

웨이브렛 변환을 이용한 전력 품질 분석

손영락*, 이화석**, 문경준*, 김형수*, 박준호*, 강헌태***
 *부산대학교 전기공학과, **거제대학 전기과, ***(주)한국수력원자력

Power Quality Analysis using Wavelet Transform

Y. R. Son*, H. S. Lee**, K. J. Mun*, H. S. Kim*, J. H. Park*, H. T. Kang***
 *Dept. of Electrical Engineering, Pusan National Univ., **Kojje College, ***Korea Hydro and Nuclear Power

Abstract - Power quality has become concern both utilities and their customers with wide spread use of electronic and power electronic equipment. This paper deals with the use of a multiresolution analysis and a discrete wavelet transform to detect interruption, sag, swell, transients and etc. The simulation system is constructed by using PSCAD/EMTDC.

To show the effectiveness of the proposed method, a various case studies are simulated.

1. 서 론

오늘날 고도의 기술성장을 이룩한 산업사회에서는 안정적이면서도 신뢰성을 갖춘 양질의 전력을 고 신뢰도로써 공급하는 것이 필수적이다. 그렇지 못할 경우 생산되는 제품의 품질 저하, 중요한 산업 시설의 정지, 정보 손실 등을 야기시킬 수 있으며 그에 따라 막대한 경제적인 손실도 초래하게 된다. 최근 정보·통신·제어기술의 발달에 따라 정보통신기기, 정밀제어기기, 기기자동생산라인 등에 마이크로프로세서 및 전력용반도체소자의 대거 도입, 고효율 속도제어용모터와 역률보상용 콘덴서의 사용, 그리고 경제발전과 산업 활성화 등으로 인한 고정밀 단일 대형부하의 증가, 도시중심부의 변화에 따른 대규모 아파트단지의 등장, 단상 220V 가전제품의 대형화 등 민감한 전력 제품 및 비선형 부하의 증가로 인해 기존까지는 그다지 문제가 되지 않았던 전압·전류의 고조파성분, 써어지 발생빈도, 순간전압변동, 전압불평형, 순간정전, 플리커 등과 같은 순시적 미소외란이 전력품질(Power Quality)을 크게 위협하고 있다.

따라서, 이러한 외란들을 검출하고 외란 발생시간 및 발생원을 파악하는 것이 중요한 문제로 대두되고 있다. 또한 전력품질의 장애가 되는 문제들과 신호는 광범위하고 다양한 특성을 가지고 있어 시간-주파수 영역에서 신호를 처리하는 웨이브렛 변환(Wavelet Transform : WT)이 전력품질 해석에 매우 다양하게 적용되고 있다.

WT는 신호처리의 한 방법으로서 기존의 신호처리 방법인 FT(Fourier Transform) 및 STFT(Short Timed Fourier Transform)의 단점인 해상도 문제를 해결할 수 있는 방법으로 제시되었다. WT에서 기저함수군을 구성하는 웨이브렛은 모함수(mother wavelet)라 불리는 웨이브렛을 확장(dilation) 및 이동(translation)함으로서 만들어진다. 시간 및 주파수 국부성을 갖는 웨이브렛 변환은 다양한 스케일로 신호를 분해해서 여러 단계(levels)로 구성되며, 원신호를 각각의 단계별로 분해하면 단계들은 특정한 시간대 및 특정 주파수 대역에 관하여 해석 가능한 특징을 가진다.

따라서, 본 논문에서는 PSCAD/EMTDC를 이용하여 전력계통의 외란현상인 Interruption, Sag, Swell, Transient 등을 모의한 후 이를 wavelet 변환을 이용하여 외란을 검출하였다.

2. 전력 품질 분석

2.1 전력 품질 외란 검출

전력 품질 외란 검출은 외란이 들어온 시점과 제거된 시점을 측정하는 것이다. 외란을 검출하는 방법을 간략하게 설명하면 먼저 입력 신호에 대해 WT계수를 구한다. 적당한 임계값과 임계처리를 통해 위에서 구한 WT계수의 크기를 줄인다. 그리고 임계치를 넘는 WT계수를 측정한다. 본 논문에서는 먼저 임계처리를 통해 나온 신호를 다해상도 분석(multiresolution analysis)을 이용하여 외란을 검출하였다.

2.2 Wavelet Transform

임의의 신호 $x(t)$ 를 $L^2(R)$ 에서 정의된 신호라고 하면

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt < \infty \quad (1)$$

$x(t)$ 의 Continuous Wavelet Transform은 다음과 같다.

$$CWT_{\psi} x(a, b) = W_x(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{a,b}^*(t) dt \quad (2)$$

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

$\psi(t)$: mother wavelet

여기서, * : complex conjugate
 $a, b \in R, a \neq 0$

그러나 이러한 연속 WT는 변환 후 방대한 데이터로 인한 메모리문제와 구현이 어려운 단점이 있다. 이러한 문제점은 계수를 $a = a_0^m, b = nb_0 a_0^m$ 로 바꾸어 이산화시킴으로서 해결할 수 있다. Discrete Wavelet Transform은 다음의 (3), (4)와 같이 정의된다.

$$DWT_{\psi} x(m, n) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{m,n}^*(t) dt \quad (3)$$

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

a_0, b_0 : fixed constants with $a_0 > 1, b_0 > 0$
 $m, n \in Z$

웨이브렛 스케일 계수 a 및 전이계수 b 가 다음과 같이 주어진다면 기저함수는 Orthonormality를 형성하게 된다.

$$\psi_{m,n}(t) = 2^{-m/2} \psi\left(\frac{t - n2^m}{2^m}\right) \quad a_0 = 2, b_0 = 1 \quad (5)$$

2.3 다해상도 분석

다해상도 분석(multiresolution analysis)과정에서는 원 신호 $x(t)$ 를 Approximated space와 Detailed space으로 나눈다. 전력품질문제에서 원신호에 외란이 포함될 경우 많은 외란요소를 포함하고 있다. 이러한 외란신호를 다해상도 분석을 사용함으로써 2가지의 다른 신호, 즉 하나는 간략화된 신호(Approximated space), 다른 하나는 외란요소들을 포함한 신호(Detailed space)로 분해할 수 있다. 이 과정을 통해 다해상도 분석을 통해 원신호로부터 외란성분을 추출 하고, 외란 검출을 할 수 있다.

원 신호 $x(t)$ 를 이산화하여 $c_0(n)$ 라 두면, 다해상도 분석으로 이 신호는 level 1에서 $c_1(n)$ 과 $d_1(n)$ 로 분해된다. $c_1(n)$ 은 원신호의 간략화된 신호로 나타나고, $d_1(n)$ 은 detail 성분을 나타낸다.

$$c_1(n) = \sum_k h(k-2n)c_0(k) \quad (6)$$

$$d_1(n) = \sum_k g(k-2n)c_0(k) \quad (7)$$

여기서 $h(n)$ 과 $g(n)$ 은 각각 $c_0(n)$ 을 $c_1(n)$ 과 $d_1(n)$ 로 분해하는 필터 계수(filter coefficients)이다. 간략화된 신호 $c_1(n)$ 를 다음 레벨로 분해한 신호는 다음의 식 (8) 및 (9)과 같으며 그림 1에서는 WT를 통한 파형 분해 과정을 나타내었다.

$$c_2(n) = \sum_k h(k-2n)c_1(k) \quad (8)$$

$$d_2(n) = \sum_k g(k-2n)c_1(k) \quad (9)$$

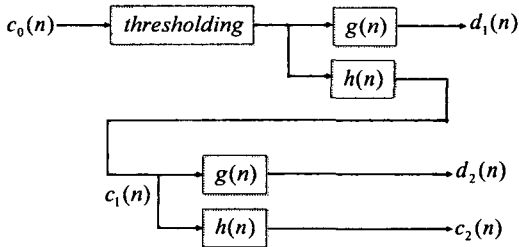


그림 1. $c_0(n)$ 의 분해 및 임계처리

2.4 임계처리

일반적으로 잡음이 첨가된 신호는 다음의 식 (10)과 같이 표현된다.

$$x' = x + N(0, \sigma^2) \quad (10)$$

x' : 잡음 (noise)이 첨가된 신호
 x : 유한 에너지를 갖는 미지의 신호
 $N(0, \sigma^2)$: 평균이 0이고 분산이 σ^2 인
 가우시안 백색 잡음

여기서,

(Gaussian White Noise)

이 신호를 DWT하면

$$DWT(x') = DWT(x + N(0, \sigma^2)) \quad (11)$$

DWT에 사용되는 mother wavelet은 orthonormal 하므로 가우시안 백색 잡음부분의 DWT는 변하지 않는다.

따라서, 원신호 x 와 이에 가우시안 백색 잡음이 포함된 신호인 x' 와의 상관관계는 식 (12), (13), (14)와 같이 된다.

$$DWT(x') = DWT(x) + N(0, \sigma^2) \quad (12)$$

$$DWT(x) = DWT(x') - N(0, \sigma^2) \quad (13)$$

$$x = DWT^{-1}(DWT(x') - N(0, \sigma^2)) \quad (14)$$

여기서 $N(0, \sigma^2)$ 를 임계값 λ 로 설정하면 식 (15)로 표현된다.

$$x \approx DWT^{-1}(DWT(x') - \lambda) \quad (15)$$

잡음제거는 추정된 신호 x' 로부터 x 를 복원하는 문제이다. 그러나 잡음으로 인해 일반적으로 정확히 x 를 복원하는 것은 불가능하다. 대신 그의 근사신호를 찾는 것이 합리적이다.

잡음 제거 기법 중 하나인 표준 임계처리 방법에는 하드(hard) 임계처리와 소프트(soft) 임계처리 두 가지가 있다.

$$T^{hard}(a, \lambda) = \begin{cases} a & \text{if } |a| \geq \lambda \\ 0 & \text{if } |a| < \lambda \end{cases} \quad (16)$$

$$T^{soft}(a, \lambda) = \begin{cases} a - \text{sgn}(a)\lambda & \text{if } |a| \geq \lambda \\ 0 & \text{if } |a| < \lambda \end{cases} \quad (17)$$

여기서, a : wavelet coefficient
 λ : 임계값

이상적인 하드 임계처리법은 최소 오차를 제공한다. 그러나 근사신호에서 인위적인 깃스현상이 발생하며 원하는 매끄러움을 갖지 못한다. 반면, 소프트 임계처리법은 근사신호의 매끄러움을 제공하지만 오차의 기대값은 하드 임계처리에 비해 크게 된다. 본 논문에서는 잡음제거에 목적을 두어 소프트 임계처리를 통해 원신호를 임계처리했다.

임계처리의 과정을 살펴보면 우선 임계값 λ 를 결정한다. 임계값 λ 는 잡음의 표준편차뿐만 아니라 관측된 신호 x 의 표본크기에 따라 결정된다. 보통 적용하는 임계값의 형태는 $\lambda = \sigma \sqrt{2 \cdot \ln 2} \cdot k$ 이다. 여기서 분산이 $\sigma^2 = 1$ 이면 표본크기가 충분히 큰 모든 잡음의 크기가 $\sqrt{2 \cdot \ln 2} \cdot k$ 보다 작을 확률이 상당히 크게 된다. 따라서 여러 임계처리 방법에 범용적으로 적용하는 임계값 λ 를 $\lambda = \sqrt{2 \cdot \ln 2} \cdot k$ 로 택한다.

2.5 Mother Wavelet의 선택

WT는 시간상에서 서로 다른 스케일과 위치를 갖는 wavelet 항들로 추정된 신호 x' 를 나타내어 신호를 분해하는 것이다. 이 과정은 추정된 신호와 모함수(mother wavelet)에서 파생된 다양한 wavelet 함수들간의 유사성을 계산하여 얻을 수 있다. 따라서 WT의 분석 결과는 모함수의 특성에 따라 다소 상이하다. 모함수의 선택은 전력 품질 외란들의 검출과 위치에 중요한 역할을 한다. 따라서 검출하려는 전력 품질 특성에 적합한 모함수를 선정함으로써 해당 신호의 전력 품질 특징을 정확히 추출할 수 있는 장점을 가진다.

전력 품질 문제에서 일반적으로 크게 외란의 지속 시간에 따라 외란 지속기간이 긴 신호 및 짧은 신호로 나누어 분석을 한다. 지속기간이 짧은 신호를 분석하는데 있어서는 시간 간격이 짧은 wavelet이 적합하며, 긴 지속 시간을 가지는 신호에서는 시간 간격이 긴 wavelet을 사용하는 것이 보다 효율적이다. 그래서 본 논문에서는 다양한 웨이블릿 함수를 사용하여 분석을 하였다.

3. 실험 및 결과

제안한 방법의 유용성을 입증하기 위해 본 논문에서는 PSCAD/EMTDC를 이용하여 22.9kV의 송전 계통의 1선 지락 사고를 모의한 후 이 경우의 전압파형의 전력 품질 특성을 분석하고 이 모의 계통을 그림 2에 나타내었다. 이 경우 선로 임피던스에서 서셉턴스의 영향으로 잡음이 첨가되었으므로 이러한 잡음을 없애기 위해 먼저 임계처리를 한 후 다해상도 분석을 이용하여 외란을 검출하였다. 외란 검출시 모함수는 db4를 사용했다.

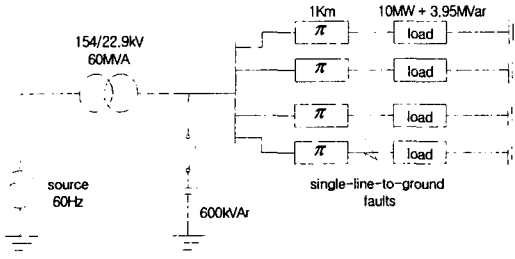
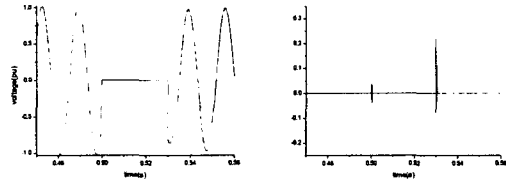


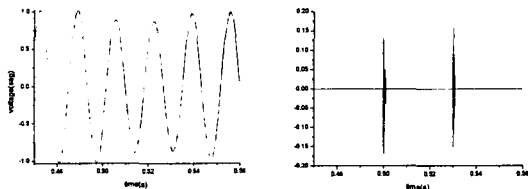
그림 2. 모의 계통

그림 3은 전력계통의 외란현상인 interruption을 모의한 경우의 전압파형 및 WT로 분석한 결과를 나타내었다. 그림 3은 1선 지락 사고가 발생한 시점에 차단기가 개방된 후의 전압 파형이다. 피더에 고장이 발생되면 차단기에 의해 고장 구간이 분리되면서 고장 구간 내의 부하에는 즉 interruption이 발생한다. 그림 3에서 나타낸 바와 같이 외란이 발생한 전압 파형으로부터 외란의 시작 및 종료 시점을 정확히 검출할 수 있었다.



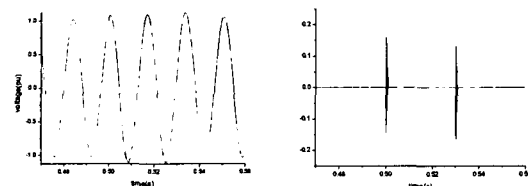
(a) Interruption 발생 (b) Interruption 검출
그림 3. Interruption 발생 및 검출

그림 4에서는 1선 지락 고장 피더에 접속된 부하의 파형 및 WT에 의한 외란 검출 결과를 나타내었다. 그림 4에서와 같이 1선 지락사고가 일어난 상(phase)은 고장 지속 기간 동안 sag 현상을 일으켰고, 또한 다른 피더에서의 같은 상에서도 sag 현상이 발생함을 확인할 수 있었다. 여기서도 제안한 방법으로 외란의 시작 및 종료 시점을 검출할 수 있었다.



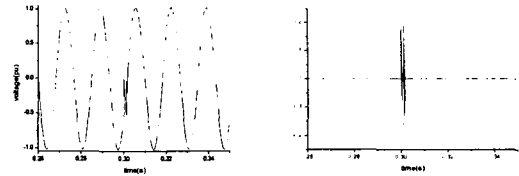
(a) Sag 발생 (b) Sag 검출
그림 4. Sag 발생 및 검출

그림 5에서는 고장 발생시 건전상의 순간적인 전압상승의 파형과 외란 검출의 그래프를 보이고 있다.



(a) Swell 발생 (b) Swell 검출
그림 5. Swell 발생 및 검출

그림 6은 모의계통에서 커패시터의 투입시 외란이 발생한 전압파형을 제안한 방법으로 분석한 결과를 나타내었다. 그림 6에 나타낸 바와 같이 외란 검출을 정확히 하는 것을 볼 수 있다.



(a) Transient 발생 (b) Transient 검출
그림 6. Transient 발생 및 검출

4. 결 론

본 논문에서는 Wavelet Transform을 이용한 전력 품질 분석법을 개발하였고, PSCAD/EMTDC로 구현한 모의 계통에 대하여 Interruption, Sag, Swell, Transient 등의 계통 외란 현상을 발생시켜 개발한 방법의 성능을 분석하였다. 모의한 계통에 대해 각 외란파형을 분석한 결과, 제안한 방법이 각 외란의 시작 및 종료 시점을 정확히 검출함을 확인할 수 있었다. 향후 과제로는 다양하게 발생하는 외란들을 종류별로 적절한 모함수를 선정한 후 이를 실제계에 적용하기 위하여 다양한 모의 계통에 대한 유용성을 입증하고자 한다.

[참 고 문 헌]

- [1] J. Stone and A. Collinson, "Power Quality," Power Engineering Journal, pp. 58-64, Apr. 2001.
- [2] "IEEE recommended practice for monitoring electric power quality," IEEE Standard 1159-1995 2 Nov. 1995.
- [3] Chul Hwan Kim and Rag Aggarwal, "Wavelet transforms in power systems. I. General introduction to the wavelet transforms." Power Engineering Journal, pp. 81-87, Apr. 2000.
- [4] Chul Hwan Kim and Rag Aggarwal, "Wavelet transforms in power systems. II. Examples of application to actual power system transients," Power Engineering Journal, pp. 193-202, Aug. 2001.
- [5] "The what, how, and why of wavelet shrinkage denoising," computing in Science & Engineering, May/June 2000.
- [6] Hong-Tzer Yang and Chiung-Chou Liao, "A de-noising scheme for enhancing wavelet-based power quality monitoring system," Power Delivery, IEEE Transactions, pp. 353-360, July 2001.
- [7] S. Santoso, E.J. Powers, W.M. Grady, and P. Hofmann, "Power quality assessment via wavelet transform," Power Delivery, IEEE Transactions, pp. 924-930, Apr. 1996.