

Progetto di Azionamenti e Reti Elettriche (9 CFU)

Sessione estiva - a.a. 2019/20

Si consideri un azionamento di velocità con motore asincrono a gabbia semplice caratterizzato dai seguenti parametri meccanici:

Coefficiente di attrito $F=0.06$ [kg m²];
Inerzia del motore $J=0.02$ [Nm s];
numero di coppie polari 2;

e dai seguenti parametri elettrici:

Resistenza statorica	$R_s=0.3 \Omega$;
Induttanza statorica	$L_s=0.043$ H;
Resistenza rotorica	$R_r=0.2 \Omega$;
Induttanza rotorica	$L_r=0.04$ H;
Induttanza Magnetizzante	$L_m=0.037$ H;
Tensione nominale	$V_{sn}=200$ V fase-fase;
Corrente statorica nominale	$I_{sn}=70$ A;
Massima corrente statorica	$I_{s_max}=140$ A;
Scorrimento relativo massimo a potenza nominale	$s_{max}=3.8\%$;
Proporzionalità tra ampiezza e frequenza	$K=1.51$;

Caratterizzare l'azionamento di velocità nei tratti a coppia massima costante ed a potenza massima costante.

A tale scopo il progetto dovrà comprendere:

- 1) la determinazione della velocità base Ω_0 (corrispondente alla velocità nominale) e della velocità massima Ω_{max} ;
- 2) la definizione di un sistema di *controllo in frequenza* che tenga conto anche dello scorrimento e permetta l'operatività nei due tratti caratteristici;

Si richiedono le seguenti prove di simulazione:

- 1) Andamento della velocità e delle correnti a regime permanente in corrispondenza ai seguenti punti di lavoro:
 - a) velocità base e potenza nominale
 - b) velocità massima Ω_{max}
- 2) 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 $c_r= 0.00075 \Omega^2$ (occorre adeguare il controllo in modo tale che non vengano superati i limiti di tensione statorica e di massima corrente statorica)

I risultati dovranno essere ottenuti mediante simulazione con Matlab/Simulink/Simscape.

La presente relazione tecnica è stata organizzata in tre parti:

- Nella prima sezione si ha una breve introduzione ai codici Matlab utilizzati per la determinazione del comportamento statico e del controllo in frequenza del motore asincrono;
- Nella seconda sezione, invece, è presentato il modello Simulink utilizzato per eseguire le prove di simulazione, con un breve confronto con lo schema a blocchi esaminato;
- Nella terza sezione, infine, sono presentati i risultati ottenuti.

SEZIONE 1: Introduzione ai codici Matlab

Per eseguire le prove di simulazione e calcolare le grandezze richieste sono stati implementati una serie di codici Matlab in cui, a partire dalla definizione dei dati di progetto in input, sono state in primo luogo determinate le caratteristiche statiche coppia-velocità e corrente statorica-velocità, ed in seguito si è tenuto conto del controllo in frequenza per caratterizzare i tratti a coppia massima costante ed a potenza massima costante.

In questa sezione introduttiva sono riportati i listati Matlab utilizzati ed un breve commento al procedimento adottato.

Script “dati_progetto.m”: questo script è servito per impostare i dati in ingresso e per determinare alcuni parametri importanti in fase di calcolo a regime permanente, come i coefficienti “Ks”, “Kr” e “I” (ovvero σ), e di simulazione tramite Simulink, ovvero le induttanze statoriche e rotoriche di dispersione “Lls” e “Llr” da inserire nel modello equivalente della macchina asincrona esaminato.

```
%% DATI DI PROGETTO %%

clear all
clc

%% Parametri meccanici della macchina asincrona %%

F=0.06; % Coefficiente di attrito, in kg*m^2
J=0.02; % Inerzia del motore, in Nm*s
p=2; % Numero di coppie polari

%% Parametri elettrici della macchina asincrona %%

Rs=0.3; % Resistenza statorica, in ohm
Ls=0.043; % Induttanza statorica, in H

Rr=0.2; % Resistenza rotorica, in ohm
Lr=0.04; % Induttanza rotorica, in H

Lm=0.037; % Induttanza magnetizzante, in H

Vsn=200; % Tensione nominale fase-fase, in V

Isn=70; % Corrente statorica nominale, in A
Ismax=140; % Corrente statorica massima, in A

s_max=0.038; % Scorrimento relativo massimo a potenza nominale
k=1.51; % Proporzionalità tra ampiezza e frequenza

%% Calcolo induttanze di dispersione e impostazione parametri%%

Lls=Ls-Lm; % Induttanza statorica di dispersione, in H
Llr=Lr-Lm; % Induttanza rotorica di dispersione, in H
```

```

Ts=Ls/Rs; % costante di tempo statorica
Tr=Lr/Rr; % costante di tempo rotorica

Ks=Lm/Ls;
Kr=Lm/Lr;
l=1-(Ks*Kr)

```

Script “progetto.m”: in questo script è stato esaminato il comportamento a regime permanente della macchina asincrona. La velocità nominale di rotazione del motore “omega_nom” è stata determinata, secondo quanto suggerito dal testo, come la velocità di rotazione corrispondente alla velocità base di alimentazione elettrica “omega_base_el”, definita come il rapporto tra la tensione statorica nominale “Vsn” ed il fattore di proporzionalità “k”: a tal proposito, è stata risolta l’equazione di 2° grado in “s” che lega la corrente statorica e la tensione statorica, considerando come parametri i valori di “a”, “b”, “k1”, “k2”, “k3” calcolati in corrispondenza della velocità base “omega_base_el”.

```

%% COMPORTAMENTO STATICO DEL MOTORE ASINCRONO %%

clear all
clc

dati_progetto;

%% calcolo velocità base nominale = velocità nominale %%

omega_base_el=(Vsn/k); % Velocità nominale elettrica di alimentazione = velocità base, in rad/s

%% Impostazione parametri %%

k1=(p*Ks*(Ts^2)*Tr*(1-l)*omega_base_el)/(Lm*(1+((Ts^2)*(omega_base_el^2))));
a=(2*Ts*Tr*(1-l)*(omega_base_el^2))/(1+((Ts^2)*(omega_base_el^2)));

b=((Tr^2)*(1+((Ts^2)*(l^2)*(omega_base_el^2)))*(omega_base_el^2))/(1+((Ts^2)*(omega_base_el^2)));

k2=(Ts^2)/((Ls^2)*(1+((Ts^2)*(omega_base_el^2))));
k3=k2*(Tr^2)*(omega_base_el^2);

%% Calcolo velocità %%

s_rov=1/sqrt(b); % scorrimento di rovesciamento, dipende solo dai parametri elettrici della macchina
                % e dalla velocità di alimentazione

vel_rovesciamento=(1-s_rov)*omega_base_el; % Velocità di rotazione del motore di rovesciamento, in rad/s

%Conoscendo corrente statorica nominale e tensione statorica nominale,
%posso trovare lo scorrimento relativo nominale

A1=(b*(Isn^2)/(Vsn^2))-k3;
B1=a*(Isn^2)/(Vsn^2);
C1=((Isn^2)/(Vsn^2))-k2;

coefficienti=[A1,B1,C1]; % vettore con i coefficienti dell'eq. di II grado
snom_coeff=roots(coefficienti); % vettore soluzione dell'eq. di II grado
snom=snom_coeff(snom_coeff>0); % valore positivo dello scorrimento nominale

omega_nom=(1-snom)*omega_base_el; % velocità di rotazione nominale

% % parametro Delta per il calcolo delle potenze in corrispondenza dello
% % scorrimento nominale

```

```

D=Lm*(1+((Ts^2)*(omega_base_el^2)))+(2*Ts*Tr*(1-
1)*(omega_base_el^2)*snom)+(((Tr^2)*(omega_base_el^2))*(1+((1^2)*(Ts^2)*(omega_base_el^2))
)*(snom^2)));

%% Caratteristiche statica coppia velocità %%

s=(0:0.0001:1); % vettore scorrimento relativo
omega=(1-s).*omega_base_el; % relazione tra velocità, velocità di alimentazione e
scorrimento relativo
C=(k1.*s.*(Vsn.^2))./(1+(a.*s)+(b.*(s.^2))); % Andamento della coppia elettromagnetica

% Valori di coppia elettromagnetica principali

coppia_nom=(k1*snom*(Vsn^2))./(1+(a*snom)+(b*(snom^2))); % coppia nominale di lavoro

coppia_massima=(k1*Vsn^2)/(a+(2*sqrt(b))); % coppia massima

coppia_massima_grafico=max(C); % verifica sul valore massimo di coppia

coppia_spunto=(k1*(Vsn^2))./(1+(a)+(b)); % coppia di spunto

% Grafico Coppia-Scorrimento relativo

subplot(2,2,3);
plot(s,C,'Color','black')
xlabel('Scorrimento relativo s')
ylabel('Coppia C, [Nm]')
set ( gca, 'xdir', 'reverse' )
grid on

% Grafico Coppia-Velocità

subplot(2,2,1);
plot(omega,C,'Color','black')
xlabel('Velocità omega, [rad/s]')
ylabel('Coppia C, [Nm]')
grid on

%% Caratteristica statica corrente statorica-velocità %%

Is=Vsn.*sqrt((k2+(k3.*(s.^2)))./(1+(a.*s)+(b*(s.^2))));

% Grafico Corrente statorica-Scorrimento

subplot(2,2,4);
plot(s,Is,'Color','black')
xlabel('Scorrimento relativo s')
ylabel('Corrente statorica Is, [A]')
set ( gca, 'xdir', 'reverse' )
grid on

% Grafico Corrente statorica-Velocità

subplot(2,2,2);
plot(omega,Is,'Color','black')
xlabel('Velocità omega, [rad/s]')
ylabel('Corrente statorica Is, [A]')
grid on

Is_nom_verifica=Vsn*sqrt((k2+(k3*(snom^2)))./(1+(a*snom)+(b*(snom^2)))) % verifica sul
valore della corrente statorica nominale

% Vettori rappresentativi principali

rovesciamento=[s_rov ; vel_rovesciamento ; coppia_massima]; % punto di rovesciamento
[s,omega,coppia]

```

```

nom=[snom;omega_nom;coppia_nom]; % punto nominale di funzionamento [s,omega,coppia]

%% Calcolo potenze in condizioni nominali%%

Pa= ((Ks*Ts*(1+(Ts*Tr*(1-
1)*(omega_base_el^2)*snom)))+(Tr^2)*(omega_base_el^2)*(snom^2)))/D)*(Vsn^2); % potenza
elettrica assorbita, in W

Pt=(1/p)*coppia_nom*omega_base_el; % potenza trasmessa dallo statore al rotore, in W

format short

Pnom=coppia_nom*omega_nom/p % potenza nominale = potenza nominale meccanica, in W

%Pm1=Pt*(1-snom) % verifica sulla potenza nominale

%% Calcolo velocità massima di alimentazione %%

vel_a_max=omega_base_el*(coppia_massima/coppia_nom) % Velocità massima di alimentazione,
in [rad/s]

```

Script “reg_frequenza.m”: attraverso questo codice, infine, è stato ottenuto l’andamento delle caratteristiche statiche coppia-velocità e corrente statorica-velocità al variare della velocità di alimentazione elettrica; per far ciò, è stato messo in evidenza il comportamento del motore nelle zone di funzionamento a coppia massima costante (I tratto) e potenza massima costante (II tratto), andando a considerare come valore massimo della tensione statorica proprio il valore nominale $V_{sn}=200$ V di tale grandezza. Il valore della velocità minima è stato preso arbitrariamente pari a 5 rad/s, mentre la velocità massima di alimentazione era stata determinata nello script precedente come il prodotto tra la velocità nominale (base) di alimentazione ed il rapporto tra coppia massima e coppia nominale.

```

%% CONTROLLO IN FREQUENZA DEL MOTORE ASINCRONO %%

clear
clc

progetto;

%% Tratto a coppia costante [velocità "minima";velocità base] %%
% Grafico coppia-velocità

format short e
omega_a_coppia_costante=linspace(5,omega_base_el,10); % vettore riga delle
velocità di alimentazione, in rad/s
VsI=k.*omega_a_coppia_costante; % vettore riga delle tensioni statoriche, in V

k1_I=(p.*Ks.*(Ts.^2).*Tr.*(1-
1).*omega_a_coppia_costante)./(Lm.*(1+((Ts.^2).*omega_a_coppia_costante.^2)));
% vettore riga
a_I=(2.*Ts.*Tr.*(1-
1).*omega_a_coppia_costante.^2))./(1+((Ts.^2).*omega_a_coppia_costante.^2)); %
vettore riga
b_I=((Tr.^2).*(1+((Ts.^2).*(1.^2).*omega_a_coppia_costante.^2)).*(omega_a_coppi
a_costante.^2))./(1+((Ts.^2).*omega_a_coppia_costante.^2)); % vettore riga

k2_I=(Ts.^2)./((Ls.^2).*(1+((Ts.^2).*omega_a_coppia_costante.^2)));
k3_I=k2.*(Tr.^2).*omega_a_coppia_costante.^2;

% Grafico Coppia-Velocità
s=[0:0.001:1]'; % vettore colonna scorrimento relativo

```

```

omega_coppia_costante=(1-s)*omega_a_coppia_costante; % matrice per la velocità di
rotazione del rotore

C_I=(k1_I.*s.*(VsI.^2))./(1+(a_I.*s)+(b_I.*(s.^2))); % matrice per la coppia
elettromagnetica

format short
C_max=(p.*(1-l).*(k.^2))./(2.*l.*Ls);

subplot(2,2,1)
coppia_I=plot(omega_coppia_costante,C_I);
xlabel('Velocità di rotazione omega, [rad/s]')
ylabel('Coppia C, [Nm]')
title('Coppia massima costante')
grid
legend('5.0000 rad/s = \Omega_{minima}','19.1611 rad/s','33.3223 rad/s','47.4834
rad/s','61.6445 rad/s','75.8057 rad/s','89.9669 rad/s','104.1280 rad/s','118.2892
rad/s','132.4503 rad/s = \Omega_{base}','Location','westoutside')

%%% Assunzione: Vsmax=Vsn %%%

format short
C_max=(p.*(1-l).*(k.^2))./(2.*l.*Ls)

% Grafico corrente-velocità

Is_I=VsI.*sqrt((k2+(k3.*(s.^2)))./(1+(a.*s)+(b.*(s.^2))));

subplot(2,2,2)
corrente_I=plot(omega_coppia_costante,Is_I);
xlabel('Velocità di rotazione omega, [rad/s]')
ylabel('Corrente statorica Is, [Nm]')
title('Coppia massima costante')
grid

%% Tratto a potenza costante [velocità base;velocità massima] %%

omega_a_potenza_costante=linspace(omega_base_el,vel_a_max,6); % vettore riga
delle velocità di alimentazione, in rad/s
VsII=Vsn; % la tensione statorica è bloccata al valore massimo = Vsn

k1_II=(p.*Ks.*(Ts.^2).*Tr.*(1-
l).*omega_a_potenza_costante)./(Lm.*(1+((Ts.^2).*(omega_a_potenza_costante.^2))))
; % vettore riga
a_II=(2.*Ts.*Tr.*(1-
l).*(omega_a_potenza_costante.^2))./(1+((Ts.^2).*(omega_a_potenza_costante.^2)));
% vettore riga
b_II=((Tr.^2).*(1+((Ts.^2).*(1.^2).*(omega_a_potenza_costante.^2))).*(omega_a_pot
enza_costante.^2))./(1+((Ts.^2).*(omega_a_potenza_costante.^2))); % vettore riga

k2_II=(Ts.^2)./(Ls.^2).*(1+((Ts.^2).*(omega_a_potenza_costante.^2)));
k3_II=k2_II.*(Tr.^2).*(omega_a_potenza_costante.^2);

omega_potenza_costante=(1-s)*omega_a_potenza_costante; % matrice per la velocità
di rotazione del rotore

C_II=(k1_II.*s.*(Vsn.^2))./(1+(a_II.*s)+(b_II.*(s.^2))); % Andamento della coppia
nel tratto a potenza max costante

subplot(2,2,3)

```

```

coppia_II=plot(omega_potenza_costante,C_II);
xlabel('Velocità di rotazione omega, [rad/s]')
ylabel('Coppia C, [Nm]')
title('Potenza massima costante')
grid
legend('132.4503 rad/s = \Omega_{base}','140.0763 rad/s','147.7022
rad/s','155.3282 rad/s','162.9542 rad/s','170.5801 rad/s =
\Omega_{max}','Location','westoutside')

Is_II=Vsn.*sqrt((k2_II+(k3_II.*(s.^2))./(1+(a_II.*s)+(b_II.*(s.^2))))); %
Andamento della corrente statorica nel tratto a potenza max costante

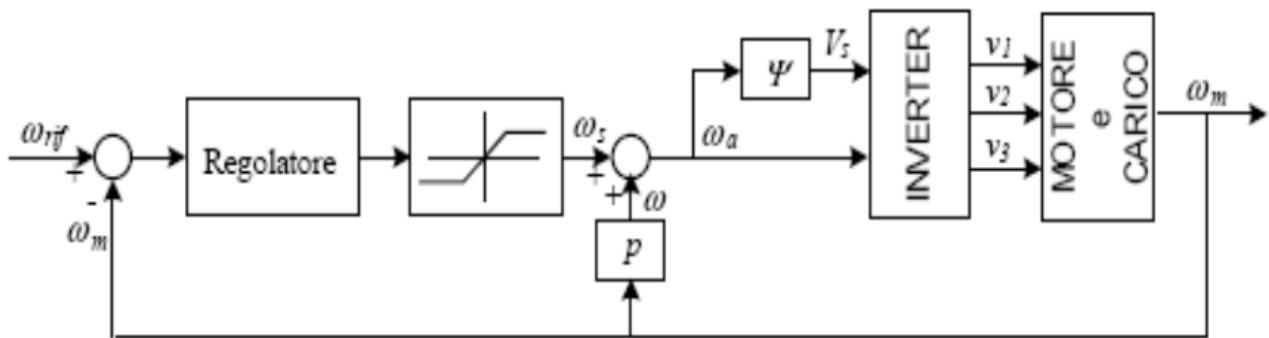
subplot(2,2,4)
corrente_II=plot(omega_potenza_costante,Is_II);
xlabel('Velocità di rotazione omega, [rad/s]')
ylabel('Corrente statorica Is, [Nm]')
title('Potenza massima costante')
grid

```

SEZIONE 2: Modello Simulink

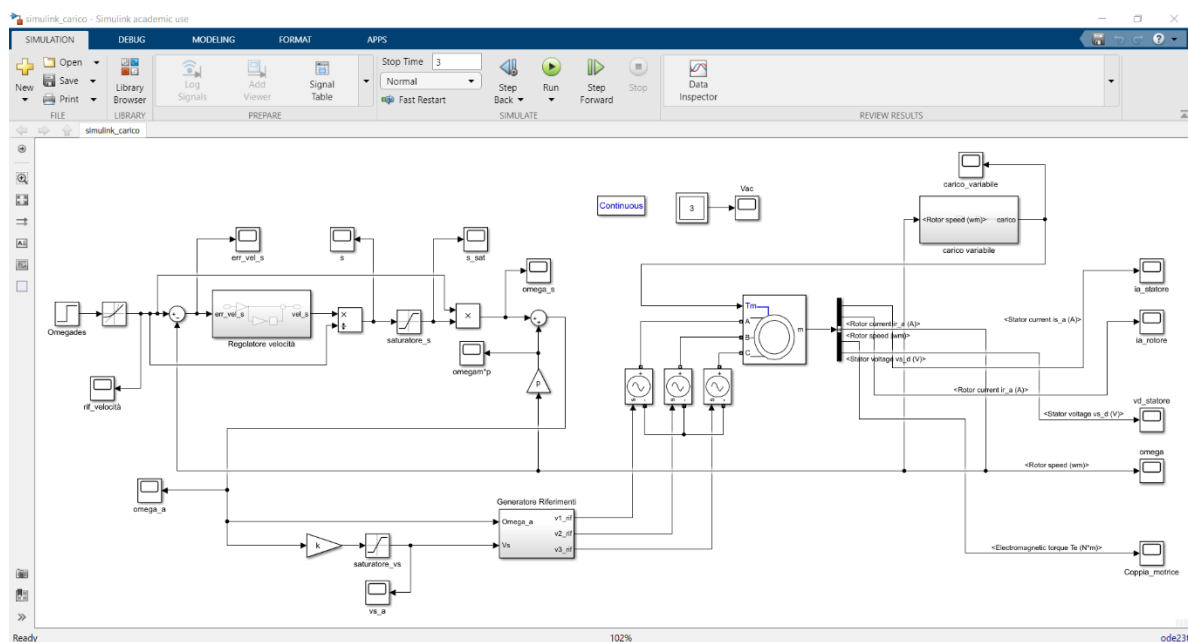
Per simulare il comportamento del motore asincrono soggetto alle condizioni di funzionamento richieste dal progetto, è stato implementato un modello Simulink necessario per la definizione di un sistema di controllo in frequenza che tenesse anche conto del valore dello scorrimento relativo massimo proposto.

Lo schema a blocchi di partenza, esaminato per produrre il modello Simulink, è quello relativo ad un controllo di scorrimento avente come variabile di controllo la pulsazione di scorrimento, in cui il regolatore PI ha in ingresso l'errore sulla velocità di rotazione ed in uscita il valore della pulsazione di scorrimento:



Questo schema è stato quindi adattato alle caratteristiche del progetto in esame, avente tra le specifiche di progetto il valore dello scorrimento relativo massimo a potenza nominale: per questo motivo, il modello Simulink (qui illustrato nella sua versione valida in presenza del carico) presenta un blocco di saturazione sul valore che lo scorrimento relativo può assumere, ottenuto attraverso un semplice blocco di divisione ed uno moltiplicativo, che esprimono la relazione:

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



Alcune osservazioni sul modello:

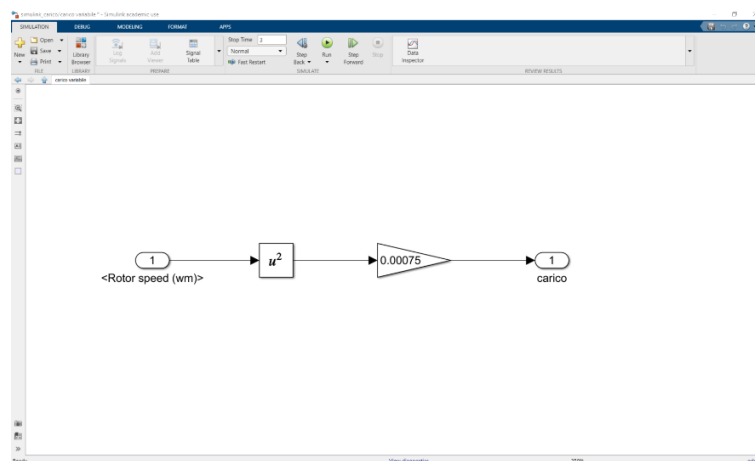
- La pendenza del riferimento della velocità desiderata è stata limitata per ridurre l'assorbimento di corrente all'avvio;
- I parametri del regolatore PI di velocità sono stati ottenuti attraverso una campagna sperimentale, eseguita a partire da un $K_p=1$ ed un $K_i=0$ e mantenendo costanti i valori inseriti nei blocchi di saturazione, fino ad arrivare alla convergenza del valore di velocità di rotazione del motore al riferimento desiderato; i valori ottenuti sono stati quindi mantenuti costanti nell'esecuzione delle prove di simulazione fatte per determinare l'andamento delle velocità e delle correnti a regime permanente in corrispondenza ai punti di lavoro a velocità base e a velocità massima. Qui di seguito, è presentata una sintesi delle prove effettuate per la condizione di carico con riferimento di velocità a gradino, da 0 alla velocità meccanica corrispondente alla velocità massima di alimentazione calcolata come:

$$velocità\ meccanica\ massima = \frac{velocità\ d'alimentazione\ massima}{p} * \frac{coppia\ massima}{coppia\ nominale} = 85.29 \frac{rad}{s}$$

Ki	Ks	$\Omega_{regime}, \frac{rad}{s}$
0	1	84.61
0	1.7	84.88
0.02	1.9	85.50
0.008	1.9	85.28
0.0085	1.9	85.30

0.0083	1.9	85.30
0.0082	1.9	85.29 (STOP)

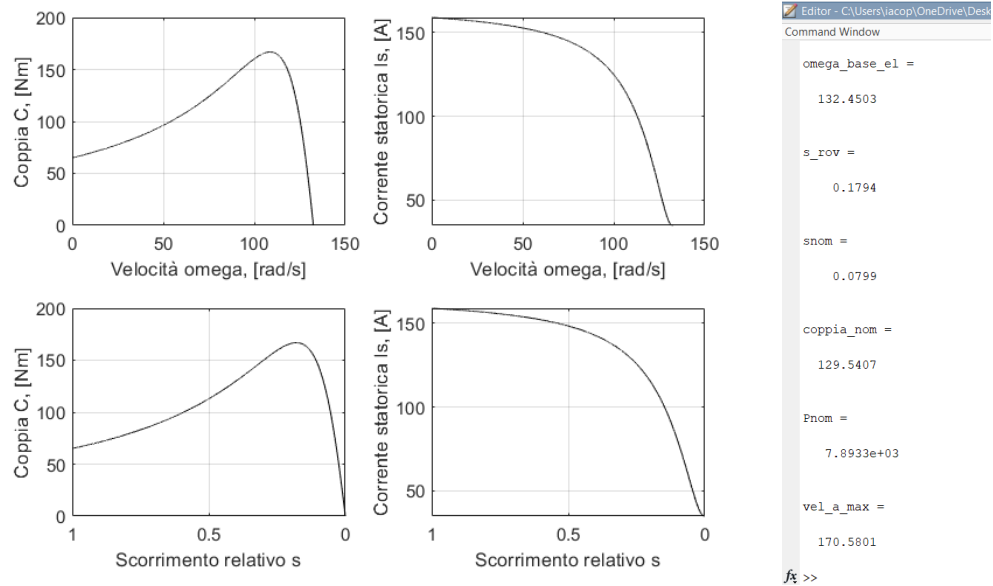
- Il blocco di saturazione dello scorrimento relativo s è stato progettato considerando come limiti superiore ed inferiore il valore massimo dello scorrimento relativo a potenza nominale $s_{\max}=3.8\%$;
- Allo stesso modo, i limiti nel blocco di saturazione della tensione statorica sono stati definiti tramite l'assunzione di una tensione di statore massima pari al suo valore nominale $V_{s\max} = V_{sn} = 200 \text{ V}$;
- I parametri del modello della macchina asincrona sono stati calcolati tramite gli script Matlab introdotti nella sezione precedente;
- Per valutare la risposta del modello ad una variazione a gradino della velocità da 0 ad Ω_{\max} ed a un carico caratterizzato da una coppia resistente variabile con il quadrato della velocità di rotazione del rotore, il modello del carico è stato definito nel seguente modo:



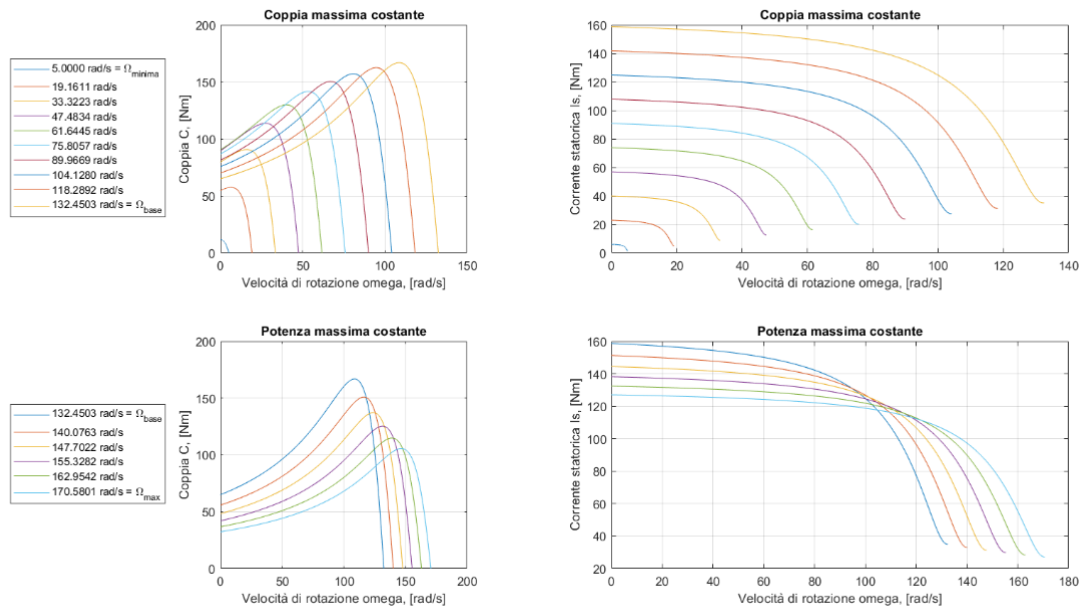
- Attraverso questo controllo sul valore dello scorrimento, è stato verificato tramite i risultati che la tensione statorica e la corrente rotorica non superassero i valori limite proposti dal progetto.

SEZIONE 3: RISULTATI OTTENUTI

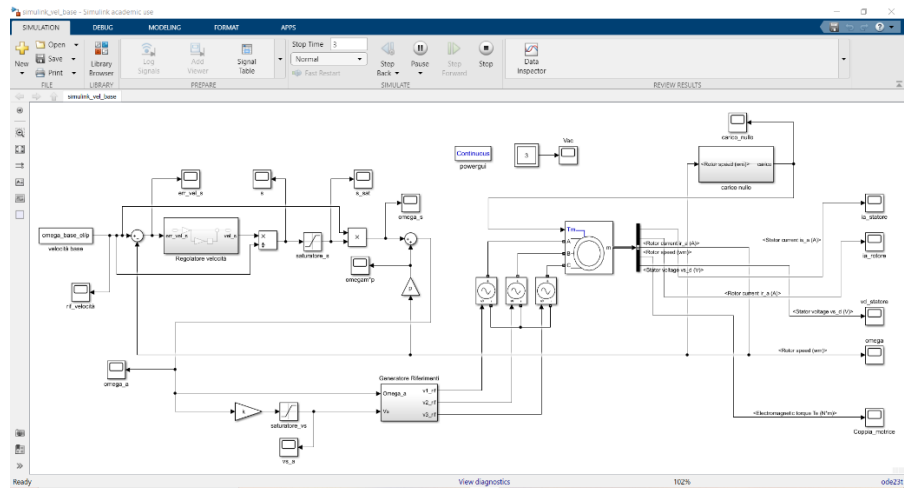
- Caratteristiche statiche coppia-velocità e corrente statorica-velocità e alcuni valori d'interesse, tramite lo script "progetto.m"



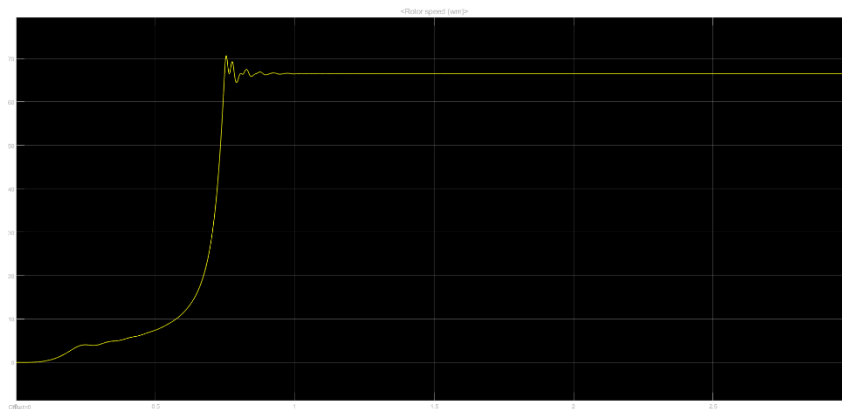
- Controllo in frequenza e distinzione dei tratti caratteristici a coppia massima costante e a potenza massima costante, tramite lo script "reg_frequenza.m"



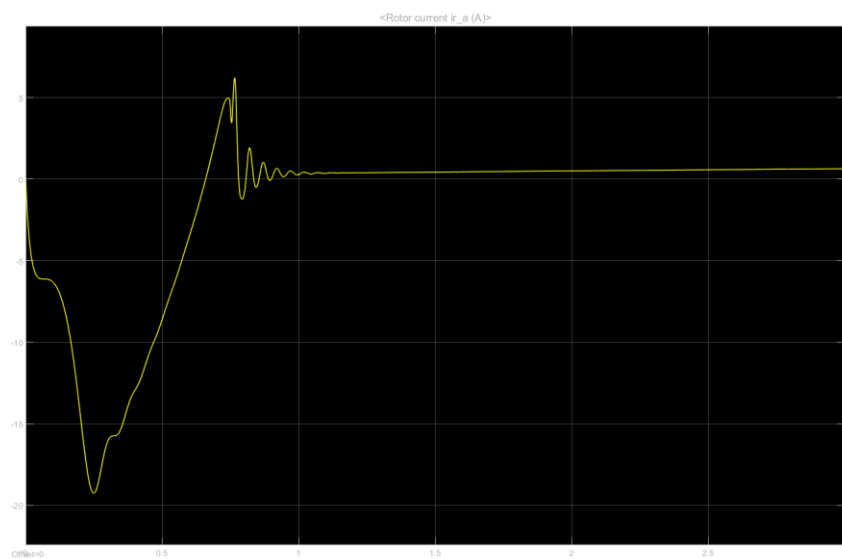
1. Modello Simulink con riferimento costante a velocità base (regime permanente, carico nullo)



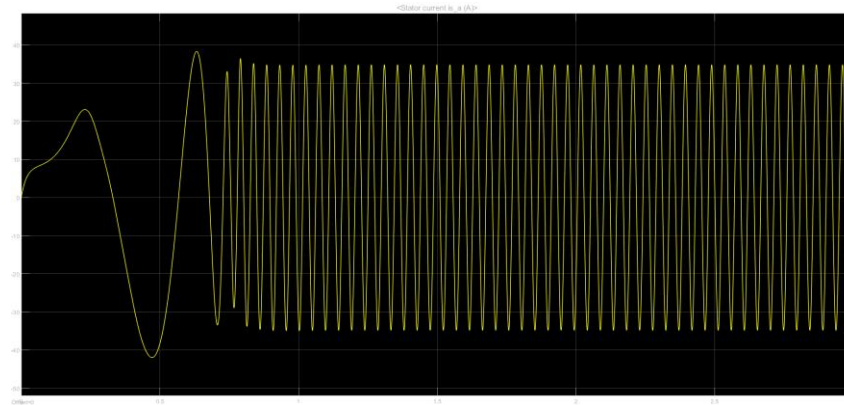
- Velocità di rotazione del motore:



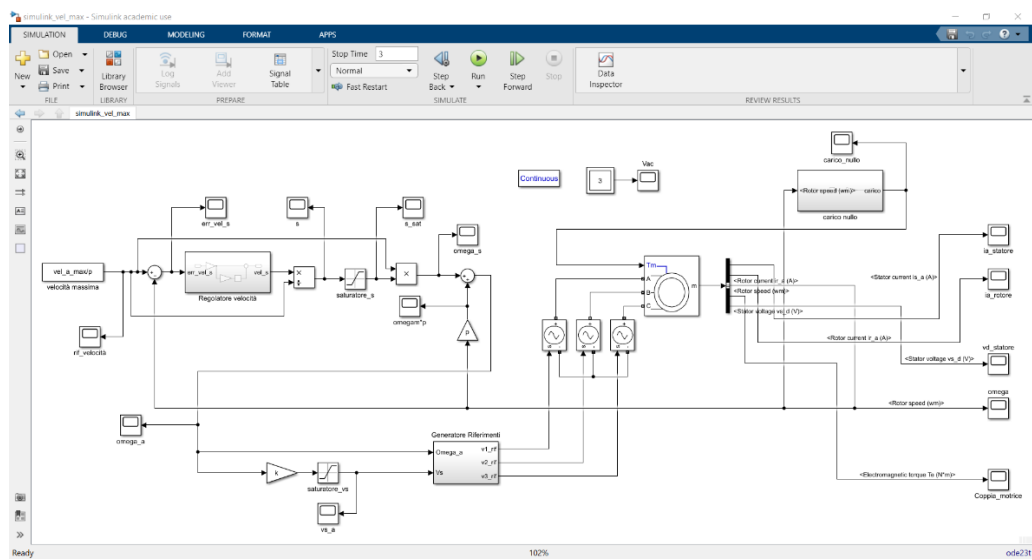
- Corrente rotorica:



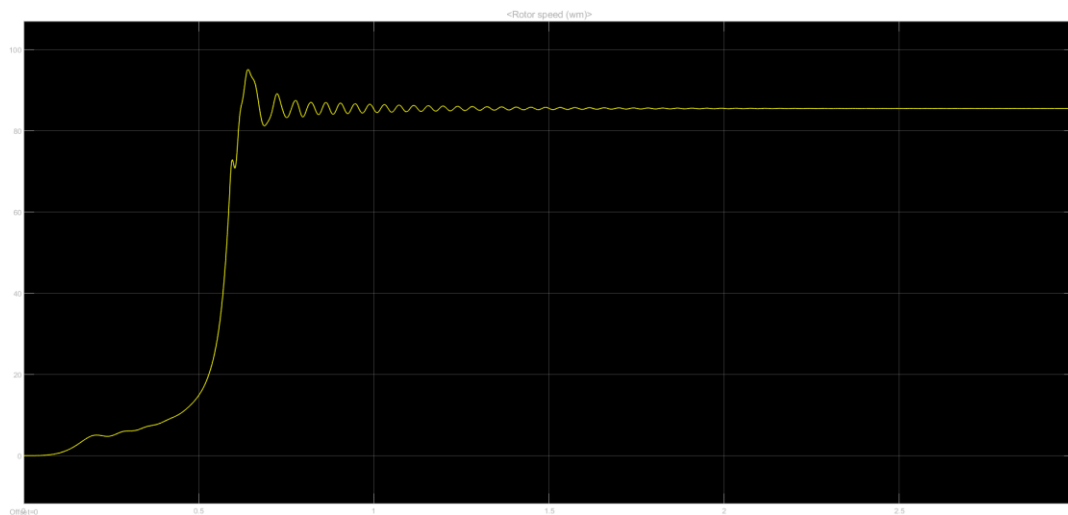
- Corrente statorica:



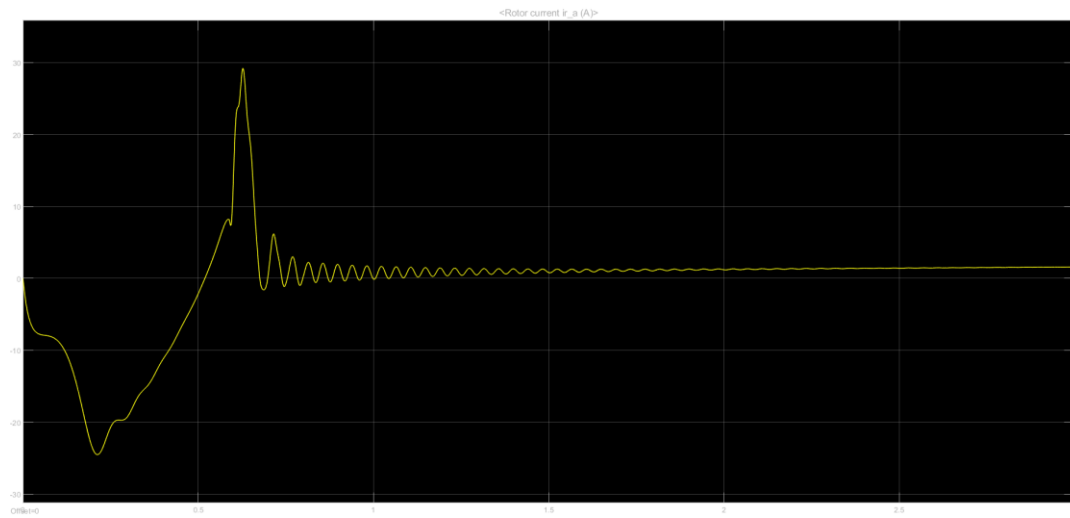
2. Modello Simulink con riferimento costante a velocità massima (regime permanente, carico nullo)



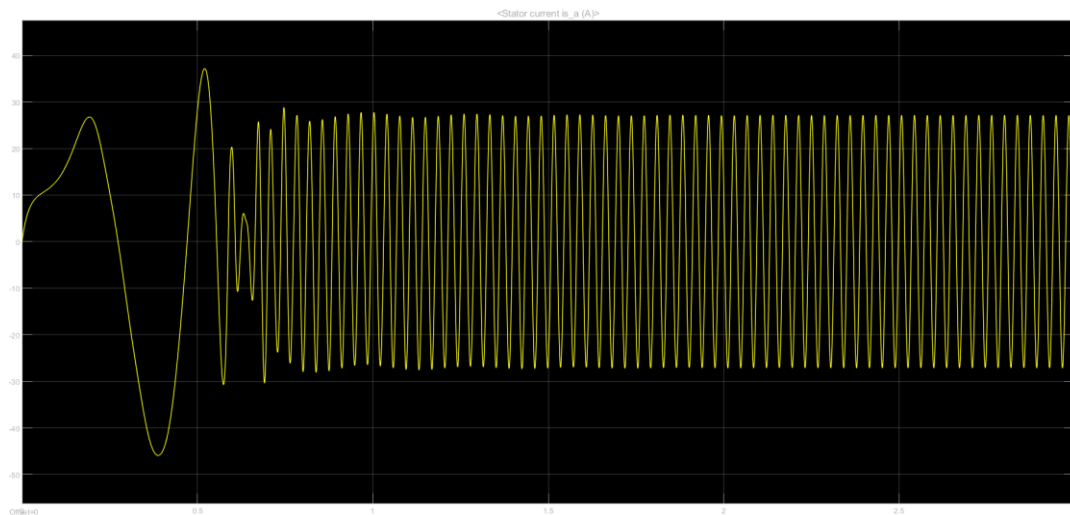
- Velocità di rotazione del motore



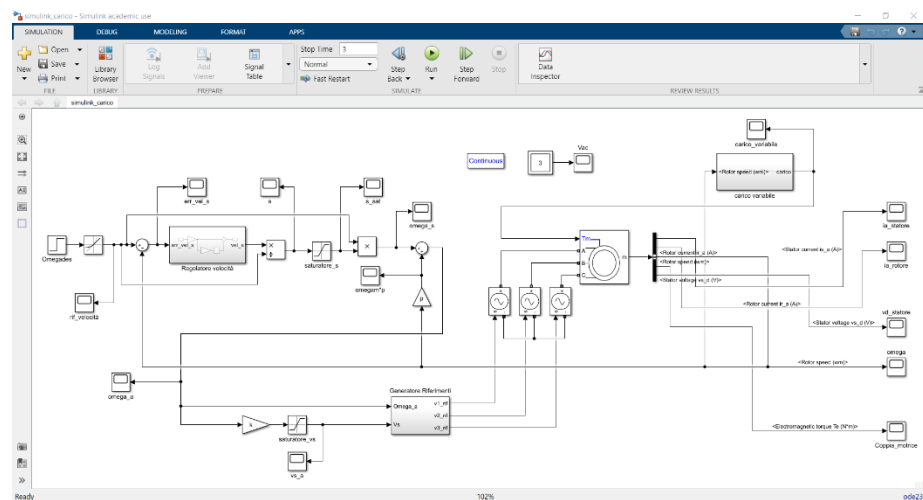
- Corrente rotorica



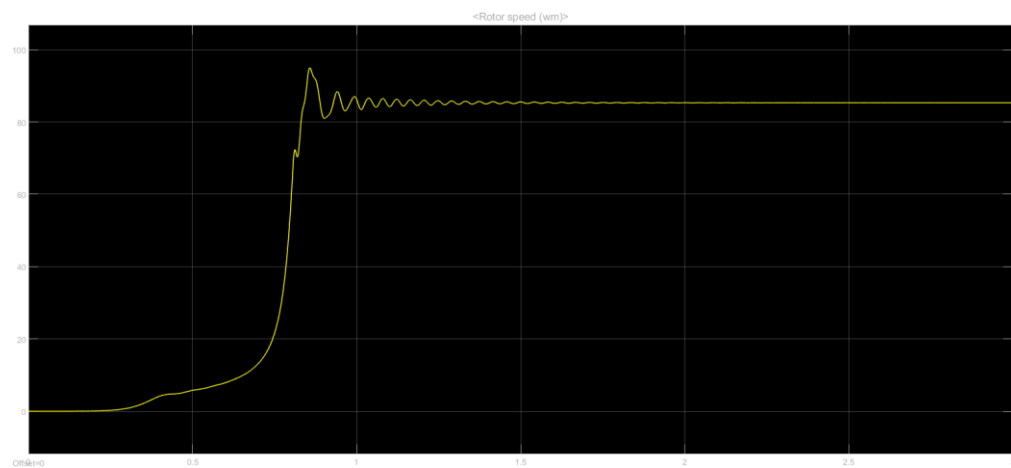
- Corrente statorica



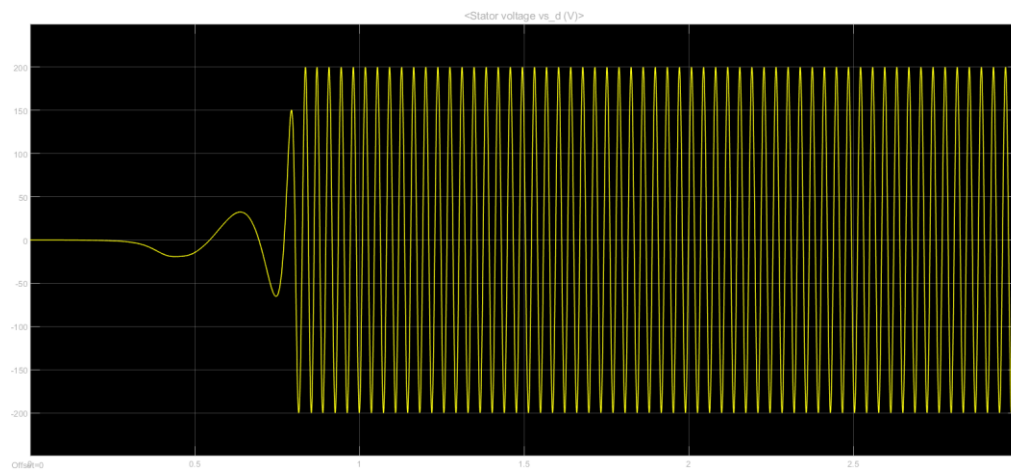
3. Modello Simulink con riferimento di velocità a gradino da 0 a Ω_{\max} ed un carico caratterizzato da una coppia resistente variabile secondo la relazione $C_r = 0.00075 \Omega^2$



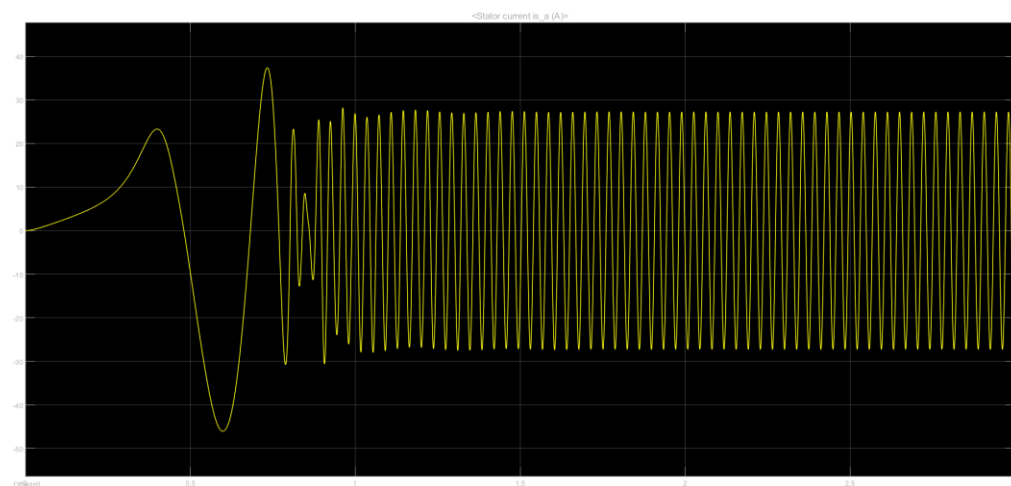
- Velocità di rotazione del motore



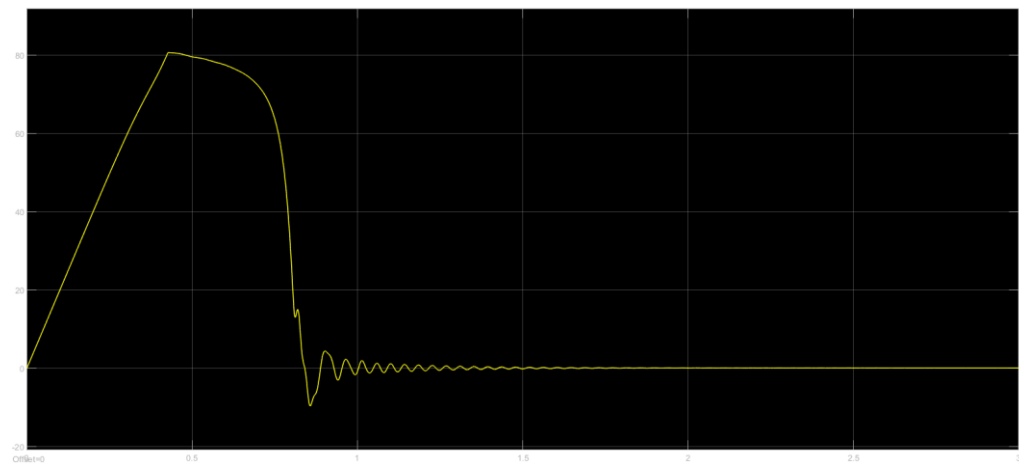
- Tensione statorica



- Corrente statorica



- Errore in ingresso al regolatore di velocità



- Andamento del carico di coppia resistente

