

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



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

# Introduzione

## Passi fondamentali

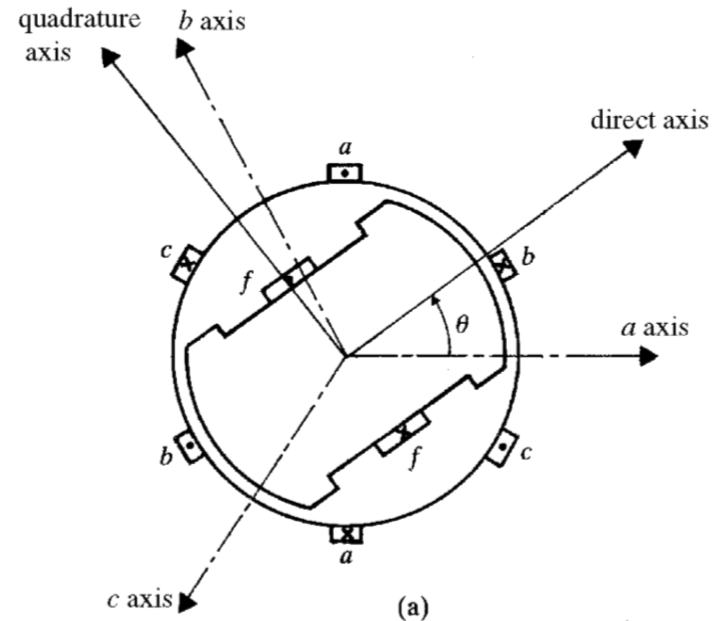
- Si procederà con la modellazione della macchina sincrona in un contesto isolato per comprendere le leggi fisiche che ne permettono il funzionamento
- Si inserirà la macchina in una rete elettrica di potenza e se ne deriverà un modello adatto per la Small Signal Analysis
- Ci si concentrerà su un controllo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

# Prerequisiti matematici

## La trasformata di Park

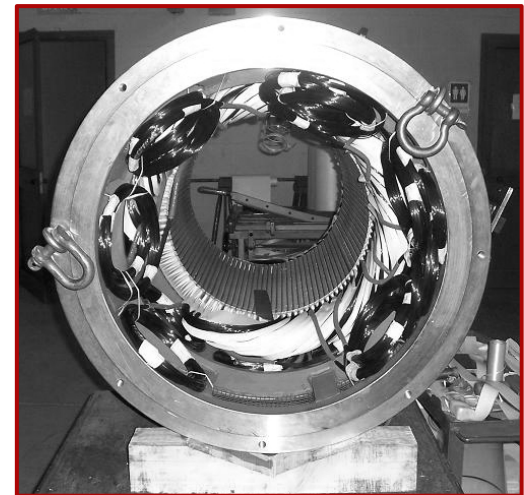
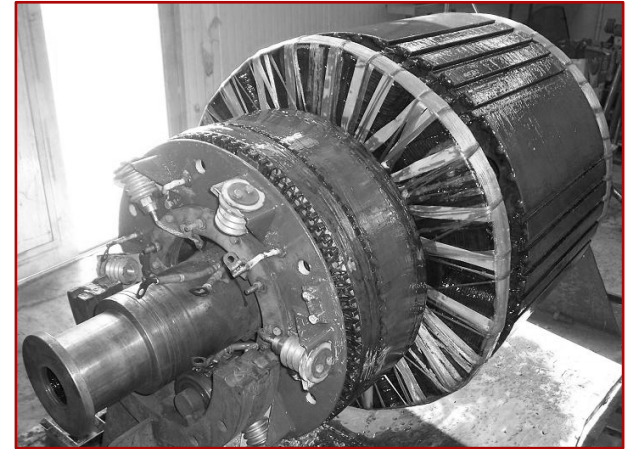
- Tre assi d,q,o che ruotano a velocità angolare omega
- Trasforma grandezze di un sistema trifase dipendenti dal tempo in valori costanti rispetto al nuovo riferimento

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



# La struttura della macchina: il rotore e lo statore

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



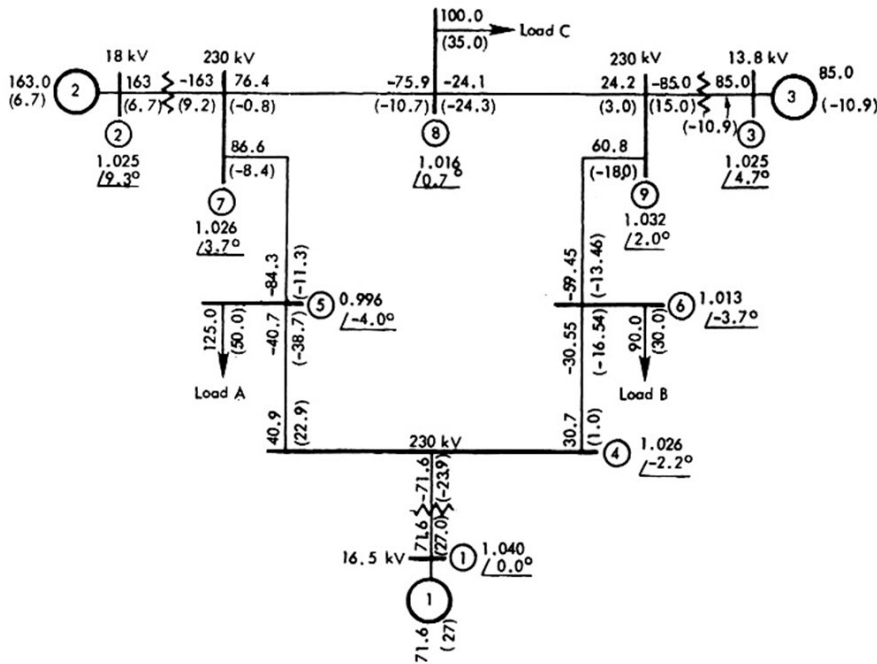
# Derivazione del modello con lo spazio di stato

## 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

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

# Inserimento nella rete WSCC-9



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

$$\begin{cases} \tau'_{q0} \dot{E}'_{d\Delta} = -E'_{d\Delta} - (x_q - x'_q) I_{q\Delta} \\ \tau'_{d0} \dot{E}'_{q\Delta} = E_{FD\Delta} - E'_{q\Delta} + (x_d - x'_d) I_{d\Delta} \\ \tau'_j \dot{\omega}_{\Delta} = C_{m\Delta} - D\omega_{\Delta} - I_{d0} E'_{d\Delta} - I_{q0} E'_{q\Delta} - E'_{d0} I_{d\Delta} - E'_{q0} I_{q\Delta} \\ \dot{\delta}_{\Delta} = \omega_{\Delta} \end{cases}$$

- 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

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

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

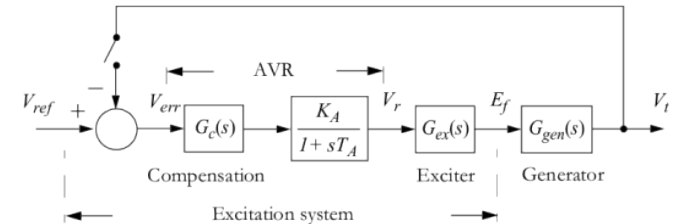
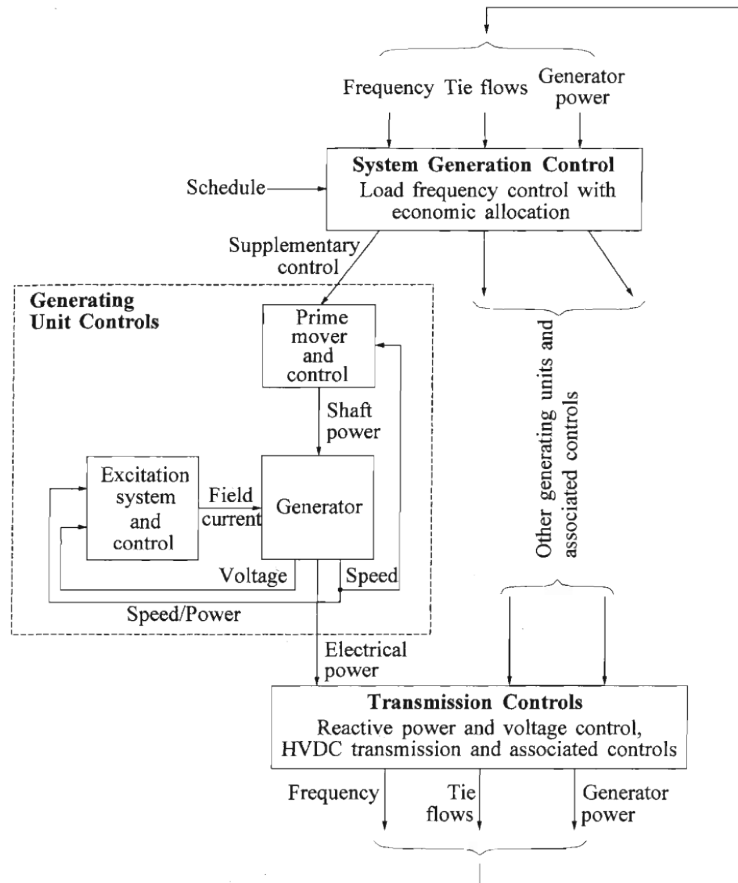
Ingressi

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

Vettore di stato

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

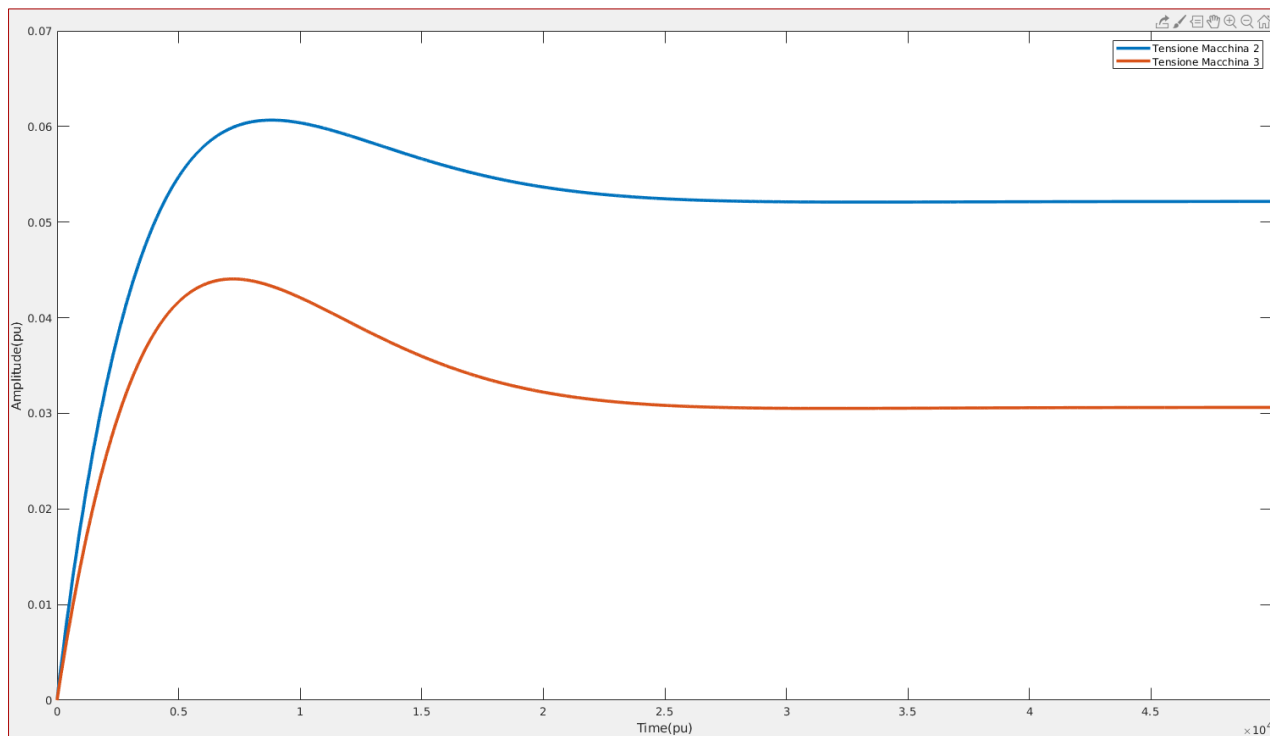
# Individuazione del contesto di controllo



- In un power system vi sono molti livelli di controllo
- Approcci moderni al tuning del controllore prevedono l' uso di benchmark per l' apprendimento da parte di algoritmi intelligenti o reti neurali
- 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

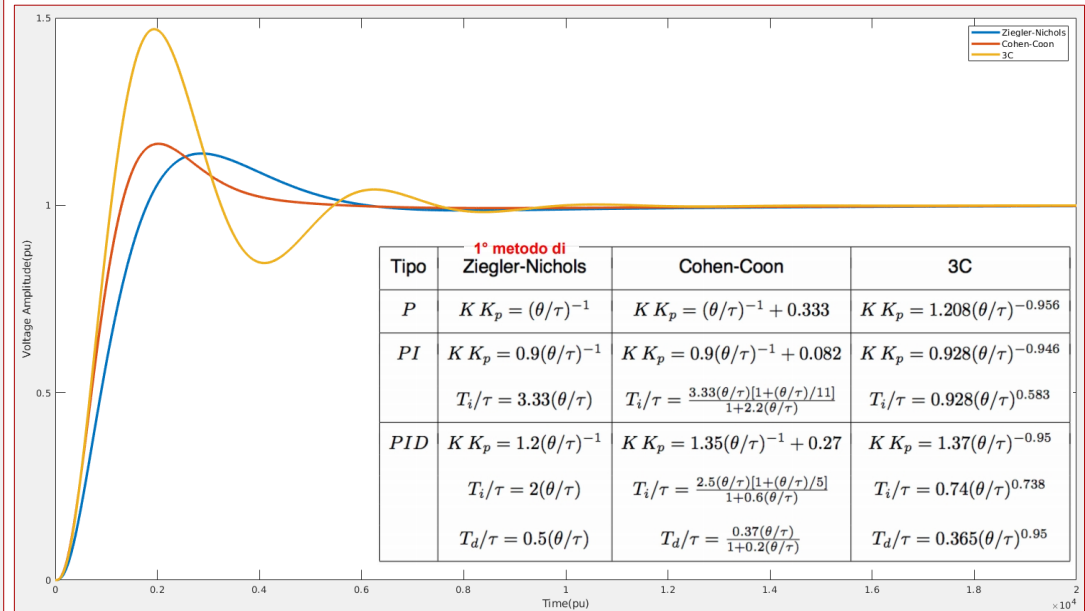
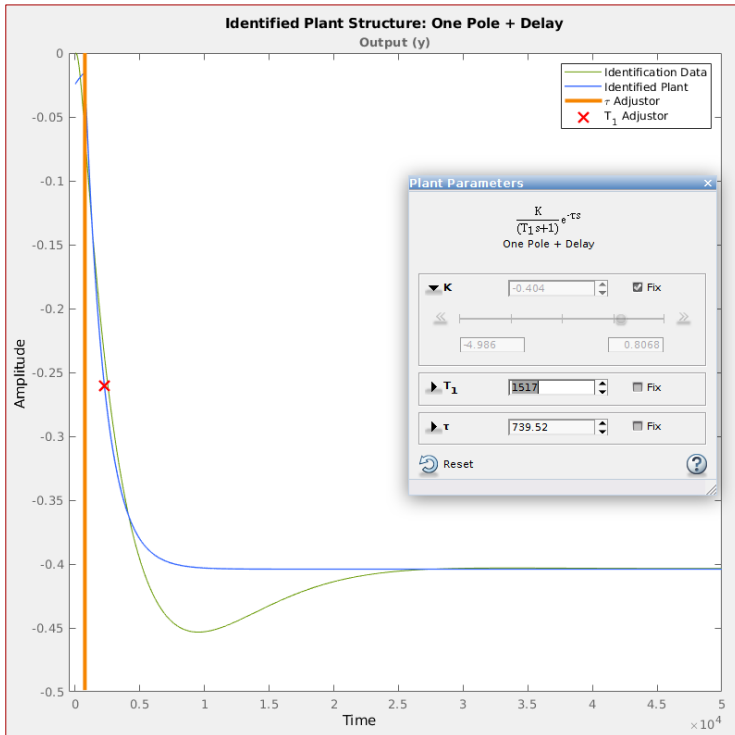


# Il sistema non controllato

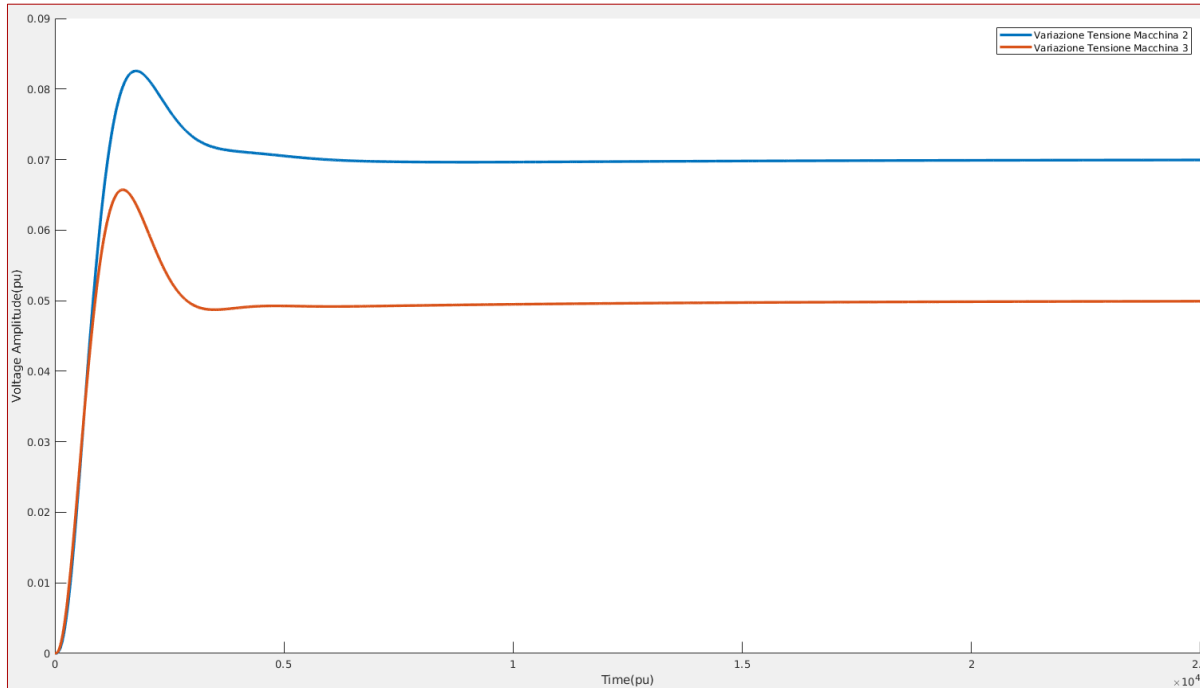


	Macchina 2	Macchina3
<b>Rise Time</b>	3290.5 pu = 8.72 s	2061.7 pu = 5.47 s
<b>Settling Time</b>	21323 pu = 56.55 s	22836 pu = 60.57 s
<b>Overshoot</b>	16.31	43.88
<b>Undershoot</b>	0	0
<b>Peak</b>	0.0607	0.0441
<b>Peak Time</b>	8831.5 pu = 23.42 s	7229.5 pu = 19.18 s

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

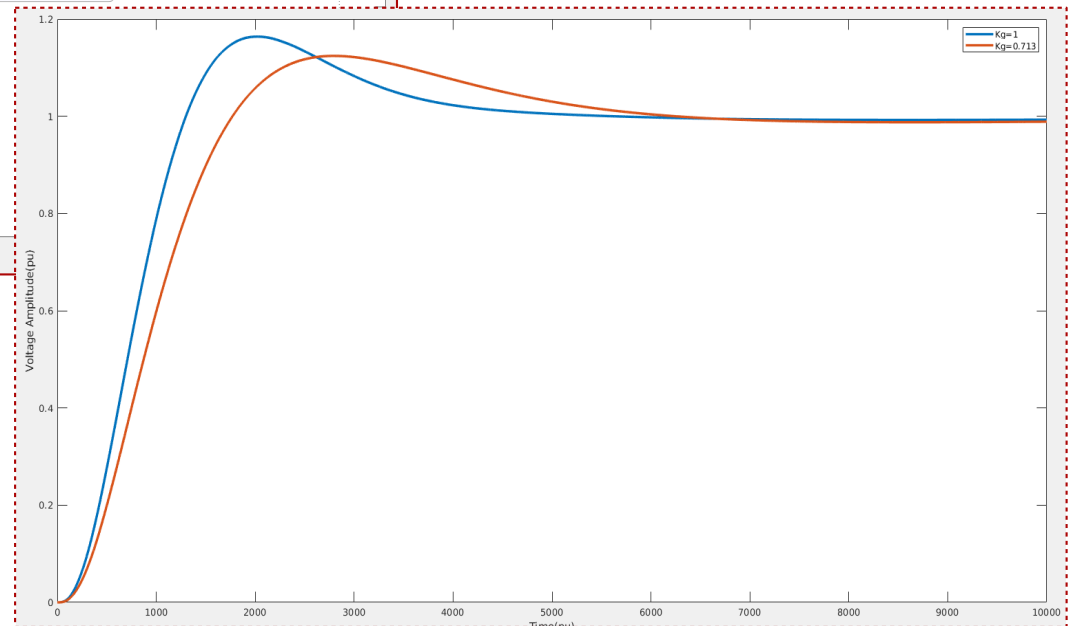
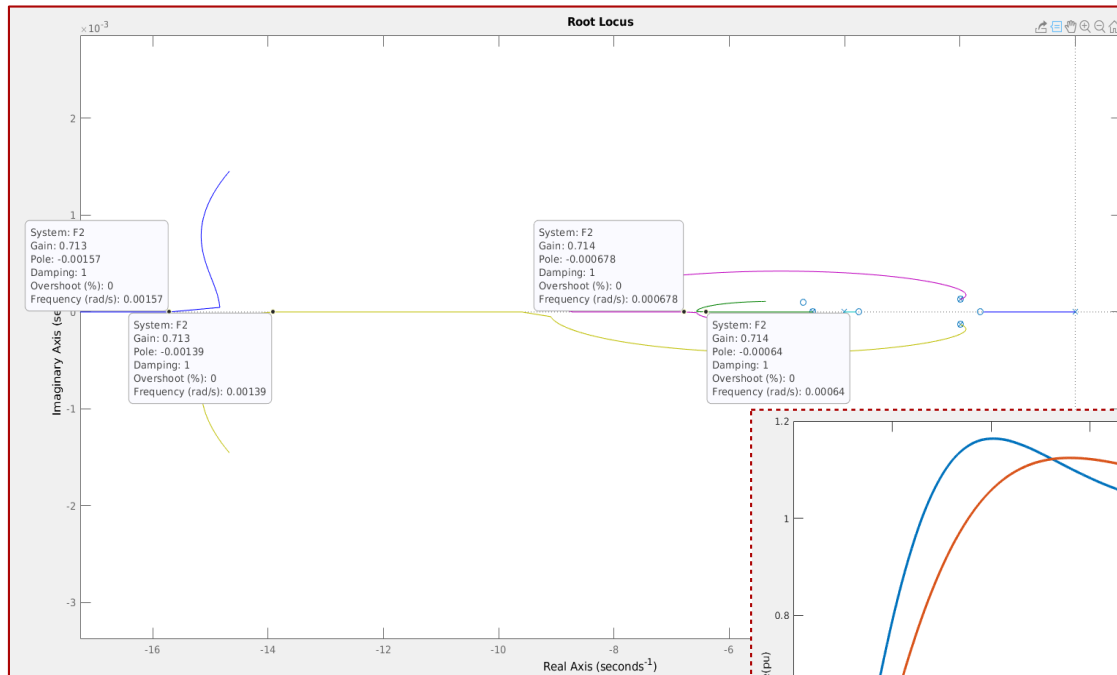


- Stima del processo e identificazione
- Viene stimato come un sistema con un polo e un ritardo
- Scelta del metodo di tuning migliore
- Il PID tarato con le regole di Cohen-Coon presenta un tempo d' assestamento minore



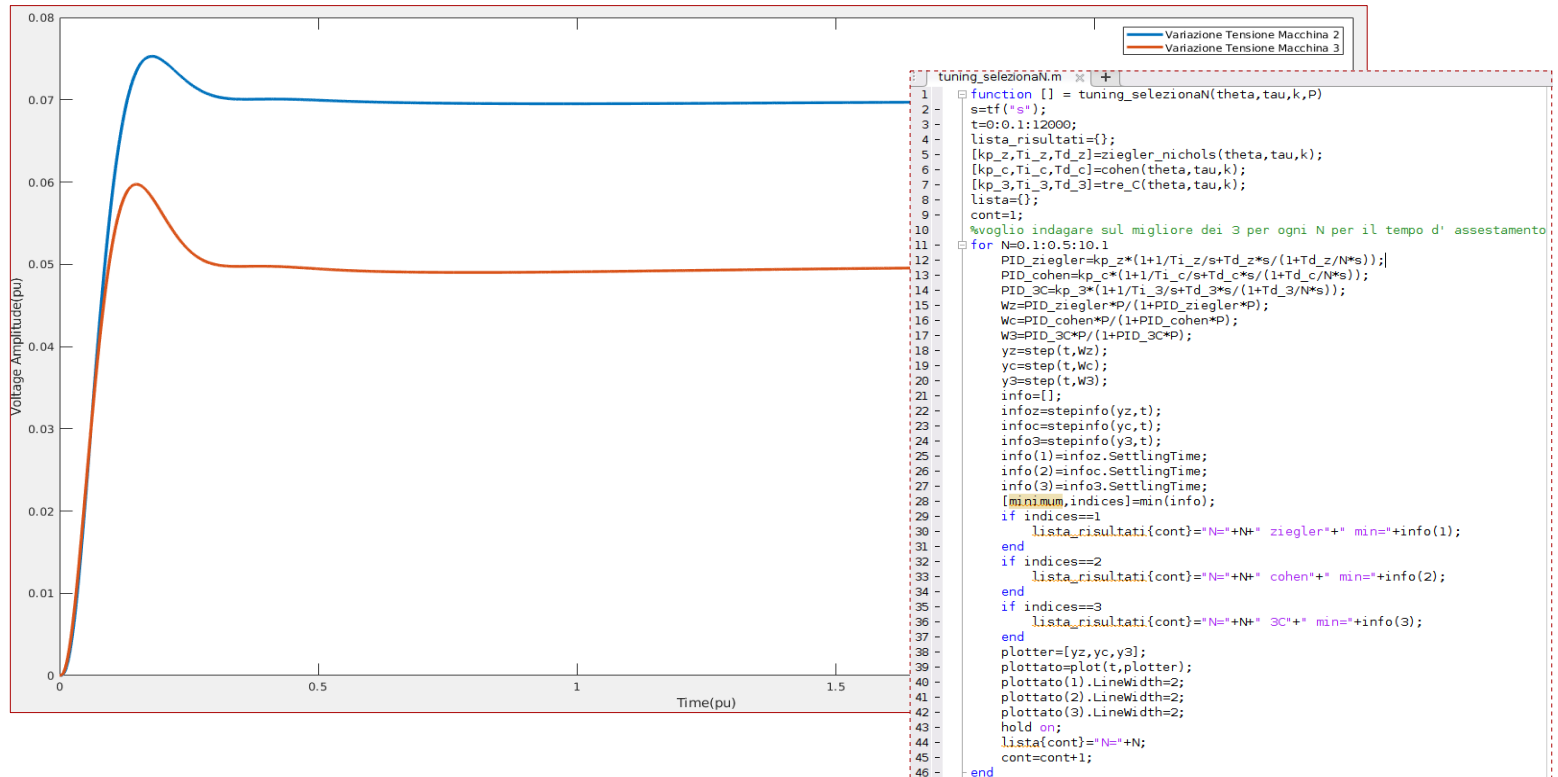
- Simulazione del sistema multimacchina dopo l' inserimento dei PID nel sistema di controllo delle macchine 2 e 3
- Sovraelongazione ancora elevata
- E' possibile una migliore disposizione dei poli?

	Macchina 2	Macchina3
<b>Rise Time</b>	735.0136 pu = 1.94 s	569.5282 pu = 1.5 s
<b>Settling Time</b>	3703 pu = 9.82 s	4012.7 pu = 10.64 s
<b>Overshoot</b>	17.9591	31.4618
<b>Undershoot</b>	0	0
<b>Peak</b>	0.0826	0.0657
<b>Peak Time</b>	1775 pu = 4.7 s	1483 pu = 3.93 s



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

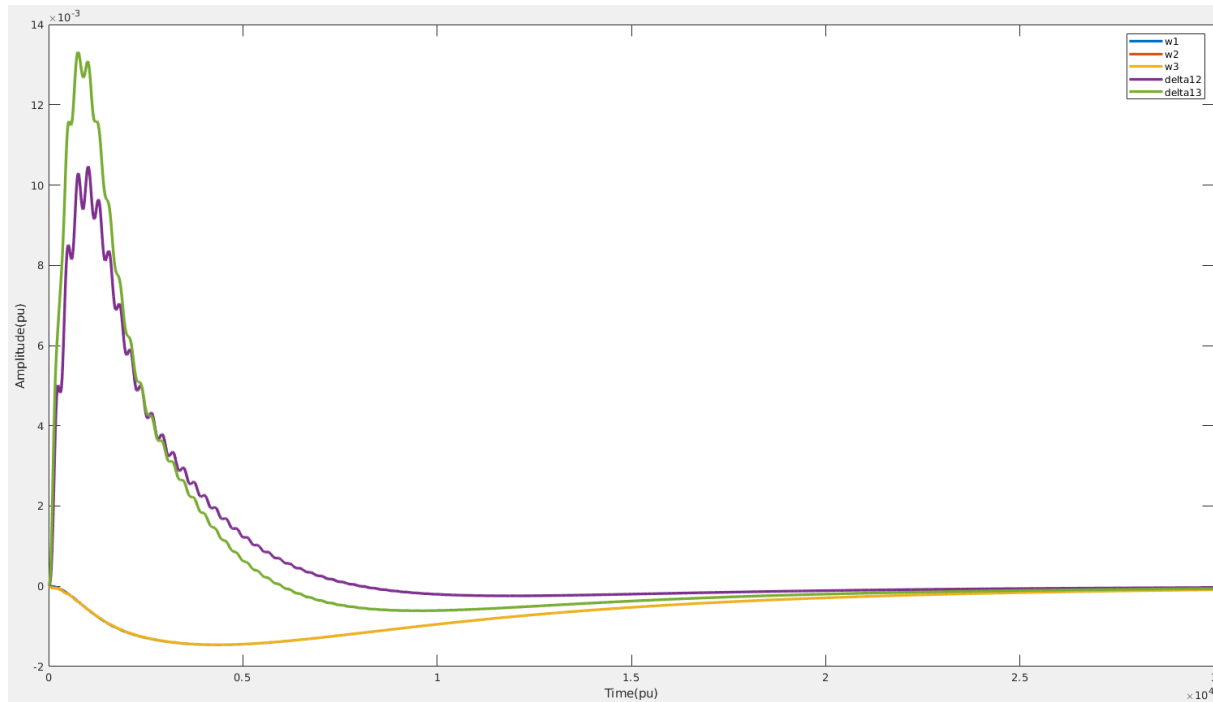
# Il sistema controllato



	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
- I problemi principali sono la mancanza di comunicazione tra i controllori (si pensi all' introduzione del PSS) e la mancanza di previsione

**Grazie dell' attenzione!**