

CORSO DI:

DINAMICA E CONTROLLO DEI SISTEMI ELETTRICI

APPUNTI REDATTI DA GIOVANNI
CANNI TRATTI DALLE LEZIONI
DEL PROF. STEFANO BARSALI

A.A. 2006-2007

ALTRI TESTI DI RIFERIMENTO:

ELECTRIC POWER SYSTEM (MANCONATO)
APPUNTI (PROF. PAOLO DELACCHI)

LEZIONE DEL 26/02/2007

CONTENUTI DEL CORSO:

①

DINAMICA E CONTROLLO.

DINAMICA - TRATTA LA COSTRUZIONE DI MODELLI DINAMICI DEI COMPONENTI IL SISTEMA (IN TERMINI DI TRASFORMATE DI PARK).

CONTROLLO - TRATTA LA REGOLAZIONE DI FREQUENZA E AMPIEZZA DEL VETTORE ELETTRICO (SULLE SINGOLE UNITA'.

TRATTA INOLTRE LO STUDIO DELLA DINAMICA DELLE PROTEZIONI INTESA COME DISPOSITIVI DI TIPO ON/OFF.

IN MERITO ALLA TRATTAZIONE DEI MODELLI DI LINEE DI TRASMISSIONE, SI ANALIZZA IL MODELLO A PARAMETRI DISTRIBUITI FINALIZZATO ALLO STUDIO DEI FENOMENI DI PROPAGAZIONE (AD. ES. FULMINAZIONI) CENNI SUI SISTEMI AD ALTA TENSIONE IN CC (CORRENTE CONTINUA) UTILIZZATI PER SCAMBI DI POTENZA INDIPENDENTI DALLE LEGGI DEL LOAD-FLOW

(2)

TRASFORMATE:

TRASFORMATA DI SEQUENZA

SI APPLICA A QUALUNQUE TERNA DI GRANDEZZE, FUNZIONE DEL TEMPO, PER LA QUALE È POSSIBILE OTTENERE UNA RAPPRESENTAZIONE IN TERMINI DI GRANDEZZE COMPLESSE.

NOMENCLATURA:

$$\begin{pmatrix} \bar{A}_{s0}(t) \\ \bar{A}_{s1}(t) \\ \bar{A}_{s2}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_0 & 0 & 0 \\ 0 & k_1 & 0 \\ 0 & 0 & k_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ \alpha & \alpha^2 & \alpha \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_a(t) \\ A_b(t) \\ A_c(t) \end{pmatrix}$$

$$A_s = T_{s1} \cdot T_{s2} \cdot A_f$$

NOTA: GLI ELEMENTI DI A_s NON SONO FASORI, MA FUNZIONI COMPLESSE DEL TEMPO

PER ESTESO ABBIAMO CHE:

$$\bar{A}_{s0}(t) = k_0 (A_a(t) + \alpha A_b(t) + \alpha^2 A_c(t))$$

$$\bar{A}_{s1}(t) = k_1 (A_a(t) + \alpha^2 A_b(t) + \alpha A_c(t))$$

$$\bar{A}_{s2}(t) = k_2 (A_a(t) + A_b(t) + A_c(t))$$

PARIMENTI A COME USUALMENTE FATTO PER ALTRE GRANDEZZE, QUALI TENSIONI E CORRENTI, ANCHE LO STUDIO DI PROPAGAZIONI DI ONDE È SUSCETTIBILE DI RAPPRESENTAZIONE MEDIANTE TRASFORMAZIONI IN SEQUENZA.

SULLA BASE DELLA SUSCRITTA NOMENCLATURA SI HA :

③

$$\bar{A}_S(t) = T_{S1} T_{S2} A_f(t)$$

$$A_f(t) = T_{S2}^{-1} T_{S1}^{-1} \bar{A}_S(t)$$

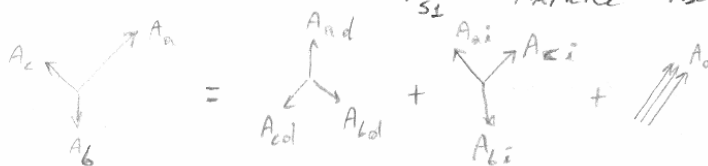
DOVE :

$$T_{S1}^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{1}{k_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{k_d} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{k_o} \end{pmatrix} ; T_{S2}^{-1} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \end{pmatrix}$$

IN BASE AI VALORI ASSEGNATI A k_d E A k_o ,
SI OTTIENE UNA TRASFORMAZIONE A POTENZA
INVARIANTE O A POTENZA VARIANTE.

ESEMPIO :

TRASFORMAZIONE DI SEQUENZA APPLICATA AD UNA TERNA DI GRANDEZZE
SINUSOIDALI CON T_{S1} MATRICE IDENTICA



$$\begin{cases} \bar{A}_a = \bar{A}_{ad} + \bar{A}_{ai} + \bar{A}_{ao} \\ \bar{A}_b = \bar{A}_{bd} + \bar{A}_{bi} + \bar{A}_{bo} \\ \bar{A}_c = \bar{A}_{cd} + \bar{A}_{ci} + \bar{A}_{co} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \bar{A}_a = A_{ad} + A_{ai} + A_{ao} \\ \bar{A}_b = \alpha^2 A_{ad} + \alpha A_{ai} + A_{ao} \\ \bar{A}_c = \alpha A_{ad} + \alpha^2 A_{ai} + A_{ao} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{pmatrix} \bar{A}_a \\ \bar{A}_b \\ \bar{A}_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{ad} \\ A_{ai} \\ A_{ao} \end{pmatrix}$$

(4)

LE GRANDEZZE DI FASE SONO LEGATE ALLE GRANDEZZE DI SEQUENZA DALLE RELAZIONI (PARLANDO ORA DI TENSIONI E CORRENTI)

$$\underline{V}_f = \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = T_s^{-1} \underline{V}_s, \quad \underline{I}_f = T_s^{-1} \underline{I}_s$$

LA POTENZA È CALCOLABILE COME:

$$\bar{S} = \underline{\bar{V}}_f^T \cdot \underline{I}_f^* = \underline{V}_s^T \cdot T_s^{-1T} T_s^{-1*} \underline{I}_s^*$$

SVOLGENDO I CONTI SI OTTIENE:

$$T_s^{-1T} T_s^{-1*} = \begin{pmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{pmatrix}$$

$$\Rightarrow \bar{S} = 3 \cdot \underline{V}_s^T \underline{I}_s^*$$

CONCLUDIAMO, PERTANTO, CHE LA SCELTA DI k_b E k_o PUÒ RENDERE LA TRASFORMAZIONE A POTENZA INVARIANTE E, PIÙ PRECISAMENTE:

CONDIZIONE DI POTENZA INVARIANTE

$$\underline{T}_s^{*T} \underline{T}_s = \underline{I} \Rightarrow \underline{T}_s^{-1} = \underline{T}_s^{*T}$$

$$\underline{T}_s = \begin{pmatrix} k_b & 0 & 0 \\ 0 & k_b & 0 \\ 0 & 0 & k_o \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix},$$

$$\underline{T}_s^{*T} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_b & 0 & 0 \\ 0 & k_b & 0 \\ 0 & 0 & k_o \end{pmatrix}$$

NOTA: k_b NON RISERVO
DELLA CONIUGAZIONE
PERCHÉ SONO
COEFFICIENTI
REALI

PER RISPETTARE LA CONDIZIONE DI POTENZA INVARIANTE DEVONO ESSERE:

$$k_b = \frac{1}{\sqrt{3}}, \quad k_o = \frac{1}{\sqrt{3}}$$

⑤

CON TALE SCELTA DEI COEFFICIENTI k_b, k_o SI OTTIENE
LA CONDIZIONE IMPOSTA, MA IN TERMINI DI
POTENZA ISTANTANEA

TRASFORMATA DI PARK

TALE TRASFORMATA È, PER DEFINIZIONE, PARI A:

$$\begin{pmatrix} A_{d2}(t) \\ A_{q2}(t) \\ A_o(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_b & 0 & 0 \\ 0 & -k_b & 0 \\ 0 & 0 & k_o \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_2(t) & \cos \theta_{2b}(t) & \cos \theta_{2c}(t) \\ \sin \theta_2(t) & \sin \theta_{2b}(t) & \sin \theta_{2c}(t) \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_a(t) \\ A_b(t) \\ A_c(t) \end{pmatrix}$$

$$A_P = T_{P1} \cdot T_{P2} \cdot A_f$$

I PEDICI d, q e o POSSONO RIFERIMENTO A TRE ASSI
CONVENZIONALMENTE INDICATI COME ASSE DIRETTO, ASSE
QUADRATURA E ASSE OMOPOLARE.

θ È UN RIFERIMENTO ANGOLARE CHE RUOTA CON
PULSAZIONE ω :

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega, \quad \begin{cases} \theta_{2b} = \theta_2 - \frac{2}{3}\pi \\ \theta_{2c} = \theta_2 - \frac{4}{3}\pi \end{cases}$$

PER ESTESO LA TRASFORMATA SI ESPRIME COME:

$$A_{d2}(t) = k_b [\cos \theta_2 A_a + \cos \theta_{2b} A_b + \cos \theta_{2c} A_c]$$

$$A_{q2}(t) = -k_b [\dots]$$

$$A_o(t) = k_o [A_a + A_b + A_c]$$

LA TRASFORMAZIONE COSÌ ESPLICITATA MOSTRA CHE, MENTRE ⑥
 A_{d2} e A_{q2} DIPENDONO DA θ , A_0 DIPENDE SOLTANTO
 DA A_a , A_b e A_c .

VEETTORE DI PARK

È DEFINITO COME:

$$\bar{A}_2(t) = A_{d2}(t) + j A_{q2}(t)$$

SOSTITUENDO A_{d2} e A_{q2} SI OTTIENE (OMETTENDO LA DIPENDENZA DAL TEMPO)

$$\bar{A}_2(t) = k_b \left[A_a \left(\cos \theta_2 - j \sin \theta_2 \right) + A_b \left(\cos \left(\theta_2 - \frac{2}{3}\pi \right) - j \sin \left(\theta_2 - \frac{2}{3}\pi \right) \right) + A_c \left(\cos \left(\theta_2 - \frac{4}{3}\pi \right) - j \sin \left(\theta_2 - \frac{4}{3}\pi \right) \right) \right]$$

RICORDANDO CHE: $\cos \theta_2 - j \sin \theta_2 = \cos(-\theta_2) + j \sin(-\theta_2) = e^{-j\theta_2}$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \bar{A}_2(t) &= k_b \left[A_a(t) \cdot e^{-j\theta_2(t)} + A_b(t) \cdot e^{-j\left(\theta_2(t) - \frac{2}{3}\pi\right)} + A_c(t) \cdot e^{-j\left(\theta_2(t) - \frac{4}{3}\pi\right)} \right] \\ &= k_b \left[A_a(t) \cdot e^{-j\theta_2} + A_b(t) \cdot e^{-j\theta_2} \cdot e^{j\frac{2}{3}\pi} + A_c(t) \cdot e^{-j\theta_2} \cdot e^{j\frac{4}{3}\pi} \right] \\ &= k_b \cdot e^{-j\theta_2(t)} \left[A_a(t) + \alpha A_b(t) + \alpha^2 A_c(t) \right] \end{aligned}$$

SI NOTA L'ESISTENZA DI UN'ANALOGIA CON LA TRASFORMAZIONE DI SEQUENZA DIRETTA,

IL LEGAME TRA IL VETTORE DI PARK E LA COMPONENTE DI SEQUENZA DIRETTA È IL SEGUENTE:

$$\bar{A}_2(t) = \frac{k_b}{k_{sb}} e^{-j\theta_2(t)} \cdot \bar{A}_{sq}(t)$$

SI NOTI CHE LE GRANDEZZE DI PARK SONO NUMERI REALI.

7

L'UTILITÀ E L'APPLICAZIONE PRINCIPI DELLA TRASFORMATA DI PARK RISIENE NELLO STUDIO DELLE MACCHINE.
QUAL'ORA VI SIANO PIÙ SISTEMI DA COORDINARE,
INTRODUCIAMO IL VETTORE A_R (PEDIA R MAIUSCOLO)

$$\bar{A}_R(t) = k_d e^{-j\theta_R(t)} \begin{bmatrix} \dots \end{bmatrix} =$$

→ VEDI FORMULA DESCRITTA IN PREC.

$$= k_d e^{-j\theta_R(t)} \cdot e^{j\theta_2} \cdot e^{-j\theta_2} \begin{bmatrix} \dots \end{bmatrix} =$$

$$= \bar{A}_2(t) \cdot e^{-j(\theta_R(t) - \theta_2(t))}$$

N.B.: DISTINGUI
R da 2

I DUE SISTEMI HANNO UGUALE VELOCITÀ ω (AL
PIÙ È AMMESSO UN LIEVE SCORRIMENTO)

TRASFORMAZIONE INVERSA:

$$\begin{pmatrix} A_{dr} \\ A_{qr} \\ A_o \end{pmatrix} = T_{P1} \cdot T_{P2} \cdot \begin{pmatrix} A_a \\ A_b \\ A_c \end{pmatrix}$$

SVOLGENDO I CONTI SI OTTIENE:

$$T_{P2}^{-1} = -\frac{2}{3\sqrt{3}} \begin{pmatrix} -\sqrt{3} \cos \theta_{2a} & -\sqrt{3} \sin \theta_{2a} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\sqrt{3} \cos \theta_{2b} & -\sqrt{3} \sin \theta_{2b} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\sqrt{3} \cos \theta_{2c} & -\sqrt{3} \sin \theta_{2c} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix}$$

DANDO PER SCANTATO IL CALCOLO DI T_{P1}^{-1}



8

SI OTTIENE:

$$T_P^{-1} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos \theta_a & \sin \theta_a & \frac{1}{2} \\ \cos \theta_{ab} & \sin \theta_{ab} & \frac{1}{2} \\ \cos \theta_{ac} & \sin \theta_{ac} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{k_0} & & \\ & -\frac{1}{k_0} & \\ & & \frac{1}{k_0} \end{pmatrix}$$

$$T_P^T = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \frac{1}{k_0} \cos \theta_a & \frac{1}{k_0} \cos \theta_{ab} & \frac{1}{k_0} \cos \theta_{ac} \\ -\frac{1}{k_0} \sin \theta_a & -\frac{1}{k_0} \sin \theta_{ab} & -\frac{1}{k_0} \sin \theta_{ac} \\ \frac{1}{2k_0} & \frac{1}{2k_0} & \frac{1}{2k_0} \end{pmatrix}$$

IMPONENDO ANCHE PER QUESTA TRASFORMAZIONE LA INVARIANZA DI POTENZA, OVVERO $T_P^T = T_P^{-1}$ (NOTA: PARAMETRI REALI $\Rightarrow$ NON SERVE CONIUGARE), SI OTTIENE

$$k_0 = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}, \quad k_0 = \frac{1}{\sqrt{3}}$$

CON TALE CONDIZIONE OTTENIAMO, IN TERMINI ISTANTANEI, UNA TRASFORMAZIONE A POTENZA INVARIANTE:

$$\begin{aligned} P(t) &= V_a(t) I_a(t) + V_b(t) I_b(t) + V_c(t) I_c(t) = \\ &= V_o(t) I_o(t) + V_g(t) I_g(t) + V_o(t) I_o(t) \end{aligned}$$

$$\Rightarrow V_f^T I_f = V_P^T I_P$$

9

DERIVATE DI GRANDEZZE TRASFORMATE

$$\begin{pmatrix} A_a(t) \\ A_b(t) \\ A_c(t) \end{pmatrix} = T_P^{-1} \begin{pmatrix} A_{d2}(t) \\ A_{q2}(t) \\ A_o(t) \end{pmatrix}$$

$$\begin{cases} A_a(t) = \frac{2}{3k_d} \cos \theta_2 A_{d2} - \frac{2}{3k_d} \sin \theta_2 A_{q2} + \frac{1}{3k_o} A_o(t) \\ A_b(t) = [\dots] \\ A_c(t) = [\dots] \end{cases}$$

DERIVANDO TALI ESPRESSIONI SI OTTIENE (1^a espressione)

$$\begin{aligned} \frac{dA_a}{dt} &= \frac{2}{3k_d} \left(\cos \theta_2 \cdot \frac{dA_{d2}}{dt} - \sin \theta_2 A_{d2} \right) - \frac{2}{3k_d} \left(\cos \theta_2 \cdot \sin \theta_2 + \sin \theta_2 \frac{d\theta_2}{dt} \right) A_{q2} \\ &\quad + \frac{1}{3k_o} \frac{dA_o}{dt} \end{aligned}$$

SI RICORDI L'IPOTESI $\sin \theta_2 = \cos \dot{\theta}_2$

È POSSIBILE RISCRIVERE L'ESPRESSIONE COME :

$$\frac{dA_a}{dt} = \frac{2}{3k_d} \cos \theta_2 \cdot \left(\frac{dA_{d2}}{dt} - \sin \theta_2 \right) + \frac{2}{3k_d} \sin \theta_2 \left(\sin \theta_2 A_{d2} - \frac{dA_{q2}}{dt} \right) + \frac{1}{3k_o} \frac{dA_o}{dt}$$

OVVERO, ESTENDENDO ALL'INTERA MATRICE :

$$\begin{pmatrix} \frac{dA_a}{dt} \\ \frac{dA_b}{dt} \\ \frac{dA_c}{dt} \end{pmatrix} = T_P^{-1} \begin{pmatrix} \frac{dA_{d2}}{dt} \\ \frac{dA_{q2}}{dt} \\ \frac{dA_o}{dt} \end{pmatrix} - \frac{2}{3k_d} \sin \theta_2 \begin{pmatrix} \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 \\ \sin \theta_2 \cos \theta_2 & \cos \theta_2 \sin \theta_2 & 0 \\ \sin \theta_2 \cos \theta_2 & \cos \theta_2 \sin \theta_2 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{d2} \\ A_{q2} \\ A_o \end{pmatrix}$$

OVVERO, SINTETIZZANDO LA DERIVAZIONE CON UN APICE, ABBIAMO
IN FORMA IMPLICITA:

(10)

$$T_P A_f' = A_P' - \frac{2}{3k_d} \Omega \begin{pmatrix} k_d & 0 & 0 \\ 0 & -k_d & 0 \\ 0 & 0 & k_o \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & \frac{3}{2} & 0 \\ \frac{3}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} =$$

$$= \frac{d|A_P|}{dt} + \Omega \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} A_P =$$

$$= \begin{pmatrix} \frac{d|A_{o/2}}{dt} - \Omega A_{q/2}(t) \\ \frac{d|A_{q/2}}{dt} + \Omega |A_{o/2}(t) \\ \frac{d|A_o}{dt} \end{pmatrix}$$

SI NOTA, DA QUEST'ULTIMA ESPRESSIONE MATRICIALE,
CHE GLI ASSI (DIRETTO E QUADRATURA) SI INFLUENZANO
VICENDevolMENTE