

Modellazione di un generatore sincrono e controllo della tensione in una rete elettrica di potenza multi-macchina



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Introduzione

Motivazioni e obiettivi

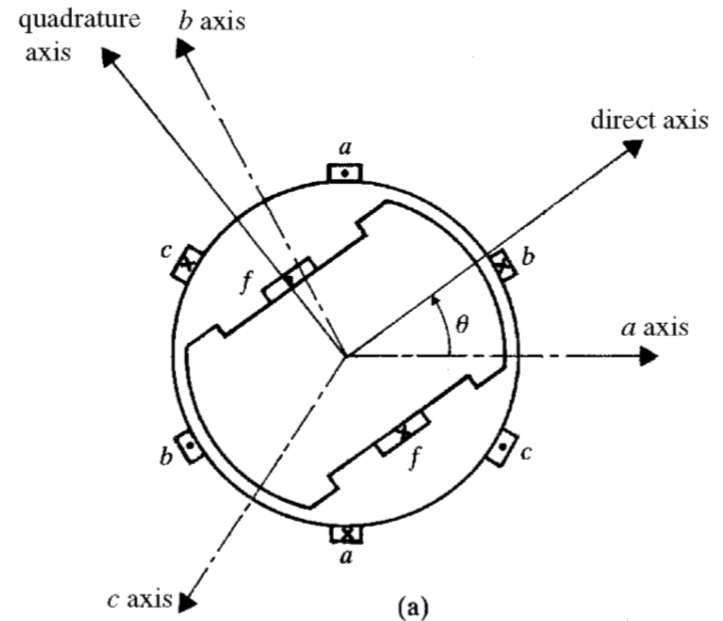
- Si procederà con la modellazione della macchina sincrona in un contesto isolato per comprendere le leggi fisiche che ne permettono il funzionamento
- Si inserirà la macchina in una rete elettrica di potenza e se ne deriverà un modello adatto per la Small Signal Analysis
- Ci si concentrerà su un controllo della tensione effettuato attraverso un controllore classico

Prerequisiti matematici

La trasformata di Park

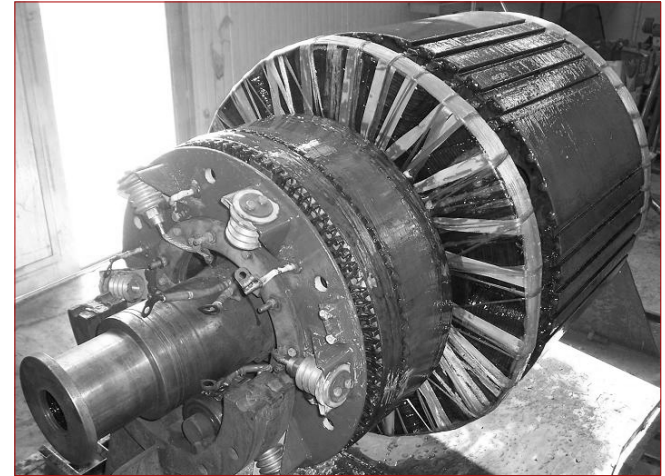
- Tre assi d,q,o che ruotano a velocità angolare omega
- Trasforma grandezze di un sistema trifase dipendenti dal tempo in valori costanti rispetto al nuovo riferimento

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\omega t) & \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \\ \sin(\omega t) & \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) & \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix}$$



La parte rotante della macchina: il rotore

- Viene fatto ruotare dall' azione di una coppia motrice generata da una turbina
- Viene modellato elettricamente da due circuiti
- Un circuito di field (f) in diretta, uno di damping (Q) in quadratura

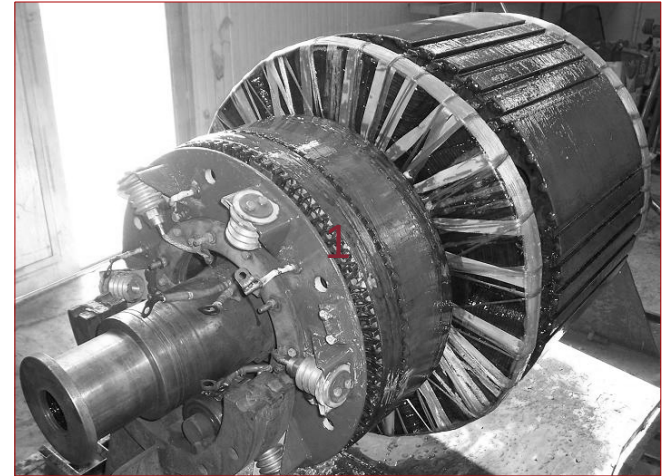


$$\begin{cases} \Psi_f = L_{fa}I_a + L_{fb}I_b + L_{fc}I_c + L_{ff}I_f + L_{fQ}I_Q \\ \Psi_Q = L_{Qa}I_a + L_{Qb}I_b + L_{Qc}I_c + L_{Qf}I_f + L_{QQ}I_Q \end{cases} \quad \longrightarrow \quad \begin{bmatrix} \Psi_f \\ \Psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & kM_f & 0 & L_f & 0 \\ 0 & 0 & kM_Q & 0 & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_o \\ I_d \\ I_q \\ I_f \\ I_Q \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -V_f \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} r_f & 0 \\ 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_f \\ I_Q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{\Psi}_f \\ \dot{\Psi}_Q \end{bmatrix}$$

La parte fissa: lo statore

- Vengono alloggiati i circuiti in direzione longitudinale, a formare tre fasi sfasate di 120° fra loro
- Sono la sede delle forze elettromotrici che generano la corrente elettrica



$$\begin{cases} \Psi_a = L_{aa}I_a + L_{ab}I_b + L_{ac}I_c + L_{af}I_f + L_{aQ}I_Q \\ \Psi_b = L_{ba}I_a + L_{bb}I_b + L_{bc}I_c + L_{bf}I_f + L_{bQ}I_Q \\ \Psi_c = L_{ca}I_a + L_{cb}I_b + L_{cc}I_c + L_{cf}I_f + L_{cQ}I_Q \end{cases} \longrightarrow \begin{bmatrix} \Psi_o \\ \Psi_d \\ \Psi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_o & 0 & 0 \\ 0 & L_d & 0 \\ 0 & 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_o \\ I_d \\ I_q \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} r_a & 0 & 0 \\ 0 & r_b & 0 \\ 0 & 0 & r_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{\Psi}_a \\ \dot{\Psi}_b \\ \dot{\Psi}_c \end{bmatrix} + V_n$$

$$V_n = -r_n \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} - L_n \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} \longrightarrow V_{odq} = r_{abc}I_{odq} - \dot{\Psi}_{odq} + \dot{P}P^{-1}\Psi_{odq} + PV_n$$

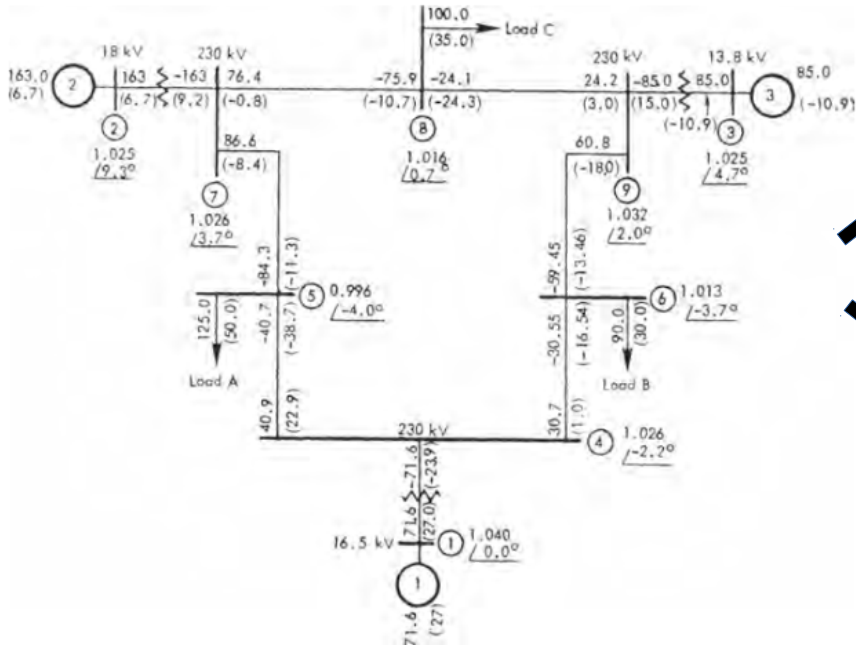
Derivazione del modello con lo spazio di stato

Modello a due assi

- Vengono trascurati i fenomeni non lineari delle parti magnetiche (saturazioni, isteresi)
- Viene assunto che la macchina lavori su carico bilanciato
- Le variabili del sistema si intendono normalizzate rispetto a delle variabili di base
- Vengono trascurate le derivate dei flussi in diretta e quadratura

$$\begin{cases} \tau'_{q0} \dot{E}'_d = -E'_d - (x_q - x'_q) I_q \\ \tau'_{d0} \dot{E}'_q = E_{FD} - E'_q + (x_d - x'_d) I_d \\ \tau_j \dot{\omega} = C_m - D\omega - E'_d I_d + E'_q I_q - (x'_q - x'_d) I_q I_d \\ \dot{\delta} = \omega - 1 \end{cases}$$

Inserimento nella rete WSCC-9



$$\begin{bmatrix} I_{q1\Delta} \\ I_{d1\Delta} \\ I_{q2\Delta} \\ I_{d2\Delta} \\ I_{q3\Delta} \\ I_{d3\Delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.1458 & -1.0288 & -0.8347 & -0.9216 & 1.6062 & 1.2642 \\ 1.0288 & -1.1458 & 0.9216 & -0.8347 & 0.1891 & 0.0265 \\ 0.4200 & 2.7239 & 0.3434 & -1.0541 & -1.1484 & 0.5805 \\ -2.7239 & 0.4200 & 1.0541 & 0.3434 & 2.4914 & -0.9666 \\ 0.0800 & -1.1058 & 0.2770 & 2.3681 & 0.8160 & -1.4414 \\ 1.1058 & 0.0800 & -2.3681 & 0.2770 & -0.8305 & 1.9859 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_{q2\Delta} \\ E'_{d2\Delta} \\ E'_{q3\Delta} \\ E'_{d3\Delta} \\ \delta_{12\Delta} \\ \delta_{13\Delta} \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} \tau'_{q0} \dot{E}'_d = -E'_d - (x_q - x'_q) I_q \\ \tau'_{d0} \dot{E}'_q = E_{FD} - E'_q + (x_d - x'_d) I_d \\ \tau_j \dot{\omega} = C_m - D\omega - I_{d0} E'_d - I_{q0} E'_q - E'_{d0} I_d - E'_{q0} I_q \\ \dot{\delta} = \omega \end{cases}$$

- La power flow analysis studia i flussi di potenza nei nodi quando la rete è a regime, al fine di soddisfare le domande di potenza dei carichi
- Serve a determinare quindi il punto di lavoro intorno al quale verrà linearizzato il sistema

Modello con lo spazio di stato

- La macchina 1 è presa come slack, quindi come riferimento ed è rappresentata in maniera classica
- Gli sfasamenti dei load angle delle altre macchine sono riferiti ad essa

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_1 \\ \dot{E}'_{q2} \\ \dot{E}'_{d2} \\ \dot{\omega}_2 \\ \dot{E}'_{q3} \\ \dot{E}'_{d3} \\ \dot{\omega}_3 \\ \dot{\delta}_{12} \\ \dot{\delta}_{13} \end{bmatrix} = 10^{-4} \begin{bmatrix} -0.5610 & 0.6793 & 0.6099 & 0 & 0.4948 & 0.5463 & 0 & -0.9520 & -0.7494 \\ 0 & -13.7658 & 1.4409 & 0 & 3.6163 & 1.1781 & 0 & 8.5472 & -3.3161 \\ 0 & -15.5076 & -150.1554 & 0 & -12.6793 & 38.9205 & 0 & 42.4023 & -21.4333 \\ 0 & -6.5352 & -1.1714 & -2.0723 & 0.9552 & 2.2156 & 0 & 5.4592 & -2.3385 \\ 0 & 5.6334 & 0.4076 & 0 & -16.5675 & 1.4111 & 0 & -4.2309 & 10.1170 \\ 0 & -3.8073 & 52.6270 & 0 & -13.1829 & -156.9117 & 0 & -38.8349 & 68.5987 \\ 0 & 2.9781 & 3.9766 & 0 & -10.6238 & -4.7247 & -4.4063 & -5.2010 & 10.7116 \\ 10000 & 0 & 0 & -10000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 10000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -10000 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ E'_{q2} \\ E'_{d2} \\ \omega_2 \\ E'_{q3} \\ E'_{d3} \\ \omega_3 \\ \delta_{12} \\ \delta_{13} \end{bmatrix} +$$

$$+ 10^{-4} \begin{bmatrix} 0.5610C_{m1} \\ 4.4210E_{FD2} \\ 0 \\ 2.0723C_{m2} \\ 4.5035E_{FD3} \\ 0 \\ 4.4063C_{m3} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

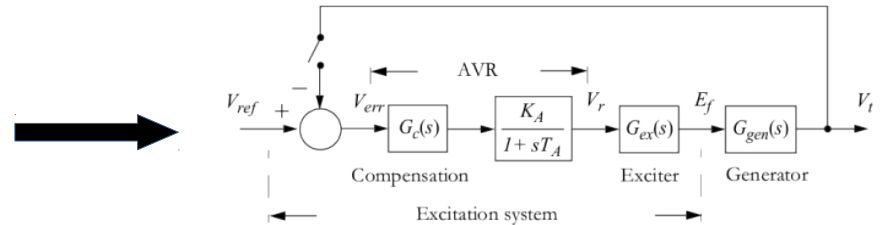
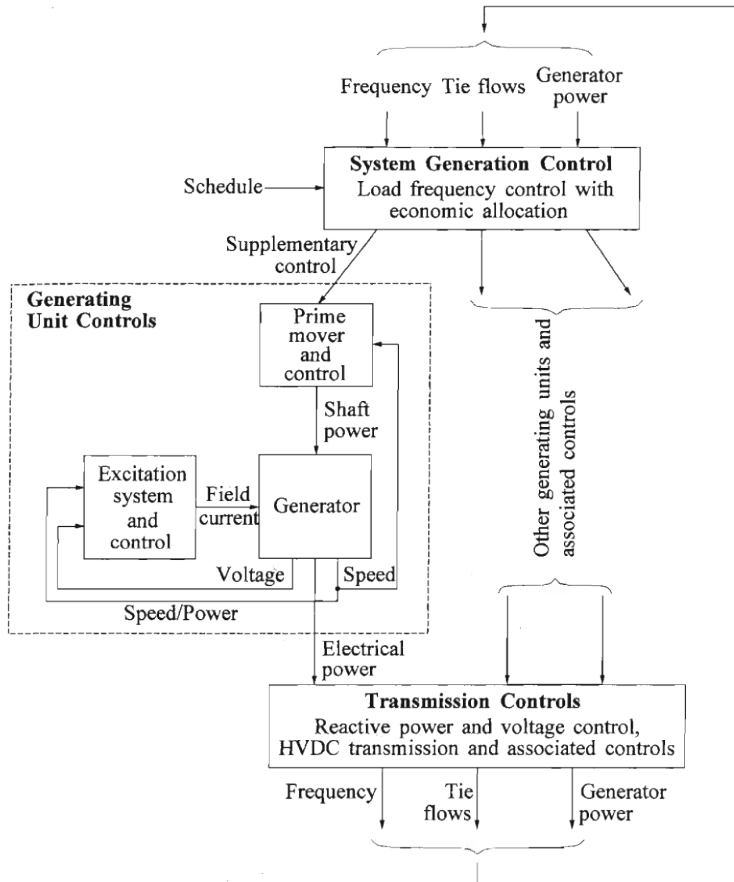
Ingressi

$$u = [C_{m1} \quad E_{fd2} \quad C_{m2} \quad E_{fd3} \quad C_{m3}]$$

Vettore di stato

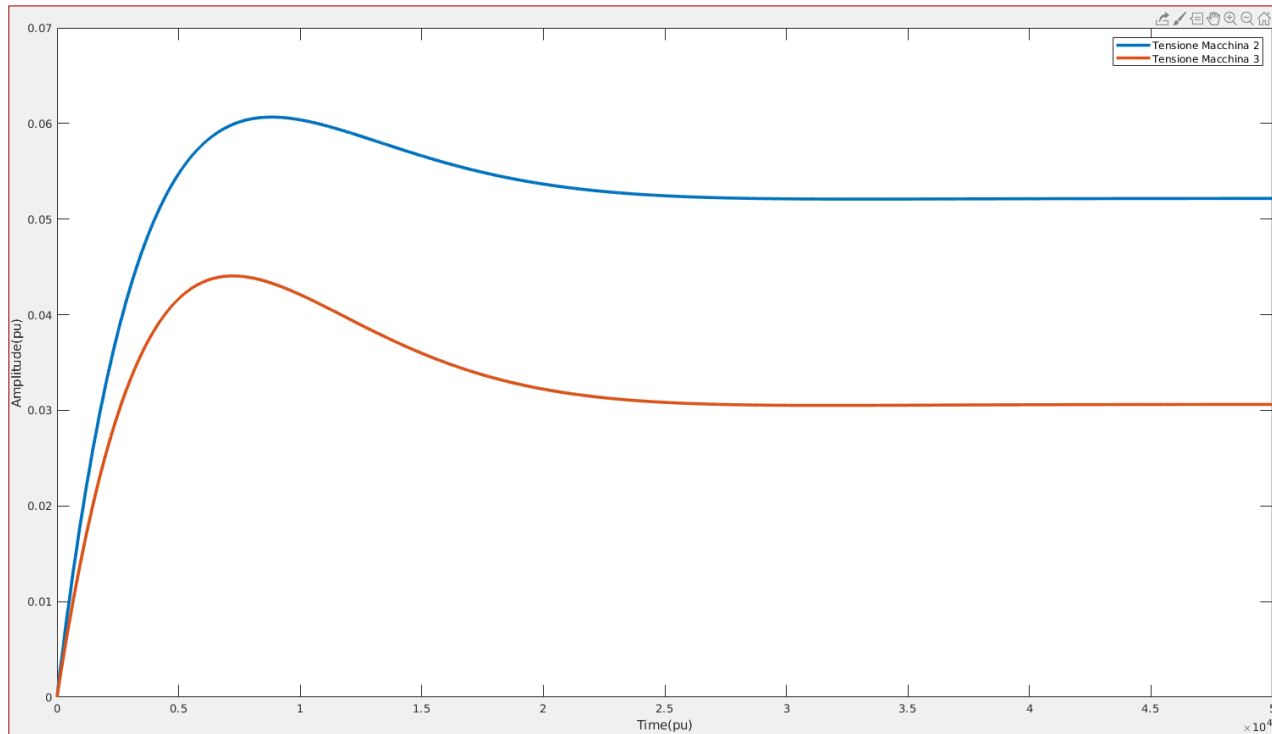
$$x = [\omega_1 \quad E'_{q2} \quad E'_{d2} \quad \omega_2 \quad E'_{q3} \quad E'_{d3} \quad \omega_3 \quad \delta_{12} \quad \delta_{13}]$$

Individuazione del contesto di controllo



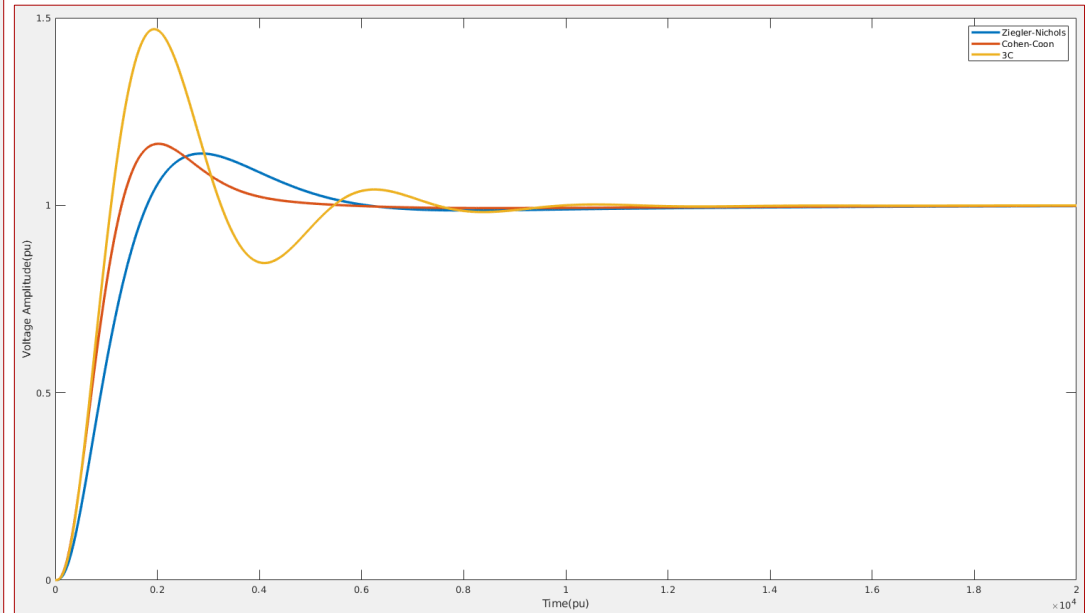
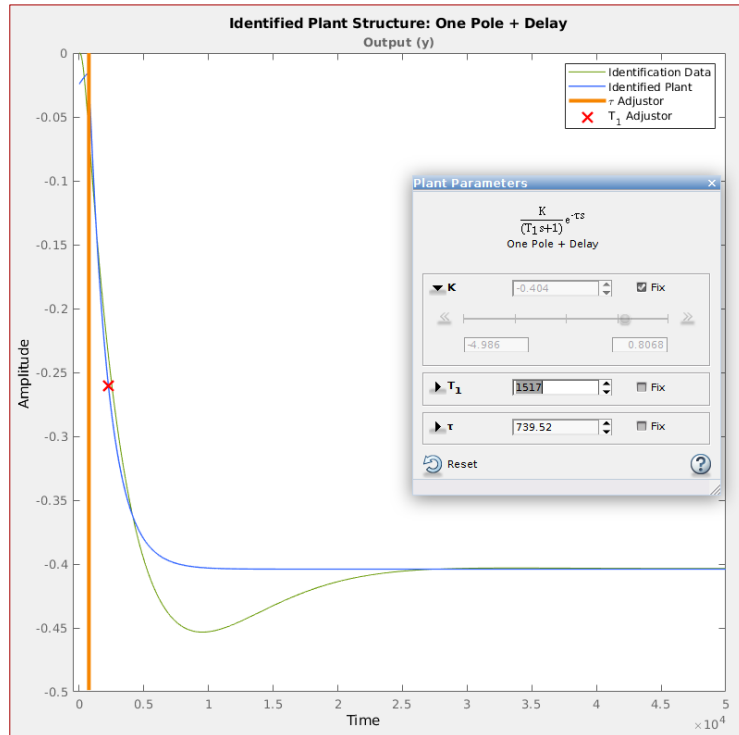
- In un power system vi sono molti livelli di controllo
- Differiscono a seconda della variabile che si vuole controllare e a seconda di dove viene effettuato il controllo
- Controllo di un sistema MIMO attraverso un approccio SISO
- Catena aperta composta da un blocco di compensazione (PID), da un amplificatore, il sistema d' eccitazione e il plant

Il sistema non controllato

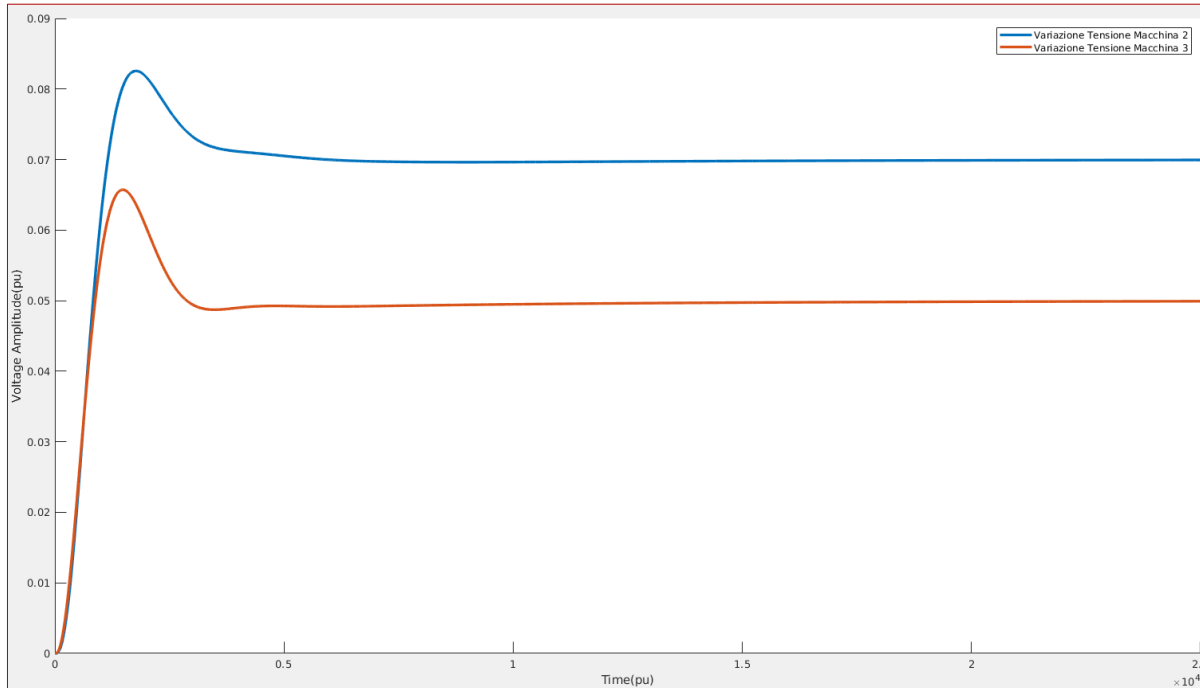


	Macchina 2	Macchina3
Rise Time	3290.5 pu = 8.72 s	2061.7 pu = 5.47 s
Settling Time	21323 pu = 56.55 s	22836 pu = 60.57 s
Overshoot	16.31	43.88
Undershoot	0	0
Peak	0.0607	0.0441
Peak Time	8831.5 pu = 23.42 s	7229.5 pu = 19.18 s

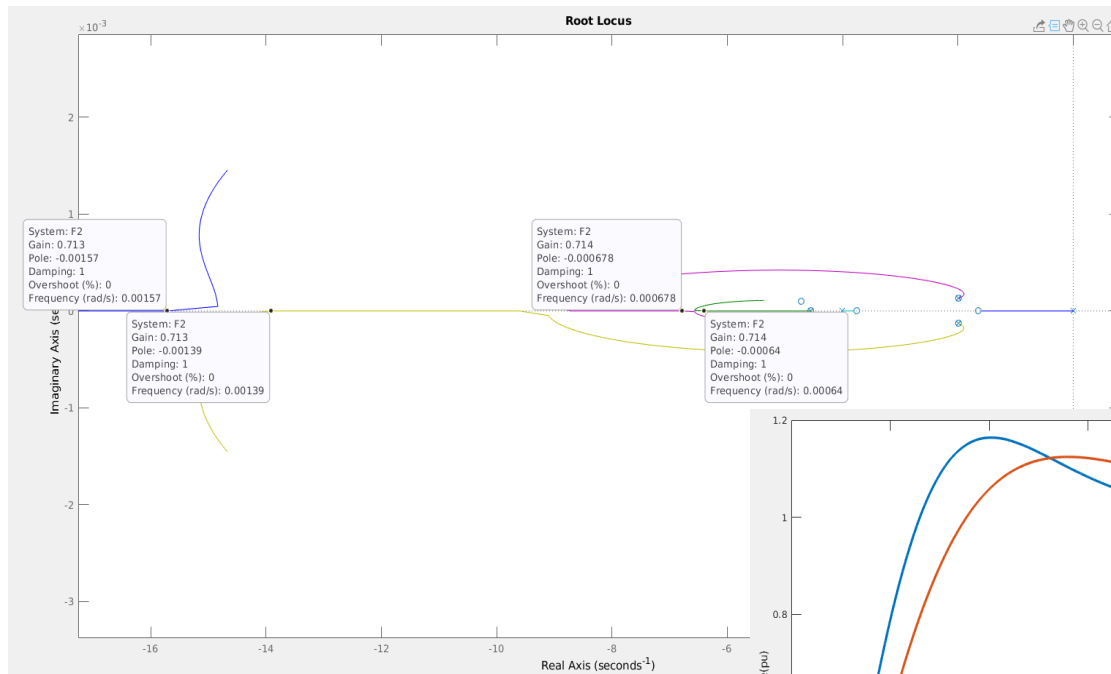
- Diminuire il tempo d' assestamento
- Mantenere una sovraelongazione limitata
- Margine di fase maggiore di 40°



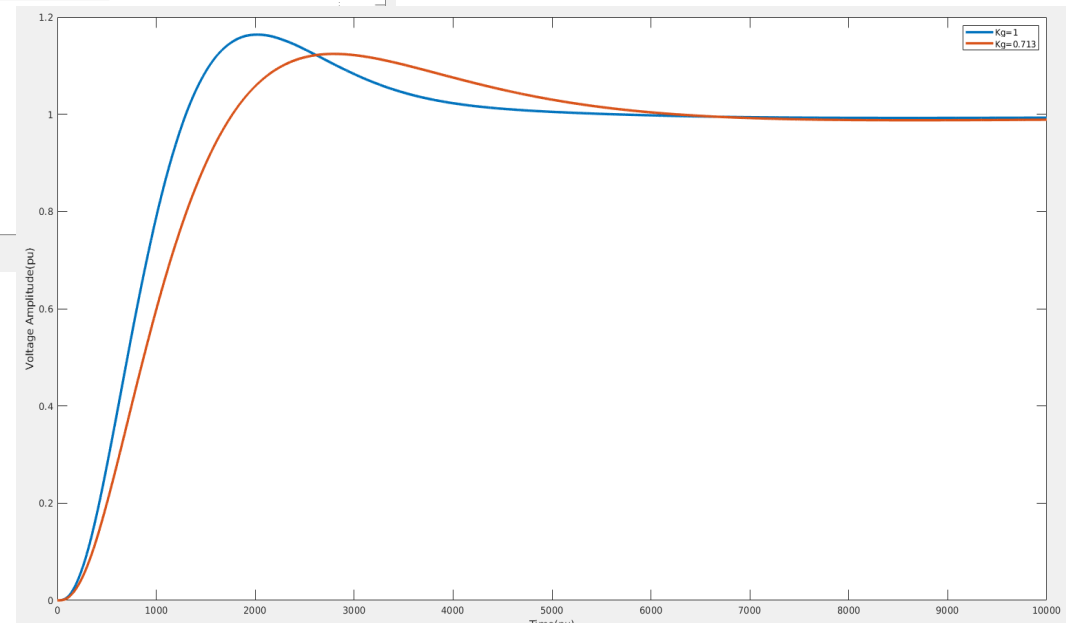
- Stima del processo e identificazione
- Viene stimato come un sistema con un polo e un ritardo
- Scelta del metodo di tuning migliore
- Il PID tarato con le regole di Cohen-Coon presenta un tempo d' assestamento minore



- Simulazione del sistema multimacchina dopo l' inserimento dei PID nel sistema di controllo delle macchine 2 e 3
- Sovraelongazione ancora elevata
- E' possibile una migliore disposizione dei poli?



- Migliore disposizione dei poli per $k=0.713$
- Quattro poli diventano a parte immaginaria nulla
- Tempo di assestamento aumenta di circa 3 secondi

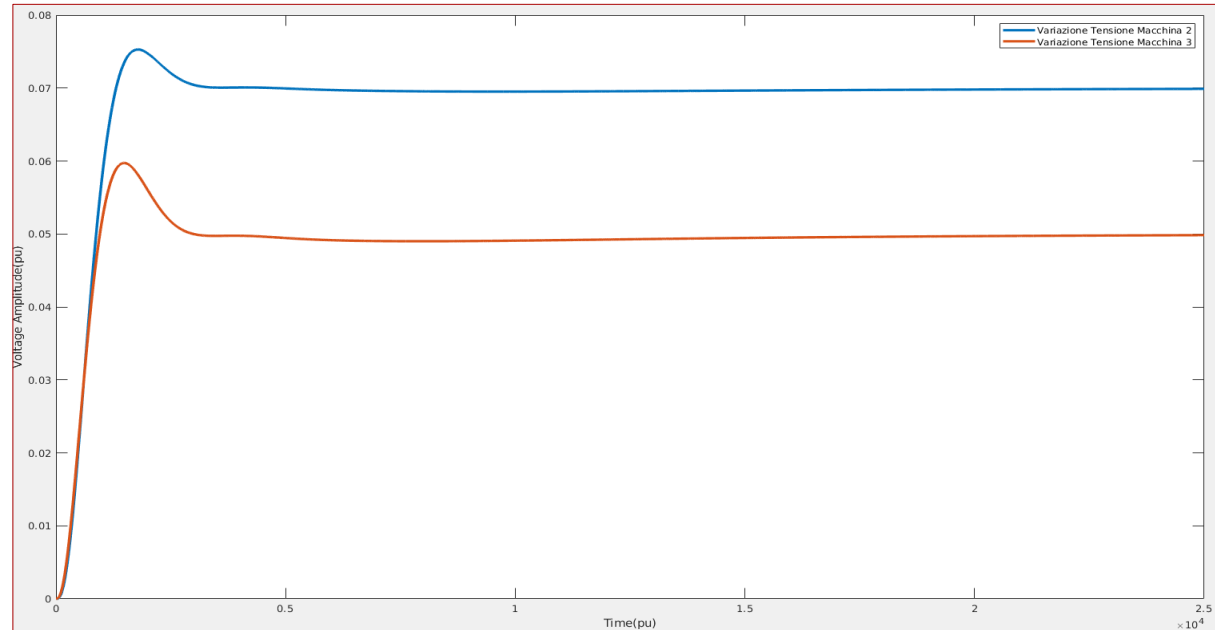


Il sistema controllato

```

tuning_selezionaM
1 function [] = tuning_selezionaN(theta,tau,k,P)
2 s=tf('s');
3 t=0:0.1:12000;
4 lista_risultati={};
5 [kp_z,Ti_z,Td_z]=ziegler_nichols(theta,tau,k);
6 [kp_c,Ti_c,Td_c]=cohen(theta,tau,k);
7 [kp_3,Ti_3,Td_3]=tre_C(theta,tau,k);
8 lista=[];
9 cont=1;
10 %voglio indagare sul migliore dei 3 per ogni N per il tempo d' assestamento
11 for N=0.1:0.5:10.1
12     PID_zeigler=kp_z*(1+Ti_z/s+Td_z*s/(1+Td_z/N*s));
13     PID_cohen=kp_c*(1+Ti_c/s+Td_c*s/(1+Td_c/N*s));
14     PID_3C=kp_3*(1+Ti_3/s+Td_3*s/(1+Td_3/N*s));
15     Wz=PID_zeigler*(1+PID_zeigler*s);
16     Wc=PID_cohen*(1+PID_cohen*s);
17     W3=PID_3C*(1+PID_3C*s);
18     yz=step(t,Wz);
19     yc=step(t,Wc);
20     y3=step(t,W3);
21     info=[];
22     infoz=stepinfo(yz,t);
23     infoc=stepinfo(yc,t);
24     info3=stepinfo(y3,t);
25     info(1)=infoz.SettlingTime;
26     info(2)=infoc.SettlingTime;
27     info(3)=info3.SettlingTime;
28     [minimum,indices]=min(info);
29     if indices==1
30         lista_risultati(cont)=[N+N* ziegler+ min=info(1);
31     end
32     if indices==2
33         lista_risultati(cont)=[N+N* cohen+ min=info(2);
34     end
35     if indices==3
36         lista_risultati(cont)=[N+N* 3C+ min=info(3);
37     end
38     plotter=[yz,yc,y3];
39     plottato=plot(t,plotter);
40     plottato(1).LineWidth=2;
41     plottato(2).LineWidth=2;
42     plottato(3).LineWidth=2;
43     hold on;
44     lista(cont)=[N+N;
45     cont=cont+1;
46 end

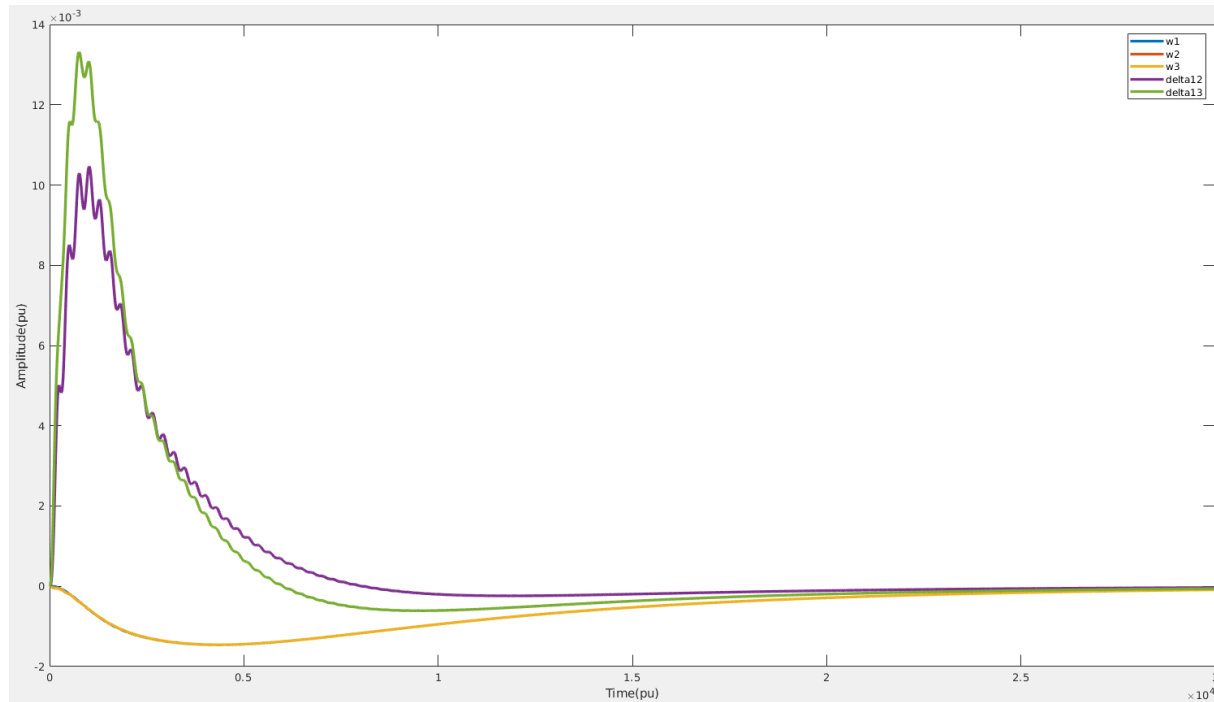
```



	Macchina 2	Macchina3
Rise Time	819.9211 pu = 2.17 s	620.4016 pu = 1.6 s
Settling Time	2650.9 pu = 7 s	2640 pu = 7 s
Overshoot	7.5534	19.46
Undershoot	0	0
Peak	0.0753	0.0597
Peak Time	1792.5 pu = 4.75 s	1485.5 pu = 3.9 s

- Tempo d' assestamento diminuito di circa due secondi
- Sovraelongazione diminuita di circa il 10 percento

Conclusioni



- Il problema di un approccio di tipo SISO a un sistema MIMO
- L' effetto che hanno le variabili lasciate incontrollate sui tempi di assestamento