

# Efeito da *Wavelet* Mãe na Detecção de Distúrbios Transitórios em Geradores Síncronos

C. M. S. Neto e W. C. Santos

<sup>1</sup>Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA  
Rodovia BR-226, s/n, Pau dos Ferros - RN, 59900-000, Pau dos Ferros, RN, Brazil

cecilio.martins@ufersa.edu.br

**Abstract.** *In this paper we present a method to detect transient disturbances in synchronous generators of salient poles. The method is based on the wavelet transform, being based on the energy analysis of the wavelet coefficients. However, the effectiveness of wavelet analysis is largely influenced by the choice of the mother wavelet. In this paper, the Daubechies, Coiflet and Symlet families are evaluated in order to select the most suitable wavelet for the detection of transient disturbances in synchronous generators.*

**Resumo.** *Neste artigo é apresentado um método para detecção de distúrbios transitórios em geradores síncronos de polos salientes. O método é baseado na transformada wavelet, sendo baseado na análise da energia dos coeficientes wavelet. No entanto, a eficácia da análise wavelet é em grande parte influenciada pela escolha da wavelet mãe. Neste artigo, são avaliadas as famílias Daubechies, Coiflet e Symlet, a fim de selecionar a wavelet mais adequada para detecção de distúrbios transitórios em geradores síncronos.*

## 1. Introdução

O Sistema elétrico de potência (SEP) têm como principal função converter energia, a partir de uma das formas disponíveis, em energia elétrica e transportá-la para consumidores industriais, urbanos e rurais. Basicamente, a estrutura de um SEP compreende os sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. No SEP, o sistema de geração exerce um papel fundamental, compreendendo todo o processo de conversão de energia de uma fonte primária em eletricidade, sendo constituído tipicamente por geradores síncronos, transformadores e sistemas de controle, comando e proteção.

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. Portanto, uma detecção rápida de distúrbios transitórios é essencial na manutenção de geradores síncronos conectados na rede elétrica.

Nos últimos anos diversas ferramentas modernas de processamento digital de sinais, tais como a transformada *wavelet* têm sido utilizadas para detecção rápida de distúrbios transitórios em SEPs [Santoso et al. 1996] [Rosa and Horacio 2002].

A transformada *wavelet* é bastante aplicada em estudos de qualidade da energia elétrica [Mo and Kinsner 1997][Lee et al. 2000], análise de distúrbios transitórios [Wilkinson and Cox 1996][Probert and Song 2002], detecção, classificação, localização e estimação de faltas em sistemas de transmissão e distribuição [Costa 2014][Costa and Driesen 2013][Costa et al. 2010a][Youssef 2001] e detecção de faltas em sistemas fotovoltaicos, no estator e rotor, de oscilações elétricas e eletromecânicas em geradores síncronos e em transformadores de potência [Neto et al. 2013a][Barreto et al. 2013][Ozgonenel et al. 2006][Ozgonenel et al. 2008].

O principal objetivo deste artigo é analisar o efeito da *wavelet* mãe na detecção de distúrbios nos terminais de um gerador síncrono conectado à rede elétrica. Resultados experimentais 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 do método.

## 2. Transformada Wavelet

A transformada *wavelet* é uma poderosa ferramenta matemática amplamente utilizada na análise de distúrbios transitórios em SEPs. Baseado na análise multiresolucional, um sinal discreto pode ser decomposto nos coeficientes escala e *wavelet*, em diversos níveis de decomposição, por meio de um processo de filtragem digital. A transformada *wavelet* discreta (TWD) e a transformada *wavelet* discreta redundante (TWDR) utilizam filtros passa-baixa e passa-alta para decompor um sinal de entrada em componentes de alta e baixa frequência (coeficientes escala e *wavelet*) [Neto et al. 2013a].

Em contraste com a TWD, a 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 [Costa et al. 2012]. Portanto, os distúrbios transitórios são detectados por meio da TWDR neste artigo.

Os coeficientes dos filtros passa-baixa (filtro escala  $g$ ) e passa-alta (filtro *wavelet*  $h$ ) são associados com a *wavelet* mãe selecionada. de acordo com [Santoso et al. 1996], a *wavelet* mãe da família Daubechies com quatro elementos (db4) fornece uma detecção rápida e precisa de distúrbios transitórios em SEPs. Neste caso, ambos os filtros  $g$  e  $h$  possuem somente quatro coeficientes ( $L = 4$ ), fornecendo um rápido cálculo dos coeficientes escala e *wavelet* [Costa et al. 2012], ideal para aplicações em tempo real.

### 2.1. Coeficientes Escala e Wavelet da TWDR

Baseado em [Costa et al. 2010b], no primeiro nível de decomposição, os coeficientes escala e *wavelet* são calculados recursivamente, como segue:

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

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

sendo  $k \geq k_x + L - 1$ ;  $k_x$  a primeira amostra usada no cálculo de  $s$  e  $w$ ;  $h_\varphi(i) = g(i)/\sqrt{2}$  e  $h_\psi(i) = h(i)/\sqrt{2}$ .

## 2.2. Energia dos Coeficientes Escala e Wavelet da TWDR

De acordo com o teorema proposto por Parseval, a energia espectral de um sinal  $x(k)$  é igual a soma da energia dos coeficientes escala no nível de resolução  $J$ , com a energia dos coeficientes *wavelet* nos diferentes níveis de resolução  $1 \leq j \leq J$ . Portanto, utilizando a TWDR, a energia do sinal original pode ser dividida em termos da energia dos coeficientes escala e *wavelet*, como segue (BURRUS C. S.; RAMESH, 1998):

$$\sum_{k=0}^{k_t-1} |x(k)|^2 = \sum_{k=0}^{k_t-1} |s_J(k)|^2 + \sum_{J=1}^J \sum_{k=0}^{k_t-1} |w_J(k)|^2, \quad (3)$$

em que:  $\sum_{k=0}^{k_t-1} |x(k)|^2$ : representa a energia espectral do sinal original no domínio do tempo;

$\sum_{k=0}^{k_t-1} |s_J(k)|^2$ : representa a energia dos coeficientes escala da TWDR no nível de resolução

$J$ ; e  $\sum_{k=0}^{k_t-1} |w_J(k)|^2$ : representa a energia dos coeficientes *wavelet* da TWDR no nível de resolução  $J$ .

A decomposição de energia (3) não pode ser aplicada para análises em tempo real, visto que seria necessário o conhecimento de todas as amostras do sinal. De acordo com [Neto et al. 2013b], as energias janeladas dos coeficientes escala ( $\ddot{\mathcal{E}}$ ) e *wavelet* ( $\dot{\mathcal{E}}$ ), no primeiro nível de decomposição são dadas por:

$$\mathcal{E}(k) = \ddot{\mathcal{E}}(k) + \dot{\mathcal{E}}(k), \quad (4)$$

sendo

$$\ddot{\mathcal{E}}(k) = \sum_{n=k-\Delta k+1}^k s^2(n), \quad (5)$$

$$\dot{\mathcal{E}}(k) = \sum_{n=k-\Delta k+1}^k w^2(n), \quad (6)$$

sendo  $k \geq k_x + \Delta k + L - 2$ .

## 2.3. Cálculo das Energias dos Coeficientes Escala e Wavelet da TWDR em Tempo Real

Em tempo real, os cálculos da energia dos coeficientes escala e *wavelet* da TWDR são realizados após a obtenção de uma nova amostra dos coeficientes escala e *wavelet*. Nas Figuras 1 e 2 são apresentados o algoritmo para cálculo em tempo real das energias dos coeficientes escala e *wavelet*, respectivamente, utilizando o sinal da tensão terminal de um gerador síncrono de polos salientes como entrada.

De acordo com a Figura 1, na amostragem  $k$ , o sinal de tensão no domínio do tempo  $x(k)$  é armazenado em um registrador com  $L$  posições de memória, no qual a

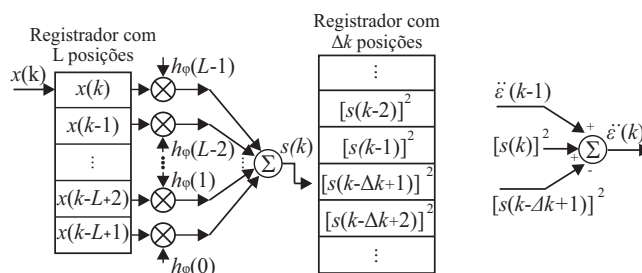


Figure 1. Cálculo da energia dos coeficientes escala em tempo real.

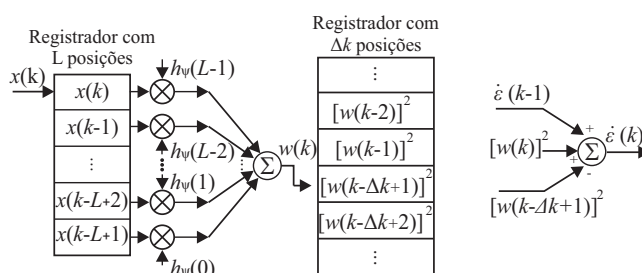


Figure 2. Cálculo da energia dos coeficientes *wavelet* em tempo real.

primeira posição é preenchida com a amostra atual  $x(k)$ . O coeficiente escala  $s(k)$  associado à amostragem  $k$  é calculado pela soma ponderada das últimas amostras  $L$  do sinal de tensão terminal com os parâmetros  $L$  do filtro escala  $h_\varphi$ . O quadrado do coeficiente escala  $[s(k)]^2$  é armazenados em um outro registrador, com capacidade de armazenamento de  $\Delta k$  posições, que corresponde a janela de um ciclo.  $[s(k)]^2$  é armazenado em uma posição de memória no qual se tem o coeficiente ao quadrado armazenado em um ciclo anterior, ou seja, onde se tem  $[s(k - \Delta k + 1)]^2$ . A energia dos coeficientes escala ( $\dot{\mathcal{E}}(k)$ ), na amostragem  $k$ , é obtida com o valor anterior de energia ( $\dot{\mathcal{E}}(k - 1)$ ) ao somar o valor atual do coeficiente ao quadrado  $[s(k)]^2$  e subtrair o coeficiente ao quadrado de um ciclo anterior  $[s(k - \Delta k + 1)]^2$ . A energia do coeficiente *wavelet* é calculada da mesma forma usando o filtro *wavelet*  $h_\psi$ , como apresentado na Figura 2.

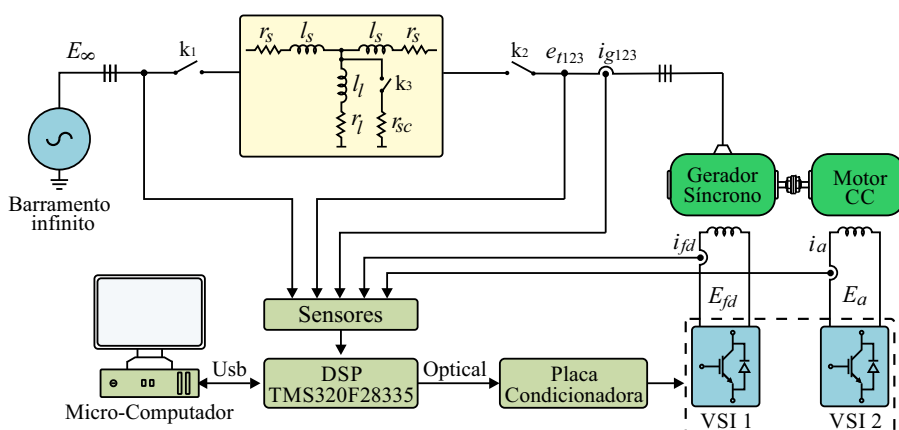


Figure 3. Protótipo de sistema de potência.

### 3. Descrição do Sistema

Na Figura 3 é apresentado o diagrama unifilar simplificado do protótipo de SEP implementado. De acordo com a Figura 3, 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 e uma subestação elétrica de 127 V utilizada como barramento infinito. O gerador síncrono de polos salientes é conectado ao barramento infinito por meio de um sistema de interconexão que emula, em escala, uma rede trifásica composta por dois segmentos de linha de transmissão, composta por uma associação em de resistor  $r_s = 0.1 \Omega$  e indutor  $l_s = 2 \text{ mH}$  e um capacitor  $c_s = 10 \mu\text{F}$  em paralelo, e uma carga linear, composta pela associação de resistor  $r_l = 30 \Omega$  e indutor  $l_l = 60 \text{ mH}$ , trifásica conectada no ponto central.

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.

### 4. Resultados Experimentais

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.

#### 4.1. Escolha da *Wavelet* Mãe

A escolha da *wavelet* mãe é uma etapa crítica em aplicações baseadas na transformada *wavelet*, nos quais 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 para detecção de transitórios nas tensões terminais de um gerador síncrono de polos salientes, um algoritmo de detecção de distúrbios transitórios, baseado nas energia dos coeficientes *wavelet* da TWDR, foi desenvolvido. Nesta análise, as famílias Daubechies, Coiflet e Symlet foram avaliadas.

Na Figura 4 é apresentada a tensão terminal do gerador síncrono de polos salientes durante período transitório.

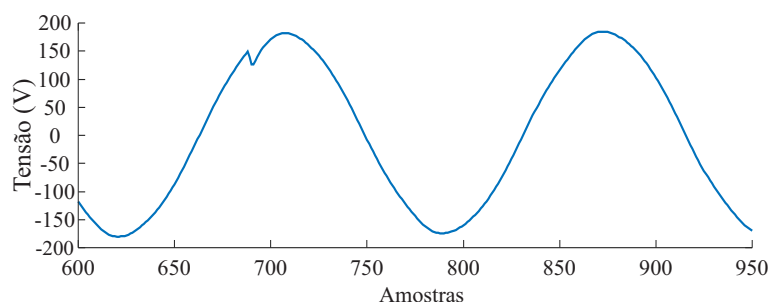
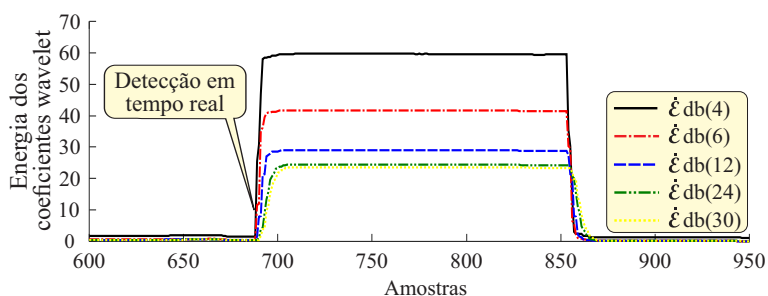


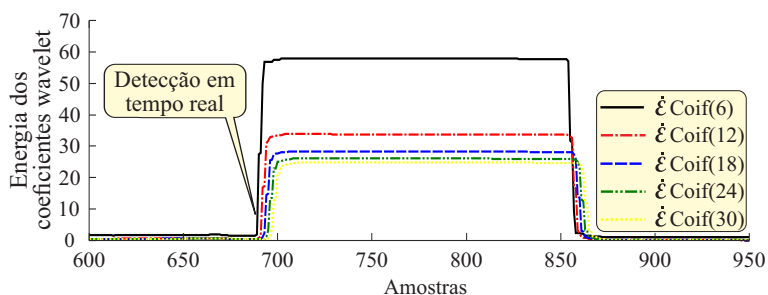
Figure 4. Tensão terminal do gerador síncrono com distúrbio transitório.

Na Figura 5 são apresentadas as energias dos coeficientes *wavelet*, no primeiro nível de decomposição da TWDR, referentes as *wavelets* mãe, db(4), db(6), db(12), db(24) e db(30), da família Daubechies. Neste caso, a energia dos coeficientes *wavelet* da família Daubechies apresentaram desempenhos satisfatório, detectando o distúrbio transitório. No entanto, a *wavelet* mãe db(4) apresentou desempenho superior as demais, detectando o distúrbio transitório sem atrasos e com uma maior sensibilidade, o que aumenta o desempenho de detecção da falta.



**Figure 5. Energia dos coeficientes *wavelet* (família Daubechies).**

Na Figura 6 são apresentadas as energias dos coeficientes *wavelet*, no primeiro nível de decomposição da TWDR, referentes as *wavelets* mãe, coif(6), coif(12), coif(18), coif(24) e coif(30), da família Coiflet. Baseado na Figura 6, a energia dos coeficientes *wavelet* da família Coiflet apresentaram desempenho bastante satisfatório, detectando o distúrbio transitório. Entretanto, a *wavelet* mãe coif(6) apresentou desempenho superior as demais, detectando o distúrbio transitório sem atrasos e com uma maior sensibilidade.



**Figure 6. Energia dos coeficientes *wavelet* (família Coiflet).**

Na Figura 7 são apresentadas as energias dos coeficientes *wavelet*, no primeiro nível de decomposição da TWDR, referentes as *wavelets* mãe, sym(4), sym(6), sym(12), sym(24) e sym(30), da família Symlet. Neste caso, a energia dos coeficientes *wavelet* da família Symlet também apresentaram desempenho satisfatório, realizando a detecção do distúrbio transitório. No entanto, com base nos resultados obtidos, a *wavelet* mãe sym(4) apresentou desempenho superior as demais, detectando o distúrbio transitório sem atrasos e com uma maior sensibilidade.

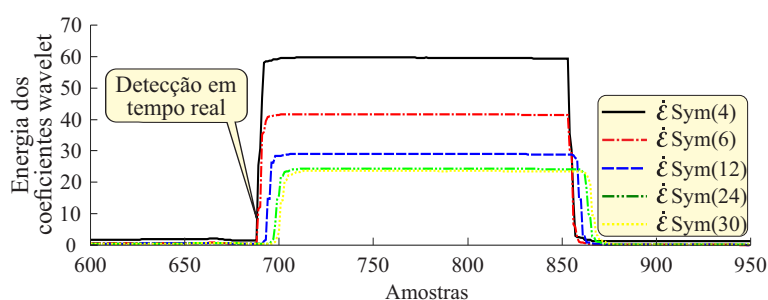


Figure 7. Energia dos coeficientes *wavelet* (família Symlet).

Na Figura 8 são apresentadas as energias dos coeficientes *wavelet*, no primeiro nível de decomposição da TWDR, referentes as *wavelets* mãe db(4), sym(4) e coif(6). De acordo com a Figura 8, a energia dos coeficientes *wavelet* das *wavelets* mãe db(4), sym(4) e coif(6) realizaram a detecção do distúrbio transitório de maneira satisfatória. Entretanto, as *wavelets* mãe db(4) e sym(4) apresentaram desempenho superior, visto que detectaram o ditúrbio transitório sem atrasos e com uma maior sensibilidade, quando comparadas ao desempenho da *wavelet* mãe coif(6).

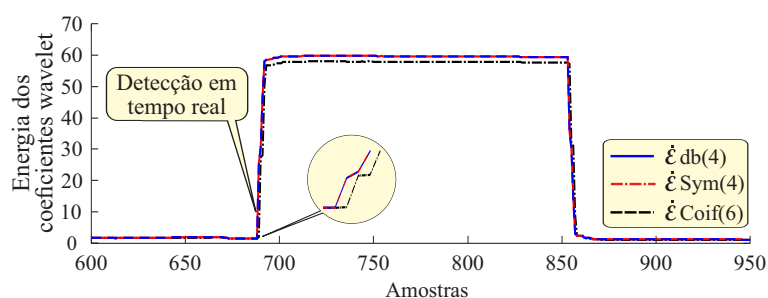


Figure 8. Energia dos coeficientes *wavelet* db(4), sym(4) e coif(6).

## 5. Conclusões

Este artigo apresentou um método para detecção de distúrbios transitórios em geradores síncronos de polos salientes conectado à rede elétrica. Com o objetivo de identificar a melhor *wavelet* mãe para detecção de transitórios nas tensões terminais de um gerador síncrono, as famílias Daubechies, Coiflet e Symlet foram analisadas.

Baeado nos resultados obtidos, as *wavelets* mãe db(4) e sym(4) foram as mais apropriadas para detecção de distúrbios transitórios em geradores síncronos usando-se a análise em tempo real da energia dos coeficientes *wavelet*. Além disso, todas essas *wavelets* mãe fornecem um rápido cálculo da energia dos coeficientes *wavelet*, sendo ideais para implementações em tempo real.

## References

- Barreto, R. L., Costa, F. B., Rocha, T. O. A., Neto, C. M. S., Lira, J. R. V., and Ribeiro, R. L. A. (2013). Wavelet-based fault detection in grid-connected photovoltaic systems. *Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, pages 1054–1059.

- Costa, F., Neto, C., Carolino, S., Ribeiro, R., Barreto, R., Rocha, T., and Pott, P. (2012). Comparison between two versions of the discrete wavelet transform for real-time transient detection on synchronous machine terminals.
- Costa, F. B. (2014). Fault-induced transient detection based on real-time analysis of the wavelet coefficient energy. *IEEE Transactions on Power Delivery*, page 140?153.
- Costa, F. B. and Driesen, J. (2013). Assessment of voltage sag indices based on scaling and wavelet coefficient energy analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, page 336?346.
- Costa, F. B., Souza, B., and Brito, N. S. D. (2010a). Detection and classification of transient disturbances in power systems. *IEEJ Transactions PE*, pages 910–916.
- Costa, F. B., Souza, B. A., and Brito, N. S. D. (2010b). Real-time detection of fault-induced transients in transmission lines. *IET Electronics Letters*, pages 753–755.
- Lee, C. H., Juen, Y., and Liang, W. (2000). A literature survey of wavelet in power engineering applications. *Proc. Natl. Sci. Counc. ROC (A)*, 24(4):249–258.
- Mo, F. and Kinsner, W. (1997). Wavelet modelling of transients in power systems. *IEEE Conference on Communications, Power and Computing*, pages 132–137.
- 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.
- Neto, C. M. S., Costa, F. B., Barreto, R. L., Rocha, T. O. A., and Ribeiro, R. L. A. (2013b). Wavelet-based method for detection of electrical and electromechanical oscillations in synchronous generators. *Conference Power Electronics (COBEP)*, pages 699–704.
- 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 pp.
- 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.
- 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.
- 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.
- Santoso, S., Powers, E. J., Grady, W. M., and Hofmann, P. (1996). Power quality assessment via wavelet transform analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 11(2):924–930.
- Wilkinson, W. A. and Cox, M. D. (1996). Discrete wavelet analysis of power system transients. *IEEE Transactions on Power Systems*, 11:2038–2044.
- Youssef, O. A. S. (2001). Fault classification based on wavelet transforms. *Transmission and Distribution Conference and Exposition*, 1:531–536.