

UMA ABORDAGEM PARA O APRIMORAMENTO DE MODELOS LINEARES NA ANÁLISE DA ESTABILIDADE A PEQUENAS PERTURBAÇÕES EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

TATIANE CRISTINA DA C. FERNANDES*, EDSON L. GERALDI JR[†], RAFAEL C. BORGES[†], RODRIGO A. RAMOS[†]

**Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, IFSP-PRC
Rua Diácono Jair de Oliveira, 1005, Santa Rosa, 13414-155
Piracicaba, São Paulo, Brasil*

*[†]Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, USP
Av. Trabalhador São Carlense, 400, Centro, 13566-590
São Carlos, São Paulo, Brasil*

Emails: taticrisfernandes@gmail.com, edluju@gmail.com, rcborges@ufmt.br,
rodrigo.ramos@ieee.org

Abstract— In this paper, an approach is proposed to improve linear models adopted in small-signal stability studies using information extracted from measured outputs of real system, as small disturbance data recorded by phasor measurement units (PMU). With this aim, a trajectory sensitivity technique is applied on the mismatch between the output of the simulated model and the response of the real system. Using this error signal and the sensitivity curves, this method can refine linear model in order to obtain a good match between the model and the measurements. In addition, this technique allows to identify which coefficients of the linear model can be refined from available data. Results obtained for a test case show that the proposed approach is effective to calibrate the coefficients of interest in the linear representation of the system.

Keywords— Linear Model, Small Signal Stability, Trajectory Sensitivity, Sampled Data

Resumo— Neste trabalho é proposta uma abordagem para o refinamento do modelo linear adotado para o estudo da estabilidade a pequenas perturbações a partir de informações extraídas diretamente de sinais medidos do sistema real, os quais podem ser monitorados, por exemplo, por unidades de medição fasorial (em inglês Phasor Measurement Units - PMUs). Com esse propósito, nesse trabalho, a técnica de sensibilidade da trajetória é aplicada diretamente no sinal de diferença entre a resposta obtida pelo modelo simulado e aquela fornecida por dados amostrados do sistema real. A partir da comparação desses sinais, e das curvas de sensibilidade, a técnica possibilita calibrar os coeficientes do modelo linear para que, assim, a resposta do modelo se aproxime da saída obtida no sistema real. Além disso, por meio das curvas de sensibilidade, é possível determinar quais coeficientes do modelo linear podem ser refinados a partir das informações disponíveis. Os resultados obtidos nesse trabalho, mostram a potencialidade do método, que é eficiente para calibrar os coeficientes de interesse da representação linear do sistema em estudo.

Palavras-chave— Modelo Linear, Estabilidade a Pequenas Perturbações, Sensibilidade da Trajetória.

1 Introdução

A representação de um Sistema Elétrico de Potência (SEP) por meio de modelos matemáticos é de grande importância para a maioria dos estudos nesta área uma vez que diversas ações são determinadas a partir de simulações computacionais. O cálculo dos limites operacionais e o estudo do planejamento do sistema para avaliar a nova demanda de carga são alguns exemplos que dependem de um modelo matemático para representar o comportamento do sistema (Pourbeik, 2010).

No contexto da estabilidade a pequenas perturbações, a representação do SEP a partir de modelos lineares pode ser destacada, uma vez que grande parte da análise dessa área pode ser realizada a partir do modelo linear e de ferramentas fornecidas por essa abordagem (Kundur, 1994). Vale ressaltar que a precisão dos resultados obtidos nessa análise irá depender da capacidade do modelo adotado em representar adequadamente o sistema em estudo.

No entanto, na prática, o sistema está su-

jeito a diferentes alterações ao longo do tempo, as quais podem ser, por exemplo, resultantes de modificações nas características topológicas do sistema ou em sua condição de operação. Tais alterações podem provocar discrepâncias entre a resposta do modelo e a observada no sistema real. Dessa forma, é importante que os modelos lineares sejam periodicamente verificados.

Recentemente, com o advento das unidades de medição fasorial, é possível monitorar o comportamento dinâmico da resposta de alguns equipamentos conectados no SEP, como os geradores síncronos. Essa tecnologia permite amostrar a resposta temporal do sistema em pontos distintos, de forma sincronizada e com uma alta taxa de amostragem (Phadke and de Moraes, 2008b). Tais informações mensuradas podem ser utilizadas para avaliar o quanto aquele modelo é adequado (Allen et al., 2010).

Em (Huang et al., 2013), por exemplo, os dados amostrados por PMUs no ponto de conexão do sistema com um gerador síncrono, são utilizados

tanto na validação quanto na calibração dos parâmetros do modelo dinâmico do gerador adotado nas simulações. Contudo, dentre a maior parte das pesquisas existentes na literatura nesta área, o modelo linear do sistema e suas características peculiares não são levados em consideração.

Neste contexto, este trabalho apresenta uma abordagem para refinar os modelos lineares utilizados na análise da estabilidade a pequenas perturbações em SEP. Com esse propósito, a representação do sistema a partir do modelo linear com a matriz jacobiana aumentada é utilizada, a qual permite acesso direto às variáveis algébricas. Desta forma, um evento dinâmico registrado por uma PMU pode ser comparado com a resposta de saída do modelo do sistema, quando este é perturbado pelo mesmo distúrbio. A partir do sinal de erro resultante, a técnica de sensibilidade da trajetória à variação de parâmetros pode ser aplicada, possibilitando ajustar os parâmetros de interesse para obter uma melhor aproximação entre a curva de saída do modelo e dos dados medidos.

Este artigo está organizado da seguinte forma: uma breve revisão sobre o modelo linear adotado no estudo da estabilidade a pequenas perturbações é apresentado na seção 2. Na seção 3, a técnica de sensibilidade da trajetória e seu algoritmo é explanado. O sistema teste e os resultados obtidos são exibidos na seção 4, enquanto as conclusões encontram-se na seção 5.

2 Representação Linear de um Sistema Elétrico de Potência

Considere a seguinte representação não linear de um sistema de potência (Kundur,1994):

$$\dot{x}(t, p) = f(x(t, p), z(t, p)) \quad (1)$$

$$0 = h(x(t, p), z(t, p)) \quad (2)$$

em que $x \in \mathbb{R}^n$ representa variáveis de estado do sistema, $z \in \mathbb{R}^m$ corresponde ao vetor das variáveis algébricas e $p \in \mathbb{R}^r$ é o vetor de parâmetros.

Aplicando a expansão em série de Taylor nas equações (1)-(2) e levando em conta apenas o primeiro termo, o modelo linear resultante no ponto de operação ($\alpha_e = x_e, z_e$) é representado em espaço de estados por (Kundur,1994):

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x}(t, p) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1(p) & J_2(p) \\ J_3(p) & J_4(p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x(t, p) \\ \Delta z(t, p) \end{bmatrix} \quad (3)$$

em que $J_1(p)$ e $J_2(p)$ são as derivadas parciais da função não linear f com relação a x e z , respectivamente, e, as derivadas parciais da função não linear h com respeito a x e z são representadas por $J_3(p)$, $J_4(p)$. Os termos $J_1(p)$, $J_2(p)$, $J_3(p)$ e $J_4(p)$ constituem a matriz jacobiana aumentada do sistema, também denominado modelo descriptor.

Eliminando as variáveis algébricas do modelo (3), é possível obter a seguinte representação em espaço de estados:

$$\Delta \dot{x} = A(p) \Delta x \quad (4)$$

em que $A(p) = J_1(p) - J_2(p)J_4(p)^{-1}J_3(p)$ corresponde à matriz de estados do sistema.

Importantes ferramentas lineares podem ser aplicadas nessa matriz para análise do sistema. Por exemplo, a partir do cálculo dos autovalores associados a matriz A , pode-se avaliar de forma qualitativa a estabilidade do modelo não linear em torno do ponto de equilíbrio em análise.

Contudo, o conjunto de equações resultantes em (4) apresenta um grande acoplamento entre as suas variáveis de estados devido à própria estrutura da matriz A . Como resultado dessa característica, identificar e isolar os parâmetros que tem maior influência na resposta desse modelo pode ser uma tarefa difícil.

Nesse sentido, a representação do sistema por meio do modelo descriptor se destaca, uma vez que as equações de estado apresentam um menor grau de acoplamento entre si. Além disso, a representação do sistema por meio da matriz jacobiana aumentada permite o acesso direto às variáveis algébricas do sistema, como as tensões e correntes injetadas em cada barra do sistema. Tais sinais podem ser obtidos por PMUs, facilitando a validação e a atualização do modelo linear.

3 Técnica de Sensibilidade da Trajetória à Variação de parâmetros

Basicamente, este método quantifica a variação da trajetória do sistema com relação a pequenas alterações em seus parâmetros. Essa quantificação é utilizada para ajustar os valores de tais parâmetros com o objetivo de minimizar a diferença entre a resposta do modelo e os sinais mensurados.

No procedimento de validação e calibração do modelo, esta técnica pode auxiliar em duas importantes etapas desse processo (Hiskens and Pai, 2002):

- As funções de sensibilidade permitem quantificar a influência de cada parâmetro nas saídas medidas. Um grande valor da sensibilidade de trajetória indica que o respectivo parâmetro influencia de forma significativa na saída em análise. Portanto, o ajuste correto desse parâmetro pode levar a uma melhor correspondência entre a resposta do modelo e os dados medidos.
- A partir do valor da função de sensibilidade da trajetória, é possível estimar os parâmetros que devem ser atualizados no processo de calibração do modelo.

3.1 Função de Sensibilidade

Suponha que $y(t, p)$ é o vetor de soluções de um conjunto de equações diferenciais ordinárias dependentes de um vetor de parâmetros

$p=[p_1, \dots, p_r]$. A função sensibilidade da j -ésima saída com relação ao i -ésimo elemento de p é calculado por (Cari et al., 2006):

$$\lambda_{ji}(t, p_0) = \left. \frac{\partial y_j(t, p)}{\partial p^i} \right|_{p_0} \quad (5)$$

em que o subscrito p_0 indica que a derivada parcial representada por ∂ é calculada para o valor nominal do vetor de parâmetros p .

Assumindo que p é o vetor de parâmetros associado ao sistema linear descrito em (3), suas respectivas equações de sensibilidade podem ser obtidas a partir da derivada parcial da função (3) com relação ao i -ésimo elemento do vetor p :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta \dot{x}(t, p)}{\partial p_i} &= \frac{\partial \Delta x(t, p)}{\partial p_i} J_1(p) + \frac{\partial J_1(p)}{\partial p_i} \Delta x(t, p) \\ &+ \frac{\partial \Delta z(t, p)}{\partial p_i} J_2(p) + \frac{\partial J_2(p)}{\partial p_i} \Delta z(t, p) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{\partial \Delta x(t, p)}{\partial p_i} J_3(p) + \frac{\partial J_3(p)}{\partial p_i} \Delta x(t, p) \\ &+ \frac{\partial \Delta z(t, p)}{\partial p_i} J_4(p) + \frac{\partial J_4(p)}{\partial p_i} \Delta z(t, p) \end{aligned} \quad (7)$$

3.2 Método de Estimação de Parâmetros utilizando Sensibilidade da Trajetória

Considere a saída $y_m(t)$ como medida no sistema real e $y(t)$ como sendo a saída do modelo simulado, quando ambos foram sujeitos à mesma perturbação. Com o objetivo de minimizar a diferença entre $y_m(t)$ e $y(t)$, a estimação de parâmetros utilizando sensibilidade da trajetória pode ser formulada como um problema de otimização.

Assim, considere que o funcional η é descrito por (Cari et al., 2006):

$$\eta(p) = \frac{1}{2} \int_0^{t_0} (y(t) - y_m(t))^T (y(t) - y_m(t)) dt \quad (8)$$

em que $\frac{1}{2}$ é uma constante adotada para simplificação dos cálculos.

Dado um valor inicial para o vetor de parâmetros, $p = p_0$, a expressão acima é minimizada calculando a derivada parcial desse funcional com relação a p e igualando a expressão a zero:

$$\frac{\partial \eta(p)}{\partial p} = \int_0^{t_0} \left(\frac{\partial y}{\partial p} \right)^T (y(t) - y_m(t)) \Big|_{p=p_0} dt = 0 \quad (9)$$

A equação (9) também pode ser expandida em série de Taylor. Desta forma, definindo $\frac{\partial \eta(p)}{\partial p}$ como $G(p)$, e negligenciando os termos de ordem superior ao de primeira ordem na série de Taylor, é possível obter:

$$G(p) \approx G(p^i) + \frac{\partial G(p^i)}{\partial p} \Delta p \quad (10)$$

em que $p = p_i$ corresponde ao valor do vetor p na i -ésima iteração e $\Delta p = p^i - p$.

Com o intuito de simplificar a notação, $\frac{\partial G(p^i)}{\partial p}$ é substituído por Γ na equação (10). O próximo

passo é igualar essa expressão (10) a zero, resultando em:

$$G(p_i) = -\Gamma \Delta p \quad (11)$$

$$\Delta p = -\Gamma^{-1} G(p^i) \quad (12)$$

Consequentemente, o valor do vetor de parâmetros p após a i -ésima iteração é dado por (Cari et al., 2006):

$$p^{i+1} = p^i + \Delta p = p^i - \Gamma^{-1} G(p^i) \quad (13)$$

Assim, o vetor de parâmetros p é atualizado após cada iteração até que o valor η seja menor que uma tolerância específica ϵ .

Com relação a matriz Γ , esta pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$\Gamma(p) \approx \int_0^{t_0} \left(\frac{\partial y}{\partial p} \right)^T \left(\frac{\partial y}{\partial p} \right) \Big|_{p=p^i} dt \quad (14)$$

4 Resultados da Simulação

Nos testes realizados, assumiu-se que os resultados adquiridos na simulação não linear por meio do *software* ANATEM (Anatem, 2009) correspondem aos dados mensurados a partir de PMUs, ou seja, representam a resposta real do sistema. Já o modelo linear a ser refinado é fornecido pela linearização das equações do modelo adotado no *software* ANATEM, adquirido a partir do *software* PacDyn (PacDyn, 2014).

Para refinar esse modelo linear, os seguintes passos foram adotados:

1. Uma pequena perturbação é aplicada no sistema em estudo durante as simulações não lineares e a resposta do sistema é amostrada. Tal resposta, juntamente com os coeficientes do modelo linear correspondente, são tomados como valores de referência.
2. No modelo linear de referência, alguns coeficientes são intencionalmente alterados, os quais podem afetar o comportamento dinâmico do sistema e em particular, as oscilações eletromecânicas.
3. A mesma perturbação aplicada no passo 1 é também inserida no modelo linear já modificado. A partir da diferença entre as curvas do modelo linear e a resposta amostrada do sistema real, a técnica de sensibilidade da trajetória é aplicada. O método é aplicado de forma iterativa, até que ϵ seja menor que tolerância $\epsilon = 9,5 \times 10^{-8}$.
4. Com o objetivo de verificar a qualidade do modelo calibrado, pequenas perturbações são aplicadas tanto na representação não linear do sistema quanto no modelo refinado. As respostas dos dois modelos são comparadas.

4.1 Sistema Teste

O sistema teste adotado neste trabalho corresponde ao sistema de duas áreas extraído de (Kundur, 1994), o qual é formado por 11 barras e 4 geradores. Nesse sistema, que está ilustrado na Figura 1, cada máquina está equipada com um regulador de tensão e um estabilizador de SEP. Os dados desse sistema estão disponíveis em (Kundur, 1994).

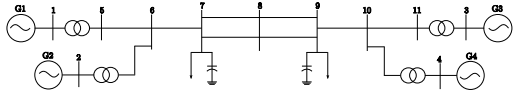


Figura 1: Diagrama unifilar do sistema em estudo.

4.2 Modificações nos coeficientes do modelo linear

No modelo linear do sistema em estudo, foram inseridas modificações nos coeficientes da equação diferencial relativa a velocidade angular do rotor de uma das máquinas, $(\Delta\dot{\omega})$. Tal equação é descrita pela seguinte expressão¹:

$$\Delta\dot{\omega}_i = K_1\Delta\delta_i + K_2\Delta I_{di} + K_3\Delta I_{qi} + K_4\Delta V_{ri} + K_5\Delta V_{mi} + K_6\Delta P_{mi} \quad (15)$$

em que P_{mi} é a potência mecânica do gerador síncrono, δ_i é o ângulo do rotor, I_{di} e I_{qi} são as componentes de eixo direto e em quadratura da corrente terminal, respectivamente, com relação a i -ésima máquina. Já V_{ri} e V_{mi} são as componentes reais e imaginárias da tensão terminal da i -ésima máquina na referência da rede.

Os coeficientes K_j , $j = 1, \dots, 6$ na equação (15) são definidos como:

- $K_1 = -\frac{I_{do}V_{teq}}{2H}\cos(\delta_o - \theta_o) + \frac{I_{qo}V_{teq}}{2H}\sin(\delta_o - \theta_o)$;
- $K_2 = \frac{-1}{2H}(V_{do} + 2R_a I_{do})$;
- $K_3 = \frac{-1}{2H}(V_{qo} + 2R_a I_{qo})$;
- $K_4 = -\frac{I_{do}}{2H} \left[\frac{V_{ro}}{V_{to}} \sin(\delta_o - \theta_o) + \frac{V_{to}V_{mo}\cos(\delta_o - \theta_o)}{V_{ro}^2(1+(V_{mo}/V_{ro}))^2} \right] - \frac{I_{qo}}{2H} \left[\frac{V_{ro}}{V_{teq}} \cos(\delta_o - \theta_o) - \frac{V_{to}V_{meq}\sin(\delta_o - \theta_o)}{V_{ro}^2(1+(V_{mo}/V_{ro}))^2} \right]$;
- $K_5 = -\frac{I_{do}}{2H} \left[\frac{V_{mo}}{V_{to}} \sin(\delta_o - \theta_o) - \frac{V_{to}\cos(\delta_o - \theta_o)}{V_{ro}(1+(V_{mo}/V_{ro}))^2} \right] - \frac{I_{qo}}{2H} \left[\frac{V_{ma}}{V_{to}} \cos(\delta_o - \theta_o) + \frac{V_{to}\sin(\delta_o - \theta_o)}{V_{ro}(1+(V_{mo}/V_{ro}))^2} \right]$;
- $K_6 = \frac{1}{2H}$

em que o parâmetro R_a é a resistência do estator, H é a constante de inércia da máquina em análise e θ corresponde ao ângulo da tensão da barra

¹Essa equação é expressa em termos das variáveis disponíveis no *software* adotado. Mais detalhes sobre esse modelo linear podem ser vistos em (PacDyn, 2014).

que o gerador está conectado. O subscrito corresponde ao valor em regime permanente da referida variável.

Dentre esses coeficientes, os valores de $K_1, \dots, K_5$ são intencionalmente modificados para verificar a eficácia do método de sensibilidade da trajetória. Apenas o coeficiente K_6 não é alterado, uma vez que nos casos estudados $\Delta P_{mi}=0$.

4.3 Resultados

Nas simulações, considera-se que a corrente terminal injetada na barra (na qual a máquina sob análise está conectada) corresponde a saída do sistema. A tensão terminal nessa mesma barra é escolhida como entrada, ou seja, a mesma é utilizada na solução do modelo linear modificado e nas equações de sensibilidade.

Inicialmente, uma pequena perturbação é aplicada nas simulações não lineares. Tal distúrbio corresponde a uma falta na barra 10 durante 5 ms, no instante de tempo $t_f=1s$. Como já mencionado, a resposta amostrada dessa simulação é considerada como resposta real do sistema.

A partir das equações da máquina 1, calcula-se a sensibilidade da corrente terminal dessa máquina, i_{t1} , com relação aos coeficientes $K_1, \dots, K_5$. Tal análise permite identificar quais coeficientes podem ser estimados a partir desse sinal. Na Figura 2, é possível observar as curvas de sensibilidade calculadas no intervalo de tempo de 1,5-4,5s.

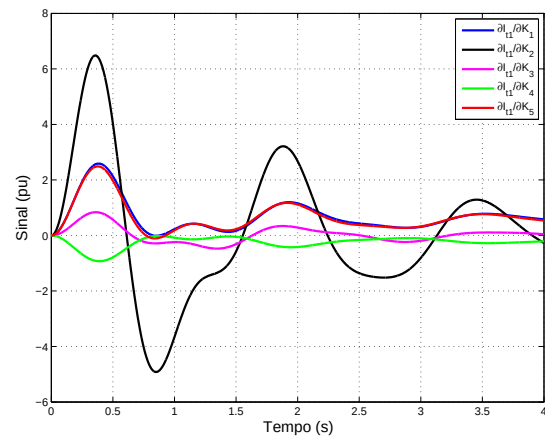


Figura 2: Curvas de sensibilidade da corrente i_{t1} com relação aos coeficientes $K_1, K_2, \dots, K_4$ e K_5 .

Note que a curva de sensibilidade da corrente terminal com relação a K_1 e K_5 são bastante similares. Isto indica que modificações em qualquer um desses coeficientes irá provocar alterações semelhantes na forma de onda da corrente. Assim, para esse caso, utilizando apenas a corrente terminal como sinal de saída não é possível a identificação de ambos coeficientes. Portanto, o valor de K_5 foi mantido fixo nas simulações.

Com o intuito de ilustrar o procedimento, suponha que os valores de K_1, K_2, K_3 e K_4 são 30%

menores que os respectivos valores de referência enquanto K_5 é fixado em 95% do seu valor nominal. A mesma perturbação aplicada anteriormente sobre o modelo não linear é agora inserida no modelo linear. Na Figura 3, é possível verificar a diferença entre a saída de referência e aquela fornecida pelo modelo linear modificado. Tal discrepância pode ser quantificada pelo funcional η (calculado por (8)), o qual corresponde a $1,445 \times 10^{-4}$, nesse caso particular.

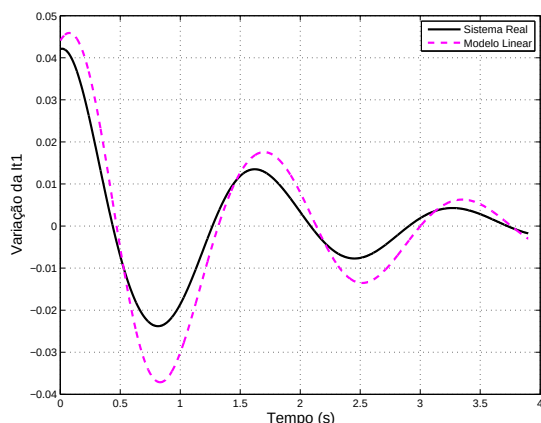


Figura 3: Comparação entre a curva de saída do modelo linear modificado e do sistema real na primeira iteração do procedimento.

Após 5 iterações do método proposto, os coeficientes K_1, K_2, K_3 e K_4 são estimados corretamente pelo método. A curva original e a saída do modelo refinado podem ser observadas na Figura 4, as quais estão agora praticamente sobrepostas. Além disso, o erro η é de apenas $9,369 \times 10^{-8}$ no final do processo.

Um segundo teste foi realizado, no qual os valores iniciais dos coeficientes são escolhidos aleatoriamente dentro de uma faixa de valores, limitada entre 50% e 150% do valor nominal de cada parâmetro e K_5 foi fixado no seu valor de referência. Na tabela 1, o valor inicial dos coeficientes juntamente com o erro η do início e do final do processo de estimação são apresentados. O número de iterações necessárias para que η fosse menor que ϵ também é informada nessa tabela, sendo que para todos os casos testados o método convergiu de forma monotônica. Note que o método apresenta uma boa convergência, reduzindo o erro entre a curva do modelo linear e a saída de referência.

Com o propósito de avaliar a influência de K_5 no desempenho do método, também foram realizadas simulações considerando diferentes valores fixos de K_5 . Já os valores iniciais de K_1, K_2, K_3 e K_4 são aqueles utilizados na última linha da tabela 1, caso 5. Na tabela 2, o erro (obtido após o processo de estimação) entre cada coeficiente estimado pelo método com relação ao seu valor nominal é apresentado quando são considerados três

valores fixos de K_5 . Note que para esses três casos, o valor do erro η é pequeno, o que indica uma boa estimativa dos coeficientes.

Para evidenciar a estimativa precisa fornecida pelo método com relação ao valor dos coeficientes K_1, K_2, K_3 e K_4 , na tabela 3 o valor inicial (perturbado) e o identificado para cada um dos coeficientes, referente ao caso 1 da tabela 1, são apresentados. Observe na terceira coluna dessa tabela que a discrepância entre o valor estimado e o valor de referência para esses coeficientes é pequena. A maior discrepância obtida é com relação ao coeficiente K_3 , de apenas 1,7%.

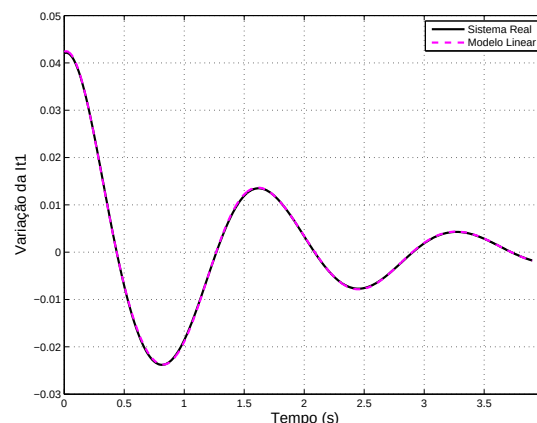


Figura 4: Comparação entre a curva de saída do modelo linear modificado e do sistema real no final do procedimento.

Para verificar a precisão e a consistência dos valores estimados para os coeficientes, diferentes perturbações foram aplicadas no modelo refinado. Assim é possível verificar se o modelo refinado é capaz de reproduzir adequadamente a resposta do gerador para diferentes perturbações.

Para ilustrar o procedimento de validação, na Figura 5 é exibida a resposta de i_{t1} do modelo não linear e do modelo linear quando um pulso de 0,05 p.u. é inserido na tensão de referência do regulador de tensão conectado na máquina 1 durante 100 ms. Esta perturbação é aplicada no sistema linear com os coeficientes estimados anteriormente, referente ao caso 2 da tabela 2. Note a boa aproximação das curvas no final do processo. O valor de η no final da estimação é de apenas $4,61 \times 10^{-7}$, confirmando a qualidade do modelo refinado.

5 Conclusões

Neste trabalho foi apresentada uma abordagem para o refinamento da representação linear de um SEP. A partir desse modelo linear refinado, informações qualitativas sobre o sistema podem ser obtidas com o objetivo de avaliar a estabilidade a pequenas perturbações do mesmo. Verificou-se que, a partir dos dados amostrados, a técnica de sensibilidade da trajetória permite estimar com uma precisão adequada os coeficientes do modelo

Tabela 1: Influência dos valores de K_1 , K_2 , K_3 e K_4 no processo de estimação

Casos	$K_{1ini}(\%)$	$K_{2ini}(\%)$	$K_{3ini}(\%)$	$K_{4ini}(\%)$	$\eta_{ini}(\times 10^{-4})$	$\eta_{final}(\times 10^{-8})$	Iterações
1	77,5	97,2	66,75	146,9	1,83	8,99	10
2	64,0	140,0	70,7	57,4	1,55	9,02	6
3	93,5	78,7	129,6	54,1	1,70	8,99	6
4	67,7	88,6	132,8	123,7	9,06	8,98	9
5	72,5	61,9	65,9	140,2	0,5	8,99	6

Tabela 2: Erro na estimativa de K_1 , K_2 , K_3 e K_4

$K_5(\%)$	$\Delta K_1(\%)$	$\Delta K_2(\%)$	$\Delta K_3(\%)$	$\Delta K_4(\%)$	$\eta_{final}(\times 10^{-8})$	Iterações
95	+3,117	+0,006	-1,119	-1,075	9,218	6
100	+0,289	+0,190	-1,828	-0,267	8,996	6
105	+3,574	+0,224	-1,993	-1,302	8,830	6

Tabela 3: Valores estimados para os coeficientes K_1, K_2, K_3 e K_4 no caso 1.

Coef.	Inicial(p.u.)	Estimado(p.u.)	Erro(%)
K_1	-0,01225	-0,01580	0,071
K_2	-0,00571	-0,00586	0,160
K_3	-0,00441	-0,00671	-1,700
K_4	-0,08799	-0,05981	-0,004

linear de interesse, desde que tais fatores possam ser observados nos dados medidos. Os resultados obtidos nos casos estudados, nos quais os coeficientes da equação da velocidade do rotor foram avaliados, mostram a eficiência do método.

Perspectivas futuras desse trabalho envolvem a aplicação da abordagem desenvolvida a um sistema de maior porte. Além disso, verificar o impacto da presença do ruído nos dados amostrados está entre as próximas etapas dessa pesquisa.

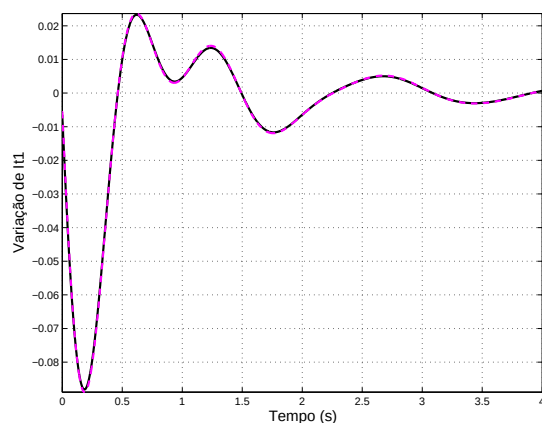


Figura 5: Comparação entre a curva de saída do modelo linear refinado e do sistema real no final do processo.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) sob os processos: 2011/22870-0 e 2015/02569-6.

Referências

- Allen, E., Kosterev, D. and Pourbeik, P. (2010). Validation of power system models, *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE*, pp. 1–7.
- Anatem (2009). Análise de transitórios eletromecânicos, *Centro de Pesquisas Elétricas (CEPEL)* p. v10.4.2/2009.
- Cari, E. P. T., Alberto, L. F. C. and Bretas, N. (2006). A methodology for parameter estimation of synchronous generators based on trajectory sensitivity and synchronization technique, *Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE*, pp. 6 pp.–.
- CEPEL (2013). *PACDYN User's Manual version 9.6.2*.
- Hiskens, I. and Pai, M. A. (2002). Power system applications of trajectory sensitivities, *Power Engineering Society Winter Meeting, 2002. IEEE*, Vol. 2, pp. 1200–1205 vol.2.
- Huang, Z., Du, P., Kosterev, Kosterev, D. and Steven, Y. (2013). Generator dynamic model validation and parameter calibration using phasor measurements at the point of connection, *IEEE Transactions on Power Systems* **28**(2): 1939–1949.
- Kundur, P. (1994). *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, New York, NY.
- PacDyn (2014). Small signal stability analysis and control, *Centro de Pesquisas Elétricas (CEPEL)* p. v10.5.1/2010.
- Phadke, A. and de Moraes, R. (2008b). The wide world of wide-area measurement, *Power and Energy Magazine, IEEE* **6**(5): 52–65.
- Pourbeik, P. (2010). Approaches to validation of power system models for system planning studies, *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE*, pp. 1–10.