

이산웨이블릿을 이용한 전력외란 측정 시스템

李鎭穆*, 金弘均**, 崔載昊***, 李尙勳****

Power disturbance measurement system using discrete wavelet transform

J.M. Lee, H.K. Kim, J.H. Choi, and S.H Lee

요약

최근 민감한 전자부하의 사용증대에 기인하여 전력의 안정도와 신뢰도에 대한 관심이 증대되고 있다. 이에 전력 품질문제가 근래에 있어 일반적인 중요한 과제로 대두되었다. 이러한 전력품질문제를 진단하기 위하여 실효치나 FFT 등의 기법을 이용한 많은 알고리즘이 연구되어 왔으나 모든 전력품질문제를 진단 하기에는 아직도 미진한 상황이다. 본 논문은 이산 웨이블릿을 응용한 전력품질문제의 진단 방법을 제안하고 웨이블릿의 이론에 대한 기본적인 설명과 함께 제안된 이론의 타당성을 입증하기 위하여 실제 전력품질문제 진단시스템을 설계하고 실험결과를 제시하였다.

ABSTRACT

Recently, need of power stability and reliability has been increased as the spread of the sensitive electronic loads. Therefore, the power quality(PQ) problems become the hot issue of public interest in these days. Many kinds of algorithms have been studied for the monitoring of PQ problems using the monitoring algorithms with RMS or FFT scheme, but it is still not enough to measure all of the PQ problems. This paper proposed the application of discrete wavelet transform(WT) for the PQ problems monitoring with the introduction of WT theory, and the design of PQ monitoring data acquisition system is described with some experimental results to verify the validity of the proposed PQ monitoring algorithm.

Key Words: Power Quality Measurement, Wavelet Transform, Data Acquisition System

1. 서론

전력품질 문제가 중요시되는 첫 번째 이유는 전력산업 구조 개편안의 통과로 전력산업 전반에 큰 변화가 일어나게 되었는데 이러한 변화 중에서 주목할 만한 것은 전력시장 형성에 의하여 전력의 판매가 가능해졌

다는 점이다. 이것은 소비자가 전력의 가격을 결정하는 것을 의미하는데 가격을 결정하는 지표로서 전력의 품질이 중요한 요인으로 부각되었다. 따라서 전력회사는 안정적이면서도 신뢰성을 갖춘 전력생산을 위하여 전력의 품질에 저하되는 원인을 규명하고 개선하려는 데 부단한 노력을 기울여야만 하는 환경에 놓이게 되었다. 둘째로는 전력전자기기의 사용증가로 전력품질이 급격하게 저하된 현실에서 전력품질에 민감한 전자부하의 사용이 증가하여 이들 기기들의 오동작이 빈번하게 발생하게 된 점이다. 컴퓨터나 공장의 자동화 설비나 전자측정 및 제어기기 등은 정전이나 순시전압강하 등과 같은 전력이상이 발생할 경우에 오동작을 일

*학생회원, 충북대 전기공학과 석사과정
E-mail : jmllee@power.chungbuk.ac.kr
**정회원, 충북대 전기공학과 박사과정
***정회원, 충북대 전기전자공학부 교수
****정회원, 포스콘 대리
접수일자 : 2003. 8.27
1차심사 : 2003. 9.17
심사완료일 : 2003. 9.29

으며 큰 손해를 발생시킨다. 실제로 미국 Power Quality 그룹의 보고에 의하면 이러한 문제로 매년 약 250억 달러의 손실을 입는다고 보고하고 있다.^[1]

전력품질문제를 해결하기 위해서는 전력품질에 대한 정확한 진단이 선행되어야 하므로 이에 관한 많은 연구가 선행되었다.

전력진단은 IEEE 규정에 따라서 sag와 swell과 interruption과 같은 시간영역에서의 진단과 Harmonics와 Noise와 Oscillatory Transients와 같은 주파수영역에서의 진단방법으로 나눌 수 있다.^[2] 주파수 영역에서 분석하는 방법으로는 푸리에 변환(Fourier Transform: FT)과 이를 개선한 단시간 푸리에 변환(Short Time Fourier Transform: STFT)이 있다.^[3] 그리고 시간영역에서 분석하는 방법으로는 실효치를 이용하는 방법과 신경망을 이용하는 방법 등이 있다. 그러나 이 방법들은 한 가지 영역에서 수행하기 때문에 두 가지 정보를 모두 필요로 하는 경우에는 각각의 방법을 이중으로 수행해야 하는 단점이 있다. 그리고 실효치를 이용하는 방법은 간단하기는 하나 오차가 크고 신경망을 이용하는 방법은 많은 학습이 필요하다. 그래서 최근에는 신호처리에 응용되어온 웨이블릿 변환(Wavelet Transform: WT)을 이용하는 방법이 많이 연구 되고 있다.^{[4][5]}

본 논문에서는 이산웨이블릿 변환(Discrete Wavelet Transform: DWT)을 이용하여 전력외란을 측정하는 시스템을 만들고 모의 시스템에 대한 실험결과를 제시하여 제안된 알고리즘의 타당성을 입증하였다.

2. 푸리에 변환

2.1 푸리에 변환을 이용한 해석

푸리에변환을 이용하는 방법은 주파수 영역에서 해석하는 가장 대표적인 방법으로서 모든 주기신호는 직류성분과 주파수가 다른 sin함수와 cos함수의 합으로 나타낼 수 있다는 이론이다. 이는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

푸리에변환은 변환구간이 $-\infty$ 에서 $+\infty$ 이기 때문에 주파수 영역에서 국부적인 신호도 시간영역에서는 모든 영역에 걸쳐 존재하게 된다. 그러므로 정제적

(stationary)신호의 분석에는 적합하지만 시간영역에서 급격하게 변화하는 비정체적(non stationary)신호의 분석에는 적합하지 않다. 전력품질문제가 비정체적인 특성을 가진다는 것을 감안하면 FT는 이를 진단하는데 적합하지 못하다.

2.2 단시간 푸리에 변환을 이용한 방법

단시간 푸리에변환을 이용하는 방법은 푸리에변환이 시간정보를 가지지 못하는 점을 보완하여 윈도우 함수를 이동하면서 푸리에변환을 수행하는 방법이다. 이는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$X_{WF}(w, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-jw(t-\tau)} \bar{w}(t-\tau)x(t) dt \quad (2)$$

식 (2)에서 $\bar{w}(t-\tau)$ 는 윈도우 함수이다. 단시간 푸리에변환은 일정한 크기의 윈도우 함수를 이용하기 때문에 시간 및 주파수 해상도가 일정하다. 따라서 시간영역에서 창의 크기가 설정되면 모든 주파수 영역에서 창의 크기가 고정되는 단점을 가지고 있다.

3. 웨이블릿 변환과 다운샘플링

3.1 웨이블릿 변환

웨이블릿 변환은 단시간 푸리에변환의 단점을 보완한 방법으로 시간영역의 윈도우 함수의 크기를 가변시켜서 낮은 주파수나 높은 주파수의 모든 영역에서 효과적으로 해석이 가능하게 하는 방법이다. 이는 식 (3)와 같이 표현된다.

$$X_w(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\bar{\psi}_{b,a}(t) dt \quad (3)$$

$$\text{단, } \bar{\psi}_{b,a}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi_{b,a}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$$

식 (3)에서 $\bar{\psi}_{b,a}(t)$ 는 모웨이블릿함수(Mother wavelet)이며 a 에 의해서 팽창/수축(Scaling)을, b 에 의해서 이동(Shifting)을 하여 모든 영역을 해석하게 된다. 팽창/수축과 이동은 국부적인 신호를 분석하기에 적당하다. 본 논문에서는 가장 분석력이 뛰어나 일반

적으로 채택하고 있는 Daubechies 4를 모함수로 사용하였다¹⁶⁾.

3.2 이산웨이블릿 변환을 이용한 방법

연속웨이블릿은 많은 연산이 필요하므로 구현하기에 어려움이 있다. 이런 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 이산웨이블릿을 사용하였다. 모웨이블릿이 식 (4)와 같이 주어지면 이산 웨이블릿은 식 (5)와 같이 주어진다.

$$\psi_{m,n}(k) = a_0^{-\frac{m}{2}} \psi(a_0^{-m}k - nb_0) \quad (4)$$

$$DWTx(m,n) = \sum_k x(k) \psi\left(\frac{k - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) \quad (5)$$

3.3 다해상도해석과 필터뱅크

다해상도해석(Multi-level Decomposition: MLD)은 그림 1과 같이 원신호(Original Signal) S를 저역통과필터(LPF)와 고역통과필터(HPF)를 사용하여 저주파수 영역의 Approximation 과 고주파수영역의 Detail을 분해할 수 있는데 이러한 연산과정을 여러 번 거치는 것을 다해상도해석이라 한다.¹⁶⁾

다해상도해석으로 한번의 분해과정이 이루어질 때마다 절반의 주파수 영역이 분리되게 된다. 본 논문에서는 3번 분해하였다. 그러나 한번 분해하는 과정에서 데이터의 양은 두 배가 되며, 분해과정을 반복할수록 데이터의 양은 점점 증가하여 연산처리와 전송에 어려움이 발생한다.

본 논문에서는 이러한 문제를 보완하기 위하여 그림 2와 같이 다운샘플링(Downsampling)을 수행하였다.¹⁷⁾¹⁸⁾ 다운샘플링을 수행하면 데이터의 수를 반으로 줄일 수 있다. 이는 그림 3에 보인 바와 같이 cA3은 저주파 영역을 cD1은 고주파 영역을 나타내는데, 그림과 같이 연산전 S의 데이터와 연산후의 cD1, cD2, cD3, cA3 데이터의 크기를 똑같이 만들어 전송을 빠르게 하는데 목적이 있다.

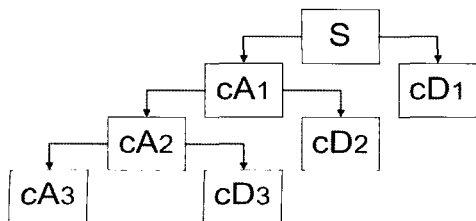


그림 1 다해상도해석
Fig. 1 Multiple-Level Decomposition

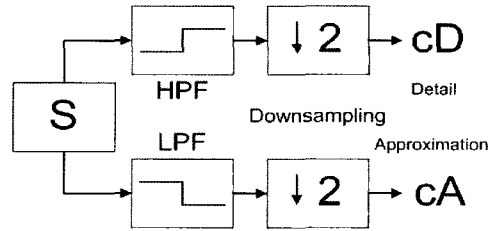


그림 2 다운샘플링
Fig. 2 Downsampling

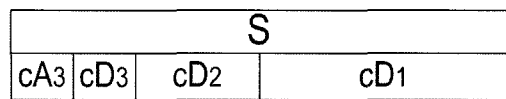


그림 3 다해상도의 주파수 영역
Fig. 3 Frequency domain of MLD

4. 실험 및 결과

4.1 시스템 구성

본 논문에서 구성한 전력품질 측정시스템의 보드 사진을 그림 4에 그리고 이의 내부 구성도를 그림 5에 각각 나타내었다.

전력분석시스템의 일반사양은 다음과 같다. 그림 5에서 보는 바와 같이 Main DSP 보드로는 TI사의 TMS320VC33을 사용하였다. 1개의 Serial Port와 1개의 Ethernet Port 454[kHz] Sampling Rate를 갖춘 7채널의 A/D를 내장했으며, 동시에 파형 테스트를 위한 12[Bit] 1[us] Settling Time을 갖는 D/A 1채널을 내장하고 있다. 실시간으로 RMS 전압과 전류와 전력파와 피상전력(Apparent Power)과 총고조파 왜형률(Total Harmonic Distortion: THD), 역률(Power Factor)을 나타낼 수 있으며 DWT 알고리즘도 내장되어 실시간으로 문제점을 알 수 있다.

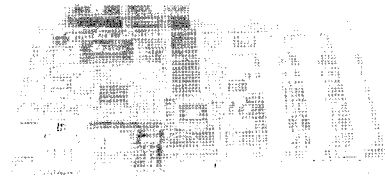


그림 4 전력품질 측정 시스템사진
Fig. 4 power quality measurement system board

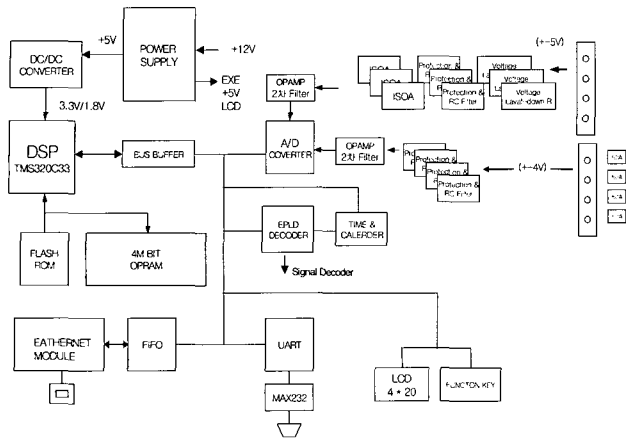


그림 5 전력품질 측정 시스템의 내부회로
Fig. 5 Internal block diagram of Power Quality Measurement System

4.2 모의실험 및 결과

모의 실험을 위해 그림 6과 같이 구성하였다. 전원 (Elgar SW5250)으로부터 여러 가지 전원에서 상황을 발생하도록 하고 이를 측정하도록 하였다. 전원 입력을 전력품질 진단 시스템에서 주기당 256번 샘플링 한 뒤 이를 A/D 변환하여 내장 되어 있는 DWT 알고리즘으로 각각의 4주기 1024개의 데이터마다 연산을 수행하도록 하였다. 본 논문에서는 가로축을 데이터 개수로 표현하여 세 번의 분해하는 과정에서 다운샘플링이 되었음을 보였다.

본 실험에서 사용한 입력은 기존의 실효치 방법을 이용하여 알아내기 힘든 Voltage Drop과 Spike와 Noise 등을 인가하고 분석결과를 비교 검토하였다. 그림 7부터 그림 18은 이상의 결과를 보인다.

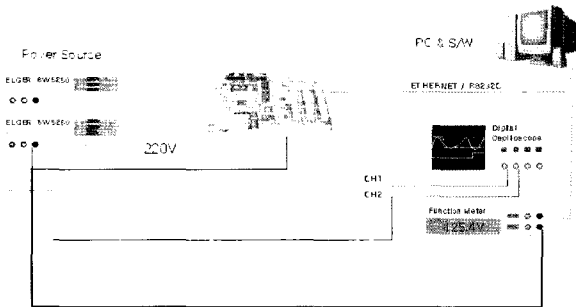


그림 6 실험 구성도
Fig. 6 Composition diagram of system

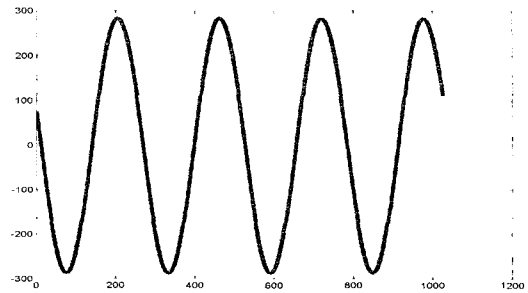


그림 7 정현파 입력파형
Fig. 7 Sine waveform

전원장애가 발생하지 않은 경우를 상정하여 그림 7과 같은 정현파 입력을 인가하였을 때 이를 실효치 방법으로 분석하면 그림 8과 같은데 실효치가 거의 변동하지 않음을 알 수 있다.

그림 10은 30° 부근에서 전압강하(voltage drop)가 발생한 입력파형을 인가한 경우에 실효치 분석결과를 보이는데 그림 11에 나타낸 바와 같이 실효가 약 10[V_{rms}] 감소한다. 이를 DWT로 분석한 결과를 그림 12에 보이는데 전원이상이 발생하고 소멸하는 구간에서 매우 큰 변화를 보이고 있다. Detail 1에서는 최고 30, Detail 2에서는 최고70, Detail 3에서는 최고150의 값을 갖는다.

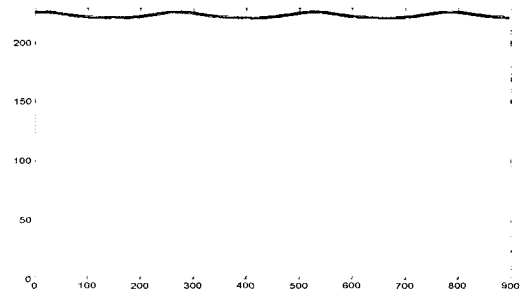


그림 8 정현파의 RMS 파형
Fig. 8 RMS waveform of Sine

전원 스파이크가 발생한 경우를 그림 13에 보인다. 정현파 피크값에서 450 [V]까지 입력이 증가한 경우인데 이의 실효치 분석하면 그림 14와 같이 스파이크가 발생할 때마다 순시치는 매우 크게 상승하였으나 실효치는 약간 증가하는데 그치고 거의 변화가 없다. 이를 DWT로 분석하면 그림 15에 보인 바와 같이 Detail 1에서는 최고 25, Detail 2에서는 최고 60, Detail 3에서

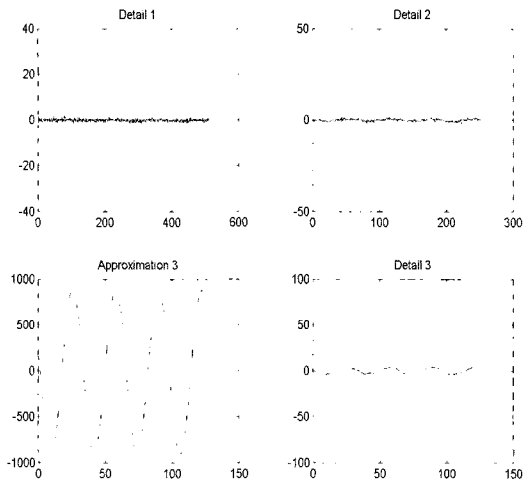


그림 9 정현파의 DWT 파형
Fig. 9 DWT waveform of Sine

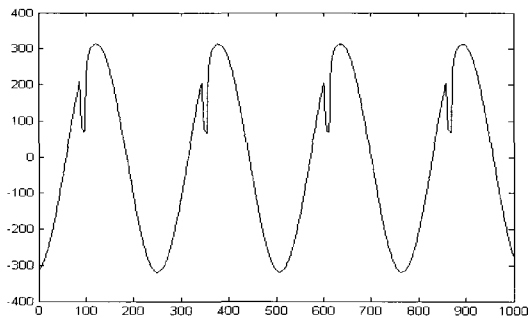


그림 10 Drop 입력파형
Fig. 10 Drop waveform

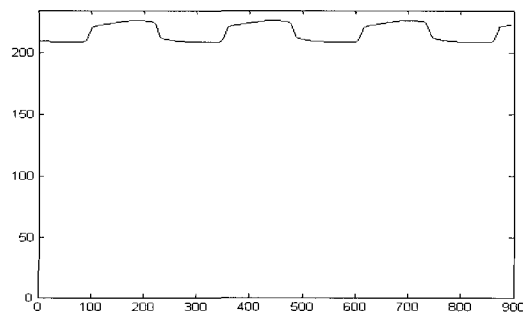


그림 11 Drop의 RMS 파형
Fig. 11 RMS waveform of Drop

는 최고 120의 변화가 있음을 보이고 있다.

그림 16에서와 같이 0°, 90°, 180°, 270°, 360°의 각각에 Noise가 발생한 입력을 부가한 경우에 실효치를 분석하면 그림 17에 보인 바와 같이 실효치의 변화가 거의 나타나지 않는다. 반면에 이를 DWT로 분석하면 그림 18에 보인 바와 같이 그 변화를 확연하게 알 수 있다. Detail 1과 Detail 2와 Detail 3에서 Noise가 발생해서 끝나는 구간 동안에 30, 50, 70의 최대 값을 가지며 변화하는 것을 알 수 있다.

실험을 통해서 얻은 결과에서 알 수 있듯이 voltage drop, spike, noise등의 전원장애가 발생한 경우에 변동이 거의 없는 실효치 분석결과로는 현상을 쉽게 판단

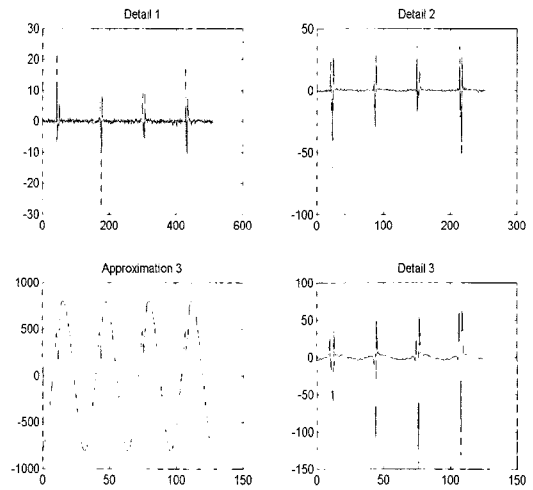


그림 12 Drop의 DWT 파형
Fig. 12 DWT waveform of Drop

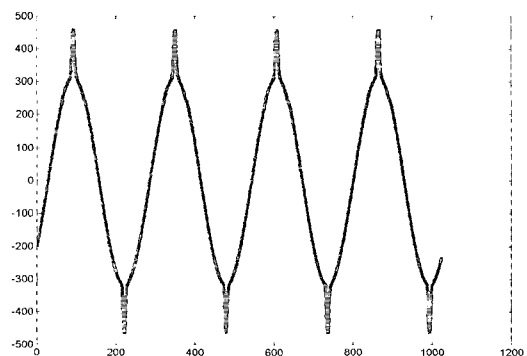


그림 13 스파이크 파형
Fig. 13 Spike waveform

하기 어렵다. 이는 그 변화량이 정상치의 ± 10 [%] 이내의 범위에 들기 때문에 이러한 전원장애가 발생한

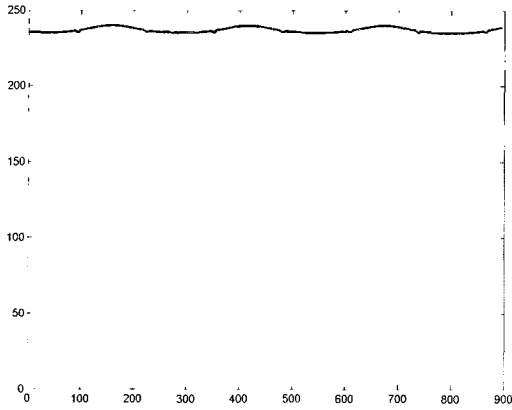


그림 14 스파이크의 RMS 파형
Fig. 14 RMS waveform of spike

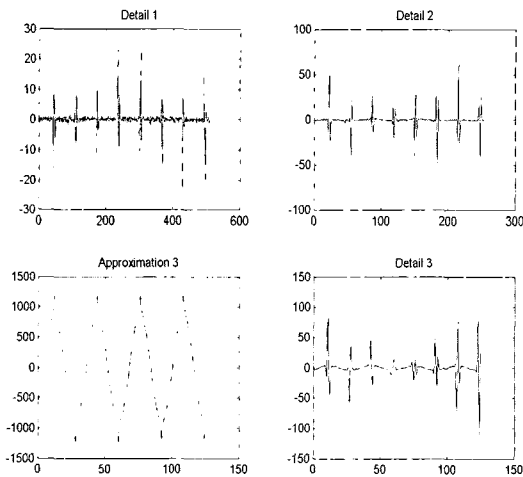


그림 15 스파이크의 DWT 파형
Fig. 15 DWT waveform of Spike

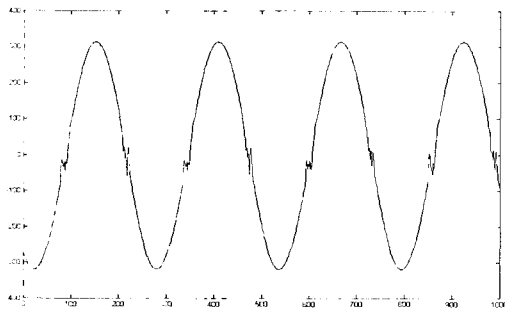


그림 16 잡음 파형
Fig. 16 Noise waveform

경우에 voltage sag나 swell로 분류되지도 않을 뿐만 아니라 그 알고리즘상의 문제로 인하여 Transients를 분류하기 어렵다는 것을 알 수 있다. 그러나 DWT를 이용하여 얻은 결과는 기본 성분 이외에 순시적인 변화를 효과적으로 알 수 있으며 그 크기도 확연하게 구분되는 결과를 얻을 수 있었다. 또한 전원장애의 종류에 따라서 각각 다른 주파수 특성을 가지게 되므로 분류도 확연하게 이루어질 수 있음을 확인할 수 있었다.

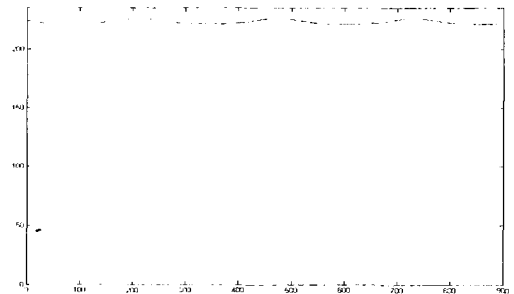


그림 17 잡음의 RMS 파형
Fig. 17 RMS waveform of noise

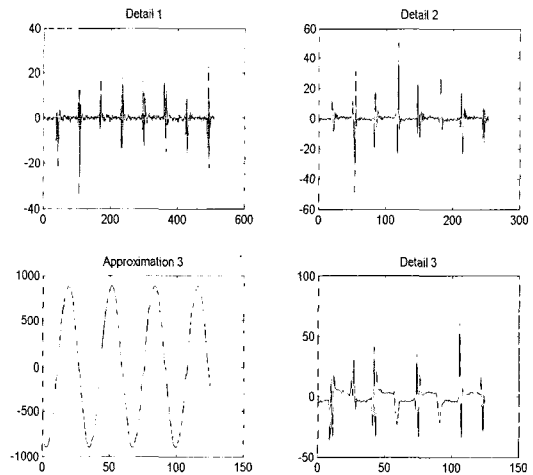


그림 18 잡음의 DWT 파형
Fig. 18 DWT waveform of noise

5. 결 론

전력품질 문제는 대부분 짧은 시간에 일어나는 순시적인 변화인데 이의 전력품질의 분석을 위해서는 그러한 빠른 변화를 효과적으로 감지하여야 한다. 그러나 기존의 대부분의 시스템에서는 실효치를 이용하여 전

력품질을 진단하므로 분석이 곤란하였다. 본 논문에서는 이를 극복하기 위하여 이산웨이블릿 변환을 이용한 전력품질 진단방법을 제안하였다. 이를 이용해서 순시적으로 변화하는 전원장애의 경우에 기존의 실효치 방법보다 유용함을 실제 모의실험장치를 구성하고 본 연구진이 개발한 전력외란 진단시스템을 이용하여 실험 결과들을 측정 비교분석함으로써 입증하였다. 향후 보다 정밀한 전원장애 및 전력품질에 대한 측정과 분류를 위하여 각종 전력외란에 대한 DWT 데이터 베이스를 구축하는 연구가 계속 수행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] E Source, Eletrotek, The Power Quality Group
- [2] IEEE Std. 1159, *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*, 1995
- [3] J. C. Goswami and A. K. Chan, *Fundamentals of Wavelets*, Wellesley-Cambridge Press, pp. 31~88 1997
- [4] Hong-Tzer Yang and Chiung-Chou Liao, "A Correlation-based Noise suppression Algorithm for Power Quality Monitoring through Wavelet Transform", *International conference on Power System Technology*, 2000, vol. 3, pp. 1311~1316
- [5] W. A. Wilkinson and M. K. Cox, "Discrete Wavelet Analysis of Power System Transients", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 11, no. 4, pp. 2038~2044, 1996.
- [6] 김철환, 고영훈, "웨이블릿 변환을 이용한 Voltage Sag 검출", *대한전기학회논문지*, 49A 권, 9 호, pp. 425~431, 2000.
- [7] G. Strang and T. Nguyen, *Wavelets and Filter Banks*, Wellesley-Cambridge Press, pp. 87~102. 1997.
- [8] 최병선, *Wavelet 해석*, 세경사, pp. 119~161. 2001.
- [9] 김홍균, 이진목, 최재호, "파워진단을 위한 계측시스템 설계", *전력전자학회 추계학술대회 논문집*, pp. 190~194, 2002.

저 자 소 개



이진목(李眞穆)

1976년 10월 1일생. 2002년 충북대 전기 전자공학부 졸업. 2002년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.



김홍균(金弘均)

2000년 한밭대학교 전자공학과졸업. 2003년 충북대학교 전기공학과 졸업(석사). 2003년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



최재호(崔載昊)

1955년 9월 27일생. 1979년 서울대 전기 공학과 졸업. 1981년 동 대학원 졸업(석사). 1989년 동 대학원 졸업(박사). 1981년~1983년 중경공업전문대학 전자과 전임강사. 1983년~현재 충북대 전기전자공학부 교수. 1993년~1994년, 1997년~1998년 University of Toronto(Visiting Professor). 당 학회 편집이사. Journal of Power Electronics 편집위원.



이상훈(李尙勳)

1969년 7월 13일생. 1994년 충북대학교 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 졸업(석사). 2001년 대학원 졸업(박사). 2001년 6월~현 (주)포스콘 기술연구소 선임연구원.