

IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS PARA ESTUDOS DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

TITO RICARDO VAZ DA COSTA*, FRANCISCO DAMASCENO FREITAS†

*Agência Nacional de Energia Elétrica
SGAN 603 Blocos I e J - Asa Norte
Brasília, DF, Brasil

†Departamento de Engenharia Elétrica - Faculdade de Tecnologia - Universidade de Brasília
Campus Asa Norte - Asa Norte
Brasília, DF, Brasil

Emails: titoricardo@aneel.gov.br, ffreitas@ene.unb.br

Abstract— This paper presents a methodology for identifying a model of a dynamical system. This model is of interest for transient electromagnetic studies, and especially for the evaluation of fast transients in electrical power systems. The methodology uses identification technique implemented in Matlab and based on the software termed as vector fitting. The method is used to evaluate the system identification process in a dynamic model representation of a 9-bus power system. The calculated model (dynamic equivalent) replaces part of the three-phase grid which is assumed as external to the network to be preserved (study area). The transfer functions of the original system in the form of discrete points were obtained from the software ATP (Alternative Transient Program), widely known in the power system electromagnetic transient community. The performance of the methodology is demonstrated considering several results concerning the parameter identification of curves.

Keywords— System identification, dynamical systems, dynamical equivalent, electromagnetic transient, Vector Fitting, optimization.

Resumo— O artigo apresenta uma metodologia para a identificação de modelo de um sistema dinâmico para estudos de transitorio eletromagnéticos, tema de interesse sobretudo para a avaliação de transitórios rápidos em sistemas elétricos de potência. A metodologia utiliza técnica de identificação implementada em Matlab, desenvolvida com base no aplicativo Vector Fitting. A aplicação é avaliada considerando-se um modelo dinâmico representativo de um sistema de potência com 9 barras. O modelo identificado do sistema (equivalente dinâmico) visa substituir parte da rede elétrica trifásica considerada externa à rede trifásica preservada (área de estudo). As funções de transferência do sistema original, na forma de pontos discretos no domínio da frequência, foram obtidas a partir do aplicativo ATP (Alternative Transient Program). A partir destes dados, foram identificados os modelos de interesse. Vários resultados na forma de curvas identificadas demonstram a eficácia da metodologia proposta.

Palavras-chave— Identificação de sistemas, sistemas dinâmicos, equivalentes dinâmicos, transitórios eletromagnéticos, Vector Fitting, otimização.

1 Introdução

Identificação de sistemas é um tópico de interesse nas mais diversas áreas de conhecimento. Em sistemas elétricos de potência, aplicações são encontradas em estudos nos quais se busca obter um modelo reduzido para a representação de equipamentos (Freitas et al., 2008). Ilustrações dessa natureza incluem a determinação dos modelos de máquinas síncronas, de reguladores de tensão, de velocidade, de controladores suplementares (Kundur, 1994). Outros estudos são voltados para a determinação de equivalentes dinâmicos (Brito, 2009) e de parâmetros de curvas, como de corrente, de tensão, de frequência. Destaca-se ainda o cálculo de parâmetros, como impedâncias (admitâncias) equivalentes, os quais podem ser de interesse tanto para estudos envolvendo transitórios eletromecânicos, quanto eletromagnéticos (Greenwood, 1991).

Com base em estudos de equivalentes dinâmicos, costuma-se dividir um sistema elétrico de potência (SEP) em duas partes: rede interna e rede

externa. Na rede interna, tem-se como objeto de estudo, por exemplo a excursão de um transitorio. Nessa parte da rede, procura-se manter os detalhes do modelo matemático original. Por outro lado, na rede externa, o objetivo consiste em se usar um modelo equivalente, de preferência de baixa ordem e que reproduza adequadamente os efeitos que seriam observados se essa rede fosse preservada. Uma aplicação prática é o equivalente de Thévenin (Johnson et al., 1994). Neste equivalente, a finalidade é o cálculo de uma tensão e de uma impedância equivalente em um dado ponto da rede. Em alguns estudos, apenas a impedância precisa ser calculada, porque na parte equivalente, o efeito de fontes é desprezível. Exemplos desta natureza são encontrados no estudo de harmônicos (Freitas et al., 2011).

Existem diferentes estudos que abordam soluções de equivalentes dinâmicos, podendo ser divididos em dois grupos principais: (i) métodos no domínio do tempo e (ii) métodos no domínio da frequência.

Segundo Azevedo et al. (2010), os métodos

no domínio do tempo envolvem uma matemática complexa e exigem técnicas de otimização, mesmo na obtenção de resultados para um modelo equivalente de sistemas de pequeno porte.

Dentre os métodos no domínio da frequência, destaca-se o método de identificação implementado no software Vector Fitting (Gustavsen and Semlyen, 1999; Gustavsen, 2006; Deschrijver et al., 2008). Este aplicativo permite a identificação de uma função de transferência na forma de um somatório de frações parciais, em que os parâmetros são os resíduos e os polos. A determinação de cada função de transferência é feita com base em ajuste de curva levando em conta dados discretos no domínio da frequência. O processo de cálculo é realizado numericamente, de forma iterativa, partindo de polos complexos conjugados como estimativas iniciais.

Este artigo tem como objetivo utilizar a técnica baseada na metodologia do Vector Fitting (Gustavsen and Semlyen, 1999) para identificação de funções de transferência. As funções de transferência escolhidas são obtidas de estudos de transitórios eletromagnéticos, na forma de pontos discretos na frequência. A obtenção destes dados é resultado de simulações realizadas no software ATP (Alternative Transient Program). Os modelos a serem identificados, neste artigo, consistem de circuitos RLC, com acoplamento, os quais são característicos dos equipamentos que fazem parte de um sistema elétrico trifásico. A faixa de frequência avaliada se estende de alguns Hz a centenas de KHz. A partir das curvas identificadas, é possível se avaliar que frequências são preponderantes. Para avaliar a metodologia, são efetuadas simulações em um sistema de nove barras.

A organização do artigo foi concebida como explicitado na sequência. Além da seção introdutória, buscou-se na Seção 2 destacar a metodologia para identificação de sistema com base na técnica implementada no Vector Fitting. A Seção 3 é dedicada à caracterização dos parâmetros típicos de um equivalente e como deve-se proceder para obtê-los. Testes e resultados são apresentados na Seção 4 e, finalmente, na Seção 5 são tecidas algumas conclusões sobre o trabalho.

2 Identificação de sistema

Nesta seção, descreve-se a metodologia para identificação de funções de transferência. A metodologia adotada é a proposta em (Gustavsen and Semlyen, 1999) e apresentada com melhoramentos em (Gustavsen, 2006; Deschrijver et al., 2008). O problema consiste em se determinar uma função de transferência do tipo

$$G(s) = \sum_{m=1}^N \frac{c_m}{s - a_m} + d \quad (1)$$

em que os parâmetros da identificação são os resíduos $c_m \in C$, os polos $a_m \in C$ e o termo de transmissão direta $d \in R$. A ordem do modelo é N .

Para efetuar a identificação dos parâmetros, são necessários os dados de valores discretos $G(s_k) \in C$, calculados na frequência complexa $s_k = j\omega_k$. Estes dados podem ser obtidos experimentalmente. No entanto, o objetivo neste trabalho é o cálculo de um modelo dinâmico para representação de parte de um sistema por um equivalente. De modo que a obtenção das informações a partir de simulação é um procedimento válido.

Os dados para identificação dos parâmetros do equivalente podem ser obtidos a partir de simulação numérica em um software de transitórios eletromagnéticos. Com esta finalidade, é necessário efetuar a devida modelagem do sistema e localizar os pontos onde são aplicados o sinal de entrada e é realizada a observação do sinal de saída. Uma aplicação para identificação de impedâncias de uma rede trifásica de sistemas de potência é avaliada na próxima seção.

A técnica utilizada no aplicativo *Vector Fitting* é iterativa. Portanto, depende de estimativas iniciais de parâmetros. Tendo em vista que os resíduos são calculados após a determinação dos polos, são necessárias estimativas apenas dos polos.

Valores de estimativas sugeridas no software Vector Fitting são escolhidos, assumindo-se valores complexos da forma

$$a_n = -\alpha + j\beta, a_{n+1} = -\alpha - j\beta. \quad (2)$$

em que $\alpha = \frac{\beta}{100}$ e β é uma frequência discreta em rad/s.

3 Parâmetros de identificação típicos

Na presente seção, descreve-se os tipos de sinais que são alvos de identificação e que, portanto, serão avaliados posteriormente. A motivação é por obter dados relativos a sinais de corrente e de tensão de uma rede elétrica trifásica de potência. Estes dados poderão ser acessados em determinados locais via procedimento de medição convencional. O objetivo é identificar sistemas representados no domínio da frequência. Para efeito de simplificação, considere a identificação apenas de sistemas contendo uma entrada e uma saída (single-input single-output - SISO) por vez.

Sendo a rede elétrica trifásica, possíveis sinais de serem medidos incluem, na fase a , a tensão e a corrente, V_a e I_a , respectivamente. Da mesma forma, respectivamente, nas fases b e c , os pares (V_b e I_b) e (V_c e I_c). Tendo estes dados, é possível calcular as impedâncias próprias Z_{aa} , Z_{bb} , Z_{cc} e mútuas Z_{ab} , Z_{ac} , Z_{bc} que caracterizam o sistema em determinado ponto de medição.

Um equivalente dinâmico em um determinado local da rede poderá ser calculado, separando o circuito elétrico nesse ponto em duas partes. Uma delas, a externa é aquela na qual se pretende calcular o equivalente. A partir deste procedimento e levando em conta apenas esta parcela do sistema, o equivalente trifásico seria caracterizado por uma fonte de tensão mais um conjunto de impedâncias próprias e mútuas. Partindo-se da hipótese de que a fonte em regime permanente é puramente senoidal, o seu cálculo pode ser realizado utilizando fatores (calculados à frequência industrial da rede), ou seja, para uma única frequência e não será objeto deste trabalho. Já as impedâncias (ou admitâncias) têm impacto em uma vasta gama de frequências. Em função disso, estes parâmetros são o foco de atenção nas discussões que se seguem.

Um dos procedimentos utilizados para a obtenção das impedâncias de um equivalente trifásico em determinado ponto da rede consiste em se injetar uma corrente com magnitude igual a 1,0 pu entre a terra (referência) e uma das fases da rede. Suponha que a fase *a* seja a escolhida, inicialmente, para a conexão dessa fonte. Procedendo desta forma, a tensão de interesse entre os terminais da fonte será V_a . As demais fases devem ser conectadas à terra. Desta maneira, as correntes que fluirão da terra para as fases *b* e *c*, que foram ligadas à terra, serão I_b e I_c , respectivamente. Com estes dados, torna-se possível calcular as impedâncias própria da fase *a*, Z_{aa} e as mútuas, Z_{ab} e Z_{ac} . Estes parâmetros são calculados no domínio da frequência, para cada frequência discreta ω_k como se segue.

$$Z_{aa}(j\omega_k) = V_a(j\omega_k) \quad (3)$$

$$Z_{ab}(j\omega_k) = Z_{ba} = \frac{V_a(j\omega_k)}{I_b(j\omega_k)} \quad (4)$$

$$Z_{ac}(j\omega_k) = Z_{ca}(j\omega_k) = \frac{V_a(j\omega_k)}{I_c(j\omega_k)} \quad (5)$$

Procedimento similar pode ser implementado para obtenção das demais impedâncias, ligando-se em seguida a fonte fictícia, por exemplo na fase *b*, e finalmente, completando o experimento, na fase *c*. Note-se que as impedâncias mútuas entre duas fases são iguais, uma vez que o circuito é passivo.

A seguir são apresentados testes e resultados que ilustram cálculos e identificação de impedâncias equivalentes em um sistema elétrico de potência.

4 Testes e resultados

Com o objetivo de efetuar testes visando o cálculo das impedâncias de um equivalente conforme

metodologia discutida na seção anterior, utilizou-se um sistema elétrico de potência (Carramaschi, 2010), com representação trifásica. O sistema tem nove barras, três geradores, três transformadores elevadores, seis linhas de transmissão e três cargas. O diagrama unifilar na Figura 1 exibe ilustração visual de como os equipamentos estão conectados. Neste sistema e tendo em vista a

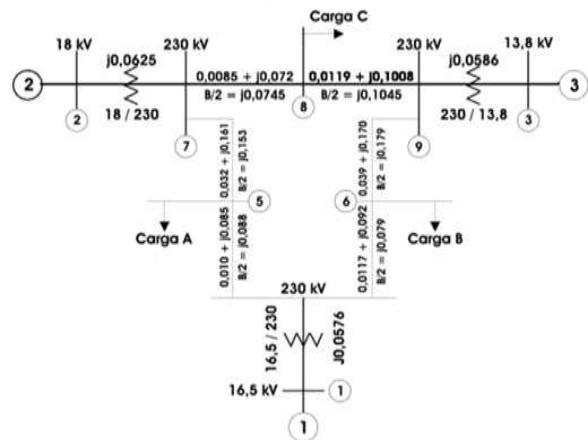


Figura 1: Sistema de nove barras simulado

faixa de frequência avaliada, as linhas de transmissão (LTs) têm um papel de destaque na modelagem. Dependendo da natureza do estudo, diversas são as modelagens adotadas para representar uma LT (Greenwood, 1991). No presente artigo, considerou-se que cada linha seja balanceada e perfeitamente transposta, consistindo de circuito em PI, contendo impedâncias séries próprias e mútuas, além de capacitâncias *shunts* e mútuas. Os dados para cálculo desses parâmetros em termos valores de sequência positiva e zero estão nas Tabelas 1 e 2. Na tabela 1, R_0 e R_1 são as resistências de sequência zero e positiva, respectivamente. O comprimento da linha é ℓ . Na Tabela 2, os dados são de reatância de sequência zero, X_0 , e positiva, X_1 ; ainda, de capacitâncias de sequência zero, C_0 , e positiva, C_1 . Todos estes parâmetros são por unidade de comprimento. As cargas foram modeladas por impedância constante em cada fase, representadas por uma resistência em série com uma indutância. Os transformadores foram representados apenas por suas indutâncias de dispersão. Portanto, a menos dos geradores, a rede pode ser considerada como linear e passiva. Maiores detalhes poderão ser acessados em (Carramaschi, 2010).

O objetivo das simulações é calcular um conjunto de impedâncias equivalentes vistas da barra 7. Ou seja, procura-se preservar apenas a barra 2 e a 7, nas quais estão ligados o gerador na barra de 18 kV e o lado de alta tensão do transformador elevador. Portanto, desconectando-se o lado de alta do transformador na barra 7, o sistema fica separado em duas porções. Ao se aplicar a

Tabela 1: Parâmetros resistivos de linha e comprimento ℓ da linha

Ligaçāo	$R_0(\text{m}\Omega/\text{km})$	$R_1(\text{m}\Omega/\text{km})$	$\ell (\text{km})$
4-5	0,1587	0,0529	80
4-6	0,2698	0,08993	100
5-7	0,5078	0,1693	80
6-9	0,6189	0,2063	100
7-8	0,1686	0,0562	70
8-9	0,1889	0,0629	100

Tabela 2: Parâmetros induktivos e capacitivos de linha, por unidade de comprimento (km)

Ligaçāo	$X_0(\text{m}\Omega)$	$X_1(\text{m}\Omega)$	$C_0(\mu\text{F})$	$C_1(\mu\text{F})$
4-5	1,349	0,4497	0,02648	0,00883
4-6	1,46	0,4867	0,02377	0,00792
5-7	2,555	0,8517	0,04603	0,01534
6-9	2,698	0,8993	0,05385	0,01795
7-8	1,428	0,4761	0,02802	0,00934
8-9	1,6	0,5332	0,03144	0,01048

metodologia apresentada na Seção 3, obtém-se as informações de interesse, conforme procedimento descrito a seguir.

A identificação das impedâncias equivalentes foi efetuada em duas etapas. Inicialmente, curvas em frequência de tensão e de corrente, foram obtidas a partir do software ATP. Os resultados destas simulações foram gravados em arquivos e daí acessados pelo aplicativo Vector Fitting, finalizando-se o processo de identificação.

A geração das curvas no domínio da frequência foi realizada no ATP por meio da rotina **frequency scan**. A faixa de frequência considerada compreende o intervalo entre 0,1 Hz e 100 kHz. No entanto, em função dos modelos estabelecidos para os equipamentos, contribuições relevantes são observadas em faixa mais restrita que se estende desde algumas dezenas de Hz até alguns kHz.

Para fins de identificação das impedâncias equivalentes, os dados gerados a partir do software ATP foram utilizados como entrada para o aplicativo Vector Fitting. De acordo com a característica numérica da curva, este software admite ajuste em algumas de suas variáveis, possibilitando convergência apropriada durante o processo iterativo. Durante o processo de identificação foi possível identificar sistema com polos instáveis e que propiciavam excelente aderência entre a curva original e a curva identificada. Entretanto, esta flexibilidade, embora com número de polos bem reduzido, foi desconsiderada, pois o sistema original é passivo e estável. Em função disto, impôs-se ao software calcular somente polos estáveis. Uma outra restrição estabelecida foi admitir a existência de termo d diferente de zero em (1), visto que

nessa equação e na modelagem do sistema teste em questão, em muito altas frequências, as impedâncias tendem a um valor constante. No entanto, fixou-se este termo em zero.

Na simulação com o Vector Fitting, cada curva na faixa de frequência fixada foi discretizada em 2401 pontos. Cada função de transferência foi modelada por 20 polos. As estimativas iniciais dos polos foram estabelecidas considerando o procedimento sugerido no aplicativo Vector Fitting, conforme (2) e com base nas frequências de pico do gráfico de magnitude. A partir dos picos foram fixados 16 polos. Os 4 restantes foram distribuídos linearmente de acordo com o procedimento ilustrado em (2). Neste processo, as frequências onde ocorrem os picos no gráfico de magnitude da função de transferência são utilizadas como a parte imaginária de um polo complexo. A parte real do polo foi calculada considerando um valor negativo correspondente a 1% da parte imaginária (ver sugestão em (2)).

A Figura 2 ilustra uma visualização no plano complexo da posição dos polos identificados para a função de transferência referente à impedância própria Z_{aa} . Há também um polo real igual a -822,3, não visualizado na figura. É possível se constatar que todos os polos estão no semi-plano esquerdo do plano complexo.

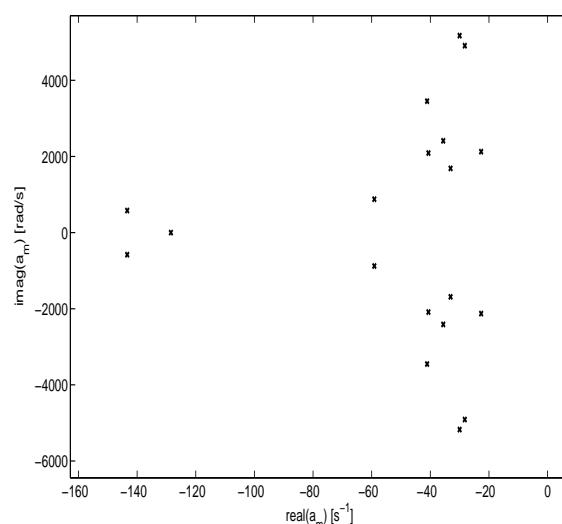


Figura 2: Polos identificados ao se considerar a curva da impedância própria Z_{aa}

Para o cálculo das impedâncias equivalentes, foram inicialmente identificados os sinais de tensão V_a , e de corrente I_b e I_c . A fonte de corrente fictícia foi fixada com magnitude igual a 1,0 A e fase -120° . Em seguida, procedeu-se ao cálculo dos valores de impedâncias a cada frequência discreta. A Figura 3 exibe o gráfico da magnitude da impedância própria Z_{aa} , em ohms, calculada a partir dos valores de corrente e tensão gerados

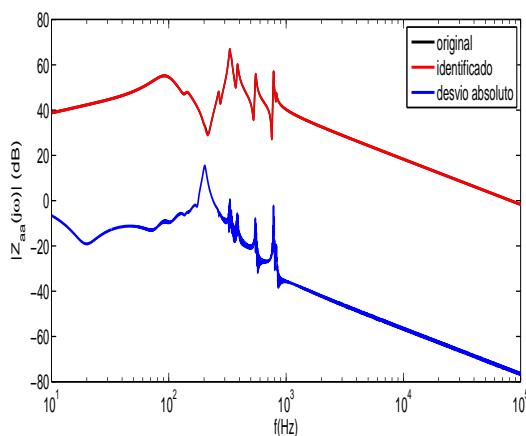


Figura 3: Resposta em frequência da magnitude da impedância própria Z_{aa}

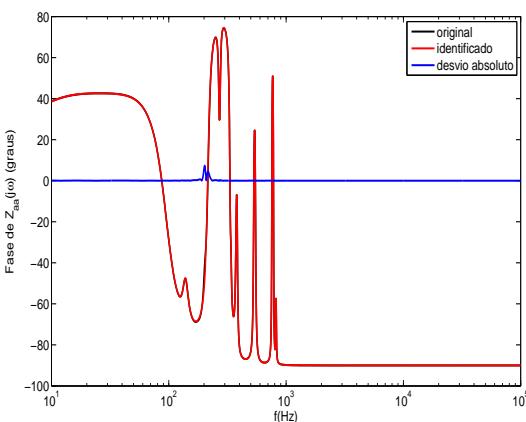


Figura 4: Resposta em frequência da fase da impedância própria Z_{aa}

em simulação, e considerando a curva identificada. O erro absoluto no gráfico indica que a aderência entre as duas curvas de impedâncias é bastante elevada. Note-se que esse erro está na mesma escala que os valores medidos. As curvas relativas à fase de Z_{aa} são mostradas na Figura 4. Também, a discrepância entre as curvas original e a identificada é desprezível, conforme pode ser observado pelo erro absoluto calculado.

O gráfico na Figura 5 é referente à magnitude da impedância mútua Z_{ab} . Novamente, o processo de identificação adotado levou ao cálculo de parâmetros que gera curva identificada praticamente coincidente com a curva original.

Foi verificado numericamente que a impedância Z_{ac} é igual a Z_{ab} . Outras simulações foram realizadas com o objetivo de calcular as demais impedâncias. Da mesma forma, as impedâncias próprias apresentaram resultados muito próximos ao de Z_{aa} , assim como as impedâncias mútuas tiveram resultados praticamente idênticos aos de Z_{ab} . Estes resultados eram esperados, uma vez que assumiu-se que as linhas são perfeitamente

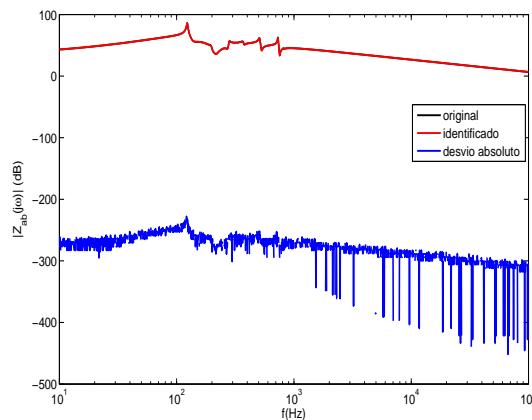


Figura 5: Resposta em frequência da magnitude da impedância mútua Z_{ab}

transpostas e balanceadas. Além disso, os demais equipamentos trifásicos foram supostos perfeitamente equilibrados.

5 Conclusões

Neste artigo, foi proposta uma metodologia para identificação de curvas de resposta em frequência de uma função de transferência. O processo de identificação é baseado em técnica de otimização para cálculo de polos e resíduos, implementado no aplicativo Vector Fitting. Este software foi utilizado para calcular as impedâncias equivalentes vistas dos três terminais de fase de parte selecionada de um sistema elétrico de potência de nove barras. Esta parte da rede foi isolada, constituindo circuito no qual se considerou como um equivalente. As impedâncias do equivalente formam uma matriz de dimensão 3×3 , em que cada elemento representa uma função de transferência. As funções de transferência foram identificadas a partir de dados no domínio da frequência gerados no aplicativo ATP. Cada função de transferência foi modelada com 20 polos. Os parâmetros obtidos no processo de identificação permitiram que fossem calculadas curvas praticamente coincidentes com aquelas originais, representadas pelos pontos discretos no domínio da frequência.

Os resultados obtidos demonstram que a combinação de simulações de redes no aplicativo ATP, assim como identificações realizadas utilizando o software Vector Fitting constituem-se em importantes ferramentas para cálculo de redes equivalentes. Em trabalhos futuros, os autores pretendem estender a metodologia para redes em que linhas muito longas possam ser também incluídas. Adicionalmente, que incluam os efeitos da variação da frequência sobre os parâmetros.

Agradecimentos

O segundo autor registra o seu agradecimento ao DPP/UnB pelo apoio a esta pesquisa.

Referências

- Azevedo, W. V. S., Neves, W. L. A., JR., D. F. and Soares, R. (2010). Síntese de redes elétricas via modelo dependente da freqüência: estimação de parâmetros e análise no domínio da frequência, *Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Automática*, pp. 3362–3368.
- Brito, G. L. R. (2009). *Equivalentes dinâmicos de sistemas de potência com estrutura de modelo de geradores e seus controladores*, PhD thesis, Universidade de Brasília.
- Carramaschi, I. H. C. (2010). *Análise de equivalência entre resultados obtidos no domínio do tempo e no domínio da frequência obtidos no aplicativo atp.*, Master's thesis, Universidade de Brasília.
- Deschrijver, D., Mrozowski, M., Dhaene, T. and Zutter, D. (2008). Macromodeling of multi-port systems using a fast implementation of the vector fitting method, *IEEE Microwave and wireless components letters* **18**(6): 383–385. DOI: [10.1109/LMWC.2008.922585](https://doi.org/10.1109/LMWC.2008.922585)
- Freitas, F. D., Martins, N., Varricchio, S. L., Rommes, J. and Véliz, F. C. (2011). Reduced-order transfer matrices from RLC network descriptor models of electric power grids, *IEEE Trans. on Power Systems* **26**: 1905–1916. DOI: [10.1109/TPWRS.2011.2136442](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2011.2136442)
- Freitas, F. D., Rommes, J. and Martins, N. (2008). *Gramian-based Reduction Method Applied to Large Sparse Power System Descriptor Models*, IEEE Transactions on Power Systems, pp. Vol. 23, n° 3, pp. 1758–1770.
- Greenwood, A. (1991). *Electrical Transients in Power Systems*, John Wiley and Sons Inc., New York.
- Gustavsen, B. (2006). Improving the pole re-locating properties of vector fitting, *IEEE Transactions on Power Delivery* **21**(3): 1587–1592. DOI: [10.1109/TPWRD.2005.860281](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.860281)
- Gustavsen, B. and Semlyen, A. (1999). Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting, *IEEE Transactions on Power Delivery* **14**(3): 1052–1061. DOI: [10.1109/61.772353](https://doi.org/10.1109/61.772353)
- Johnson, D. E., Hilburn, J. L. and Johnson, J. R. (1994). *Fundamentos de análise de circuitos elétricos*, Prentice-Hall do Brasil.
- Kundur, P. (1994). *Power system stability and control. EPRI Power Systems Engineering Series*, McGraw-Hill.