

14º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2023

ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO MSP CONSIDERANDO UM BARRAMENTO INTERMEDIÁRIO

DAVI DA SILVA OLIVEIRA DIAS¹, DANILO B. DO VALLE², CLAUDINER M. DE SEIXAS³

¹Graduando em Engenharia Elétrica, IFSP, Câmpus Votuporanga, dias.oliveira@aluno.ifsp.edu.br

²Doutor em Engenharia Elétrica, Docente, IFSP-GPAI, Câmpus Votuporanga, danilo.valle@ifsp.edu.br

³Doutor em Engenharia Elétrica, Docente, IFSP-GPAI, Câmpus Votuporanga, claudiner@ifsp.edu.br

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.04.04.00-2 Sistemas Elétrico de Potência.

RESUMO: Neste trabalho, propõe-se a modelagem e a implementação computacional de um sistema de máquina síncrona conectada a um barramento por meio de uma linha de transmissão, utilizando o Modelo de Sensibilidade de Potência (MSP). Uma barra intermediária foi adicionada ao sistema de transmissão, possibilitando a futura inclusão de dispositivos, como, por exemplo, os dispositivos *Flexible AC Transmission Systems* (FACTS). O programa foi validado por meio da utilização de um sistema de teste amplamente reconhecido na literatura. Com o programa desenvolvido, foi possível avaliar como o ganho do regulador automático de tensão de ação rápida influencia o torque de amortecimento do sistema e a estabilidade em face de pequenas perturbações. Todo o programa foi implementado em um *software* livre chamado Scilab, uma alternativa de código aberto ao Matlab®.

PALAVRAS-CHAVE: Sistema Máquina Barramento Infinito (MBI); Modelagem; Sistema Elétrico de Potência; Pequenas Perturbações; Regulador Automático de Tensão.

STUDY AND COMPUTATIONAL IMPLEMENTATION OF PSM CONSIDERING AN INTERMEDIATE BUS

ABSTRACT: In this work, it is proposed the modeling and computational implementation of a synchronous machine system connected to a infinite bus through a transmission line, using the Power Sensitivity Model (PSM). An intermediate bus was added to the transmission system, enabling the future inclusion of devices, such as Flexible AC Transmission Systems (FACTS) devices. The program was validated using a well-known test system in the literature. With the developed program, it was possible to assess how the fast voltage regulator influences the damping torque of the system and its stability under small disturbances. The entire program was implemented in open-source software called Scilab, an alternative to Matlab®.

KEYWORDS: Machine Infinite Bus System (MIB); Modeling; Electric Power system; Small disturbances; Automatic Voltage Regulator.

INTRODUÇÃO

O principal objetivo de um sistema elétrico de potência é fornecer energia de maneira eficiente e econômica. Para atingir esse objetivo, é necessário que o sistema possua aspectos relacionados à qualidade, segurança e confiabilidade.

Neste cenário é indispensável realizar uma análise e um planejamento detalhado da operação do sistema e de sua proteção, juntamente com as condições necessárias para a estabilidade do sistema.

A estabilidade de um sistema pode ser compreendida como a capacidade que ele possui de retornar a um estado de equilíbrio após ter sido sujeito a uma perturbação física (Machowski et al., 2020). Para fins operacionais, a análise de estabilidade do sistema de energia desempenha um papel crucial na determinação de seus limites de operação. Essa análise também é conduzida para verificar os ajustes dos relés e definir os parâmetros dos dispositivos de controle. Decisões e conclusões relevantes sobre a operação e o planejamento de sistemas de potência são baseadas nos resultados dos estudos de estabilidade (Chiang, 2011).

No estudo da estabilidade frente a pequenas perturbações, considerando um dado ponto de operação, o modelo empregado pode ser linear. Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo implementar o sistema máquina-barramento infinito (MBI) modelado pelo Modelo de Sensibilidade de Potência (MSP), e analisar como o ganho do regulador automático de tensão influencia de maneira negativa a estabilidade dinâmica do sistema.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para dedução do MSP, foi utilizado um sistema MBI, com a inclusão de uma barra intermediária (para a futura implementação de outros dispositivos no sistema), conforme apresentado na Figura 1.

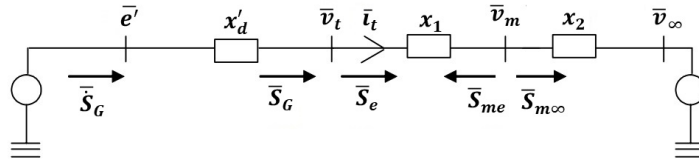


Figura 1: Diagrama Unifilar – Sistema MBI.

Na Figura 1, $\bar{S}_G$ é o fluxo de potência ativa e reativa chegando à barra terminal do gerador, $\bar{S}_e$ o fluxo de potência ativa e reativa deixando a barra terminal, $\bar{S}_{me}$ o fluxo de potência ativa e reativa que flui da barra intermediária m para a barra terminal do gerador síncrono e $\bar{S}_{m\infty}$ o fluxo de potência ativa e reativa que flui da barra intermediária m para a barra infinita. O parâmetro x_d' é a reatância transitória do eixo direto da máquina síncrona, x_1 a reatância do transformador e x_2 a reatância da linha de transmissão. A tensão interna do gerador é $\bar{e}'$, a tensão terminal da máquina síncrona é $\bar{v}_t$, a tensão da barra intermediária do sistema é $\bar{v}_m$ e a tensão da barra infinita é $\bar{v}_\infty$.

Por inspeção da Figura 1 e fazendo uso da transformada de Park é possível chegar nas Equações de (1) à (6), chamadas de equações básicas para o desenvolvimento do MSP.

$$i_{td} = \frac{e'_q - v_t \cos(\delta - \theta_t)}{x'_d} \quad (1)$$

$$i_{tq} = \frac{v_t}{x_q} \sin(\delta - \theta_t) \quad (2)$$

$$e'_d = (x_q - x'_d) i_{tq} \quad (3)$$

$$e'_q = v_t \cos(\delta - \theta_t) + x'_d i_{td} \quad (4)$$

$$v_{td} = v_\infty \sin \delta - x_e i_{tq} = x_q i_{tq} = v_t \sin(\delta - \theta_t) \quad (5)$$

$$v_{tq} = e'_q - x'_d i_{td} = v_\infty \cos \delta + x_e i_{td} = v_t \cos(\delta - \theta_t) \quad (6)$$

Utilizando as equações básicas do MSP, foi possível obter a potência ativa e a potência reativa entregue pelo gerador à barra terminal, conforme apresentado nas Equações (7) e (8), respectivamente.

$$P_g = \frac{e'_q v_t}{x'_d} \sin(\delta - \theta_t) + \frac{v_t^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x'_d} \right) \sin[2(\delta - \theta_t)] \quad (7)$$

$$Q_g = \frac{e'_q v_t}{x'_d} \cos(\delta - \theta_t) - \frac{v_t^2}{x'_d} - \frac{v_t^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x'_d} \right) \{1 - \cos[2(\delta - \theta_t)]\} \quad (8)$$

Analisando a Figura 1, é possível descrever as potências ativa e reativa que deixam o terminal do gerador, consoante as Equações (9) e (10).

$$P_e = \frac{v_t v_m}{x_1} \sin(\theta_t - \theta_m) \quad (9)$$

$$Q_e = \frac{v_t^2}{x_1} - \frac{v_t v_m}{x_1} \cos(\theta_t - \theta_m) \quad (10)$$

Os fluxos de potências ativa e reativa que fluem da barra m para a barra terminal e da barra m para o barramento infinito são mostrados nas Equações (11), (12), (13) e (14), respectivamente.

$$P_{me} = \frac{v_m v_t}{x_1} \sin(\theta_m - \theta_t) \quad (11)$$

$$Q_{me} = \frac{v_m^2}{x_1} - \frac{v_m v_t}{x_1} \cos(\theta_m - \theta_t) \quad (12)$$

$$P_{m\infty} = \frac{v_m v_\infty}{x_2} \sin(\theta_m) \quad (13)$$

$$Q_{m\infty} = \frac{v_m^2}{x_2} - \frac{v_m v_\infty}{x_2} \cos(\theta_m) \quad (14)$$

Considerando que o balanço nodal de potência ativa e de potência reativa deve ser atendido em todas as barras do sistema, pode-se escrever as Equações (15) e (16).

$$\Delta P_g - \Delta P_e = 0 \quad \text{e} \quad \Delta Q_g - \Delta Q_e = 0 \quad (15)$$

$$-\Delta P_{me} - \Delta P_{m\infty} = 0 \quad \text{e} \quad -\Delta Q_{me} - \Delta Q_{m\infty} = 0 \quad (16)$$

Aplicando-se a linearização baseada na expansão por série de Taylor nas Equações (7) e (8), foram obtidos os coeficientes de sensibilidade de potência ativa ($A1_g$, $A2_g$ e $A3_g$) e de potência reativa ($R1_g$, $R2_g$ e $R3_g$) do gerador síncrono. Realizando procedimento análogo nas Equações (9) e (10), obtiveram-se os coeficientes de potência ativa ($A1_e$, $A2_e$ e $A3_e$) e de potência reativa ($R1_e$, $R2_e$ e $R3_e$) da linha de transmissão entre a barra terminal e a barra intermediária m . A linearização das Equações (11) e (12), forneceram os coeficientes de sensibilidade de potência ativa ($A1_{me}$, $A2_{me}$ e $A3_{me}$) e de potência reativa ($R1_{me}$, $R2_{me}$ e $R3_{me}$) da linha de transmissão entre a barra intermediária m e a barra terminal. Por fim, com a linearização das Equações (13) e (14), foram obtidos os coeficientes de potência ativa ($A1_{m\infty}$, $A2_{m\infty}$) e de potência reativa ($R1_{m\infty}$, $R2_{m\infty}$) da linha de transmissão entre a barra intermediária m e a barra infinita.

A substituição das Equações (7) à (10), linearizadas, no conjunto de Equações (15), resultou nas Equações (17) e (18).

$$A1_g \Delta \delta + A2_g \Delta e'_q - (A1_g + A1_e) \Delta \theta_t + A1_e \Delta \theta_m + (A3_g - A2_e) \Delta v_t - A3_e \Delta v_m = 0 \quad (17)$$

$$R1_g \Delta \delta + R2_g \Delta e'_q - (R1_g + R1_e) \Delta \theta_t + R1_e \Delta \theta_m + (R3_g - R2_e) \Delta v_t - R3_e \Delta v_m = 0 \quad (18)$$

De forma análoga, a substituição das Equações (11) à (14), linearizadas, no conjunto de Equações (16), resultou nas Equações (19) e (20).

$$A1_{me} \Delta \theta_t - (A1_{me} + A1_{m\infty}) \Delta \theta_m - A3_{me} \Delta v_t - (A2_{me} + A2_{m\infty}) \Delta v_m = 0 \quad (19)$$

$$R1_{me} \Delta \theta_t - (R1_{me} + R1_{m\infty}) \Delta \theta_m - R3_{me} \Delta v_t - (R2_{me} + R2_{m\infty}) \Delta v_m = 0 \quad (20)$$

No tocante à dinâmica do MSP, optou-se por representar a máquina síncrona por um modelo de terceira ordem. A equação *swing* da máquina síncrona, em sua forma linearizada, pode ser definida conforme as Equações (21) e (22).

$$\Delta \dot{\omega} = \frac{1}{M} \Delta P_m - \frac{1}{M} \Delta P_g - \frac{D}{M} \Delta \omega \quad (21)$$

$$\Delta \dot{\delta} = \omega_0 \Delta \omega \quad (22)$$

Linearizando a Equação (7) e a substituindo na Equação (21), chega-se à Equação (23).

$$\Delta \dot{\omega} = -\frac{D}{M} \Delta \omega - \frac{A1_g}{M} \Delta \delta - \frac{A2_g}{M} \Delta e'_q + \frac{A1_g}{M} \Delta \theta_t - \frac{A3_g}{M} \Delta v_t + \frac{1}{M} \Delta P_m \quad (23)$$

A dinâmica da tensão interna da máquina síncrona é representada pela Equação (24).

$$T'_{d0} \dot{e}'_q = e_{fd} - e'_q - (x_d - x'_d) i_{td} \quad (24)$$

Substituindo a Equação (1), na Equação (24) e realizando a sua linearização, chegou-se à Equação (25).

$$\Delta \dot{e}'_q = -\frac{k_A}{T'_{d0}} \Delta \delta - \frac{x_d}{T'_{d0} x'_d} \Delta e'_q + \frac{1}{T'_{d0}} \Delta e_{fd} + \frac{k_A}{T'_{d0}} \Delta \theta_t + \frac{k_V}{T'_{d0}} \Delta v_t \quad (25)$$

Na Equação (25), os temos $k_A = \frac{(x_d - x'_d)}{x'_d} v_t \sin(\delta - \theta_t)$ e $k_V = \frac{(x_d - x'_d)}{x'_d} \cos(\delta - \theta_t)$, são os coeficientes da reação de armadura do MSP. T'_{d0} e e_{fd} são, respectivamente, a constante de tempo transitória de eixo direto em circuito aberto e a tensão aplicada ao circuito de campo do gerador síncrono.

Por fim, modelou-se o sistema de excitação do gerador síncrono no MSP. A equação dinâmica linearizada de um regulador automático de tensão (do tipo estático) é definida pela Equação (26).

$$\Delta \dot{e}_{fd} = -\frac{1}{T_r} \Delta e_{fd} - \frac{K_r}{T_r} \Delta v_t + \frac{K_r}{T_r} \Delta v_{ref} \quad (26)$$

Utilizando-se as equações diferenciais (22), (23), (25) e (26), e as algébricas (17), (18), (19) e (20), pode-se realizar uma representação no espaço de estados do MSP, conforme a Equação (27).

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} [u] \quad (27)$$

As submatrizes da equação (27), são apresentadas pelo conjunto de equações (28).

$$J_{11} = \begin{bmatrix} -\frac{D}{M} & -\frac{A1_g}{M} & -\frac{A2_g}{M} & 0 \\ \omega_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{k_A}{T'_{d0}} & -\frac{x_d}{T'_{d0} x'_d} & \frac{1}{T'_{d0}} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \quad J_{12} = \begin{bmatrix} \frac{A1_g}{M} & 0 & -\frac{A3_g}{M} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_A}{T'_{d0}} & 0 & \frac{k_V}{T'_{d0}} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{k_r}{T_r} & 0 \end{bmatrix}$$

$$J_{22} = \begin{bmatrix} -(A1_g + A1_e) & A1_e & (A3_g - A2_e) & -A3_e \\ -(R1_g + R1_e) & R1_e & (R3_g - R2_e) & -R3_e \\ A1_{me} & -(A1_{me} + A1_{m\infty}) & -A3_{me} & -(A2_{me} + A2_{m\infty}) \\ R1_{me} & -(R1_{me} + R1_{m\infty}) & -R3_{me} & -(R2_{me} + R2_{m\infty}) \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$J_{21} = \begin{bmatrix} 0 & A1_g & A2_g & 0 \\ 0 & R1_g & R2_g & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{M} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{k_r}{T_r} \end{bmatrix} \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Na Equação (27), o vetor $x = [\Delta\omega \ \Delta\delta \ \Delta e'_q \ \Delta e_{fd}]^t$, o vetor $z = [\Delta\theta_t \ \Delta\theta_m \ \Delta v_t \ \Delta v_m]^t$ e o vetor $u = [\Delta P_m \ \Delta V_{ref}]^t$. A matriz de estados do sistema é $A = (J_{11} - J_{12}J_{22}^{-1}J_{21})$, sendo $B = (B_1 - J_{12}J_{22}^{-1}B_2)$ a matriz de entradas.

A partir da matriz característica do sistema (matriz A), é possível obter os autovalores do sistema, os quais fornecerão informações valiosas acerca da estabilidade do sistema.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com as deduções realizadas, foi desenvolvido um programa computacional para analisar a estabilidade do sistema e poder avaliar como o ganho do regulador automático de tensão (k_r) afeta o torque de amortecimento inerente do sistema.

Para validar o programa desenvolvido, utilizou-se dados de sistemas de teste disponíveis na literatura de estabilidade, como aqueles descritos no livro dos autores Gibbard, Pourbeik e Vowles (2015). Os dados específicos do sistema de teste empregados neste estudo foram obtidos em Silva (2008).

A análise foi conduzida, considerando a avaliação dos autovalores, bem como os coeficientes de amortecimento (ξ) e as frequências naturais não amortecidas (f_n) associadas aos autovalores dominantes. Esses resultados estão apresentados na Tabela (1).

Tabela 1: Autovalores, coeficiente de amortecimento e frequência de oscilação.

k_r	Autovalores	ξ	$f_n(Hz)$
05	$-0,13425 \pm 6,64185i$	0,02021	1,05708
15	$-0,01219 \pm 6,64919i$	0,00183	1,05825
50	$0,32208 \pm 6,81425i$	-0,04721	1,08452
100	$0,52606 \pm 7,12567i$	-0,07362	1,13408

A análise da Tabela 1 revela que a frequência de oscilação do sistema está situada na faixa de 0,7 a 1,2 Hz, o que caracteriza oscilações do tipo local, ocorrendo quando uma máquina (ou usina) oscila em relação ao restante do sistema.

Também é notável que a estabilidade do sistema está assegurada com um ganho do regulador automático de tensão de até 15, conforme evidenciado na análise dos autovalores apresentados na Tabela (1). Entretanto, para valores de ganho superiores a 15, a parte real dos autovalores se torna positiva, indicando a instabilidade do sistema. Esta constatação pode ser corroborada de forma alternativa ao avaliar o coeficiente de amortecimento, que passa a ser negativo.

As curvas da Figura (2) foram geradas através da aplicação de uma perturbação de 5% na potência mecânica da máquina síncrona. Isso foi feito visando analisar os efeitos que essa perturbação teria sobre o sistema MBI. Foram plotadas as variações na velocidade angular do rotor da máquina para dois valores diferentes de k_r , nomeadamente 5 e 50.

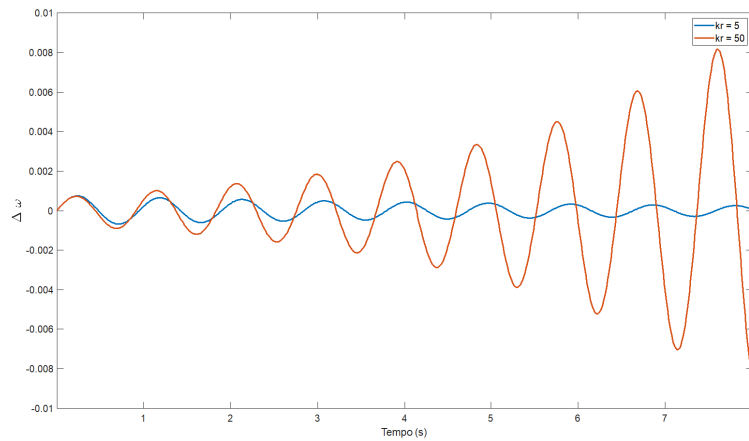


Figura 2: Variação da velocidade angular do rotor da máquina síncrona, após perturbação.

CONCLUSÕES

Neste estudo, realizou-se o modelamento matemático e a implementação computacional do sistema MBI, utilizando o MSP como base. Para representar a máquina síncrona, adotou-se um modelo de terceira ordem e incorporou-se um regulador automático de tensão de primeira ordem. A validação do programa foi conduzida mediante a sistemas de teste previamente descritos na literatura, com os resultados demonstrando a precisão do programa computacional.

Neste modelo, a adição de um barramento intermediário abre portas para pesquisas futuras, possibilitando a inclusão de controladores FACTS e a avaliação de sua influência na estabilidade diante de pequenas perturbações. Os resultados obtidos destacaram que o regulador automático de tensão de primeira ordem pode impactar a estabilidade do sistema, principalmente quando configurado com valores elevados de ganho e baixas constantes de tempo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, a minha família e ao meu orientador, por todo apoio oferecido a mim para a realização deste projeto, sou muito grato a todos.

REFERÊNCIAS

- CHIANG, H.-D. *Direct methods for stability analysis of electric power systems: theoretical foundation, BCU methodologies, and applications*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011.
- GIBBARD, M. J.; POURBEIK, P.; VOWLES, D. J. *Small-signal stability, control and dynamic performance of power systems*. [S.l.]: University of Adelaide press, 2015.
- MACHOWSKI, J. et al. *Power system dynamics: stability and control*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2020.
- SILVA, M. S. *Estudo Comparativo do Modelo Linear de Heffron e Phillips e Modelo de Sensibilidade de Potência com a Inclusão dos Dispositivos FACTS SVC e TCSC*. Dissertação de Mestrado, 2008. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/87231>>.