

전력시스템에서의 웨이브릿 변환 적용 사례

김창일*

유인근**

* 남해전문대학 ** 창원대학교

An overview on applications of wavelet transform in power systems

Chang-Il Kim*

In-Keun Yu**

* Namhae Provincial College ** Changwon National University

Abstract - An overview on applications of wavelet transform in power systems presented in this paper. Wavelet transform is capable of making trade-offs between time and frequency resolutions, which is a property that makes it appropriate for the analysis of non stationary signal. In recent years, wavelet transform is widely accepted as a technology offering an alternative way due to its flexibility in representation of non-stationary signal even in power systems. This paper presents various applications of wavelet transform in power systems. Wavelet transform has been used by the authors in the field of power system protection for the classification of transient signals, and forecasting of short term loads and system marginal price and so on. Various research works carried out by many researchers in power systems are summarized.

1. 서 론

일반적으로 신호는 많은 중복성을 가지고 있으며 이러한 신호를 효율적으로 처리하기 위해서는 이 신호를 중복성이 없는 형태의 신호들로 분해하는 작업이 필수적이라 할 수 있다. 선형확장 이론은 신호를 정현파와 여현파의 급수형태로 표현한 Fourier 변환을 기점으로 하여 Garbor의 시간-주파수 분석에 이르기까지 그 이론적 발전을 거듭하였다[1]. 최근 신호처리 분야에서 주목을 받으며 활발하게 연구가 추진되고 있는 웨이브릿 이론은 정현파 분석, 수리 물리학 등의 기본적인 이론탐구 분야에서부터 신호의 압축, 인식 등의 응용에 이르기까지 실로 다양한 분야에서 독자적인 연구가 이루어져 왔으며 Grossman과 Morlet에 의해 신호처리 분야에 처음으로 소개되었고, Meyer는 $L^2(R)$ 공간에서 직교기저를 형성하는 웨이브릿이 존재함을 증명하였다[2]. 그 이후 Daubechies는 수학분야에서의 이론적 기초를 신호처리 분야에 접목시켜 이산 웨이브릿 변환의 개념을 확립시켰으며, 정규성을 최대화시킨 유한 길이의 필터를 설계하는 알고리즘을 제안하였다[3]. 또한 Mallat은 웨이브릿 이론에 대해상도 분석의 개념을 도입하여 공학적 응용의 기초를 마련하였다. 따라서 웨이브릿 변환은 신호처리나 Fourier 변환을 필요로 하는 분야, 즉 astronomy, acoustics, nuclear engineering, sub-band coding, signal and image processing, neurophysiology, music, magnetic resonance imaging, speech discrimination, optics, fractals, turbulence, earth-quake prediction, radar and human vision 등 실로 다양한 분야에 활용 가능한 방법으로 주목을 받고 있다. 최근에는 전력계통에서도 과도해석과 전력품질 해석, 데이터 축약 및 전송 관련연구 등에 일부 도입되면서 많은 관심을 모으고 있으며, 저자들도 보호계전,

단기부하 및 계통한계비용(SMP) 예측 분야에 이를 적용하여 그 효율성을 입증한 바 있다[8,19]. 본 연구에서는 전력계통 분야에서 응용되고 있는 웨이브릿의 기초 이론을 소개하고 적용 사례들을 예시하고자 한다.

2. 신호처리

2.1 Non-Stationary Signal Analysis

데이터를 주파수 대역으로 변환하는데 가장 널리 알려진 방법은 Fourier 변환이며, 이것은 신호를 다양한 주파수의 정현파 성분으로 분해한 뒤 각 성분의 상대적 크기를 해석하는 방법으로서 식 (1)과 같이 표현된다. 식 (1)에서 $X(f)$ 는 무한구간의 정현파 기저와 신호의 내적으로 표현된다.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-2i\pi ft} dt \quad (1)$$

Fourier 변환은 변환구간이 $-\infty$ 에서 $+\infty$ 이기 때문에 주파수 영역에서는 국부성을 갖는 신호가 시간 영역에서는 모든 영역에 걸쳐 존재하게 되어 시간영역과 주파수 영역의 국부성을 동시에 만족시켜 주지 못하므로 정제적(stationary) 신호의 분석에는 적합하지만 시간 영역에서의 급격한 변화를 나타내는 비정제적(non stationary) 신호의 분석에는 부적합하다. 따라서 전력계통에서 발생하는 대부분의 신호가 비정제적인 과도 특성을 많이 포함하고 있으므로 Fourier 분석은 이러한 특성들을 검출하는데 적합하지 못하다.

2.2 Short Time Fourier Transform

STFT는 시간과 주파수에서 동시에 신호를 분석하는 방법으로서 window를 시간축의 한 점 t 에 놓고, 그 윈도우 내에서 Fourier 변환을 수행하며, 식 (2)와 같이 표현된다.

$$STFT(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)g^*(t-t)e^{-2i\pi ft} dt \quad (2)$$

STFT는 신호분석을 국부화시키기 위한 창함수에 의해 일정 간격의 주파수 대역으로 분해하는 것으로 신호의 특성에 관계없이 고정된 크기의 창함수를 사용하기 때문에 시간 및 주파수 해상도가 일정하다. 즉, 시간영역에서 윈도우의 크기가 설정되면 모든 주파수 영역에서 윈도우의 크기가 고정되는 단점이 있다.

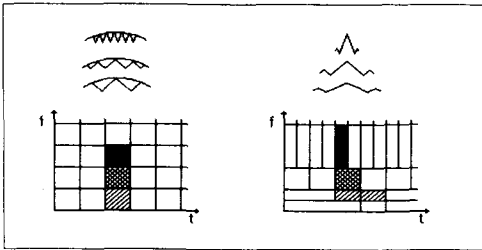
3. 웨이브릿 변환

실제 자연계에 존재하는 비정제적인 신호들은 신호들이 높은 주파수일 때는 좁은 시간영역에서 발생하며, 넓은 시간영역에서는 저주파 성분이 존재하게 된다. 따라

서 윈도우의 크기를 가변하여 저주파 영역에서는 넓은 윈도우를 사용하고 고주파 영역에서는 좁은 윈도우를 사용함으로써 SFTF의 단점을 극복한 방법이 웨이브릿 변환이고 그 정의 식은 식 (3)과 같다.

$$W_f(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) f(t) dt \quad (3)$$

웨이브릿의 기저함수는 마더 웨이브릿 $\psi(t)$ 를 시간 축에서 b 만큼 변이시키고, a 만큼 팽창/수축시켜 얻어진다. a 가 1보다 크면 기저함수는 시간축에서 좁아지며, a 가 1보다 작으면 넓어진다. 따라서 웨이브릿 변환은 시간-스케일 영역을 사용한 가변 윈도우의 특성을 이용하여 기저함수들의 해상도를 조절할 수 있다. 또한 용이한 과도신호의 국부성 분석을 통하여 전력계통에서 발생하는 과도현상의 분석에 매우 적절하게 활용될 수 있다. 그림 1은 Fourier 변환과 Wavelet 변환의 차이점을 나타낸 것이며, 그림에서 보여지듯이 Fourier 변환의 결점인 시간분해 능력이 Wavelet 변환에서는 매우 우수함을 알 수 있다.



(a) STFT (b) Wavelet Transform

Fig. 1 Basis function and corresponding tiling of the frequency plane

3. 1 연속 웨이브릿 변환

웨이브릿 기저함수 $h_{a,b}(t)$ 는 한 함수의 팽창/수축 (dilation)과 변이(translation)에 의해 만들어지며, 변환요소를 $a(a>0)$, 이동요소를 b 라 하면, 식 (4)와 같이 표현된다.

$$h_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} h\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (4)$$

식 (4)와 같은 기저함수를 이용한 입력신호 $x(t)$ 에 대한 웨이브릿 변환 $W_x(a, b)$ 는

$$W_x(a, b) = \langle h_{a,b}(t), x(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} h^*\left(\frac{t-b}{a}\right) x(t) dt \quad (5)$$

3. 2 이산 웨이브릿 변환

연속 웨이브릿 변환을 수행할 경우 수많은 기저함수로 인해 구현의 어려움이 수반된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 변수 a, b 를 샘플링하여 이산화 한다. 샘플링 격자를 $a = a_0^m (a_0 > 1)$, $b = nb_0 a_0^m (b \neq 0)$ 라 하면 이산 웨이브릿 변환 형태는

$$h_{mn}(t) = a_0^{-\frac{m}{2}} h(a_0^m(t) - nb_0), m, n \in Z \quad (6)$$

이산 웨이브릿 변환은 신호의 분해와 합성을 위한 저 대역 및 고 대역필터의 개념으로 확장될 수 있으며, 필터

뱅크는 분해시 입력을 두 개의 채널로 나누고 합성시 반대의 과정을 수행한다

3. 3 다해상도 해석과 필터뱅크

이산 웨이브릿 변환에서는 구현의 용이함을 위하여 역승(2⁻¹)의 형태를 주로 취하며, 특성상 스케일이 증가할수록 웨이브릿 변환 신호의 공간 해상도는 떨어지고 저주파 대역의 성분을 나타내게 된다. 이러한 Dyadic 웨이브릿 변환은 그림 2와 같이 다해상도 피라미드형 분해기법에 의해 실행되며 그림 3은 신호를 1단계 스케일의 저주파 성분과 고주파 성분으로 분해한 것이고, 그림 4는 분해된 신호를 합성하여 원 신호로 복원하는 과정을 보여주고 있다.

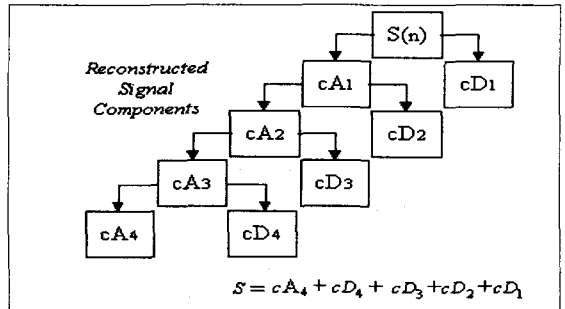


Fig. 2 Decomposition & reconstruction of the five scaled approximations and details

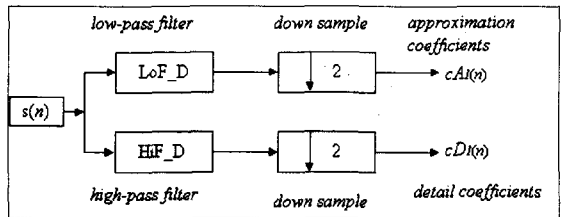


Fig. 3 The first-scale signal decomposition of $S(n)$ in $cA1(n)$ and $cD1(n)$

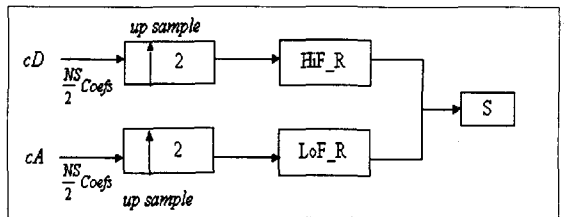


Fig. 4 Reconstruction of the approximations and the details

4. 전력계통에서의 적용 예

4.1 Protection과 과도신호 해석

● Shijie Cheng 등은 웨이브릿 변환을 이용하여 시스템 스위치 송전선로의 효율적 고장검출 기법을 제안하였고 [4], Transformer inrush identification을 강조한 전력계통 보호계전에 웨이브릿 변환을 적용하여 시뮬레이션을 통해 제안된 기법의 효율성을 입증하였다[5].

● Z.Chen 등은 [6] 이산 웨이브릿 변환으로 과도신호 검출하는 방법을 변압기 보호에 적용하였다. 계전시 과

도신호를 효율적으로 검출하기 위하여 이산 웨이브릿 변환이 적용되었고, 제안된 릴레이는 내부고장으로 인한 돌입전류를 효과적으로 제거할 수 있음을 제시하였다.

● Ge Yaozhong 등은[7] 전류 진행파와 웨이브릿에 기초한 고장점 추정 알고리즘과 릴레이를 제안하였고, 릴레이는 진행파에 기초하여 거리보호와 정확한 고장점을 검출할 수 있음을 제시하였다.

● 유인근 등은 웨이브릿 변환을 이용하여 초고압 송전 계통의 적응 단상재폐로 대책을 수립하였으며, 특히 Daubechies D4 웨이브릿 변환을 이용하여 영구고장과 과도고장 현상에서 발생하는 2차 파형을 해석하고, 송전 계통에서의 고장특성 검출과 고장 판정에 웨이브릿 변환을 효율적으로 사용하였다[8]. 또한 웨이브릿 변환과 신경회로망을 이용한 초고압 송전계통의 적응 단상재폐로 대책을 제안하고, 400kV 송전시스템에서 EMTP에 의해 발생된 과도 및 영구고장 파형을 분석하기 위하여 이산 웨이브릿 변환을 적용하였다[9].

● 박성택 등은[10] 배전계통의 단위 기기별 열화특성 신호를 측정하고 이를 이산 웨이브릿 계수를 이용하여 정량화하는 기법과 배전선로의 고장을 사전에 예측하기 위한 배전선로 고장징후 신호의 검출 방안을 제시하였다.

● Jeffrey S. Mayer 등은[11] 전력계통의 과도신호 해석에 웨이브릿을 적용하였고, 웨이브릿 변환에 의한 주파수 영역의 데이터가 과도신호 분석에 유용함을 제시하였다.

● 김철환 등은 EMTP를 이용하여 고저항 지락사고를 모의한 후, 웨이브릿 변환을 이용하여 고장을 검출하였으며[12], 웨이브릿 변환을 이용하여 일시고장과 영구고장을 판별한 후 이를 단상 자동재폐로 기법에 적용하였다[13]. 또한 웨이브릿 변환을 이용하여 고장검출 및 고장시간을 추정하였으며[14], EMTP를 이용하여 모의된 모델계통의 사고 데이터에 마더 웨이브릿을 변화시키면서 고장검출 성능을 분석함으로써 송전선로의 고장검출에 적절한 마더 웨이브릿을 제시하였고, 선정된 마더 웨이브릿을 이용한 송전선로 고장검출 방식을 제안하였다[15].

● M.D.Cox 등은[16] 이산 웨이브릿 변환에 대한 기초 이론을 제안하고 이산 웨이브릿 변환을 이용하여 과도신호를 분해하였다.

● Irene Y.H.Gu 등은[17] 3상 시스템에서 동기 캐패시터 스위칭 때문에 발생하는 과도신호의 인식과 분류를 위해 이산 웨이브릿 변환을 사용하였다.

● 이종범 등은[18] 송전선의 고장점 추정을 위해 웨이브릿 변환을 이용하였으며, 고장상황에서 진압과 전류의 진행파가 송전선로 양단에 설치된 계전기의 위치에서 측정되는 시간과 고장점 도달에 대한 시간을 분석하여 고장점을 추정하였다.

4.2 Forecasting & Prediction

● 유인근 등은 Daubechies D4와 D10, 웨이브릿 변환을 이용하여 일간 평일부하를 예측하고, 사례연구를 통하여 웨이브릿 변환의 타당성을 입증하였으며[19], 기온민감 부하에 Daubechies D2, D4 및 D10 웨이브릿 변환을 이용하여 평일과 주말의 일간부하 예측 알고리즘을 제안하였다[20, 21]. 또한 코호넨 신경회로망을 이용하여 각 계절별 실적부하를 4가지 유형으로 분류한 후 분류된 부하데이터와 기온데이터를 입력으로 Daubechies D10 웨이브릿 변환을 통해 단기부하를 예측할 수 있는 방법도 제안하였다[22]. 그리고 용도별 부하 중 대부분을 차지하고 있는 산업용 부하의 예측가능성도 제시하였으며[23]. 다양한 마더 웨이브릿에 대해 면밀한 분석을 거쳐, 단기부하예측에 가장 적합한 마더 웨이브릿을 선정하였다[24].

근년, 전력사업의 구조변화와 관련하여 중요한 연구 대상으로 부각되고 있는 발전시스템 한계비용(SMP)을 예측하는데 Daubechies D1, D2 및 D4 웨이브릿 변환을 이용하였고, 예측결과를 통해 웨이브릿 변환이 SMP 예측에 효율적으로 적용될 수 있음을 보였다[25, 26].

4.3 Data Compression

● W.M. Grady 등은[27] 전력품질 외란 데이터에 대한 웨이브릿 압축기법을 소개하였으며, 압축기법은 신호분해, 웨이브릿 변환 계수의 문턱값 그리고 신호합성을 통해 이루어졌다. 압축된 데이터의 크기는 원신호의 1/6에서 1/4 정도이고, 데이터 저장과 전송에 관련된 비용을 현저히 감소시켰다.

● D. J. Morrow 등은[28] 웨이브릿과 이산 여현 변환을 이용한 압축결과를 비교하였으며, power monitoring에서의 웨이브릿 압축에 대한 응용가능성을 제시하였다.

4.4 Quality Assessment

● Ching-Lien Huang 등은[29] 다양한 전력계통의 외란에 대해 Morlet 기저함수를 이용한 웨이브릿 변환을 적용하고, 전력계통의 다양한 외란에 대해 제안된 기법의 효용성을 입증하였다.

● P. Pillay 등은[30] 웨이브릿 변환의 기초이론을 제시하였으며 비정체적인 전력시스템의 외란을 정확히 복원하는데 있어 웨이브릿이 어떻게 사용되어지는가를 제시하였다.

● A. M. Gaouda 등은[31] 웨이브릿과 다해상도 신호분해를 이용하여 사고로 인한 과도신호를 효율적으로 분석하였으며, 다해상도 신호분해는 분해된 왜형파로부터 중요한 정보를 추출하는데 유용한 기법이 될 수 있음을 입증하였다.

● G. T. Heydt 등은[32] 전력계통에서의 과도신호를 분석할 수 있는 웨이브릿 기법을 제안하였고, 제안된 기법의 장단점을 제시하였다.

● 김철로 등은[33] 웨이브릿 이론과 신경회로망을 이용하여 전력품질 외란을 식별하였으며, 기존의 방법(지속시간, 외란의 크기로 특징벡터를 잡음)에 비해 훈련기간이 단축되고, 인식율도 향상됨을 보였다.

5. 결 론

본 논문에서는 신호처리나 푸리에 변환을 필요로 하는 다양한 분야에 활용 가능한 방법으로 주목을 받고 있는 웨이브릿 변환의 기초이론과 활용분야를 소개하였다. 특히 시간과 주파수 영역에서 다중 분해능 특성을 가지면서 비정체적 신호를 효과적으로 분석할 수 있는 웨이브릿 변환을 이용한 과도해석, 전력품질 해석, 보호계전, 부하예측, 계통한계비용 예측 및 data 축약 등 전력계통 분야에서 응용되고 있는 웨이브릿의 적용 사례들을 영역(Theme)별로 살펴보았으며, 사례연구 결과 향후 전력계통의 신뢰성 제고를 위한 단기예측은 물론 보호계전 분야와 전력품질해석 관련 분야 등에서 웨이브릿 변환의 활용도가 매우 높아질 것으로 전망된다.

본 연구는 2000년 에너지절약 학술진흥사업과 한국과학기술원 지질 자원대학교 공작기계기술 연구센터의 일부 지원에 의한 것임

[참 고 문 헌]

- [1] O.Rioul and M. Vetterli, "Wavelets and signal processing", IEEE SP magazine, Oct. 1991

- [2] Charles K. Chui, "An introduction to wavelets", Academic Press, Inc., 1992
- [3] M. Vetterli, "Wavelets and filter banks : Theory and design", IEEE Trans. Signal Processing, vol 40, pp. 2207-2232, Sept, 1992
- [4] Xiangnung Lin, Pei Liu and Shijie Cheng, "Effective transmission line fault detection during power swing with wavelet transform", IEEE Winter meeting, 2000
- [5] Xiangnung Lin, Pei Liu and Shijie Cheng, "A wavelet transform based scheme for power transformer inrush identification", IEEE Winter meeting, 2000
- [6] F. Jiang, Z. Q. Bo, P S M Chin, M. A. Redfern and Z. Chen, "Power transformer protection based on transient detection using discrete wavelet transform(DWT)", IEEE Winter meeting, 2000
- [7] Dong Xinzhou, Ge Yaozhong and Xu Bingyin, "Fault position relay based on current travelling waves and wavelets", IEEE Winter meeting, 2000
- [8] I.K. Yu and Y. H. Song, "Development of a Novel Adaptive Single-pole Autoreclosure Schemes for EHV Transmission Systems using Wavelet Transform Analysis," Electric Power System Research, Vol. 47, No. 1, 1998
- [9] I. K. Yu, Y. H. Song, "Wavelet analysis and neural network based adaptive single-pole autoreclosure scheme for EHV transmission systems", Electric Power Systems Research, Vol. 20, No. 7, pp. 465-474, 1998
- [10] 신정훈, 김태원, 박성택, "웨이브릿 변환을 이용한 배전설비의 고장징후 검출기법" 전력, 제 14권 2호, 1997
- [11] D. C. Robertson, O. I. Camps, J. S. Mayer and W. B. Gish "Wavelets and electromagnetic power system transients", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, No. 2, pp. 1050-1051, 1996
- [12] 고영훈, 김철환, 김현, "웨이브릿 변환을 이용한 고저항 지락사고 검출 및 판별" 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1373-1375, 1999
- [13] 조성빈, 김철환, "웨이브릿 변환을 이용한 송전선로의 일시고장과 영구고장 검출에 관한 연구" 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1366-1368, 1999
- [14] 김현, 김철환, "웨이브릿 변환을 이용한 고저항 지락고장 검출" 대한전기학회 논문집, 제 48A권 12호, pp. 1492-1497, 1999
- [15] 변성현, 김현, 김철환, 김일동, 한경남, 채영무 "송전선로의 고장검출을 위한 Mother Wavelet 선정에 관한 연구" 대한전기학회 논문집, 제 47권 9호, pp. 1277-1282, 1998
- [16] W.A. Wilkinson, M. D. Cox, "Discrete wavelet analysis of power transients", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, No. 4, pp. 2038-2044, 1996
- [17] E. Styvaktakis, Math H.J.Bollen and Y.H.Gu, "Classification of power system transients & synchronised switching", IEEE Witer meeting, 2000
- [18] 문성철, 이종범, "송전선에서 웨이브릿을 이용한 고장점 추정에 관한 연구" 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1360-1362, 1999
- [19] I.K. Yu, C.I. Kim, and Y H Song, "A novel wavelet transform based approach to short-term load forecasting," ICEE, Kyungju, Korea, 1998
- [20] C.I. Kim, I.K. Yu and Y H Song, "A novel short-term load forecasting technique using wavelet transform analysis," accepted by Electric Machines and Power Systems, 1998
- [21] 김창일, 김봉태, 김우현, 유인근, "웨이브릿 변환을 이용한 계절별 부하예측 알고리즘" 대한전기학회 추계학술대회 논문집 A권, pp. 242-244, 1999
- [22] 김창일, 김봉태, 김우현, 유인근, "코호넨 신경회로망과 웨이브릿 변환을 이용한 단기부하예측" 대한전기학회 추계학술대회 논문집 A권, pp. 239-241, 1999
- [23] 김봉태, 김창일, 김우현, 유인근, "웨이브릿 변환을 이용한 산업별 부하예측" 대한전기학회 부산울산경남지부 추계 합동학술대회 논문집, pp. 76-78, 1999
- [24] 김창일, 유인근, "단기부하예측을 위한 최적 마더 웨이브릿 선정" 대한전기학회 합동추계학술대회 논문집, pp. 149-151, 2000
- [25] C.I. Kim, I.K. Yu and Y H Song, "Prediction of system marginal price of electricity using wavelet transform analysis," accepted by System Sciences special issue on power market and deregulation, 1999
- [26] 김창일, 김봉태, 김우현, 유인근, "웨이브릿 변환을 이용한 발전시스템 한계원가 예측기법" 대한전기학회 추계학술대회 논문집 A권, pp. 210-212, 1999
- [27] S. Santoso and E.J. Powers, and W.M. Grady, "Power quality disturbance data compression using wavelet transform methods", IEEE Trans. on Power Delivery, 1997, 12 (3) pp. 1250-1256
- [28] T. B. Littler and D. J. Morrow, "Wavelets analysis and compression of power system disturbances", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 14, No. 2, pp. 358-364, 1999
- [29] Shyh-Jier Huang, Cheng-Tao Hsieh, Ching-Lien Huang, "Application of Morlet Wavelets to Supervise Power System Disturbances", IEEE Trans. No Power Delivery, Vol. 14, No. 1, pp. 235-243, 1999
- [30] P. Pillay, A. Bhattacharjee, "Application of wavelets to model short-term power system disturbances", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, No. 4, pp. 2031-2037, 1996
- [31] A. M. Gaouda, M. M. A. Salama, M. R. Siltan and A. Y. Chikbani, "Power quality detection and classification using wavelet-multi-resolution signal decomposition", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 14, No. 4, pp. 1469-1476, 1999
- [32] G. T. Heydt and A. W. Galli, "Transient power quality problems analyzed using wavelets", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, No. 2, pp. 908-915, 1999
- [33] 김봉수, 김승조, 남상원, 김진오, "웨이브릿 이론과 신경회로망을 이용한 전력품질 외란의 검출 및 식별" 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp. 69-71, 1994