

# Detecção de Distúrbios Transitórios em Geradores Síncronos Utilizando a Transformada Wavelet

Cecilio Martins de Sousa Neto, Pedro Thiago Valério de Souza

**Resumo**—Neste artigo é apresentado um método em tempo real, utilizando a transformada *wavelet*, para detecção de distúrbio transitório em geradores síncronos de polos salientes conectados à rede elétrica. O método é baseado na análise em tempo real das energias dos coeficientes escala e *wavelet* com efeito de bordas. Para avaliar o efeito da *wavelet* mãe as famílias Daubechies, Coiflet e Symlet foram avaliadas, a fim de analisar a influência da *wavelet* mãe e selecionar a *wavelet* mais adequada para detecção de distúrbios transitórios em geradores síncronos.

**Palavras-Chave**—Transformada Wavelet, Geradores Síncronos de Polos Salientes, Distúrbios Transitórios.

**Abstract**—In this paper a real-time method is presented, using the wavelet transform for the detection and characterization of transient disturbance in synchronous generators of the salient poles connected to the electric network. The method is based on the real-time analysis of the energies of the scale and wavelet coefficients with border effects. To evaluate the effect of the mother wavelet the Daubechies, Coiflet and Symlet families were evaluated.

**Keywords**—Wavelet Transform, Synchronous Generation of Salient Poles, Disturbance Transients.

## I. INTRODUÇÃO

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a matriz energética brasileira possui uma capacidade instalada de aproximadamente 158GW, sendo que aproximadamente 64% corresponde a geração hidráulica, ou seja, proveniente de usinas hidrelétricas de grande (UHEs) e pequeno porte (PCHs). Neste contexto, a geração convencional e a geração distribuída (GD) utilizando fontes de energia renováveis podem ser consideradas uma importante alternativa para aumentar o potencial energético do sistema elétrico. Tanto as UHEs como as PCHs utilizam geradores síncronos, sendo estes imprescindíveis na manutenção da estabilidade do sistema elétrico de potência (SEP), devido sua inércia rotacional [5].

Desta forma, o gerador síncrono é um dos componentes mais importantes do sistema de geração de energia elétrica, sendo responsável pela geração e fornecimento de boa parte da potência ativa e reativa demandada pelo sistema de transmissão. Desta forma, geradores síncronos conectados em um barramento infinito devem-se manter em sincronismo mesmo em condições adversas, tais como faltas, variações de carga e transitórios rápidos. Desta forma, distúrbios transitórios de qualidade de energia devem ser detectados de forma adequada

e eficaz para mitigar a falha que pode resultar em mau funcionamento e danos de equipamentos no SEP.

Nas últimas décadas, diversas ferramentas modernas de processamento digital de sinais, tais como a transformada *wavelet* têm sido utilizadas para detecção rápida de distúrbios transitórios em SEPs [9] [10]. A transformada *wavelet* é bastante aplicada em estudos de qualidade da energia elétrica [11][12], análise de distúrbios transitórios [16][17], detecção, classificação, localização e estimação de faltas em sistemas de transmissão e distribuição [2][3][18], identificação e classificação de distúrbios em micro-redes [6], [7], [8] e detecção de faltas, no estator e rotor, de oscilações elétricas e eletromecânicas em geradores síncronos e em transformadores de potência [13][14][15].

Neste artigo é apresentado um método, em tempo real, baseado na transformada *wavelet* para detectar distúrbios transitórios nos terminais de um geradores síncronos de polos salientes conectados à rede elétrica. Para avaliar o efeito da *wavelet* mãe as famílias Daubechies, Coiflet e Symlet foram avaliadas. Os resultados foram obtidos por meio de um protótipo de SEP composto por um gerador síncrono conectado à rede elétrica. O método *wavelet* foi implementado e avaliado em tempo real para detecção de distúrbios transitórios e os resultados obtidos demonstram a eficiência da metodologia.

## II. TRANSFORMADA Wavelet

De acordo com Percival e Walden [1], a transformada *wavelet* discreta (TWD) utiliza filtros passa-baixa ( $h_\varphi$ ) e passa-alta ( $h_\psi$ ) para decompor um sinal de entrada em componentes de alta e baixa frequência (denominados coeficientes escala e *wavelet*, respectivamente). Em análises em tempo real, no primeiro nível de decomposição da TWD, os coeficientes escala e *wavelet* são calculados por:

$$s(k) = \sum_{l=0}^{L-1} h_\varphi(2k+l-L+1), \quad (1)$$

$$w(k) = \sum_{l=0}^{L-1} h_\psi(2k+l-L+1). \quad (2)$$

Em análises em tempo real, os coeficientes escala e *wavelet* da TWD são calculados apenas a cada duas amostras do sinal original devido a subamostragem por dois. Em contraste a TWD, a transformada *wavelet* discreta redundante (TWDR) não apresenta processo de subamostragem por dois no cálculo dos coeficientes escala e *wavelet*. Como consequência disso, distúrbios transitórios podem ser detectados de forma mais

rápida e segura usando o algoritmo da TWDR. Portanto, apenas a TWDR será avaliada neste artigo.

Baseado no algoritmo piramidal da TWDR, no primeiro nível de decomposição, os coeficientes escala e *wavelet* são calculados recursivamente por:

$$s(k) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{l=0}^{L-1} h_{\varphi}(k+l-L+1)x(n), \quad (3)$$

$$w(k) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{l=0}^{L-1} h_{\psi}(k+l-L+1)x(n), \quad (4)$$

sendo  $k \geq k_x + L - 1$ ;  $k_x$  a primeira amostra usada no cálculo de  $s$  e  $w$ .

Recentemente, Costa [3] propôs a inclusão dos primeiros  $L-1$  coeficientes com efeito de bordas no cálculo das energias dos coeficientes escala e *wavelet*. Desta forma, em tempo real, os coeficientes escala e *wavelet* com efeito de bordas são calculados por meio das primeiras e últimas  $L-1$  amostras do sinal pertencente à janela deslizante, como segue:

$$\tilde{s}(k) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{l=0}^{L-1} h_{\varphi}(l)x(k+l-L+1), \quad (5)$$

$$\tilde{w}(k) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{l=0}^{L-1} h_{\psi}(l)x(k+l-L+1). \quad (6)$$

Baseado em Costa e Driesen [2] e Costa [3], a energia espectral de um sinal de tensão ( $\mathcal{E}$ ) de uma janela deslizante com  $\Delta k$  amostras pode ser decomposta na energia dos coeficiente escala ( $\mathcal{E}^s$ ) e *wavelet* ( $\mathcal{E}^w$ ), como segue:

$$\mathcal{E}(k) = \sum_{n=k-\Delta k+1}^k [v(n)]^2 = \mathcal{E}^s(k) + \mathcal{E}^w(k), \quad (7)$$

em que  $\mathcal{E}^s(k)$  e ( $\mathcal{E}^w$ ) pode ser decomposta em mais duas componente, como segue [2], [3]:

$$\mathcal{E}^s(k) = \mathcal{E}^{sa}(k) + \mathcal{E}^{sb}(k), \quad (8)$$

$$\mathcal{E}^w(k) = \mathcal{E}^{wa}(k) + \mathcal{E}^{wb}(k), \quad (9)$$

desde que  $k \geq \Delta k - 1$ .

As componentes  $\mathcal{E}^{sa}$  e  $\mathcal{E}^{wa}$  são calculadas com os  $L-1$  coeficientes escala e *wavelet* com efeito de bordas, como segue [2], [3]:

$$\mathcal{E}^{sa}(k) = \sum_{n=0}^{L-2} [\tilde{s}(n)]^2, \quad (10)$$

$$\mathcal{E}^{wa}(k) = \sum_{n=0}^{L-2} [\tilde{w}(n)]^2. \quad (11)$$

Em tempo real, as componentes  $\varepsilon^{sa}$  e  $\varepsilon^{wa}$  são calculadas recursivamente, como segue [2]:

$$\varepsilon^{sa}(k) = \varepsilon^{sa}(k-1) - [\tilde{s}(k-\Delta k)]^2 + [\tilde{s}(k)]^2, \quad (12)$$

$$\varepsilon^{wa}(k) = \varepsilon^{wa}(k-1) - [\tilde{w}(k-\Delta k)]^2 + [\tilde{w}(k)]^2. \quad (13)$$

As componentes  $\varepsilon^{sb}$  e  $\varepsilon^{wb}$  são calculadas com os coeficientes escala e *wavelet* sem efeito de bordas, como segue:

$$\varepsilon^{sb}(k) = \sum_{n=k-\Delta k+L}^k [s(n)]^2, \quad (14)$$

$$\varepsilon^{wb}(k) = \sum_{n=k-\Delta k+L}^k [w(n)]^2. \quad (15)$$

De maneira similar às Equações 12 e 13, em tempo real as componentes  $\varepsilon^{sb}$  e  $\varepsilon^{wb}$  são calculadas recursivamente, como segue [2]:

$$\varepsilon^{sb}(k) = \varepsilon^{sb}(k-1) - [s(k-\Delta k)]^2 + [s(k)]^2, \quad (16)$$

$$\varepsilon^{wb}(k) = \varepsilon^{wb}(k-1) - [w(k-\Delta k)]^2 + [w(k)]^2. \quad (17)$$

### III. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

Na Figura 1 é apresentado o diagrama unifilar simplificado do protótipo de SEP implementado. De acordo com a Figura 1, o emulador de sistema elétrico de potência implementado é composto por um gerador síncrono de polos salientes (380 V, 5 kVA, 600 rpm) tracionado por um motor de corrente contínua de 3 kW. Este sistema é conectado a um ponto de acoplamento comum (PAC), no qual é conectado uma carga linear, composta pela associação de resistor  $r_l = 30 \Omega$  e indutor  $l_l = 60$  mH, um modelo de linha de transmissão (tipo T) composta por uma associação em de resistor  $r_s = 0.1 \Omega$  e indutor  $l_s = 2$  mH e um capacitor  $c_s = 10 \mu\text{F}$  em paralelo e uma fonte primária, implementada por uma subestação abrigada, trifásica de 15 kVA utilizada como barramento infinito.

O acionamento das máquinas são realizados por dois conversores de potência de ponte completa, comandados por uma estratégia de modulação por largura de pulso (do inglês, *pulse-width modulation* - PWM). A velocidade do conjunto motor CC - gerador síncrono de polos salientes é medida por um *encoder* incremental acoplado no eixo do conjunto motor-gerador. Os sinais de tensão e de corrente são medidos por sensores de efeito *hall* do tipo LV20-P e LAH 25-NP, respectivamente.

### IV. RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados experimentais obtidos foram desenvolvidos em uma plataforma composta por DSP 320F28335 de ponto flutuante conectado a um microcomputador. o Algoritmo de detecção de distúrbios transitórios foi implementado usando linguagem C. Os sinais de tensão foram medidos por sensores de tensão de efeito hall, dispositivos de aquisição e conversores A/D. A taxa de amostragem dos sinais foi de 10 kHz.

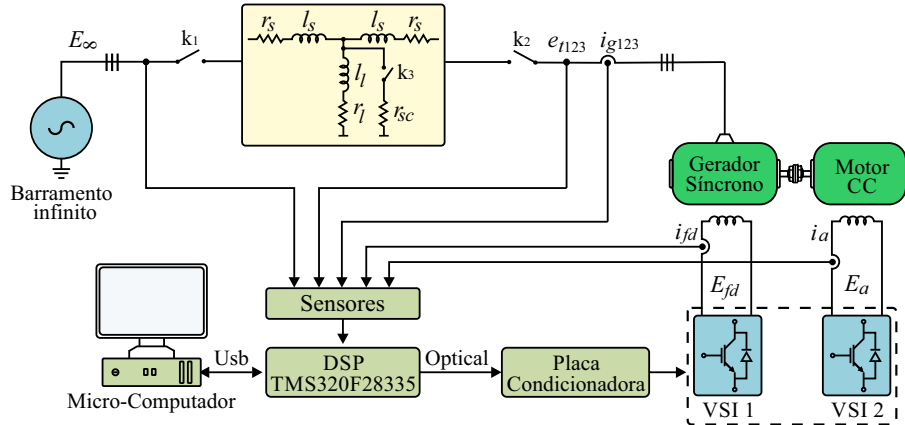


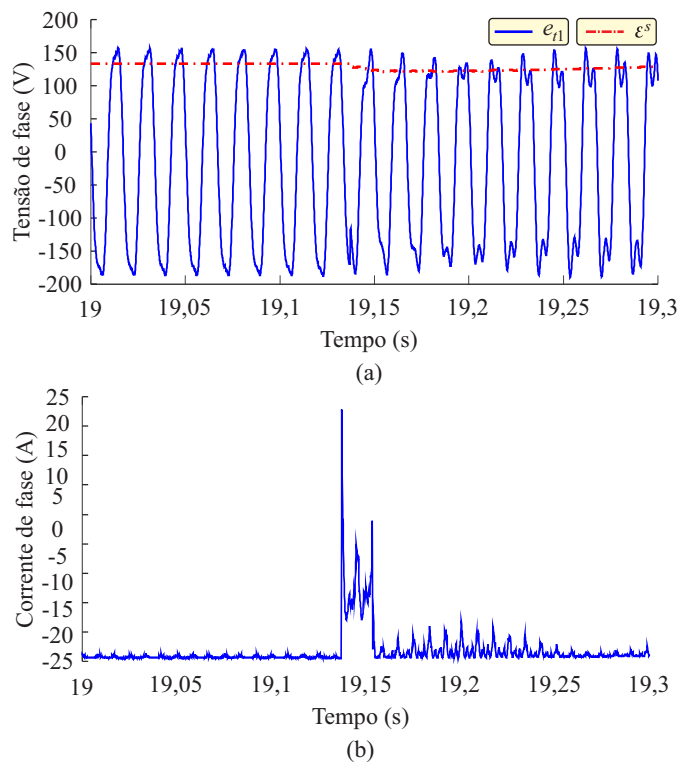
Fig. 1. Protótipo de sistema de potência.

### A. Detecção de Distúrbios Transitórios

Na Figura 2 são apresentadas a tensão terminal de fase do gerador síncrono de polos salientes, a energia dos coeficientes escala e *wavelet* com efeito de bordas, no primeiro nível de decomposição da TWDR, calculadas em tempo real usando a *wavelet* mãe db(4), durante período de curto-circuito. Em  $t = 19,13$ , o curto-circuito foi aplicado ao sistema por meio de uma de uma resistência de curto circuito em paralelo com a carga nominal. A energia dos coeficientes escala foi normalizada com a sua raiz quadrada ( $\sqrt{\varepsilon^s / \Delta k}$ ) para apresentar valores equivalentes ao valor rms da tensão de fase do gerador síncrono. De acordo com a Figura 2, a energia dos coeficientes escala com efeito de bordas da tensão terminal do gerador síncrono de polos salientes podem ser usadas para caracterização dos distúrbios, tais como magnitude e duração. Por outro lado, durante o período de regime permanente a energia dos coeficientes *wavelet* apresentam valores praticamente constantes, sendo influenciada apenas pelos ruídos de alta frequência, no entanto na ocorrência do curto-circuito a amplitude aumenta rapidamente. Portanto, a energia dos coeficientes *wavelet* com efeito de bordas podem ser usadas para detecção de oscilações elétricas em geradores síncronos de polos salientes. No entanto, é necessário avaliar a influência da *wavelet* mãe.

Segundo [2] e [3], em estudos baseados na transformada *wavelet* a escolha da *wavelet* mãe é uma etapa crítica, em que vários fatores devem ser levados em consideração, tais como a resposta em frequência, atraso na detecção dos distúrbios e o tempo de processamento para o cálculo dos coeficientes *wavelet*. Com o objetivo de identificar a melhor *wavelet* mãe, as famílias Daubechies, Coiflet e Symlet foram avaliadas.

Na Figura 3 são apresentadas a energia dos coeficientes escala e *wavelet* com efeito de bordas, no primeiro nível de decomposição da TWDR, utilizando-se as *wavelets* mãe das famílias Daubechies, Coiflet e Symlet. Os coeficientes escala representam a saída de um filtro passa-baixa, contendo as informações de baixa frequência do sinal original. De acordo com a Figura 3, em regime permanente a energia dos coeficientes escala apresentou um valor de aproximadamente  $\varepsilon^s \approx 133,2$ , no entanto, em  $t = 19,13$ , a energia dos coeficientes escala apresentou um decaimento de aproximada-


 Fig. 2. Resultados obtidos: (a) tensão terminal e energia dos coeficientes escala; (b) energia dos coeficientes *wavelet*.

mente  $\varepsilon^s \approx 120,8$ . Por outro lado, os coeficientes *wavelet* representam a saída de um filtro passa alta, contendo as informações de alta frequência do sinal original. Baseado na Figura 3, durante o período de regime permanente a energia dos coeficientes *wavelet* apresentaram valores praticamente constantes, sendo influenciadas apenas pelos ruídos de alta frequência. No entanto, na ocorrência do distúrbio transitório, a amplitude da energia dos coeficientes *wavelet* aumenta rapidamente. Desta forma, *wavelets* mãe compactas (Haar, db(4), sym(4) e coif(6)) e longas (db(30), coif(30) e sym(30)) não apresentaram atrasos tanto na caracterização quanto na detecção de distúrbios transitórios em geradores síncronos.

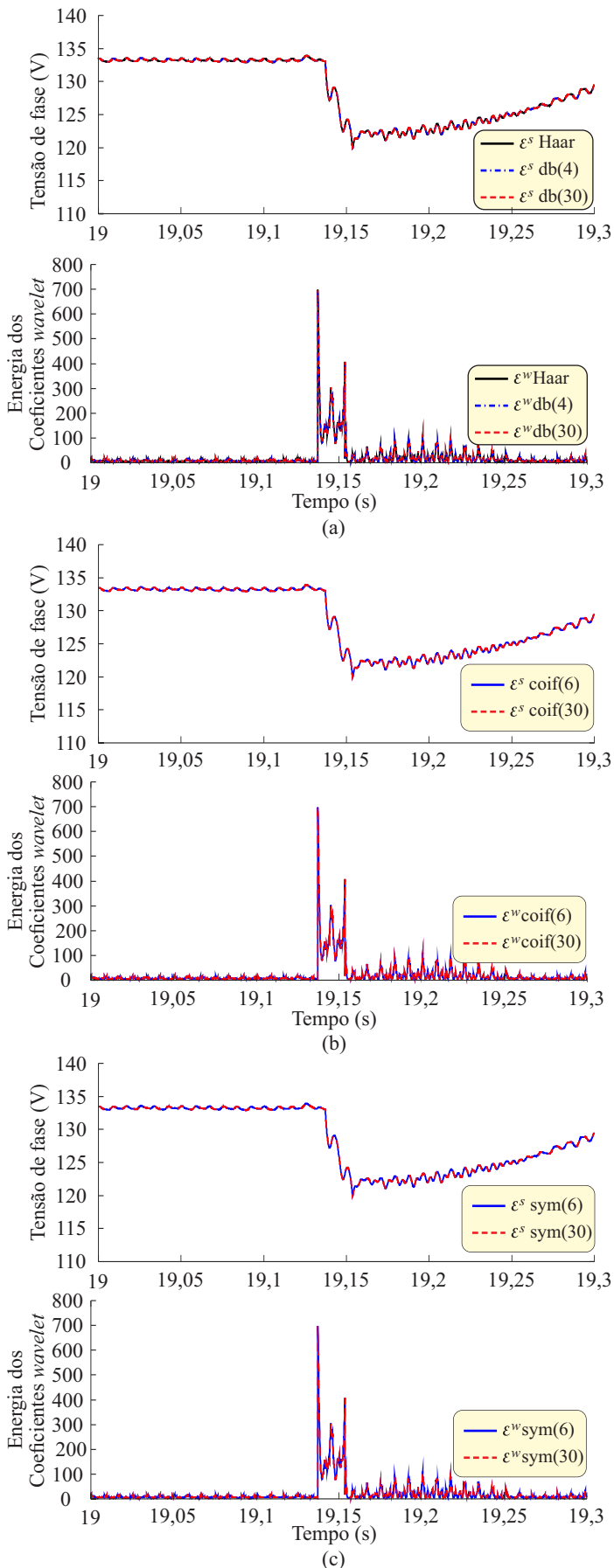


Fig. 3. Energia dos coeficientes escala e wavelet: (a) família Daubechies; (b) família Coiflet; (c) família Symlet

## V. CONCLUSÕES

Neste artigo foi apresentado um método, baseado na transformada *wavelet*, para detecção de distúrbios transitórios nos terminais de geradores síncronos conectados à rede elétrica. Para avaliar e identificar a melhor *wavelet* mãe as famílias Daubechies, Coiflet e Symlet foram avaliadas.

O desempenho da transformada wavelet foi avaliado na detecção de distúrbios transitórios nos terminais de um gerador síncrono de polos salientes. De acordo com os resultados obtidos, verificou-se que as energias dos coeficientes escala e *wavelet* com efeito de bordas não apresentou atrasos significativos na detecção e caracterização de distúrbios transitórios em geradores síncronos, tanto para *wavelets* compactas e longas, sendo pouco afetadas pela escolha da *wavelet* mãe para este propósito. No entanto, devido a baixa complexidade computacional, a *wavelet* mãe Haar com apenas dois coeficientes de filtro foi a mais adequada para detecção e caracterização de distúrbios transitórios em geradores síncronos usando-se a análise em tempo real das energias dos coeficientes escala e *wavelet* com efeito de bordas.

## REFERÊNCIAS

- [1] D. B. Percival and A. T. Walden, *Wavelet Methods for Time Series Analysis*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2000.
- [2] F. Costa and J. Driesen, Assessment of Voltage Sag Indices Based on Scaling and Wavelet Coefficient Energy Analysis, *IEEE Transactions Power Delivery*, vol. 28, no. 1, pp. 336-346, Jan. 2013.
- [3] F. B. Costa, Fault-Induced Transient Detection Based on Real-Time Analysis of the Wavelet Coefficient Energy, *IEEE Transactions Power Delivery*, vol. 29, no. 1, pp. 140-153, Feb. 2014.
- [4] C. M. d. S. Neto, F. B. Costa, R. L. d. A. Ribeiro, R. L. Barreto and T. d. O. A. Rocha, Wavelet-Based Power System Stabilizer, in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 12, pp. 7360-7369, Dec. 2015.
- [5] S. Curi, D. Groß and F. Dörfler, Control of Low-Inertia Power Grids: A Model Reduction Approach, 2017 IEEE 56th Annual Conference on Decision and Control (CDC), Melbourne, VIC, 2017, pp. 5708-5713.
- [6] S. P. Puthenpurakel and P. R. Subadhra, Identification and Classification of Microgrid Disturbances in a Hybrid Distributed Generation System Using Wavelet Transform, 2016 International Conference on Next Generation Intelligent Systems (ICNGIS), Kottayam, 2016, pp. 1-5.
- [7] S. A. Saleh, E. Ozkop and A. S. Aljankawey, The Development and Testing of a Coordinated Anti-Islanding Protection for Collector Systems with Multiple Distributed Generation Units, 2016 IEEE/IAS 52nd Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (ICPS), Detroit, MI, 2016, pp. 1-11.
- [8] M. Alizadeh Moghadam, M. Pourfallah and S. Jalilzadeh, A New Method Islanding Detection of Distributed Generation Systems via Wavelet Transform-Based Approaches, The 9th Power Systems Protection and Control Conference (PSPC2015), Tehran, 2015, pp. 1-5.
- [9] Rosa, M. C. F. and Horacio, N. D. R. (2002). An Overview of Wavelet Transforms Application in Power Systems. *Power Systems Computation Conference*, pages 1-8.
- [10] Santoso, S., Powers, E. J., Grady, W. M., and Hofmann, P. Power Quality Assessment via Wavelet Transform Analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no. 2, pp. 924-930, Apr. 1996.
- [11] Lee, C. H., Juen, Y., and Liang, W. (2000). A Literature Survey of Wavelet in Power Engineering Applications. *Proc. Natl. Sci. Coun. ROC (A)*, 24(4):249-258.
- [12] Mo, F. and Kinsner, W. (1997). Wavelet Modelling of Transients in Power Systems. *IEEE Conference on Communications, Power and Computing*, pages 132-137.
- [13] Neto, C. M. S., Costa, F. B., Barreto, R. L., Rocha, T. O. A., and Ribeiro, R. L. A. (2013a). Wavelet-Based Method for Detection of Electrical and Electromechanical Oscillations in Synchronous Generators. *Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, pages 699-704.
- [14] Ozgonenel, O., Arisoy, E., Khan, M. A. S. K., and Rahman, M. A. (2006). A Wavelet Power Based Algorithm for Synchronous Generator Protection. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, page 6.

- [15] Ozgonenel, O., Khan, M. A. S. K., and Rahman, M. A. (2008). Wavelet Power Based Transformer Internal Fault Protection Algorithm. International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP), pages 280-284.
- [16] Probert, S. A. and Song, Y. H. (2002). Detection and Classification of high Frequency Transients Using Wavelet Analysis. Proc. 2002 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2:801-806.
- [17] Wilkinson, W. A. and Cox, M. D. (1996). Discrete Wavelet Analysis of Power System Transients. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 11, no. 4, pp.2038-2044, Nov. 1996.
- [18] Youssef, O. A. S. (2001). Fault Classification Based on Wavelet Transforms. Transmission and Distribution Conference and Exposition, 1:531-536.