

## Progetto di Elettrotecnica Industriale (6 CFU)

### Sessione estiva - a.a. 2021/2022

Si considerino due motori in corrente continua a magneti permanenti accoppiati meccanicamente sullo stesso albero in maniera ideale, caratterizzati dai seguenti parametri meccanici:

Coefficiente di attrito	$F=0.025 \text{ [kg m}^2/\text{s]};$
Inerzia del motore	$J=0.02 \text{ [kg m}^2];$
costante di coppia	$K_m=0.8 \text{ [Nm/A]};$

e dai seguenti parametri elettrici:

Resistenza di armatura	$R_a=0.5 \text{ } \Omega;$
Induttanza di armatura	$L_a=1.2 \text{ mH};$
Massima Tensione di armatura	$V_{a\_max}=V_{a\_nom}=150 \text{ V};$
Corrente nominale di armatura	$I_{an}=15 \text{ A};$
Massima corrente di picco di armatura	$I_{a\_max}=30 \text{ A};$

Si richiede di determinare le prestazioni dell'azionamento 1 impiegando l'azionamento 2 come un carico meccanico controllato. A tale scopo il progetto dovrà comprendere:

1. Caratterizzare l'azionamento di velocità 1 nel tratto a coppia massima costante considerando un sistema di controllo a catena chiusa della velocità;
2. L'azionamento 2 deve permettere l'impostazione della coppia motrice con riferimento impostabile dall'utente.

Si richiedono le seguenti prove di simulazione:

- a. risposta ad una variazione a gradino della velocità di ampiezza pari alla velocità base  $\Omega'$  considerando un profilo della coppia resistente variabile linearmente con la velocità, imposta dall'azionamento 2 in  $t=0$ ;
- b. risposta dell'azionamento 1 per valori di velocità pari alla metà della omega base in corrispondenza al seguente profilo di coppia resistente  $C_r(t)$ :

$$C_r(t-t_1) = C_n/2 + \sin(\omega_c t)$$

dove  $C_n$  è il valore di coppia nominale dell'azionamento 1 e  $\omega_c = 1 \text{ rad/s}$  e per  $\omega_c = 10 \text{ rad/s}$ ,  $t_1$  istante di applicazione della coppia resistente.

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

La presente relazione tecnica è stata organizzata in tre parti:

1. Nella prima sezione si ha una breve introduzione alle equazioni risolutive utilizzate, dopodiché sono riportati i valori di funzionamento nominale ricavati e le caratteristiche statiche coppia-velocità dell'azionamento 1.
2. Nella seconda sezione, invece, è presentato il modello Simulink utilizzato e i risultati ottenuti nel caratterizzare l'azionamento di velocità alle condizioni di lavoro nominali, nel caso di lavoro a. e nel caso b.
3. Infine nella terza sezione sono presentati gli script Matlab adoperati per definire i parametri meccanici ed elettrici in ingresso nel modello Simulink e per ricavare le grandezze richieste al fine di confronto con i risultati delle simulazioni.

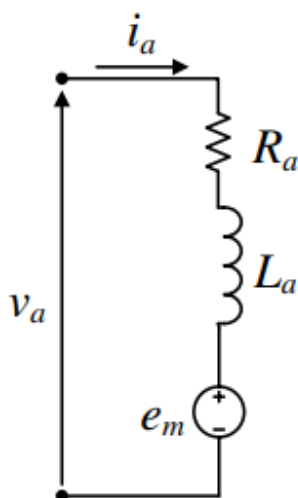
## **DEFINIZIONE DEL MODELLO DEL MOTORE IN C.C. A MAGNETI PERMANENTI**

I motori in cc a magneti permanenti sono privi di avvolgimento di eccitazione, cioè il campo magnetico (e quindi il flusso di eccitazione) è prodotto da magneti permanenti inseriti nella struttura dello statore.

Per caratterizzare l'azionamento di velocità 1, cioè il motore da testare, si è partiti dal definire le equazioni che regolano il funzionamento del modello del motore a magneti permanenti: non essendo, possibile agire sul flusso di eccitazione, l'unica possibilità di controllo consiste nel variare la tensione di armatura; pertanto, impiegando un motore a magneti permanenti, si realizza solo il funzionamento a coppia massima costante.

Si riportano le equazioni utilizzate:

MODELLO DEL CIRCUITO  
EQUIVALENTE D'ARMATURA



$$\begin{cases} V_a = R_a I_a + \frac{\delta \varphi_a}{\delta t} + e_m \\ \varphi_a = L_a I_a + M i_e \end{cases}$$

Nel funzionamento a regime  
permanente, le derivate di  
corrente e velocità sono nulle

$$C_m = K_m I_a, \quad E_m = K_m \Omega, \quad I_a = V_a - \frac{E_m}{R_a}, \quad C_m = K_m \left( \frac{V_a - K_m \Omega}{R_a} \right)$$

$$P_m = C_m \Omega = E_m I_a, \quad C_m = C_c + F \Omega + J \frac{\delta \Omega}{\delta t} = C_c + F \Omega$$

$$V_{a \text{ nom}} = K_m \Omega_{\text{base}}, \quad P_a = V_a I_a, \quad P_m = C_m \Omega, \quad P_d = P_a - P_m$$

Si sono quindi ottenuti, tramite lo script “progetto.m”, i seguenti valori nominali di funzionamento dell’azionamento 1:

#### VALORI DI FUNZIONAMENTO A POTENZA NOMINALE

<b>coppia_nom</b>	12	Nm
<b>Va_nom</b>	150	V
<b>omega_nom</b>	178.125	rad/s
<b>coppia_resistente_nom</b>	7.5469	Nm
<b>omega_base</b>	187.5	rad/s
<b>Pa_nom</b>	2250	W
<b>Pm_nom</b>	2137.5	W
<b>Pd_nom</b>	112.5	W

E le rette statiche al variare della tensione di armatura da 0 al valore nominale, nel tratto a coppia massima costante:

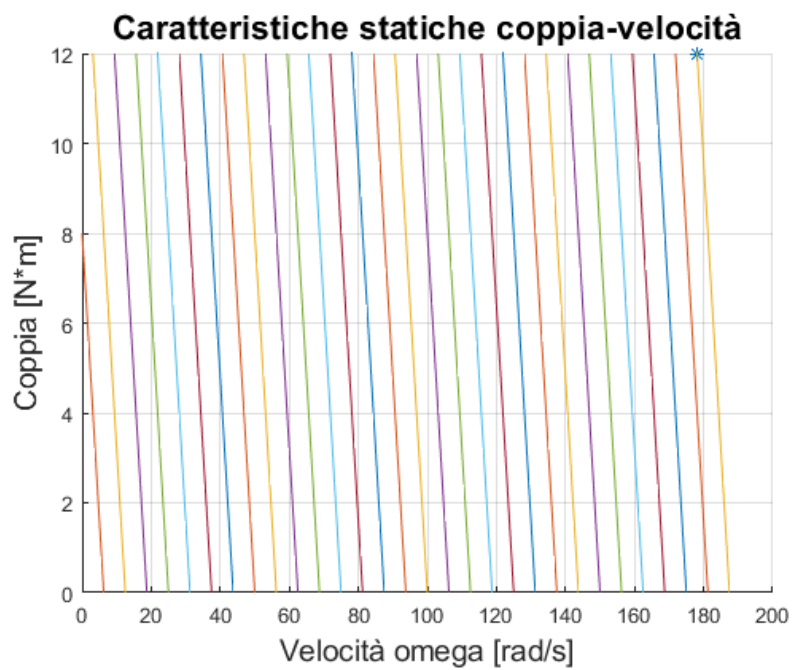


Fig.1.1 Caratteristiche statiche coppia-velocità del motore 1

- In \* è indicato il punto di lavoro nominale.
- Il funzionamento a coppia massima costante si realizza variando la  $V_a$  all’aumentare della  $\omega$  richiesta, ed è possibile fin quando la potenza applicata raggiunge il valore massimo, cioè fino a valori di  $\omega = \omega_{base}$ .

## RISULTATI DELLE SIMULAZIONI

### Modello Simulink per la caratterizzazione nel tratto a coppia massima costante – funzionamento nominale

Per simulare il comportamento dei due azionamenti in corrente continua accoppiati alle condizioni di funzionamento richieste si sono esaminati, come punto di partenza, i due schemi a blocchi sotto riportati:

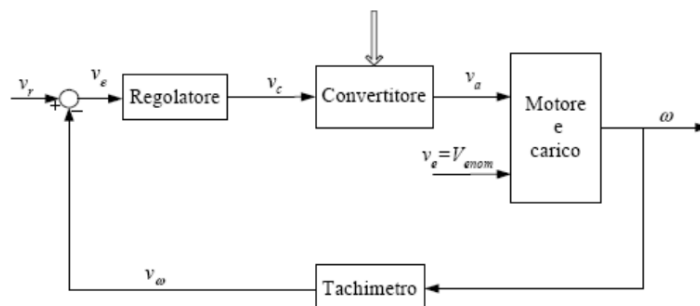


Fig. 1.2 Schema a blocchi di un azionamento di velocità a catena chiusa con comando in velocità

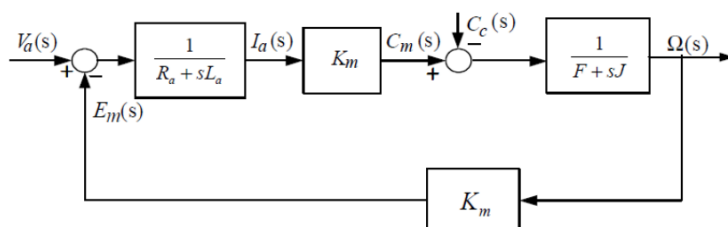
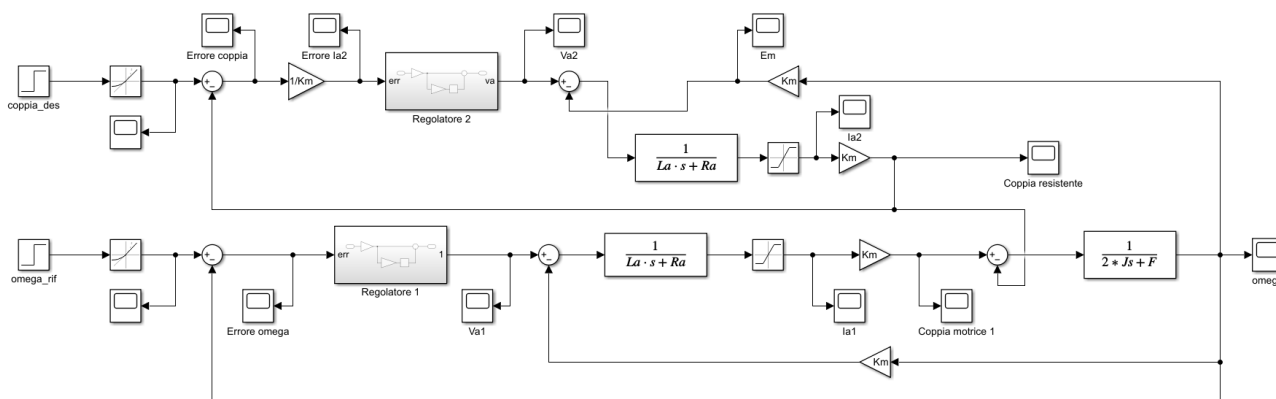


Fig. 1.3 Schema a blocchi del motore a magneti permanenti

Quindi per modellare due motori che agiscono coassialmente sullo stesso albero motore si è inserito, al posto del riferimento di coppia resistente nell'azionamento 1, la coppia motrice generata dal motore 2, cioè del secondo azionamento. In questo modo entrambi i motori applicano la loro coppia motrice sullo stesso carico meccanico, e in particolare si può attribuire al motore 2 il significato fisico di un carico meccanico variabile controllato, dunque il motore 1 è il motore 'test' di cui si vogliono testare le performance.

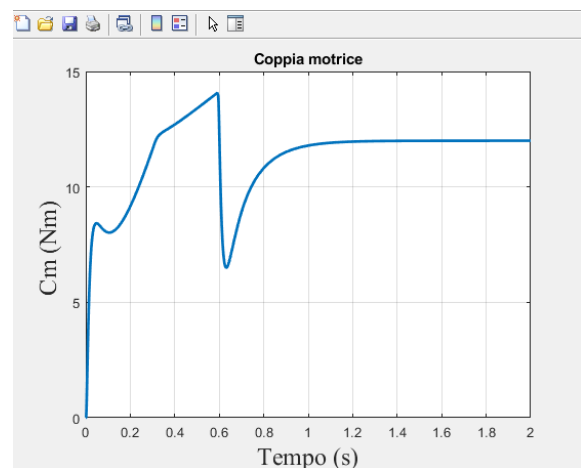
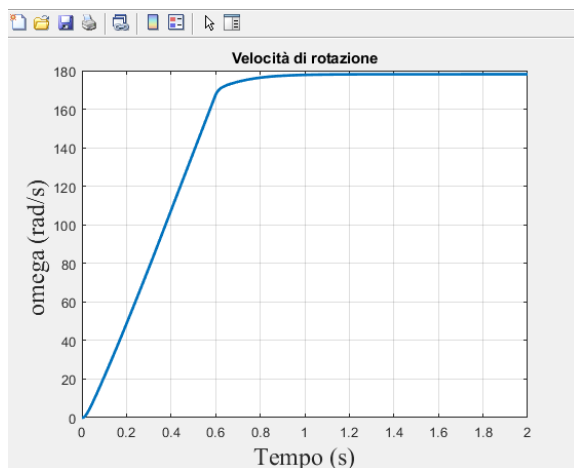


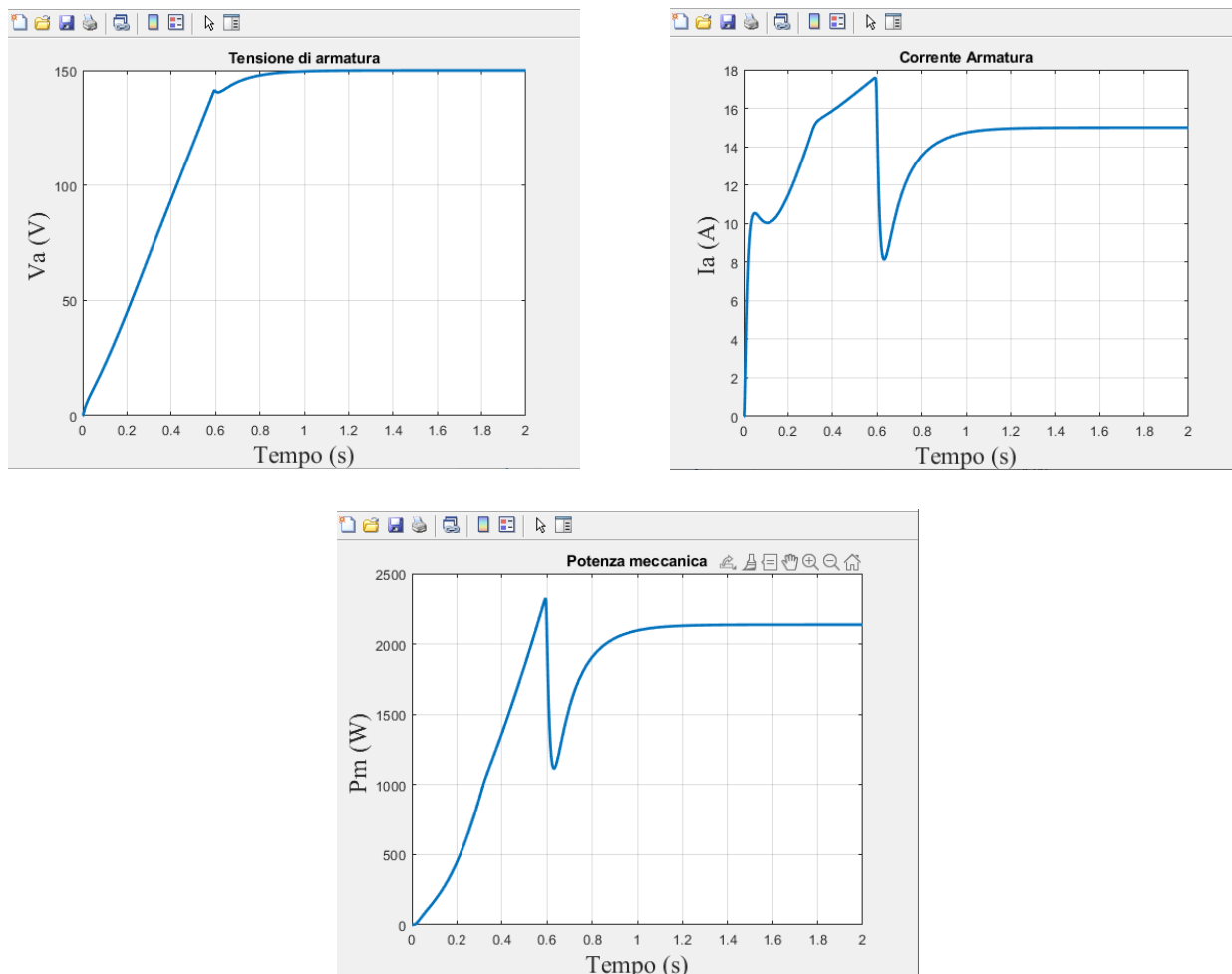
È stato quindi definito il modello Simulink sopra riportato. Ovviamente per poter testare un loop di velocità sul motore 1, l'altro motore deve essere obbligatoriamente controllato in coppia. Il sistema di controllo a catena chiusa della velocità consente di variare la retta statica in tempo reale, in modo da adeguarla alla velocità desiderata → all'aumentare della velocità  $\Omega$  aumenterà anche la  $V_a$ , così si realizzerà il funzionamento a coppia massima costante;

Alcune osservazioni sul modello:

- $\Omega_{rif}$  e  $coppia_{des}$  sono due ingressi a gradino, il primo con valore finale  $\omega_{nom}$  e il secondo  $coppia_{resistente\_nom}$ . L'ingresso di coppia resistente ha un breve ritardo rispetto all'applicazione della  $\omega_{rif}$ ;
- Per quanto detto, il regolatore 1 è un regolatore di velocità, mentre il regolatore 2 è un regolatore di coppia;
- Poiché la corrente di armatura può assumere, a causa di brusche variazioni del riferimento, valori transitori molto elevati, la velocità di variazione dei riferimenti di velocità e di coppia è stata limitata utilizzando dei rate limiter → la limitazione sulla pendenza del riferimento limita la dinamica dell'azionamento;
- Poiché i due motori sono calettati sullo stesso albero, come momento d'inerzia  $J$  del carico si è preso il momento di inerzia complessivo dei due motori, cioè la loro somma  $2J$ ;
- Il limite del blocco di saturazione della corrente d'armatura  $I_{a1}$  e  $I_{a2}$  è stato impostato a  $I_{a\_max}=30$  A, massimo valore di corrente di picco riportato tra i parametri elettrici nei dati di progetto;

Si presentano i risultati ottenuti per l'azionamento 1:





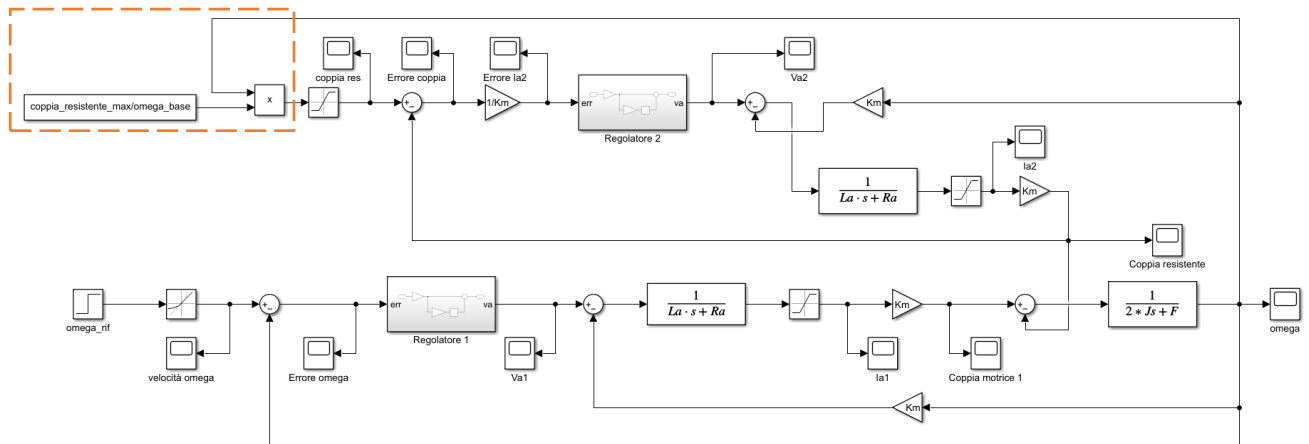
Figg. 1.4 Andamenti di omega, coppia motrice, tensione d'armatura, corrente d'armatura e potenza meccanica ricavati con la simulazione

Si osserva che la velocità segue piuttosto fedelmente il riferimento imposto. La corrente d'armatura presenta sovraelengazioni nel transitorio, che tuttavia non superano mai il valore  $I_{a\_max}$  di 30 A; analogamente la coppia motrice, essendo proporzionale alla corrente d'armatura tramite la costante di coppia. La potenza meccanica presenta un picco non troppo elevato rispetto al valore a regime.

Nei sistemi con singolo anello di controllo, il regolatore P.I. riesce a dare buoni risultati solo se il riferimento di velocità non presenta brusche variazioni, cioè per dinamiche lente.

Inoltre, andamenti bruschi possono essere mitigati ottimizzando i valori  $K_p$  e  $\tau_i$  dei regolatori di velocità e di coppia, in modo che le eventuali oscillazioni non superino i valori a regime. Questo risultato si potrebbe ancora migliorare aggiungendo sull'azionamento 1 un altro regolatore, che funge da anello per il controllo della corrente d'armatura → è un sistema di controllo più complesso (e più costoso dal punto di vista dell'hardware) in quanto necessita anche di un sensore di misura della corrente.

## Modello Simulink – caso 1

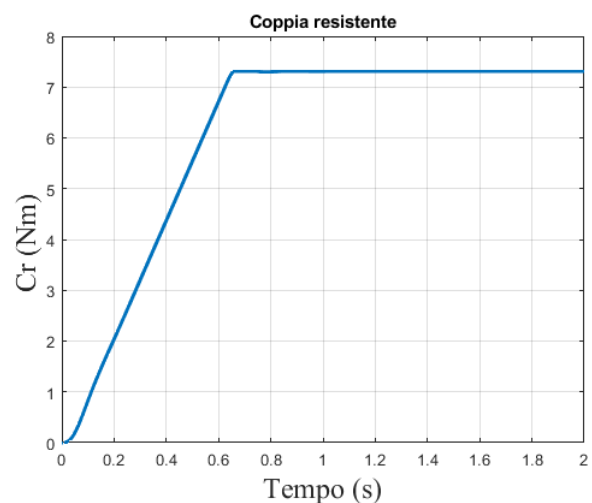
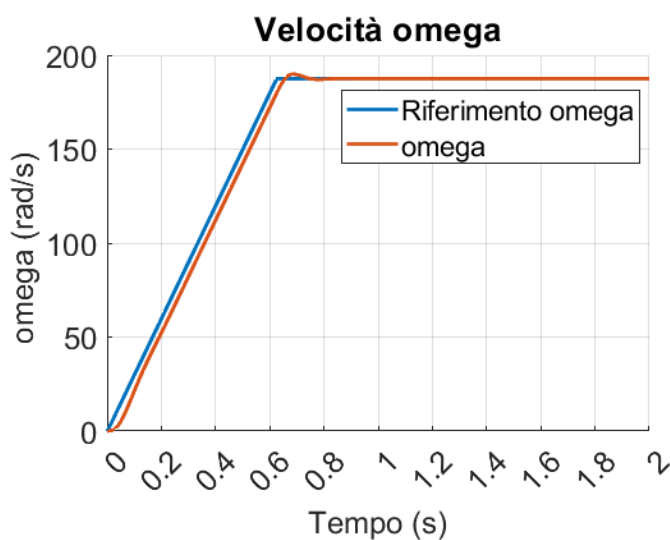


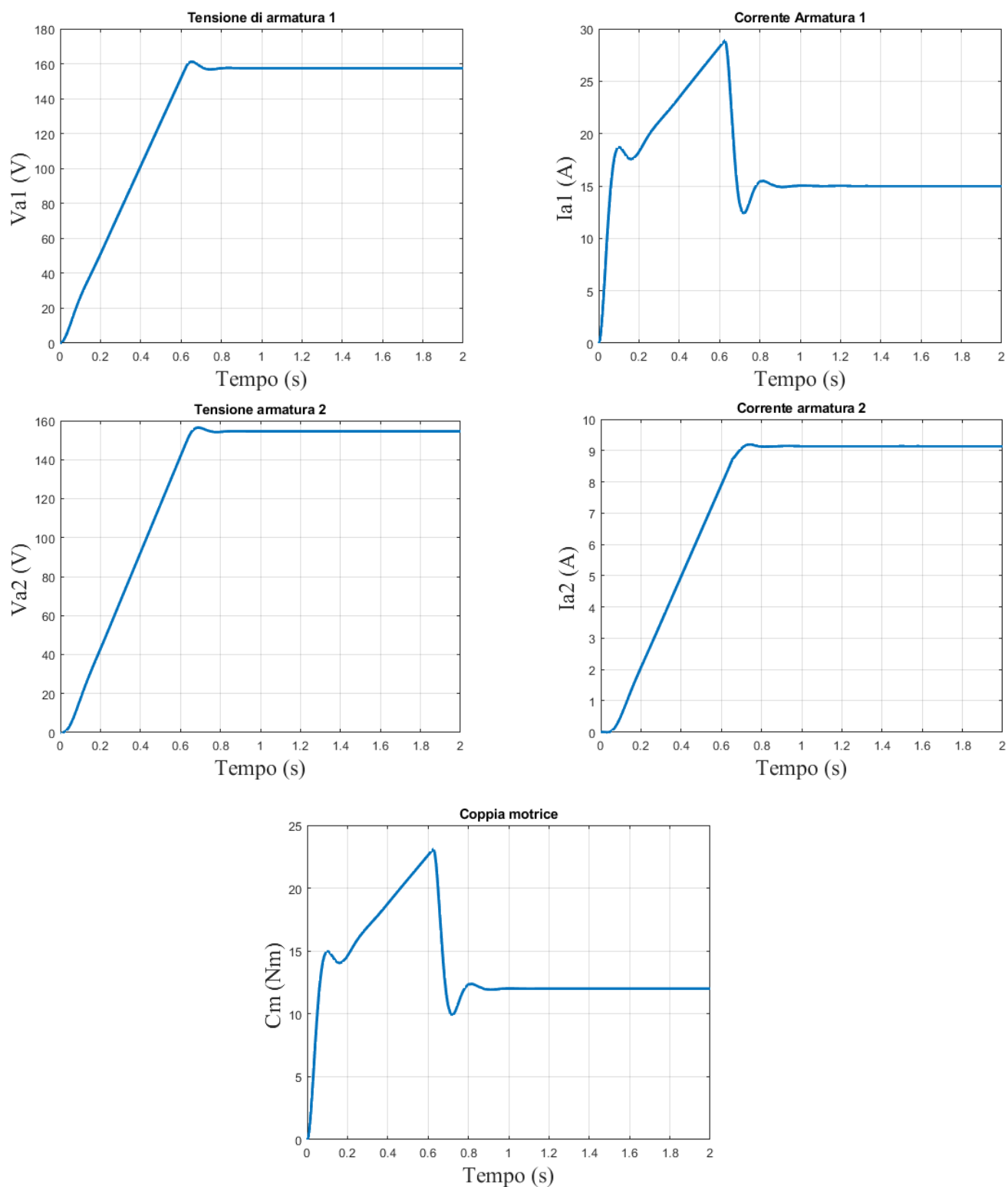
La richiesta era di trovare la risposta in corrispondenza ad una variazione a gradino della velocità di ampiezza pari alla velocità base  $\Omega'$ , e considerando il profilo della coppia resistente variabile linearmente con la velocità, imposta dall'azionamento 2 in  $t=0$ .

Alcune precisazioni sul modello:

- La variazione lineare della coppia resistente con la velocità si è ottenuta scalando il valore attuale della velocità ( $\omega$ ) mediante un opportuno coefficiente, espresso come il rapporto tra  $coppia\_resistente\_max$  (che garantisce il funzionamento a coppia massima costante per  $\omega$  pari alla  $\omega\_base$ ) e  $\omega\_base$ ;
- Coppia resistente e riferimento di velocità sono imposti entrambi in  $t=0$  s.
- Come limite di saturazione del riferimento di coppia resistente si è dunque preso il valore  $coppia\_resistente\_max = 7.3125$  Nm.

Si presenta la risposta ottenuta:





Figg. 1.5 Risposta di primo e secondo azionamento al profilo di velocità e coppia assegnati

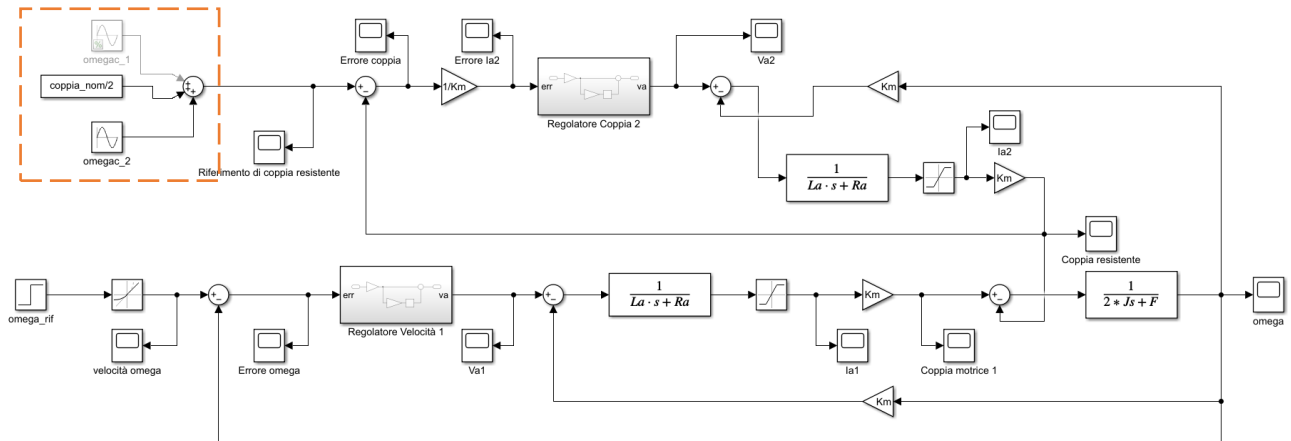


I risultati sono confrontabili con i valori ricavati a regime permanente per omega pari a omega\_base e coppia resistente pari a coppia\_resistente\_max.

VALORI DI FUNZIONAMENTO A POTENZA MASSIMA

<b>coppia_nom</b>	12	Nm
<b>Va_max</b>	157.5	V
<b>omega_base</b>	187.5	rad/s
<b>coppia_resistente_max</b>	7.3125	Nm
<b>Pa_max</b>	2362.5	W
<b>Pm_max</b>	2250	W
<b>Pd_max</b>	112.5	W

## Modello Simulink – caso 2



La richiesta era di trovare la risposta del primo azionamento per valori di velocità pari alla metà della omega base in corrispondenza al seguente profilo di coppia resistente  $C_r(t)$ :  $C_r(t-t_1) = C_n/2 + \sin(\omega_c t)$ .

Innanzitutto si sono trovati i valori ricavati a regime permanente per omega pari a  $\omega_{base}/2$  e per il profilo di coppia resistente assegnato:

### VALORI DI FUNZIONAMENTO

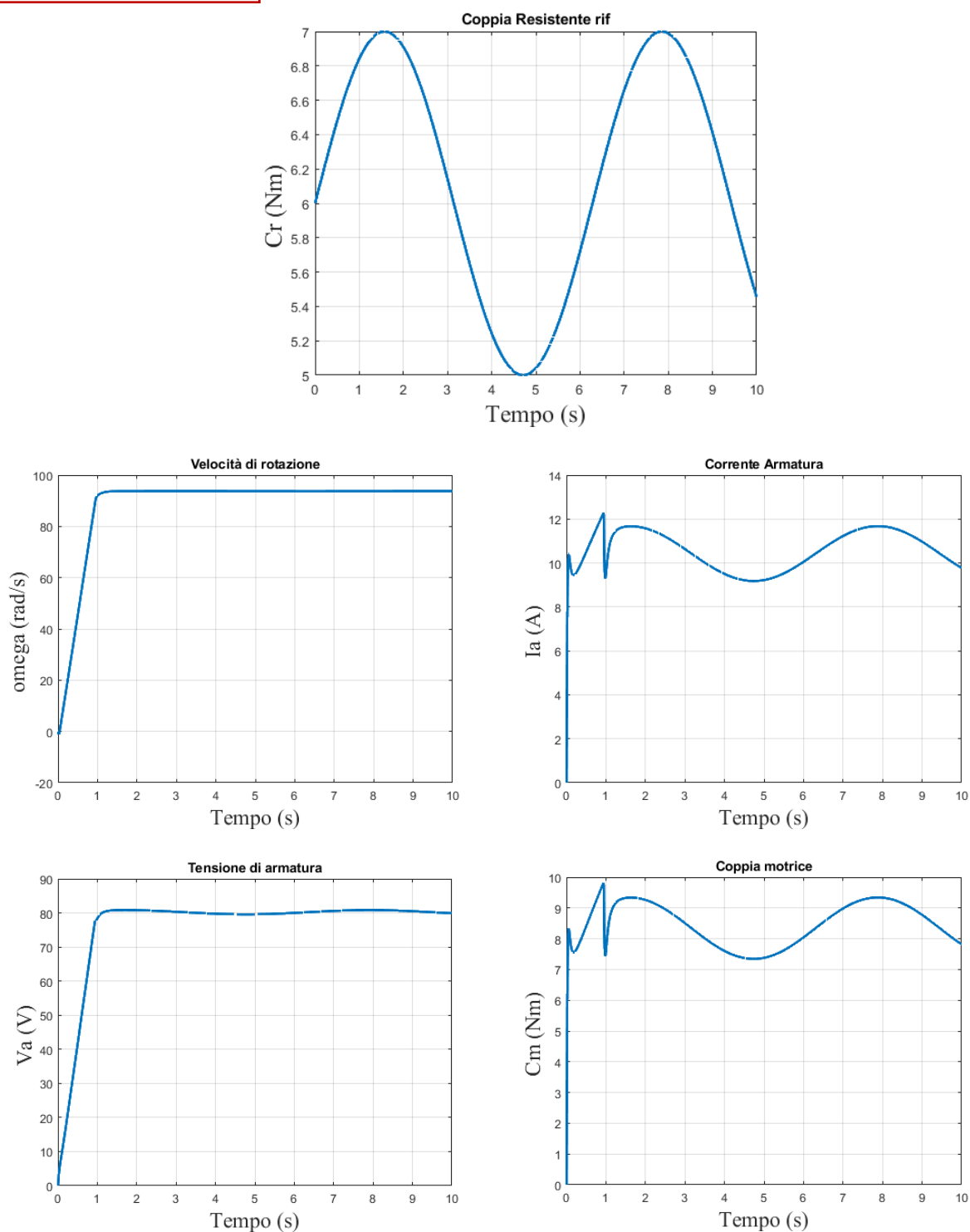
<b>coppia</b>	$8.34375 + \sin(\omega_{cacc} * t)$	Nm
<b>Va</b>	82.5	V
<b>omega_base/2</b>	93.75	rad/s
<b>coppia resistente teorica</b>	9.6563	Nm

Si osserva che il profilo di coppia resistente imposto esternamente ha valori in modulo sempre inferiori al valore di coppia resistente che il secondo azionamento dovrebbe fornire affinché il primo funzioni a coppia massima costante → la coppia motrice prodotta dal primo azionamento non potrà essere pari al valore massimo nominale di 12 Nm, tuttavia il motore 1 riesce a rispettare il riferimento di velocità imposto.

- L'andamento della coppia resistente è stato imposto sommando il termine costante “coppia\_nom/2” una volta con il termine sinusoidale “omegac\_1” avente frequenza 1 rad/s e una volta con il termine “omega\_2” avente frequenza 10 rad/s;
- Le durate delle due simulazioni sono differenti poiché differente è il periodo delle sinusoidi di coppia resistente;

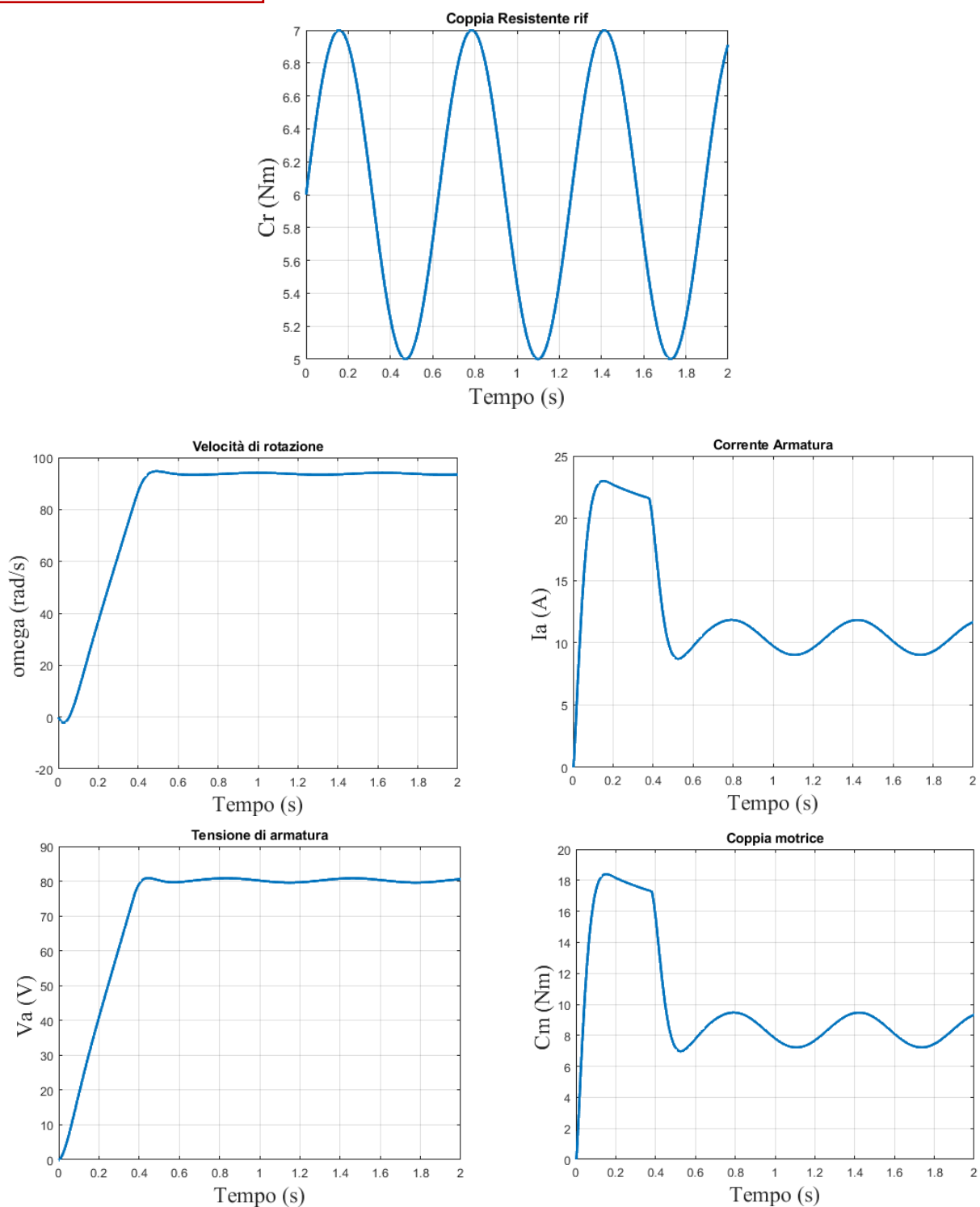
Si confrontano i valori sopra ricavati con le risposte ottenute dalle due simulazioni richieste.

$\omega_{c} = 1 \text{ rad/s}$



Figg. 1.6 Andamenti di  $\omega$ , corrente e tensione d'armatura e coppia motrice ricavati con la simulazione per  $\omega_{c} = 1 \text{ rad/s}$

$\omega_{ac} = 10 \text{ rad/s}$



Figg. 1.7 Andamenti di  $\omega$ , corrente e tensione d'armatura e coppia motrice ricavati con la simulazione per  $\omega_{ac} = 10 \text{ rad/s}$

La  $\omega$ , come le altre grandezze, una volta arrivata a regime oscilla sinusoidalmente attorno alla posizione di equilibrio, che nel caso della velocità è  $93.75 \text{ rad/s}$

# SCRIPT MATLAB

## dati\_progetto.m

```
%% DATI DI PROGETTO %%

clear all
clc

%% Parametri meccanici della macchine in cc a magneti permanenti %%

F=0.025; % Coefficiente di attrito, in kg*m^2/s
J=0.02; % Inerzia del motore, in kg*m^2
Km=0.8; % Costante di coppia, in Nm/A

%% Parametri elettrici delle macchine in cc a magneti permanenti %%

Ra=0.5; % Resistenza di armatura, in ohm
La=0.0012; % Induttanza di armatura, in H
Va_nom=150; % Tensione nominale di armatura, in V
Ia_nom=15; % Corrente nominale di armatura, in A
Ia_max=30; % Massima corrente di picco di armatura, in A

%% Parametri del regolatore di velocità e di coppia nom %%

Kp1_nom=4;
tau11_nom=0.7;
Kp2_nom=15;
tau12_nom=0.1;

%% Parametri del regolatore di velocità e di coppia caso1 %%

Kp1_caso1=0.1;
tau11_caso1=0.003;
Kp2_caso1=10;
tau12_caso1=0.02;

%% Parametri del regolatore di velocità e di coppia caso2 %%

Kp1_caso2=0.1;
tau11_caso2=1000000;
Kp2_caso2=1;
tau12_caso2=0.0008;
```

## progetto.m

```
%% COMPORTAMENTO STATICO DEL MOTORE IN CC A MAGNETI PERMANENTI %%

clear all
clc
dati_progetto;

%% calcolo parametri nominali%%

coppia_nom=Km*Ia_nom; % Valore di coppia motrice nominale di lavoro, per Ia=Ia_nom, in N*m
omega_nom=Va_nom/Km-(Ra*coppia_nom)/Km^2; % Valore di velocità di funzionamento nominale, in rad/s
omega_base=Va_nom/Km; % Valore della omega base, in rad/s

coppia_resistente_nom=coppia_nom-F*omega_nom; % Carico di coppia che il secondo azionamento deve fornire perchè il primo raggiunga il valore di coppia motrice nominale

Pa_nom=Va_nom*Ia_nom; % Potenza assorbita dal primo azionamento, in W
Pm_nom=coppia_nom*omega_nom; % Potenza meccanica fornita dal primo azionamento (convertita da elettrica a meccanica), in W
Pd_nom=Pa_nom-Pm_nom; % Potenza dissipata sulla resistenza d'armatura, in W

%% calcolo parametri massimi %%

coppia_resistente_max=coppia_nom-F*omega_base;
Va_max=coppia_nom*Km/(Km+Km*omega_base);

Pa_max=Va_max*Ia_nom;
Pm_max=coppia_nom*omega_base;
Pd_max=Pa_max-Pm_max;

%% Caratteristica statica coppia-velocità azionamento 1

omega=0:1.875:omega_base;
Va=5:5:Va_nom;
coppia=zeros(length(Va),length(omega));

for i=1:length(Va)
    coppia(i,:)=Km*(Va(i)-Km.*omega)./Ra;
end

figure
hold on
xline(omega_nom, 'b', 'omega_nom')
plot(omega_nom, coppia_nom, '*')
plot(omega, coppia)
grid on
title('Caratteristiche statiche coppia-velocità','fontsize',16)
xlabel('Velocità omega [rad/s]','fontsize',14)
ylabel('Coppia [N*m]','fontsize',14)
ylim([0 coppia_nom])
```