

Estimação dos Parâmetros de Linhas de Transmissão por meio de Medições Fasoriais e Método dos Mínimos Quadrados

Felipe Proença de Albuquerque*
 Eduardo C. Marques Costa* Luísa Helena B. Liboni***
 Ronaldo Francisco R. Pereira**** Maurício C. Oliveira†

* *Escola Politécnica da Universidade de São Paulo,
 (felipe.proenca.albuquerque@usp.br; educosta@usp.br).*

** *Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, (e-mail:
 educosta@usp.br)*

*** *Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo,
 (luisa.liboni@ifsp.edu.br)*

**** *Universidade Federal do Acre - UFAC, (ronaldoffc93@usp.br)*

† *Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of
 California San Diego, USA, (mauricio@ucsd.edu)*

Abstract: This research proposes a method for estimation of electrical parameters of overhead transmission lines. The procedure is carried out from simulations of phasor measurements using PMUs at both line terminals, and also taking into account eventual noises during signal acquisition and data records. The estimation method is based on the least squares methods and shows accurate results for short and medium transmission lines.

Resumo: Esta pesquisa propõe um método de estimação dos parâmetros elétricos de linhas de transmissão aéreas. O procedimento é desenvolvido a partir de simulações de medições fasoriais a partir de PMUs nos dois terminais da linha, bem como eventuais ruídos durante a aquisição dos sinais e registro dos dados. O método de estimação é baseado no método dos mínimos quadrados e mostra-se preciso na determinação dos parâmetros elétricos de linhas curtas e médias.

Keywords: Power systems; transmission lines; parameters estimation; least square method; unbiased estimators.

Palavras-chaves: Sistemas de potência; linhas de transmissão; estimação de parâmetros; mínimos quadrados; estimadores não viesados.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento prévio das características de sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica são de grande importância na análise da confiabilidade e operação da rede como um todo. A precisão na identificação de tais características e parâmetros está diretamente relacionada ao desempenho do sistema, tal como: no ajuste da proteção contra sobretensões; detecção e localização de faltas em redes aéreas e subterrâneas; coordenação de isolamento; previsão de possíveis transitórios eletromagnéticos e sobretensões; e análise da estabilidade na manutenção dos níveis de tensão em função da potência demandada.

Os parâmetros de linhas de transmissão aéreas são convencionalmente calculados a partir das características físicas e geométricas das torres e dos condutores, como por exemplo

a altura dos condutores em relação ao solo, características geométricas dos feixes de condutores (*bundle*), geometria das torres, condutividade do solo, efeito da corrente de retorno pelo solo e o efeito pelicular nos condutores das fases (Hofmann, 2002), (Monteiro et al., 2013).

Os métodos de cálculo convencionais são baseados em diversas aproximações, resultando em imprecisões na determinação dos parâmetros das linhas de transmissão aéreas. Por exemplo, a permissividade elétrica ao longo do comprimento da linha varia de acordo com a unidade e variações na isolamento do sistema, assim como a condutividade do solo. Tais características não são levadas em conta durante o cálculo dos parâmetros, fazendo uso das formulas de Carson, considerando a resistividade do solo constante, e no cálculo do efeito pelicular nos condutores. Diversas outras aproximações são consideradas também a partir das características geométricas das torres, dos condutores múltiplos e as características físicas do meio no qual a linha encontra-se imersa (Zanetta Jr, 2006).

As imprecisões decorrente da determinação dos parâmetros elétricos influenciam diretamente na análise e previsão do desempenho do sistema, no que diz respeito à

* Coordenação de Pessoal de Nível Superior - CAPES.

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (Proc. 408681/2016-0).

Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP (Procs. 2018/10952-2 e 2019/05381-9).

estabilidade da tensão em função da potência demandada, dimensionamento da proteção, coordenação de isolamento, e características de propagação da linha. Ademais, os parâmetros elétricos das linhas de transmissão apresentam comportamento dinâmico, visto que são dependentes de variações técnicas e ambientais (e.g. umidade do ar, condutividade do solo, temperatura dos condutores etc). Nesse contexto, as atuais *smart grids* e os modernos sistemas de transmissão requerem métodos mais sofisticados e precisos de medição e análise do estado da rede como um todo, levando em conta o comportamento dinâmico e parâmetros variáveis com o tempo em função dos fatores de ordem técnica e ambientais que encontram-se sujeitos.

Alguns métodos de estimação dos parâmetros de linhas de transmissão foram propostos ao longo da última década como um meio alternativo para obtenção da impedância série e admitância transversal, a partir de medições nos terminais da linha. Dessa forma, todos os fatores de ordem técnica e ambientais discutidos anteriormente são considerados de forma intrínseca com base nas medições de corrente e tensão coletadas nos terminais, restando apenas a possibilidade de eventuais imprecisões no método de estimação ou no modelo adotado da linha.

Existem basicamente dois tipos de métodos de estimação. O primeiro é desenvolvido no domínio do tempo por meio de registros oscilográficos de corrente e tensão nos dois terminais da linha. Por exemplo, alguns métodos fazem uso dos registros de faltas coletados por reles digitais nos terminais (Schulze et al., 2011), (Costa and Kurokawa, 2015). O segundo método é baseado em medições fasoriais nos terminais da linha no domínio da frequência, convencionalmente esses registros de corrente e tensão são coletados por meio de *Phasor Measurements Units* - PMUs (Li et al., 2017), (Janeček et al., 2011).

Um método de estimação interessante foi proposto a partir das equações do circuito π equivalente da linha e de medições fasoriais registradas em ambos terminais. A partir do sistema de equações do circuito equivalente é possível estimar os parâmetros da linha em função das medições e erros de sincronismo nos dois terminais. O algoritmo é proposto com base em aproximações de primeira ordem nas séries de Taylor e mitigação da função custo em função dos erros na estimação dos parâmetros (Ritzmann et al., 2016). Tal método mostra-se eficiente para estimação em tempo real dos parâmetros de linhas de transmissão curtas.

Outro método de estimação interessante é baseado em múltiplas medições ao longo da operação do sistema, selecionadas de modo adaptativo. Essas medições compõem um sistema de equações exponenciais não lineares, sendo que cada parâmetro apresenta uma variação padrão e a solução é encontrada por meio de um método numérico desenvolvido a partir do método de Newton (Li et al., 2017).

Nesse sentido, este trabalho apresenta as seguintes inovações: primeiro, é utilizada uma nova abordagem para as equações fasoriais que descrevem uma linha de transmissão de comprimento médio a fim de estimar seus parâmetros. Depois, é proposta uma modelagem do ruído nas medições fasoriais obtidas por meio das PMUs. Tal modelagem proposta permite obter a solução não enviesada de mínima

variância para o problema. Por fim, é analisado o efeito da quantidade de realizações na acurácia do método de estimação empregado.

2. MODELO DA LINHA DE TRANSMISSÃO

No desenvolvimento do método de estimação proposto, uma linha trifásica média, equilibrada e com plano de simetria vertical, é modelada tanto para simulação dos sinais nos terminais, quanto para aplicação do método propriamente dito (Stevenson, 1974). O circuito equivalente de sequência positiva é descrito na figura 1.

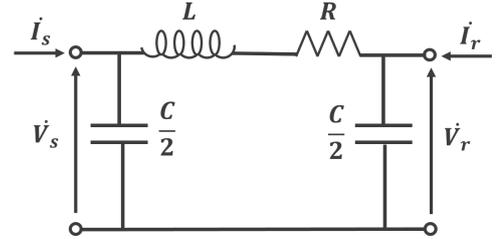


Figura 1. Circuito π para linhas médias.

Os termos $\dot{V}_s, \dot{V}_r, \dot{I}_s, \dot{I}_r$ são as tensões e correntes nos terminais emissor e receptor da linha, respectivamente.

As equações fasoriais do circuito π podem ser obtidas com base nas leis de Kirchhoff e utilizadas como ponto de partida na estimação dos parâmetros da linha (R, b, X). Portanto, as seguintes equações são definidas:

$$b = -\frac{2(I_{sr} + I_{rr})}{V_{si} + V_{ri}} \quad (1)$$

$$V_{sr} - V_{rr} = \left(I_{sr} + \frac{b}{2} V_{si} \right) R + \left(-I_{si} + \frac{b}{2} V_{sr} \right) X \quad (2)$$

$$V_{si} - V_{ri} = \left(I_{si} - \frac{b}{2} V_{sr} \right) R + \left(I_{sr} + \frac{b}{2} V_{si} \right) X \quad (3)$$

$$V_{sr} - V_{rr} = \left(-\frac{b}{2} V_{ri} - I_{rr} \right) R + \left(-\frac{b}{2} V_{rr} + I_{ri} \right) X \quad (4)$$

$$V_{si} - V_{ri} = \left(\frac{b}{2} V_{rr} - I_{ri} \right) R + \left(-\frac{b}{2} V_{ri} - I_{rr} \right) X \quad (5)$$

Os termos $V_{sr}, V_{rr}, I_{sr}, I_{rr}$ são os valores reais dos fasores, enquanto $V_{si}, V_{ri}, I_{si}, I_{ri}$ são a parcela imaginária desses mesmos fasores, respectivamente.

A susceptância b (equação 1) é calculada a partir das medições simuladas nos terminais da linha e substituídas nas equações (2), (3), (4) e (5); que por sua vez, passam a depender apenas das correntes e tensões nos terminais. Desse modo, conhecendo-se b , a resistência R e reatância indutiva X são obtidas a partir da seguinte equação matricial:

$$\bar{Y} = H\theta \quad (6)$$

Na equação (6), o vetor \bar{Y} tem dimensão quatro, enquanto o vetor θ é composto pelos parâmetros série da linha R e

X . A matriz \mathbf{H} tem dimensão quatro por dois, sendo os oito elementos determinados em função das correntes e tensões nos terminais. A descrição dos vetores e matriz, bem como seus respectivos elementos, é apresentada da seguinte forma:

$$\bar{\mathbf{Y}} = \begin{bmatrix} V_{sr} - V_{rr} \\ V_{si} - V_{ri} \\ V_{sr} - V_{rr} \\ V_{si} - V_{ri} \end{bmatrix}, \boldsymbol{\theta} = \begin{bmatrix} R \\ X \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \\ h_{31} & h_{32} \\ h_{41} & h_{42} \end{bmatrix}$$

- $h_{11} = I_{sr} - \frac{I_{sr} + I_{rr}}{V_{si} + V_{ri}} V_{si}$
- $h_{12} = -I_{si} - \frac{I_{sr} + I_{rr}}{V_{si} + V_{ri}} V_{sr}$
- $h_{21} = I_{si} + \frac{I_{sr} + I_{rr}}{V_{si} + V_{ri}} V_{sr}$
- $h_{22} = I_{sr} - \frac{I_{sr} + I_{rr}}{V_{si} + V_{ri}} V_{si}$
- $h_{31} = \frac{I_{sr} + I_{rr}}{V_{si} + V_{ri}} V_{ri} - I_{rr}$
- $h_{32} = \frac{I_{sr} + I_{rr}}{V_{si} + V_{ri}} V_{rr} + I_{ri}$
- $h_{41} = -\frac{I_{sr} + I_{rr}}{V_{si} + V_{ri}} V_{rr} - I_{ri}$
- $h_{42} = \frac{I_{sr} + I_{rr}}{V_{si} + V_{ri}} V_{ri} - I_{rr}$

3. MÉTODO DE ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS

As medições fasoriais de corrente e tensão são obtidas por meio de métodos aplicados a estimação dos fasores, tal como *Fast Fourier Transform* - FFT. Embora os PMUs sejam dispositivos de medição de grande precisão, é necessário considerar a presença de ruído nas medições simuladas (Khandeparkar et al., 2016). Dessa forma, foi proposta a seguinte técnica para Modelagem dos ruídos durante as medições e registro dos dados:

$$b[n] = -\frac{2(I_{sr}[n] + I_{rr}[n])}{V_{si}[n] + V_{ri}[n]} + w_1[n] \quad (7)$$

$$n = 1, 2, \dots, N$$

O termo n representa o número da amostragem do sinal coletado, N é o total de amostragens, $w_1[n]$ trata-se do ruído com média zero e não correlacionado com o sinal medido, e cada amostra tem variância σ_1^2 . Sendo assim, incluindo-se o ruído na equação (6), tem-se:

$$\mathbf{Y}[n] = \mathbf{H}[n]\boldsymbol{\theta}[n] + \mathbf{W}[n] \quad (8)$$

$$n = 1, 2, \dots, N$$

Sendo $\mathbf{W}[n] \sim \mathcal{N}(0; \mathbf{C})$ não correlacionados.

Na equação (7), $b[n]$ trata-se de uma variável aleatória e ressaltando novamente que o ruído apresenta média zero, pode-se afirmar que:

$$E[b[n]] = -\frac{2(I_{sr} + I_{rr})}{V_{si} + V_{ri}} = b$$

O operador $E[\]$ representa o valor esperado da variável aleatória $b[n]$.

Analisando a equação (8) para cada n , observa-se que trata-se de um modelo linear, sendo então possível determinar o estimador não viesado de mínima variância (MVUE), representado por $\hat{\boldsymbol{\theta}}[n]$ (Kay, 1993):

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}[n] = (\mathbf{H}[n]^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{H}[n])^{-1} \mathbf{H}[n]^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{Y}[n] \quad (9)$$

A covariância esperada da matriz para cada iteração do método é expressa como:

$$\mathbf{C}_{\hat{\boldsymbol{\theta}}}[n] = (\mathbf{H}[n]^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{H}[n])^{-1} \quad (10)$$

Vale ressaltar que se o sistema operar sem variações durante todo período de coleta das N amostragens, i.e. sem alterações na carga e na fonte, os valores dos fasores sem ruídos não se alteram, logo a matriz $\mathbf{H}[n]$ deve ser constante e, portanto, a matriz $\mathbf{C}_{\hat{\boldsymbol{\theta}}}[n]$ é constante também. Outro aspecto é importante é que, sendo o estimador não viesado, o valor esperado do estimador é igual ao vetor de parâmetros, matematicamente:

$$E[\hat{\boldsymbol{\theta}}[n]] = \boldsymbol{\theta}$$

4. ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS

Os valores de corrente e tensão nos terminais foram simuladas a partir de uma linha de transmissão em que os parâmetros são previamente conhecidos, como descrito na tabela 1 (Pereira, 2019). Esses mesmos parâmetros são utilizados para mensurar os erros após o processo de estimação e avaliar o desempenho do método proposto.

| Parâmetro | Valor |
|---------------------|------------------|
| \tilde{V}_s | 230 kV |
| R' | 0,04 Ω/Km |
| L' | 2,90 mH/Km |
| C' | 8,391 nF/Km |
| Frequência | 60 Hz |
| Comprimento (l) | 100 Km |

Tabela 1. Parâmetros da linha de transmissão.

A linha é modelada e as medições fasoriais são simuladas fazendo uso do *Simscape toolbox* no Simulink, como descrito na figura 2.

Os parâmetros concentrados (R, L e X) são calculados multiplicando-se os parâmetros distribuídos (R', L' e X') pelo comprimento da linha l :

$$R = R' \cdot l, X = X' \cdot l, C = C' \cdot l$$

Na figura 2, R_{shunt} é necessário para assegurar a convergência numérica da simulação, sendo que o valor desse parâmetro deve ser menor quando comparado aos outros

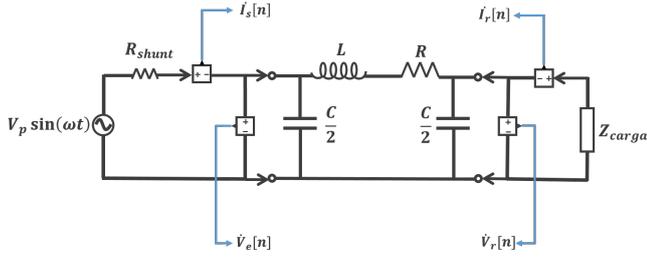


Figura 2. Modelagem da linha de transmissão no Simulink.

parâmetros concentrados da linha. Dessa forma, a resistência shunt é determinada $R_{shunt} = 0,05 \Omega$. A impedância da carga Z_{carga} é ajustada de forma a transmitir 90% da potência natural da linha. Logo, a impedância da carga é definida como $653,2 \Omega$.

Com base no modelo e nas condições operacionais descrita até então, sem a introdução de ruído, as medições fasoriais simuladas são:

$$\begin{aligned}\dot{V}_s &= (187650 - j 5,4322) V \\ \dot{I}_s &= (287,33 + j 10,864) A \\ \dot{V}_r &= (184440 - j 31343) V \\ \dot{I}_r &= (-282,37 + j 47,984) A\end{aligned}$$

A partir desses valores, a matriz \mathbf{H} é determinada:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 287,33 & 18,834 \\ -18,834 & 287,33 \\ 287,33 & 18,793 \\ -18,793 & 287,33 \end{bmatrix}$$

Dadas as descrições do sistema e simulações realizadas, faz-se necessário determinar as características do ruído nos sinais obtidos, i.e. determinar $w_1[n]$ e \mathbf{W} a partir das informações da linha modelada. O desvio padrão do ruído $w_1[n]$ $n = 1, 2, \dots, N$ é definido de maneira arbitrária como sendo $\sigma_1 = 3,796 \cdot 10^{-5} F$. A matriz de covariância do vetor de ruído $\mathbf{W}(\mathbf{C})$ é definida como:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0,148 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 14,141 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,148 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 14,141 \end{bmatrix} \cdot 10^6$$

Após a aplicação do método, é possível determinar a matriz de covariância do vetor com os parâmetros $\mathbf{C}_{\hat{\theta}}$ por meio da equação (10):

$$\mathbf{C}_{\hat{\theta}} = \begin{bmatrix} 1,2527 & -5,5018 \\ -5,5018 & 84,919 \end{bmatrix}$$

$$\text{Var}(R) = 1,2527 \Rightarrow \sigma_R = 1,1192 \Omega$$

$$\text{Var}(X) = 84,919 \Rightarrow \sigma_X = 9,2152 \Omega$$

Definindo $N = 10^4$ na equação (7) e (8), é possível gerar os histogramas de b , R e X :

Os valores estimados de cada parâmetro são obtidos a partir do valor médio, para cada grupo de N pontos, por meio da equação (11).

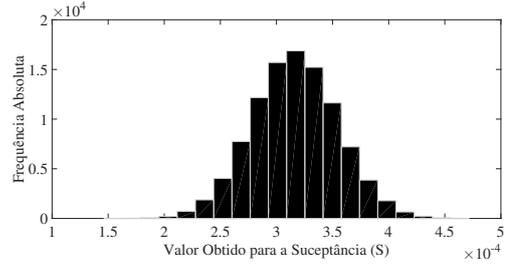


Figura 3. Histograma da susceptância b em S .

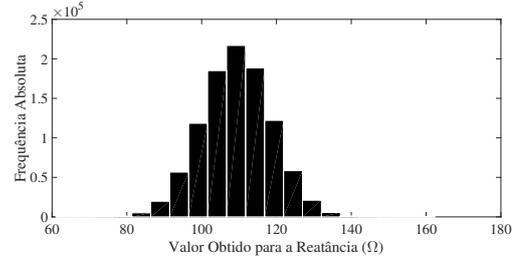


Figura 4. Histograma da reatância série X em Ω .

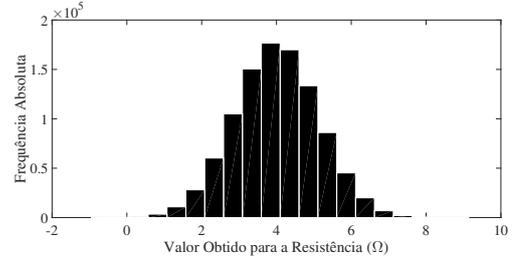


Figura 5. Histograma da resistência série R em Ω .

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x[n] \quad (11)$$

A dispersão dos dados estimados é mensurada por meio do desvio padrão, como descrito na equação (12).

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x[n] - \bar{x})^2} \quad (12)$$

Dessa forma, conhecendo-se os valores exatos dos parâmetros da linha, previamente determinados para simulação dos fasores de corrente e tensão, é possível calcular com precisão o erro relativo dos parâmetros estimados por meio da equação (13), com o objetivo de validar o método proposto.

$$\Delta_x = \left| \frac{\bar{x} - x'}{x'} \right| \quad (13)$$

Sendo o termo x' o valor exato de cada parâmetro.

Os indicadores estatísticos de cada parâmetro, considerando 10^4 amostras, encontram-se resumidos na tabela 2, enquanto os valores absolutos do erro relativo são descritos na tabela 3.

Os resultados mostram que o método proposto apresenta desvio relativo percentual inferior aos métodos que o

| Parâmetro | \bar{x} | σ_x |
|-----------|--------------------------|--------------------------|
| b | $3,1640 \cdot 10^{-4} S$ | $3,8046 \cdot 10^{-5} S$ |
| R | $3,9998 \Omega$ | $1,1194 \Omega$ |
| X | $109,3357 \Omega$ | $9,2132 \Omega$ |

Tabela 2. Indicadores dos parâmetros para $N=10^4$ amostras.

| Parâmetros | Δx (%) |
|------------|----------------|
| b | 0,0218 |
| R | 0,0049 |
| X | 0,0079 |

Tabela 3. Desvio percentual dos parâmetros para $N=10^4$ amostras.

antecederam, tal como descrito na tabela 3 (Li et al., 2017), (Janeček et al., 2011) (Ding et al., 2011). Ademais, para a magnitude dos valores escolhidos de σ_1 e dos elementos da matriz C , a variância de cada parâmetro é a menor possível, uma vez que o estimador é o MVUE.

Vale ainda ressaltar que, analisando a variância apresentada na tabela 2 e a variância previamente calculada usando a expressão (10), os valores obtidos por meio das simulações são os mesmos gerados pela expressão teoricamente conhecida para o método empregado.

Por meio da variação do número de amostras utilizadas na estimação dos parâmetros, é possível analisar a convergência do método quanto ao desvio percentual relativo dos parâmetros estimados. O resultado dessa análise é apresentado na figura 6.

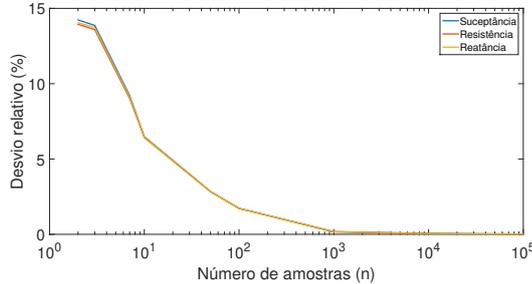


Figura 6. Análise da variação no número de amostras

5. CONCLUSÃO

O método proposto mostra-se capaz de estimar os parâmetros de uma linha de transmissão média com grande precisão, com erros percentuais desprezíveis de se comparados a outros métodos disponíveis na literatura técnica sobre o assunto e devidamente citados ao longo do artigo. As medições fasoriais de corrente e tensão podem ser obtidas por meio de PMUs localizados nos terminais da linha. No entanto, frente as limitações técnicas e acesso a informações obtidas por meio desses dispositivos, tais fatores foram simulados utilizando ferramentas computacionais bem estabelecidas na análise de sistemas de potência em geral. O método de estimação proposto mostra-se promissor e em trabalhos futuros, propõe-se ampliá-lo para aplicações envolvendo linhas longas e até mesmo outros dispositivos utilizados em sistemas de potência, como por exemplo, grandes transformadores de potência.

AGRADECIMENTOS

Coordenação de Pessoal de Nível Superior - CAPES. Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (Proc. 408681/2016-0). Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP (Procs. 2018/10952-2 e 2019/05381-9).

REFERÊNCIAS

- Costa, E.C.M. and Kurokawa, S. (2015). Estimation of transmission line parameters using multiple methods. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 9(16), 2617–2624.
- Ding, L., Bi, T., and Zhang, D. (2011). Transmission line parameters identification based on moving-window tls and pmu data. In *2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection*, volume 3, 2187–2191. IEEE.
- Hofmann, L. (2002). Series expansions for line series impedances considering different specific resistances, magnetic permeabilities, and dielectric permittivities of conductors, air and ground. *Power Engineering Review*, IEEE, 22, 80–80. doi:10.1109/MPER.2002.4312156.
- Janeček, E., Hering, P., Janeček, P., and Popelka, A. (2011). Transmission line identification using pmus. In *2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, 1–4. IEEE.
- Kay, S.M. (1993). *Fundamentals of statistical signal processing*. Prentice Hall PTR.
- Khandeparkar, K.V., Soman, S.A., and Gajjar, G. (2016). Detection and correction of systematic errors in instrument transformers along with line parameter estimation using pmu data. *IEEE transactions on power systems*, 32(4), 3089–3098.
- Li, C., Zhang, Y., Zhang, H., Wu, Q., and Terzija, V. (2017). Measurement-based transmission line parameter estimation with adaptive data selection scheme. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(6), 5764–5773.
- Monteiro, J.H.A., Costa, E.C.M., Pinto, A.J.G., Kurokawa, S., Gatous, O.M.O., and Pissolato, J. (2013). Simplified skin-effect formulation for power transmission lines. *IET Science, Measurement & Technology*, 8(2), 47–53.
- Pereira, R.F.R. (2019). *Estimação de parâmetros de linhas de transmissão por meio de técnicas de identificação de sistemas*. Master's thesis, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Ritzmann, D., Wright, P.S., Holderbaum, W., and Potter, B. (2016). A method for accurate transmission line impedance parameter estimation. *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, 65(10), 2204–2213.
- Schulze, R., Schegner, P., and Zivanovic, R. (2011). Parameter identification of unsymmetrical transmission lines using fault records obtained from protective relays. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26(2), 1265–1272.
- Stevenson, W.D. (1974). *Elementos de análise de sistemas de potência*. McGraw-Hill do Brasil.
- Zanetta Jr, L.C. (2006). *Fundamentos de sistemas elétricos de potência*. Editora Livraria da Física.