

웨이블릿 변환과 GPS 정밀시각동기를 이용한 전력계통 고장점 모니터링 시스템에 관한 연구

Power System Fault Monitoring System using Wavelet Transform and GPS for Accurate Time Synchronization

김기택* 김혁수** 최정용***
Kim, Gi-Taek Kim, Hyuck-Soo Choi, Jung-Yong

Abstract

A continuous and reliable electrical energy supply is the objective of any power system operation. A transmission line is the part of the power system where faults are most likely to happen. This paper describes the use of wavelet transform for analyzing power system fault transients in order to determine the fault location. Synchronized sampling was made possible by precise time receivers based on GPS time reference, and the sampled data were analyzed using wavelet transform. This paper describes a fault location monitoring system and fault locating algorithm with GPS, DSP processor, and data acquisition board, and presents some experimental results and error analysis.

키워드 : GPS, 웨이블릿 변환, 전력계통 모니터링, 정밀시각동기

Keywords : GPS, wavelet transform, power system monitoring, time synchronization

1. 서론

연속적이고 양질의 전력공급은 산업생산에 밀접한 관련을 맺고 있다. 전력시스템(Power System)의 동작에 대한 신중한 관리에도 불구하고 여러 고장(Fault)들이 발생하게 된다. 특히 전력선(Transmission Line)은 전력시스템의 고장이 가장 빈번히 발생하는 곳이다.

전송선 고장들은 신속히 그 위치를 발견하여 수리함으로써 원상태의 전력공급을 재개해야 한다. 그러나, 장거리 전송선 이거나 지리적으로 쉽게 접근할 수 없고, 고장위치의 발견이 어려운 곳에서는 신속한 복구가 어려워지게 마련이다. 따라서, 정확

한 고장위치의 측정이 가장 중요하게 된다.

송전선로의 과도현상을 분석하기 위해 진행파(traveling wave) 이론을 이용한다. Fault Detection을 위해 진행파 이론을 이용하는 것은 Dommel과 Micheles에 의해서 처음 제안되었다.[1] 진행파 이론이란 고장위치와 계전기 사이에 발생하는 과도현상의 비 주기적이고 원 신호보다 고주파인 파형의 travel time을 측정하여 고장위치를 알아내는 이론이다. 수 백 kHz 이상의 진행파를 샘플링하기 위하여 고속의 샘플링이 요구되며 샘플링의 속도에 따라 최소한의 오차를 가진 고장위치를 결정할 수가 있게 된다.

고장 위치를 측정하기 위해 송전선 양 끝단에 설치된 측정단 간의 샘플링 동기화가 매우 중요하다. 기존의 동기화 방법으로는 rotation of sample 방식, 영 교차 방식(zero-crossing determination) 등이 있으며, 본 논문에서는 GPS(Global

* 강원대학교 전기전자공학부 부교수, 공학박사
** 강원대학교 제어계측공학과 석사과정 졸업
*** 강원대학교 제어계측공학과 석사과정

Positioning System)로부터 얻어지는 정밀시각동기 신호를 이용한 시각동기 방식을 사용하였다. 정밀 시각동기 방식은 다양한 동작이나 고장환경에서도 정확한 시각동기를 얻을 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서는 고장 위치를 추정하기 위하여 Arbitrary Function Generator를 이용하여 실제 전력선상의 파형과 유사한 파형을 프로그래밍 한 후 시뮬레이션 하게 된다. NI-DAQ 보드와 i80c296 Microprocessor와 TMS320C32 DSP를 사용하여 모의된 전력선 상의 신호를 샘플링하여 저장하며, 고장 여부를 판단한다. 각 신호 측정 장치들은 LAN을 이용하여 통신을 하도록 하였고, 수집된 두 신호의 정보를 이용하여 고장위치를 파악하게 된다. 연속적으로 수집되는 방대한 양의 데이터를 모두 저장할 수 없기 때문에 일정한 크기의 순환 버퍼를 사용한다. 입력되는 데이터를 저장하면서 실시간으로 분석하여 고장 여부를 결정하고 고장이 발생하였을 때에는 일정한 시간만큼 더 입력신호를 샘플링 하여 저장 후 버퍼의 데이터를 LAN을 통해 host에 전송하게 되며, 양단에서 전송된 데이터를 비교 분석하여 고장여부를 다시 판단하게 되고, 만일 사고가 발생한 것으로 판단되면 그 위치를 계산하여 모니터링 한다.

고장 위치의 판단을 위해서는 최근 신호처리 분야에서 많이 사용되고 있는 웨이블릿 변환(Wavelet Transform)을 이용하였다.

한편, 인공위성을 이용한 원격탐사 기법은 동시에 넓은 지역의 수질 상태를 측정할 수 있고, 주기적으로 동일지점을 관측할 수 있다는 장점을 가지고 있다.[1]

2. GPS와 정밀시각동기

위성항법시스템(Global Positioning System)은 1970년대 초, 미 국방성(U.S. Department of Defence)에 의해 개발되기 시작하여 1990년대 중반부터 본격적인 가동이 시작되었다. 위성 항법 시스템은 시간, 기상 상태에 관계없이 지구 전역에서 사용 가능한 가장 이상적인 항법 시스템으로서 처음에는 군사적인 용도를 위해 개발되었지만 경제성 및 유용성으로 인해 급속도로 민간용으로 확장되어 현재에 이르러 가장 일반적인 항법 시스템으로 자리 잡고 있다.

위성항법시스템(Global Positioning System)의 주요한 오차원인 중의 하나였던 고의잡음(Selective Availability)이 2000년 5월 1일 자정(미국시간)을 기해서 제거되었기 때문에 앞으로 정밀 위치 측정 및 기존의 GPS 응용 분야에 새로운 전기를 마련하게 되었다.

GPS의 기본 기능은 자신의 위치를 알고 있는

위성으로부터 지상이나 공중 및 해상의 어느 곳에서나 사용자의 위치를 알아내는 것이며, 이러한 위치 정보와 시각정보를 이용하여 속도 및 가속도 등과 같은 정보도 얻을 수 있다. GPS 위성에는 고안정도의 원자 주파수 표준기가 탑재되어 있고 이것을 기준으로 항법신호를 송신하고 있다. GPS를 이용한 시각동기 방법은 위성이 상공을 통과할 때 그 신호를 수신하여 지상국 시계를 GPS time에 동기 시키는 방식이다. GPS에서 출력된 1PPS(Pulse Per Second) 신호와 위성의 원자시계에서 출력된 1PPS와의 시간차는 SA(Selective Availability)로 인해 발생되었으나 현재는 고의 잡음이 제거되었으므로 무시한다. GPS 수신기에서 매초마다 입력되는 1PPS신호를 이용하여 송전선상의 고장 위치를 추정하기 위한 동기화 신호로 사용한다. 정확한 시각동기를 얻기 위해서는 시각동기 장치로 제작된 GPS 수신기를 사용하여야 한다.

3. 웨이블릿 변환(Wavelet Transform)

푸리에 변환(Fourier Transform)은 다른 주파수들로 구성된 정현파 신호(sinusoidal signal)로 분석해 내는 방법이므로 신호에 대한 주파수 해석이 용이하다. 반면 주파수 영역으로 변환되므로 시간 정보(time information)를 잃어버리게 된다. 단구간 푸리에 변환(Short-time Fourier Transform : STFT)은 신호를 시간에 대해서 작게 자른 후, 그것들에 대해서 푸리에 변환을 한 것이다. STFT를 사용하면 시간 정보는 확보했으나 해상도(resolution)에 한계를 가지게 된다. 웨이블릿 변환(wavelet transform)을 이용하면 주파수와 시간 정보를 동시에 얻을 수 있으므로 고전적인 단구간 푸리에 변환이나 가보 변환(Gabor Transform)을 대체할 수 있다.

웨이블릿 해석은 연속(continuous) 신호와 이산(discrete) 신호의 경우에 모두 적용될 수 있으며 다양한 분야에서 그 응용 가능성을 인정받고 있다. 웨이블릿 변환에서 하나의 기저함수를 웨이블릿이라 부르며 웨이블릿은 하나의 대역 통과 필터이다. 웨이블릿은 유한 길이를 가지는 기저함수이므로 웨이블릿 변환은 모 웨이블릿(Mother Wavelet)이라 불리는 원형의 웨이블릿의 수축과 팽창에 의해 얻어지는 웨이블릿들의 집합에 의해 구성된다. 웨이블릿 변환에서는 주파수라는 용어대신에 스케일이라는 용어를 사용하며 하나의 웨이블릿을 통과한 신호를 스케일의 상세 신호(detail signal)라 한다. 모 웨이블릿을 $\Psi(x)$ 라 할 때 웨이블릿 기저함수(wavelet basis functions)들은 다음과 같다.

$$\Psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad (1)$$

a 는 scaling 요소로서 마더 웨이블릿을 팽창, 압축시키며, b 는 shift 요소로서 마더 웨이블릿을 b 만큼 지연시킨다.

연속 웨이블릿 변환(Continuous Wavelet Transform)은 분석할 신호의 시작점에서 원 신호와 마더 웨이블릿을 비교하여 나온 계수값인

$C_{a,b}(t)$ 는 원신호와 마더 웨이블릿이 얼마나 유사한지를 나타낸다. 이 계수값이 클수록 서로 유사한 형태임을 나타낸다. 그리고 분석할 신호의 끝까지 shift시키면서 $C_{a,b}(t)$ 를 계산하고, a 의 최대값까지 scaling시키면서 그 위의 순서를 반복한다.

$$CWT_{f,a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2)$$

그러나, 연속 웨이블릿 변환은 분석할 계수가 무한히 많아진다는 단점을 가지고 있다. 이를 해결하기 위해 scaling 요소와 shift 요소를 이산화시킨 이산 웨이블릿 변환(Discrete Wavelet Transform)이 있다. 2의 멱승 형태에 기초한 scaling과 shift를 사용하여 정확하고 효율적으로 웨이블릿 변환을 수행하게 된다. 이산 웨이블릿 변환은 고차필터(HPF)와 저차필터(LPF)를 사용하여 원 신호를 필터링 함으로 detail한 성분과 approximation성분으로 분해한다. 두 필터에 의해 필터링 된 신호는 각각 원 신호와 데이터 양이 같다. 따라서, 다분해능(multiresolution)을 지원하기 위해서는 필터링 된 신호를 down sampling하여 데이터 양을 감소시킨다. 식(3)에서 $a = 2^m$ 이며, $b = ka = k2^m$, 그리고, m 은 다분해능의 단계를 나타낸다.

$$DWT_{f,m,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{a^m}} \sum_{k=0}^{\infty} f[k] \Psi\left(\frac{n-ka}{a^m}\right) \quad (3)$$

마더 웨이블릿 $\Psi(x)$ 은 길이가 짧고 진동함수로서 평균값이 0이다. 본 논문에서는 Harr, Daubechies, Symlets, Coiflets 웨이블릿을 사용하였고, 사용한 DWT(Discrete Wavelet Transform)는 식(4)와 같은 웨이블릿 계수 행렬(W)을 적용함으로써 구성된다. 전체 길이가 N 인 데이터에 길이 저차필터(LPF)요소인 “smooth” 벡터를 곱해 나가는 방법으로 최종적인 원소를 얻게 되는 방법을 Pyramidal Algorithm이라 부른다. 만일 데이터의 길이가 클수록 더 많은 단계가 필요하게 된다. 그러나, 전력선 신호의 사고 검출을 위해서는 1차의

DWT만을 수행하게 된다.

$$W = \begin{bmatrix} c0 & c1 & c2 & c3 & \dots \\ c3 & -c2 & c1 & -c0 & \dots \\ & & c0 & c1 & c2 & c3 \\ & & c3 & -c2 & c1 & -c0 \\ & & & & \dots & \\ c2 & c3 & & & & c0 & c1 \\ c1 & -c0 & & & & & c3 & -c2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

4. 실험 방법 및 결과

4.1 시스템 구성

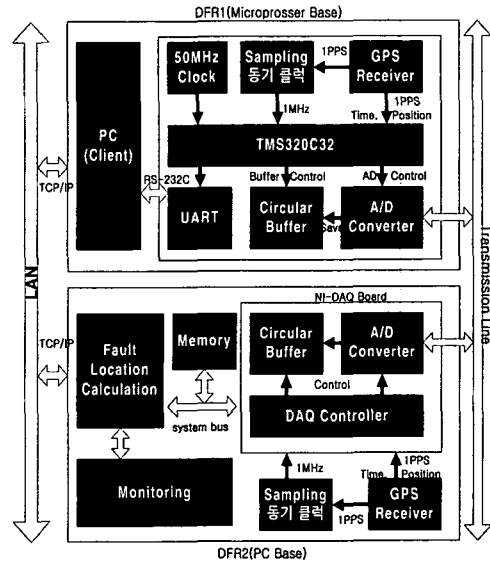


그림 1. Fault Location Detect System Structure

그림 1은 전체적인 시스템 구성도를 보여 준다. 사고 파형은 임의의 파형 발생기(Arbitrary Function Generator)로 전력선 양단으로부터 모의된다. 좀더 실제적인 적용을 위하여 DFR1은 TMS320c32 DSP를 이용한 것과, Intel 80C296SA를 사용한 Microprocessor 기반의 standalone 시스템으로 구성하였고, 다른 한쪽은 NI-DAQ (National Instrument Data Acquisition) 보드를 사용하여 PC 기반으로 구성하였다. 그리고, DFR간의 통신은 LAN(Local Area Network)을 통하여 데이터를 송수신 하게 된다.

각 DFR은 60Hz의 정형파와 고주파인 사고 파형의 아날로그 값을 디지털 값으로 변환(AD)한 다음 이 디지털 값을 저장 및 분석하는 역할을 한다.

GPS 수신기는 위성으로부터 수신되는 1PPS (Pulse Per Second) 신호로 시각동기를 제공해 주게 된다. GPS 수신기로부터의 1PPS신호를 이용하여 계수기(Counter Generator)를 리셋 시키는 데 이 계수기는 Altera사의 CPLD(Programmable Logic Device)칩인 FLEX 6106을 이용하여 1MHz의 클럭신호를 발생시킨다. 이 클럭 신호를 기준으로 하여 각 DFR은 AD변환을 실행하게 된다. 그림 4는 1PPS 신호에 동기되어 발생되는 1MHz의 타이밍 신호의 파형이다.

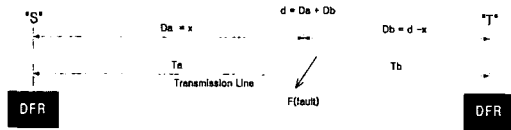


그림 2 사고지점 검출 계산

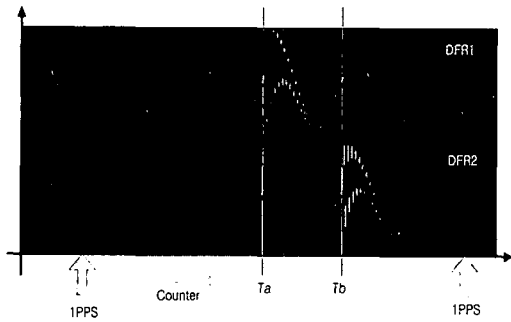


그림 3 동일한 시간대에서의 사고지점 검출방법



그림 4 Altera's FLEX6016 CPLD에 대한 샘플링 동기 클럭(1MHz)

실제 전송선에서의 사고 지점 검출을 하기 위해서는 그림 3 과 같이 동일한 시간으로 두 DFR에서 획득된 데이터를 비교하여야 한다. 그림 2에서 F는 사고 지점이며, 'd'는 송전선의 전체 길이를 나타내고, "S"와 "T"는 송전선상의 양끝 단을 나타낸다. 그리고, Ta와 Tb는 사고가 발생한 순간의 전압 파형이 사고 발생 지점부터 송전선 양 끝단

까지 전달되는 시간을 나타낸다. 사고지점까지의 거리 x는 다음 식으로 쉽게 계산되어 진다.

$$T_{ab} = T_b - T_a [\text{sec}] \quad (5)$$

$$x = (d - T_{ab} \times c) / 2 [m] \quad (6)$$

광속으로 전송되는 전력 파형을 샘플링 하여 거리를 계산하기 위해서는 고속의 A/D 변환기가 필요하다. 본 논문에서는 500kSa/s와 1MSa/s의 두 A/D변환기를 각각 이용하였다.

$$D_{\text{sample}} = c / S_{\text{rate}} [m] \quad (7)$$

위에서 D_{sample} 은 1 샘플링 시간 동안에 전파의 이동 거리, 즉 검출 정확도이며, S_{rate} 는 샘플링 속도이다.

표 1 샘플링 속도에 따른 거리 오차 정밀도

Sampling Rate[Sa/s]	오차[m]	비고
1 MHz	300	DFR2
500 KHz	600	DFR1

본 논문에서 최대 1MSa/s의 A/D 변환기를 사용하였으므로 샘플링 시간마다의 오차는 300m로서 비교적 큰 편으로 송전탑간의 거리와 비슷하므로, 사고 발생시 사고 발생 지점과 가장 가까운 송전탑의 위치를 파악할 수 있다.

통신 및 웨이블릿 변환, 모니터링은 NI사의 LabWindows를 이용하여 프로그래밍하였다.

4.2 실험 파형

실험 파형은 그림 3과 같은 일반적인 고주파의 진행파가 첨가된 파형과, 전압 침하, 강한 노이즈, 또한 순간 단락 파형등 전력선 상에서 발생할 수 있는 여러 파형들로 모의하였다.

4.3 검출 결과

그림 3은 입력된 송전선상의 파형을 AD변환하여 그 값을 사용자 인터페이스 화면에 디스플레이한 것이다. 웨이블릿한 결과의 계수도 함께 디스플레이 하였고 1PPS를 기준으로 한 카운터 값을 나타내 준다. 그림 6는 두 대의 DFR로부터 입력받은 데이터를 이용하여 동일한 시간하에서 웨이블릿 변환한 것이며, 사용된 웨이블릿에 따른 사고 지점 위치 및 시간, 오차등을 디스플레이 한다.

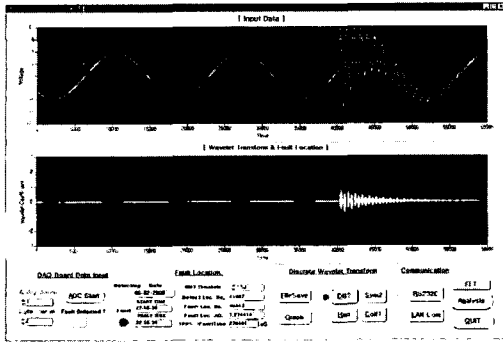


그림 5 DFR@ Monitoring 화면

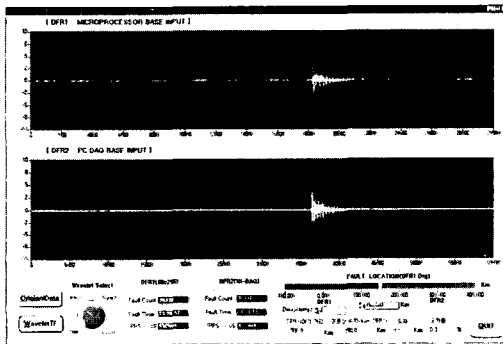


그림 6 Fault Location 검출 화면

그림 7은 여러 웨이블릿을 적용한 결과의 비교이며 그림 6은 각 웨이블릿에 의한 사고지점 검출 오차 비교이다. 이것은 모의된 실제 위치와 제작된 시스템에 의해 측정된 거리 오차의 차이를 나타내 준다. 오차율은 식 (8)과 같이 계산된다.

$$err(\%) = \frac{ActualLoc. - CalculatLoc.}{TotalLineLength} \times 100 \quad (8)$$

Symlets 웨이블릿은 Daubechies 웨이블릿을 변형시켜 만들어진 웨이블릿이기 때문에 서로 특성이 유사한 분석결과가 나온다. Harr 웨이블릿으로 구해진 사고 지점의 오차가 다른 웨이블릿 보다 크다는 것을 알 수가 있다. Daubechies 웨이블릿의 경우에 오차범위가 300m ~ 600m에 근접해 있지만 Harr 웨이블릿을 사용했을 경우는 오차 범위가 더 커짐을 알 수 있다.

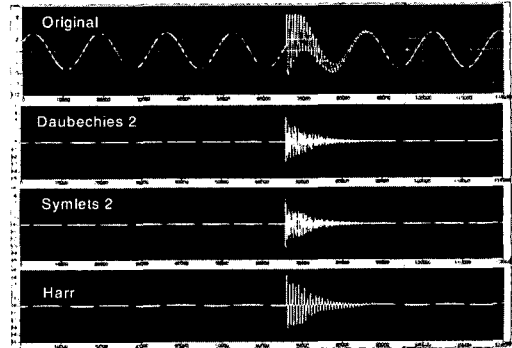


그림 7 잡음이 첨가된 신호의 웨이블릿 변환 결과

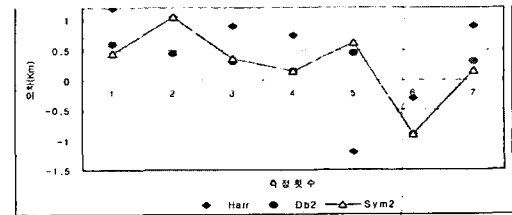


그림 8 각 웨이블릿에 대한 오차 비교

5. 결론

본 논문에서는 전력 계통의 비 주기적인 과도 현상을 분석하기 위하여 진행과 이론과 GPS 위성으로부터 송신되는 시각 동기 신호를 사용하였다. 동기화 된 샘플링의 최대 이점은 샘플링에 따른 오차를 최소화할 수 있다는 것이다. 위성으로부터 수신되는 동기 신호를 사용하였기 때문에 지리상 위치에 거의 영향을 받지 않으므로 위치에 따른 동기화의 문제가 해결됨을 알 수 있다. 사고 지점을 검출해 내기 위하여 송전선 양단의 데이터 취득부에서는 기본적인 검출 루틴만을 사용하였다. 또한, 분산 환경에서 중앙 처리 장치로의 데이터 전송을 위하여 LAN을 사용하였는데 데이터 취득부에서 수집하여 저장하고 있는 방대한 량의 전력 데이터들을 고속으로 받아 볼 수 있게 하였다. 각 데이터 취득부의 데이터들은 시각 동기 정보와 전압 혹은 전류 샘플 값, 그리고, 시스템 정보 등을 가지고 있다.

전송된 데이터들을 취합하여 시각 동기 정보를 바탕으로 두 데이터를 비교하게 된다. 정확한 사고 지점 검출을 위해서 근래 신호 분석에 많이 사용되는 웨이블릿 변환을 사용하였는데 각 마더 웨이블릿에 따른 오차가 조금씩 차이를 알 수 있다. 따라서, 전력신호의 분석을 위해서 마더 웨이블릿 선

정이 중요함을 알 수 있다.

마이크로프로세서 기반의 시스템과 PC 기반의 시스템을 복합적으로 연계함으로써 실제 환경에 맞는 형태의 시스템을 구현하는 데에 중점을 두었다. 송전선로사고 검출에 웨이블릿이 유용함을 보였고, 사용자가 쉽게 자동으로 모니터링 되는 사고 신호를 확인 할 수 있도록 하였다.

앞으로 고속의 시스템을 이용하여 더욱 정밀한 사고 검출이 가능하도록 하는 연구와 사고 유형의 실시간 분석에 더 많은 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] Milenko B Djuric, Zoran m Radojevic and Viadimir V Terzija, " Digital signal processing algorithm for arcing faults detection and fault distance calculation on transmission lines", *Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 19, No. 3, pp 165-170, 1997
- [2] A. Rakotomamonjy, D. Coast, P.Marche, " Wavelet-based enhancement of signal averaged electrocardiograms for late potential detection", *Medical & Biological Engineering & Computing*, Vol. 37, 1999
- [3] K. Srinivasan, A. St-Jacques, "A New fault location algorithm for radial transmission lines with loads", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4, No. 3, 1989
- [4] Douglas E. Driscoll & Stephen D. Howard, "The Detection of radar pulse sequences by means of a Continuous Wavelet Transform", *IEEE publications No 7803* pp1389-1392, 1999
- [5] B.Y.Lee, Y.S. tarng, "Drill fracture detection by the discrete wavelet transform", *Journal of Materials Processing Technology*", 1998
- [6] Antony C. Parsons, W.Mack Grady, Edward J. Powers, "A wavelet-Based Procedure for Automatically Determining the Beginning and End of Transmission System Voltage Sags"
- [7] 이호섭 외, "카오스 특징에 의한 고저항 지락 사고의 유형 분류", *전기학회논문지* 47-9, pp1283-1288, 1998
- [8] 이창복, 양성훈, 김영범, "GPS 동기 측정기술 연구", *제6차 GPS Workshop Preceedings*, pp. 665-674. 1999pp.15-29, 1994