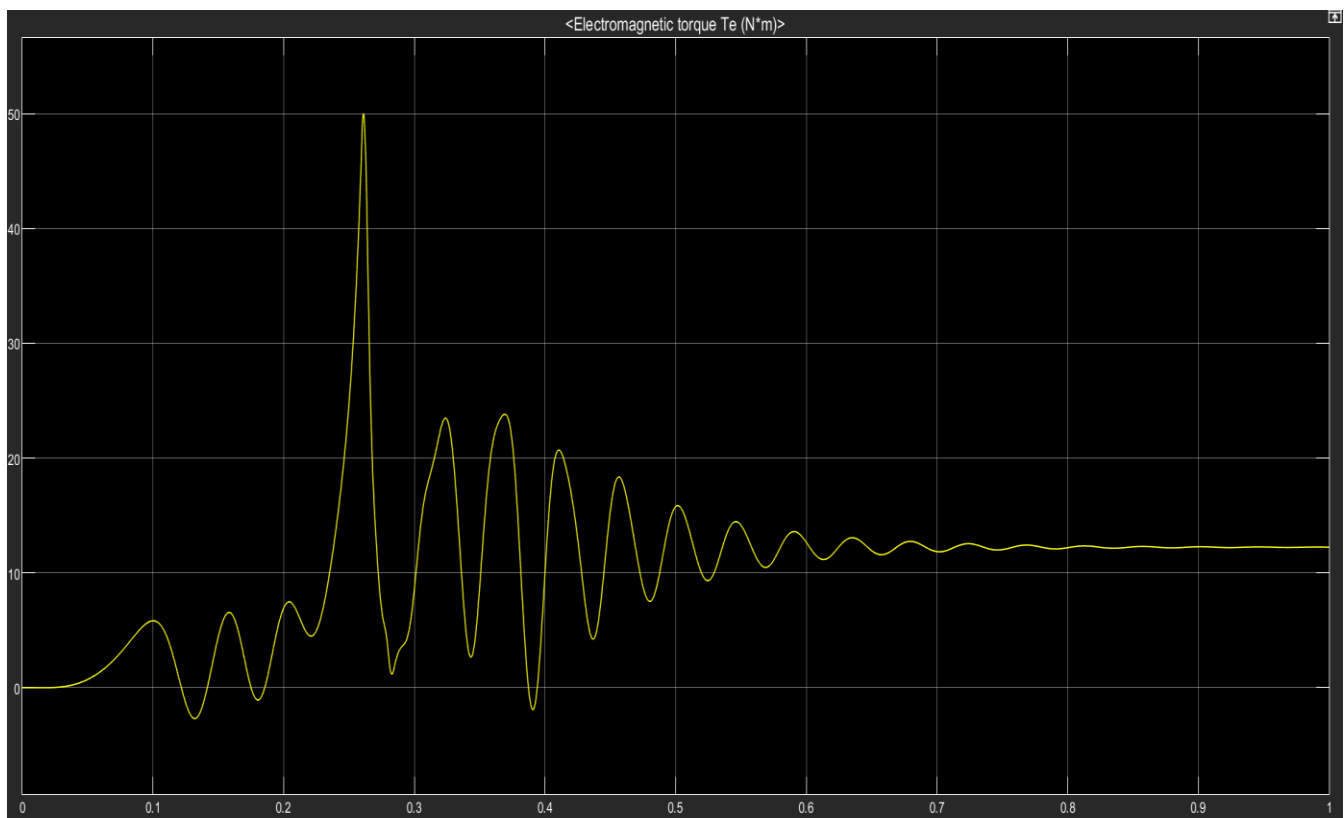


Figura 11: andamento coppia motrice