EEL 7531 - Fundamentos de Controle
1o Trabalho Computacional

1 Sistema Máquina-Barra infinita: apresentação e modelagem

Modelos do tipo máquina-barra infinita como o representado pelo diagrama unifilar da Fig. 1 são frequentemente utilizados em estudos de estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência para investigar o comportamento de um gerador síncrono (normalmente uma máquina equivalente a uma central de geração) conectado mediante um sistema de transmissão a um grande sistema elétrico de inércia muito maior (este representado pela barra infinita). Na Fig. 1, $E\angle\delta$ é a tensão complexa na barra terminal da máquina, $E_\infty\angle 0$ é a tensão da barra infinita, X_e é a reatância equivalente do sistema de transmissão (cujas perdas são desprezadas, e portanto $R_e \approx 0$) e P_e é a potência entregue pela máquina ao grande sistema representado pela barra infinita.

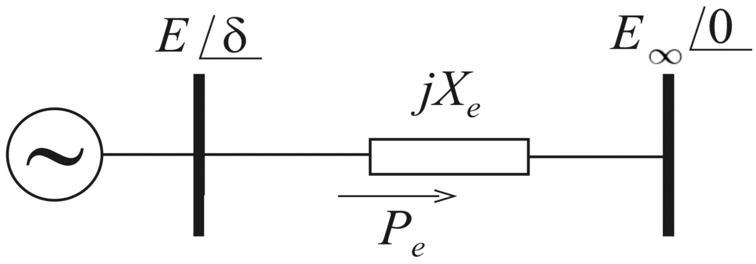

Figura 1: Representação de um sistema constituído por uma máquina síncrona conectado a barra infinita via sistema de transmissão, cujas perdas são desprezadas.

Um tipo de estudo particularmente importante baseado na representação máquina barra-infinita é o de análise de estabilidade *a pequenas perturbações*. Neste caso, o modelo é linearizado com respeito a um dado ponto de operação (normalmente associado à operação em carga pesada), de modo que métodos de análise e projeto de sistemas lineares podem ser empregados. Quando um modelo de gerador síncrono de terceira ordem é utilizado, o sistema linearizado máquina-barra infinita pode ser representado por um modelo de terceira ordem conhecido como *modelo de Heffron-Phillips*, cujo diagrama de blocos é apresentado na Figura 2. As constantes K_1 a K_6 dependem da topologia e parâmetros da rede, dos parâmetros das máquinas e do ponto de operação inicial do sistema. Além disso, $M = 2H$, onde H é a constante de inércia do gerador síncrono, T'_{do} é a constante de tempo transitória de circuito aberto do gerador, D é o coeficiente de amortecimento da carga e $\omega_b = 2\pi \times 60$ é a frequência nominal do sistema em rad/s. Na Figura 2 também é representado o sistema de excitação da máquina, cuja função de transferência é dada por:

$$EXC(s) = \frac{K_\epsilon}{1 + sT_\epsilon}$$

sendo K_ϵ e T_ϵ o ganho e a constante de tempo do sistema de excitação, respectivamente.

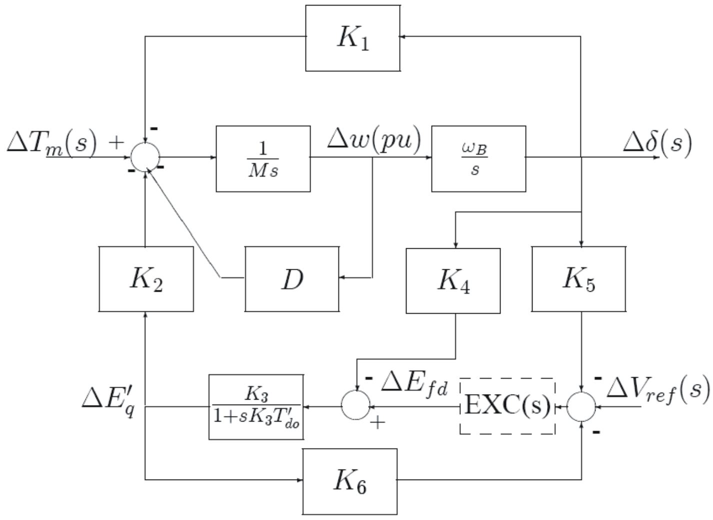

Figura 2: Diagrama de blocos do modelo linearizado do sistema máquina-barra infinita, incluindo sistema de excitação.

O diagrama de blocos da Figura 2 pode ser convertido em um modelo no espaço de estados, sendo o vetor de estados dado por:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \Delta E'q & \Delta\omega & \Delta\delta & \Delta E_{fd} \end{bmatrix}^T$$

onde:

$\Delta E'q$:	variação da tensão transitória de eixo em quadratura;
$\Delta\omega$:	desvio de velocidade da máquina;
$\Delta\delta$:	desvio no ângulo do rotor da máquina;
ΔE_{fd} :	variação da tensão de campo da máquina.

As entradas do sistema são

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \Delta V_{ref} & \Delta T_m \end{bmatrix}^T$$

onde V_{ref} é a tensão de referência do regulador de tensão e T_m é o torque mecânico entregue pela turbina ao eixo do gerador. Finalmente, as saídas são o desvio de velocidade $\Delta\omega$ e o desvio no torque elétrico fornecida pela máquina, ΔT_e, formando o vetor $\mathbf{y} = \begin{bmatrix}\Delta\omega & \Delta T_e\end{bmatrix}^T$. Da Figura 2, é possível se deduzir o modelo dinâmico no tempo para o sistema máquina-barra infinita, cujas equações são:

$$\begin{aligned} 2H\,\tfrac{d\,\Delta\omega}{dt} + D\,\Delta\omega &= \Delta T_m - \left(K_1\,\Delta\delta + K_2\,\Delta E'_q\right) \\ \Delta\dot{\delta} &= 2\pi f^0 \times \Delta\omega(t) \\ K_3 T'_{do}\,\tfrac{d\,\Delta E'_q}{dt} + \Delta E'_q &= K_3(\Delta E_{fd} - K_4\Delta\delta) \\ T_\epsilon\,\tfrac{d\,\Delta E_{fd}}{dt} + \Delta E_{fd} &= K_\epsilon\left[\Delta V_{ref} - \left(K_5\,\Delta\delta + K_6\,\Delta E'_q\right)\right] \end{aligned} \tag{1}$$

No presente trabalho, o gerador síncrono tem potência nominal de 192 MVA, e na condição de operação considerada está entregando 163 MW à barra infinita. Os parâmetros da máquina, sistema de transmissão e sistema de excitação são dados na Tabela 1, enquanto que as constantes $K_1, \ldots, K_6$ do modelo de Heffron-Phillips são fornecidos na Tabela 2, ambas apresentadas no Anexo A.

A representação do modelo matemático (1) no espaço de estados é (verifique!):

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} -0,459 & 0 & -0,2893 & 0,1667 \\ -0,437 & 0 & -0,3586 & 0 \\ 0 & 377 & 0 & 0 \\ -5186 & 0 & 516,8 & -50 \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0,3751 \\ 0 & 0 \\ 10000 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{u}$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1,165 & 0 & 0,9559 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x}$$

O trabalho computacional consiste das seguintes etapas:

2 Análise

1. **Controlabilidade e Observabilidade**

   (a) Verifique que é possível controlar completamente o sistema máquina-barra infinita usando as duas entradas disponíveis;

   (b) Se apenas a tensão de referência do regulador de tensão ΔV_{ref} for utilizada como entrada (isto é, com $u_2 = \Delta T_m = 0$) o sistema ainda permanece controlável?

   (c) Verifique que o sistema é observável quando ambas as variáveis $y_1 = \Delta\omega$ e $y_2 = \Delta T_e$ são disponíveis via medição direta;

   (d) Suponha agora que a única variável mensurável é o desvio de velocidade do gerador. Nestas condições, o modelo da máquina é observável?

   (e) Repita o item c), se agora o desvio no torque elétrico fornecido pela máquina é a única variável medida.

2. **Estabilidade**

   (a) Calcule os autovalores em malha aberta do modelo linearizado e identifique os autovalores dominantes (que estão associados aos modos eletromecânicos);

   (b) Determine a frequência em Hz dos modos dominantes, bem como sua razão de amortecimento;

   (c) Analise a estabilidade do sistema máquina-barra infinita. Há autovalores instáveis? Em caso positivo, quais são eles? É possível associá-los a um modo específico (eletromecânico, da excitatriz, etc.)?

   (d) Utilizando o Matlab, Simulink ou outra ferramenta de simulação similar, determine a curva de resposta do torque elétrico a um degrau de torque mecânico $\Delta T_m = 0,05$ pu durante $5,0$ s, considerando que não há alteração da tensão de referência do regulador (isto é, $\Delta V_{ref} = 0$). Analise a correlação entre a curva resultante e os resultados obtidos nos itens 2b e 2c.

3 Projeto

Nesta seção, considere que a única entrada de controle é ΔV_{ref} (ou seja, $u_2 = \Delta T_m = 0$) e que a única saída mensurável é ΔT_e (isto é, supõe-se que $\Delta\omega$ não está disponível para medição).

3.1 Projeto por alocação de polos (Controle modal e observador)

1. Projete um controle modal que garanta que os polos *dominantes* do sistema em malha fechada sejam complexos conjugados, com frequência igual à dos polos dominantes em malha aberta e com amortecimento de no mínimo 6%;

2. Projete um observador de estados para o sistema de uma entrada e uma saída, arbitrando a posição dos polos do observador suficientemente à esquerda do plano complexo de modo a conseguir um desempenho satisfatório do sistema;

3. Simule o sistema em malha fechada para $\mathbf{x}(\mathbf{0})$ arbitrário e $\hat{\mathbf{x}}(\mathbf{0}) = \mathbf{0}$ e analise o seu desempenho em termos de: *(a)* convergência da evolução no tempo dos estados estimados para as curvas dos estados verdadeiros, e *(b)* comportamento dinâmico (tempo de resposta, amortecimento) da resposta do sistema em malha fechada.

3.2 Projetos LQR e LQG

1. Projete um controlador por realimentação de estados usando a estratégia *LQR* (controle ótimo). Considere inicialmente uma matriz de ponderação dos estados da forma $\mathbf{Q} = \text{diag}\{0, q_2, 0, 0\}$, onde q_2 é um número inteiro positivo, e $R = 1$, e avalie posteriormente outras alternativas de definição de $\mathbf{Q}$ e R;

2. Projete um filtro de Kalman (estratégia *LQG*) para estimar os estados do sistema;

3. Encontre os auto-valores para o sistema em malha fechada (Processo + LQR + LQG);

4. Simule o sistema arbitrando valores iniciais não nulos para os estados, compare o movimento dos estados observados ao dos estados do processo e analise o desempenho do sistema em malha fechada.

ANEXO A

Tabela 1: Parâmetros da máquina, sistema de transmissão e regulador de tensão *

Parâmetros da máquina	
Potência nominal (S_base)	192 MVA
Constante de inércia (H)	1,333 s
Coeficiente de amortecimento (D)	0
Reatância transitória de eixo direto (X'_d)	0,23 pu
Reatância transitória de eixo em quadratura (X'_q)	0,378 pu
Reatância síncrona de eixo direto (X_d)	1,7199 pu
Reatância síncrona de eixo em quadratura (X_q)	1,6598 pu
Resistência de armadura (R_a)	0
Constante de tempo transitória de eixo direto (T'_{d0})	6 s
Constante de tempo transitória de eixo em quadratura (T'_{q0})	0,535 s
Parâmetros do sistema de transmissão	
Reatância externa (X_e	0,6194 pu
Parâmetros do regulador de tensão	
Ganho (K_ϵ)	200
Constante de tempo (T_ϵ)	0,02 s

* Valores em pu na base de potência da máquina (192 MVA)

Tabela 2: Parâmetros do modelo de Heffron-Phillips

K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6
$0,9560$	$1,1650$	$0,3631$	$1,7358$	$-0,0517$	$0,5186$