

13^o Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2022

Estudo e Implementação Computacional do Sistema MBI representado pelo Modelo de Sensibilidade de Potência (MSP)

Gustavo de Sousa Marques Silva¹, Danilo Basseto do Valle², Claudiner Mendes de Seixas³

¹Graduando em Engenharia Elétrica, Bolsista PIBIFSP, IFSP, Câmpus VTP, gustavo.marques@aluno.ifsp.edu.br

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

³Doutor em Engenharia Elétrica, Docente, IFSP, Câmpus VTP, claudinere@ifsp.edu.br

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.04.04.05-3 Sistemas Elétricos de Potência.

RESUMO: O MSP é uma alternativa ao modelo clássico conhecido como Heffron e Phillips (MHP), porém apresenta significativas vantagens, principalmente quando se deseja modelar dispositivos FACTS (*Flexible AC Transmission System*) no sistema elétrico. Para a concepção do sistema MBI-MSP foi utilizado um modelo de terceira ordem para representação da máquina síncrona e um modelo de primeira ordem para seu sistema de excitação, ou seja, um típico controlador tiristorizado de ação rápida. Neste trabalho é proposto a representação do sistema MBI-MSP no domínio do tempo, através de equações algébricas e diferenciais, com sua posterior modelagem em espaço de estados. A partir do desenvolvimento computacional e das simulações realizadas, foi possível avaliar o comportamento do sistema através da análise dos autovalores da matriz de estados do sistema e comparar o modelo MBI-MSP com o modelo MBI-MHP.

PALAVRAS-CHAVE: Modelo de Heffron e Phillips (MHP), Modelo de Sensibilidade de Potência (MSP), Sistemas Elétrico de Potência; Sistema Máquina Barramento Infinito (MBI).

Study and Computational Implementation of the SMIB system using the Power Sensitivity Model (PSM)

ABSTRACT: The PSM is an alternative to Heffron-Phillip's Model, with significant advantages, especially when modeling FACTS devices is necessary in the electrical power system. For the design of the SMIB-PSM system, a third-order model was used to represent the synchronous machine and a first-order model for its excitation system, i.e., a typical fast-acting thyristor controller. In this paper, we propose the representation of the SMIB-PSM system in the time domain, through algebraic and differential equations and its subsequent state space representation. From the computational development and the simulations performed, it was possible to evaluate the behavior system through the eigenvalue analysis and to compare SMIB-PSM model with SMIB-HPM model.

KEYWORDS: Electrical Power Systems, Heffron-Phillip's Model (HPM), Power Sensitivity Model (PSM), Single Machine Infinite Bus System (SMIB) .

INTRODUÇÃO

O comportamento dinâmico de um Sistema Elétrico de Potência (SEP) é estudado em sistemas do tipo: máquina síncrona conectada a um barramento infinito, sendo o modelo linear conhecido como “Heffron e Phillips” amplamente utilizado na literatura. Este modelo serviu como base para vários trabalhos científicos e forneceu as bases teóricas que foram e são de extrema relevância para a operação segura e confiável dos sistemas elétricos mundiais (DEMELLO; CONCORDIA, 1969)(KUNDUR; MALIK, 1994).

Entretanto, este modelo apresenta algumas características desfavoráveis, como a necessidade da manutenção do barramento infinito, bem como a eliminação da barra terminal do gerador. Estas características representam limitações significativas ao modelo, principalmente quando se deseja incluir na análise os controladores *FACTS*, que são equipamentos de fundamental importância devido à necessidade cada vez maior de flexibilização no sistema elétrico (SONG; JOHNS, 1999).

Com o intuito de superar as limitações do modelo de “Heffron e Phillips”, foi proposto um modelo alternativo para representar o sistema elétrico de potência. Este modelo é baseado em coeficientes de sensibilidade de potência ativa e reativa, sendo denominado por “Modelo de Sensibilidade de Potência”, cujo estudo e implementação computacional é o objetivo deste trabalho (DECKMANN; COSTA, 1994).

Para a validação do modelamento matemático do sistema MBI-MSP análises comparativas com o sistema MBI-MHP foram realizadas, considerando diferentes pontos operativos do sistema. Os resultados obtidos apontaram que tanto a modelagem matemática, quanto a sua implementação computacional estão de acordo com a literatura, o que possibilitará novos estudos e a inclusão de dispositivos *FACTS* na modelagem do SEP.

MATERIAIS E MÉTODOS

O equacionamento do MSP foi obtido através da análise do diagrama esquemático apresentado na Figura 1, que representa uma máquina síncrona conectada ao barramento infinito através de uma impedância externa x_e . Nesta figura, \bar{e}' , \bar{v}_t e \bar{v}_∞ , são respectivamente, as tensões da barra interna do gerador, da barra terminal e do barramento infinito (tomado como referência angular do sistema). A grandeza x'_d representa a reatância transitória de eixo direto do gerador.

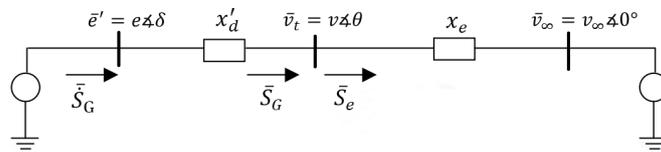


Figura 1: Diagrama Máquina Barramento Infinito

Utilizando a transformada de park, foi possível obter a potência ativa e a potência reativa entregue pelo gerador ao barramento terminal v_t , conforme o definido pelas Equações (1) e (2).

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

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

Ainda através do diagrama da Figura 1, a potência ativa e a potência reativa que deixa o barramento

terminal podem ser escritas conforme o conjunto de Equações (3).

$$P_e = \frac{v_t v_\infty}{x_e} \sin(\theta) \quad \text{e} \quad Q_e = \frac{v_t^2}{x_e} - \frac{v_t v_\infty}{x_e} \cos(\theta) \quad (3)$$

O conceito do MSP baseia-se no balanço nodal de potência ativa e reativa em todas as barras do sistema. Deste modo, na condição de equilíbrio, as Equações (4), devem ser satisfeitas.

$$\Delta P_g - \Delta P_e = 0 \quad \text{e} \quad \Delta Q_g - \Delta Q_e = 0 \quad (4)$$

A linearização baseada na expansão por série de Taylor da Equação (1) e da Equação de potência ativa apresentada em (3), definem os coeficientes de sensibilidade de potência ativa do gerador ($A1g$, $A2g$ e $A3g$) e da rede elétrica ($A1e$ e $A2e$). De modo análogo, a linearização da Equação (2) e da potência reativa fornecida em (3), definem os coeficientes de sensibilidade de potência reativa do gerador ($R1g$, $R2g$ e $R3g$) e da rede elétrica ($R1e$ e $R2e$).

Após a linearização das Equações (1) a (3) e posterior substituição no conjunto de Equações (4), obtêm-se as Equações Algébricas (5) e (6) que compõem o MSP.

$$A1g\Delta(\delta - \theta) + A2g\Delta e'_q + A3g\Delta v_t - A1e\Delta\theta - A2e\Delta v_t = 0 \quad (5)$$

$$R1g\Delta(\delta - \theta) + R2g\Delta e'_q + R3g\Delta v_t - R1e\Delta\theta - R2e\Delta v_t = 0 \quad (6)$$

As equações que relacionam os fenômenos físicos, mecânicos e elétricos do gerador síncrono foram obtidas a partir da equação de *swing* da máquina. Esta equação de segundo grau foi decomposta em duas equações de primeira ordem, sendo a variação da velocidade síncrona do gerador ($\Delta\dot{\omega}$) e do ângulo de carga ($\Delta\dot{\delta}$) da máquina. Tais equações, linearizadas em torno de um ponto de equilíbrio, são descritas conforme o estabelecido em (7) e (8).

$$\Delta\dot{\omega} = -\frac{D}{M}\Delta\omega - \frac{A1g}{M}\Delta\delta - \frac{A2g}{M}\Delta e'_q + \frac{A1g}{M}\Delta\theta - \frac{A3g}{M}\Delta V + \frac{1}{M}\Delta P_m \quad (7)$$

$$\Delta\dot{\delta} = \omega_0\Delta\omega \quad (8)$$

Nas Equações (7) e (8), D representa o coeficiente de torque de amortecimento intrínseco do sistema, ΔP_m a variação da potência mecânica e M igual a $2H$, sendo H a constante de inércia das máquinas síncronas (KUNDUR; MALIK, 1994).

A variação da tensão interna de um gerador síncrono é definida pela Equação (9), que tem como objetivo implementar a dinâmica do circuito de campo da máquina síncrona. Nesta equação linearizada, T'_{d0} e e_{fd} representam a constante de tempo transitória de eixo direto do gerador em circuito aberto e a tensão de campo da máquina síncrona (KUNDUR; MALIK, 1994).

$$\Delta \dot{e}'_q = -\frac{K_A}{T'_{d0}}\Delta\delta - \frac{X_d}{T'_{d0}X'_d}\Delta e'_q + \frac{1}{T'_{d0}}\Delta e_{fd} + \frac{k_A}{T'_{d0}}\Delta\theta + \frac{k_V}{T'_{d0}}\Delta v_t \quad (9)$$

Na Equação (9), os coeficientes $k_V = \left(\frac{X_d - X'_d}{X'_d}\right) \cos(\delta - \theta)$ e $k_A = \left(\frac{X_d - X'_d}{X'_d}\right) v_t \sin(\delta - \theta)$, foram obtidos no processo de linearização e são conhecidos como coeficientes de reação de armadura do MSP.

A estrutura do regulador automático de tensão (RAT) de primeira ordem é formada por um ganho K_r e por uma constante de tempo T_r , sendo a equação característica deste tipo de regulador apresentada em sua forma linearizada pela Equação (10).

$$\Delta \dot{e}_{fd} = -\frac{1}{T_r} \Delta e_{fd} - \frac{K_r}{T_r} \Delta v_t + \frac{K_r}{T_r} \Delta v_{ref} \quad (10)$$

Na Equação (10), Δv_{ref} é a tensão de referência especificada para o sistema e e_{fd} é a tensão de excitação regulada da máquina síncrona. Considerando o RAT de ação rápida, o SEP passa a ter uma representação mais fidedigna no tocante ao estudo da estabilidade dinâmica do sistema.

Compactando as informações que descrevem o sistema e organizando as quatro equações diferenciais de primeira ordem obtidas no modelamento (Equações 7 à 10), juntamente com as duas equações algébricas (Equações 5 e 6), é possível definir a representação do sistema MBI-MSP no domínio do tempo, conforme definido pelo Conjunto (11).

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

No Conjunto (11), têm-se o vetor de variáveis de estado: $x = [\Delta\omega \ \Delta\delta \ \Delta e'_q \ \Delta e_{fd}]^t$, o vetor de variáveis algébricas: $z = [\Delta\theta \ \Delta v_t]^t$ e o vetor de variáveis de entrada: $u = [\Delta P_m \ \Delta v_{ref}]^t$. As submatrizes que compõem o Conjunto (11), podem ser observadas pelo conjunto de Equações (12).

$$\begin{aligned} J_{11} &= \begin{bmatrix} -\frac{D}{M} & -\frac{A1g}{M} & -\frac{A2g}{M} & 0 \\ \omega_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{k_A}{T'_{d0}} & -\frac{X_d}{T'_{d0}X'_d} & \frac{1}{T'_{d0}} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix} & J_{12} &= \begin{bmatrix} \frac{A1g}{M} & -\frac{A3g}{M} \\ 0 & 0 \\ \frac{k_A}{T'_{d0}} & \frac{k_V}{T'_{d0}} \\ 0 & -\frac{K_r}{T_r} \end{bmatrix} \\ J_{21} &= \begin{bmatrix} 0 & A1g & A2g & 0 \\ 0 & R1g & R2g & 0 \end{bmatrix} & J_{22} &= \begin{bmatrix} -(A1g + A1e) & (A3g - A2e) \\ -(R1g + R1e) & (R3g - R2e) \end{bmatrix} \\ B_1 &= \begin{bmatrix} \frac{1}{M} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_r}{T_r} \end{bmatrix} & B_2 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

A representação em espaço de estados pode ser realizada pela eliminação do vetor das variáveis algébricas, resultando nas Equações (13), onde A é matriz de estados e B a matriz de entradas do SEP.

$$\Delta \dot{x} = Ax + Bu \quad (13)$$

Na Equação (13), têm-se que $A = (J_{11} - J_{12}J_{22}^{-1}J_{21})$ e $B = (B_1 - J_{12}J_{22}^{-1}B_2)$.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tendo em vista as deduções apresentadas, foi possível desenvolver a programação referente ao MBI-MSP, gerando seus respectivos coeficientes de sensibilidade de potência, autovalores e coeficientes de reação de armadura, conforme apresentado na Tabela 1. Para isto, os dados do sistema MBI utilizados na programação foram obtidos de Gibbard, Pourbeik e Vowles (2015). Salienta-se que os pontos de operação apresentados na Tabela 1 são idênticos aos apresentados por Gibbard, Pourbeik e Vowles (2015), onde os autores modelaram o sistema elétrico utilizando o MBI-MHP.

A partir dos dados apresentados na Tabela 1 é possível verificar que quantitativamente os dois

Tabela 1: Constantes, Autovalores e Coeficientes de torque

Q(pu)	A1g	A2g	A3g	R1g	R2g	R3g	A1e	A2e	R1e	R2e	Autovalor	Ka	Kv
-0,2	2,758	3,100	-0,0492	0,0492	1,225	-1,131	2,867	0,90	0,90	2,467	1,148±j9,234	4,960	1,959
0	2,567	2,836	-0,3416	0,3416	1,751	-1,322	2,667	0,90	0,90	2,667	0,514±j8,697	4,538	2,801
0,2	2,385	2,553	-0,4679	0,4679	2,143	-1,504	2,467	0,90	0,90	2,867	0,267±j8,246	4,085	3,429
0,4	2,261	2,285	-0,4861	0,4861	2,426	-1,627	2,267	0,90	0,90	3,067	0,198±j7,939	3,657	3,882

modelos são equivalentes, por apresentarem autovalores numericamente iguais. Qualitativamente estes resultados mostram que as duas formulações diferem apenas de como se analisa o sistema MBI.

O MSP avalia o sistema MBI considerando todas as barras do sistema até chegar ao barramento infinito, enquanto que o MHP avalia o sistema MBI da barra interna do gerador à barra infinita, eliminando a barra terminal do gerador ou eventuais barras intermediárias.

Ainda pela Tabela 1 é possível verificar que o sistema é dito como instável, uma vez que os autovalores possuem parte real positiva. Com a aplicação de uma perturbação no sistema, a velocidade do gerador seria caracterizada com amplitudes crescentes no tempo. Para solucionar o problema, algum dispositivo *FACTS* ou um Estabilizador de Sistema Elétricos de Potência (ESP), se faz necessário.

CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo principal a modelagem matemática e a implementação computacional de um sistema máquina síncrona conectada a um barramento infinito, utilizando o MSP. Verificou-se através de simulações computacionais que tanto a modelagem matemática como a sua implementação computacional estão corretas, uma vez que os autovalores do sistema teste analisado apresentaram os mesmos valores numéricos do sistema MBI-MHP apresentado na literatura técnica especializada. Verificou-se ainda pela análise dos autovalores que o sistema é inoperante para todos os pontos de operação, uma vez que a parte real dos autovalores são positivas. Conclui-se ainda que para a sua correta operação, uma ação de controle deve ser realizada, ou pela inclusão de dispositivos *FACTS* ou pela inclusão de um ESP na malha de controle do RAT da máquina síncrona.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao PIBIFSP, ao meu orientador e ao grupo de pesquisa GPAI, por todo apoio.

REFERÊNCIAS

- DECKMANN, S.; COSTA, V. da. A power sensitivity model for electromechanical oscillation studies. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 9, n. 2, p. 965–971, 1994.
- DEMELLO, F. P.; CONCORDIA, C. Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control. *IEEE Transactions on power apparatus and systems*, Citeseer, v. 88, n. 4, p. 316–329, 1969.
- 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.
- KUNDUR, P. S.; MALIK, O. P. *Power system stability and control*. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 1994.
- SONG, Y.-H.; JOHNS, A. *Flexible ac transmission systems (FACTS)*. [S.l.]: IET, 1999.