

웨이블릿 변환을 이용한 순간전압강하 검출 연구

이교성*, 이용재, 김도훈, 김양모

A Study of Voltage Sag Detection Using Wavelet Transform

Lee Kyo-Sung*, Lee Yong-Jae, Kim Do-Hun, Kim Yang-Mo
Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University

Abstract - The fourier transform yields good information on the frequency content of the transient, but the time at which a particular disturbance in the signal occurred is lost. Unlike the fourier transform, the wavelet transform provides a time information in addition to the frequency information. So the wavelet transform is more efficient in detecting power quality disturbances. In this paper, we use the wavelet transform for detecting the voltage sag.

1. 서 론

최근 전력의 품질에 대한 관심이 높아지고 있는데, 이는 가정 및 산업체 전반에 걸쳐 사용이 급증하고 있는 컴퓨터, 통신기기 등 외란에 민감한 전자부품 또는 전력전자 장비가 증가하고 있기 때문이다. 특히 전력산업이 민영화됨에 따라 수요가 측에서 더 좋은 전력을 선택할 수 있는 길이 열림으로써 전력품질에 대한 수요 및 관심이 증가하고 있다. 이러한 수요에 따라 양질의 전력품질을 얻기 위해 각종 외란에 대한 대책 연구가 활발히 이루어지고 있다.

양질의 전력 품질을 얻기 위해서는 전력 외란에 대한 분석이 우선시 되어야 한다. 어떠한 전력 외란이 문제가 되는가를 분석하여 그 종류 및 발생 정도를 알아야 적절한 보상 대책을 적용할 수 있다. 따라서 전력품질을 감시(monitoring)하기 위한 시스템이 필수적이다.

본 논문에서는 전력품질 감시 시스템 구축을 위한 일환으로 순간전압강하의 검출을 위해서 웨이블릿 변환(Wavelet Transform : WT)을 사용하였다. 웨이블릿 변환은 FFT(Fast Fourier Transform)와 마찬가지로 주파수와 관련된 정보를 제공한다. 그러나 FFT가 시간에 대한 정보를 상실하는데 반하여 웨이블릿 변환은 시간에 대한 정보를 제공할 수 있으므로 FFT보다 더욱 효과적이다. 따라서 전력 외란 중 가장 발생빈도가 높고 미치는 영향이 큰 순간전압강하의 검출을 위해 웨이블릿 변환을 적용하고 그 효과에 대하여 논의해 보고자 한다.

2. 순간전압강하

순간전압강하는 송배전 계통상에서 지락사고나 대용량 부하의 기동으로 인해 발생하는 현상으로 IEEE Std. 1159-1195는 0.5 cycle에서 1분 동안 전력계통에서 전압이 rms 값으로 0.1pu ~ 0.9pu 이내로 감소하는 현상이라 정의하고 있다.

순간전압강하는 여러 전력 외란 중에서 그 발생빈도가 가장 높고 산업 전반에 걸친 생산량 감소, 장비의 오동작, 생산라인의 정지, 생산품질의 하락 등 막대한 경제적 피해를 야기하고 있다. 민감한 전자장비의 증가로 인해서 순간전압강하는 이전보다 각종 장비에 더 큰 피해를 끼치고 있다.

표 1. 순간전압강하의 종류

구 분	지속시간	전압 크기
Instantaneous	0.5~30 cycles	0.1~0.9 pu
Momentary	30 cycles~3s	0.1~0.9 pu
Temporary	3s~1min	0.1~0.9 pu

이러한 순간전압강하의 영향을 줄이기 위해서 전력 계통 측에서 완전한 대책을 세우는 것은 현실적으로 매우 어렵다. 따라서 수요가 측에서 이에 대한 대책을 마련하는 것에 더 주력하고 있으며 UPS(Uninterruptable Power supply)와 DVR(Dynamic Voltage Restorer) 등이 그 대표적인 예라 할 수 있다.

3. 웨이블릿 변환

주어진 신호 또는 함수 $f(t)$ 를 분석하거나 그의 특성을 파악하기 위해서 정현파와 같은 단순 주기함수를 제외하고는 그 신호 자체를 직접 다루는 것은 효과적이지 못하다. 신호를 효율적으로 다루는 방법 중에 하나는 적당한 신호의 모임을 정하여 그에 적절한 신호 $\psi_n(t)$ 를 이용하여 주어진 신호를 재구성하는 것이다.

$$f(t) = \sum_n a_n \psi_n(t) \tag{1}$$

이 때 a_n 은 위의 급수 전개식의 계수이다. 주기신호의 처리에서 주로 사용하는 것은 푸리에 급수 전개식으로, 사용된 $\psi_n(t)$ 는 정현함수와 여현함수로 이루어진 $e^{j\omega t}$ 이다. 신호 및 영상처리에서 전통적으로 많이 이용되는 방법인 푸리에 변환(Fourier Transform : FT)은 적당한 주파수 간격으로 얻은 푸리에 계수를 통하여 신호의 스펙트럼 정보를 분석할 수 있게 한다. 그러나 그 특성상 주파수 영역에서만 신호를 분석할 수 있어 신호의 시간정보와 주파수 정보를 동시에 파악할 수 없다는 단점을 갖고 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 창함수(Window function)라 불리는 시간에 의존하는 가중함수를 붙인 국소 푸리에 변환(Short-Time Fourier Transform : STFT)이 도입되었다. STFT는 주파수 영역과는 독립적인 창함수를 기존 푸리에 변환에 가중함수로 붙여 사용하므로, 분석영역이 시간-주파수에 대해 항상 일정하다. 따라서 시간의 변화에 따라 그 특성이 변화하는 신호를 효율적으로 분석할 수 없다는 단점을 가지고 있다.

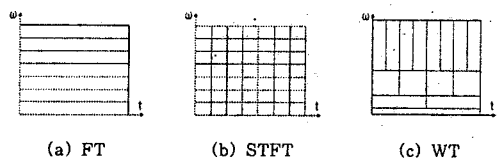


그림 1. Time-Frequency Windows of FT, STFT, WT

웨이블릿 변환은 이러한 단점을 보완하여 STFT보다 더 효율적인 시간-주파수 분석을 가능하게 한다. 웨이블릿 변환을 식 (2)에 나타내었다.

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

웨이블릿 변환은 적절히 주어진 기본함수 $\psi(t)$ 를 팽창 또는 수축으로 척도구성(scaling)하고 평행이동(shift)한 결과로 생기는 함수들을 이용한다. 팽창은 척도구성 변수 a 에 의해 조절되고, 이는 적당한 주파수 대역에 대응된다. 평행이동은 시간축에 대한 것이며 이동 간격은 척도구성 변수에 따라 다르다. 이때 기본함수 $\psi(t)$ 를 모 웨이블릿(Mother wavelet)이라고 부른다. 즉, 웨이블릿 변환은 신호의 재구성을 위한 $\psi_n(t)$ 로 모 웨이블릿을 사용한 것으로 변환의 결과는 FT에서와 마찬가지로 신호의 재구성을 위한 계수를 나타낸다. 모 웨이블릿은 짧은 시간동안 진동하다가 사라지는 특성을 지니며 그 평균값은 0이다.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (3)$$

3.1 이산 웨이블릿 변환

푸리에 변환과 마찬가지로 웨이블릿 변환도 이산 웨이블릿 변환(The Discrete Wavelet Transform : DWT)으로 나타낼 수 있다.

$$DWT[m, k] = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_n x[n] g\left[\frac{k - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right] \quad (4)$$

$a = a_0^m$, $b = nb_0 a_0^m$ ($a_0 > 1$, $b_0 > 0$)이고 m 과 n 은 양의 정수이다. 따라서 m 의 증가에 따라 a 가 커지면, 주파수 축은 짧고 시간 축은 길게되고 반면에 a 가 작으면 시간 축이 짧고 주파수 축이 긴 시간-주파수 창을 가지게 된다. 본 논문에서는 일반적으로 사용하는 $a_0 = 2$, $b_0 = 1$ 을 적용하여 DWT를 사용하였다.

식 (4)를 다시 쓰면

$$DWT[m, n] = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_k x[k] g[a_0^{-m} n - k] \quad (5)$$

이고, 이는 FIR 디지털 필터의 형태를 가지고 있고 $g[a_0^{-m} n - k]$ 는 필터의 임펄스 응답임을 알 수 있다.

3.2 웨이블릿 변환의 다중해상도 분석과 주파수 특성

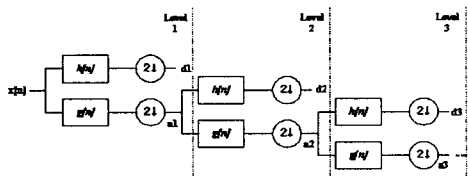


그림 2. Multi-Resolution filter bank DWT Implementation

그림 2는 저역통과 모 웨이블릿 $g[n]$ 과 쌍을 이루는 고역통과 $h[n]$ 을 이용한 DWT를 나타낸 것이다.

$$h[L-1-n] = (-1)^n g[n] \quad (6)$$

$h[n]$ 과 $g[n]$ 의 관계는 식 (6)과 같고, $h[n]$ 을 웨이블릿 함수(Wavelet function), $g[n]$ 을 척도구성 함수(Scaling function)라 한다. 각각의 필터의 출력은 다운샘플링($2\downarrow$)을 통하여 샘플의 수는 반으로 감소하게 되며 고역통과

필터를 통과하여 얻은 출력 $d1$ 은 신호의 고주파 성분이며 저주파 성분 $a1$ 은 $a1$ 내에서의 고주파 성분을 얻기 위해서 다시 필터링 과정과 다운샘플링 과정을 거친다. 이러한 과정은 이론상으로 샘플이 하나가 될 때까지 가능하다.

웨이블릿 변환을 통하여 얻을 수 있는 주파수에 대한 정보는 연속적인 것이 아니라 어떠한 대역(band) 단위로 얻어진다. 이것은 샘플링 주파수와 밀접한 관계를 가진다. 나이퀴스트 이론(Nyquist theory)에 의해서 측정될 수 있는 최대 주파수는

$$f_{max} = \frac{f_s}{2} \quad (7)$$

이다. 이 때 웨이블릿 변환을 이용하여 n level까지 분석한 경우 각 레벨에서 분석 가능한 주파수는

$$\frac{f_s}{2^{n-1}} < f_n \leq \frac{f_s}{2^n} \quad (8)$$

이다. 표 2에 샘플링 주파수가 3840Hz인 경우의 level 별 주파수 대역을 나타내었다.

표 2. Different levels of wavelet analysis ($f_s = 3840\text{Hz}$)

level	Frequency band	Center frequency
1	960Hz ~ 1920Hz	1440Hz
2	480Hz ~ 960Hz	720Hz
3	240Hz ~ 480Hz	360Hz
4	120Hz ~ 240Hz	180Hz
5	60Hz ~ 120Hz	90Hz
6	30Hz ~ 60Hz	45Hz

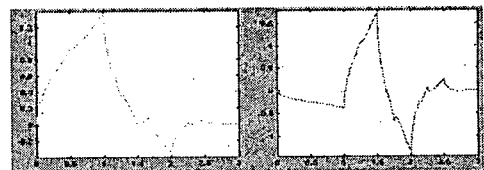
이처럼 level이 증가함에 따라 분석 가능한 주파수 대역이 다르고 분석에 의한 샘플의 수는 반감되므로 다중해상도 분석이 가능하다. 이 때 분석하고자 하는 주파수가 대역의 경계에 있는 경우 정확한 분석이 곤란하다. 분석하고자 하는 주파수가 접하는 두 대역이 중첩(overlap)되는 곳에 위치하는 경우 일치하지 않기 때문이다. 이를 피하기 위해서 적절한 샘플링 주파수를 선택하여 분석하고자 하는 주파수가 대역의 중심 주파수(Center frequency)가 되도록 하여 정보의 손실을 줄임으로써 더 좋은 결과를 얻을 수 있다.

4. 순간전압강하의 검출

외란의 검출은 외란의 시작점과 끝점을 측정하여 외란의 존재구간을 결정하는 것이다. DWT로 n level까지 분석하는 경우 각 level은 각기 다른 웨이블릿 변환 계수를 가지며, 이 계수가 크면 해당 대역의 주파수 성분이 많이 포함되어 있음을 나타낸다.

순간전압강하의 검출은 level 1의 고역통과 필터를 통과한 웨이블릿 계수($d1$)를 사용하였는데, 이는 신호를 웨이블릿 변환하였을 때 level 1의 계수가 그 신호의 고주파 특성을 가장 잘 나타내고 있기 때문에 작은 변화에도 민감한 변화를 보이기 때문이다.

웨이블릿 변환에 사용한 모 웨이블릿은 도비시(Daubechies)에 의해서 정의된 Daubechies 4 웨이블릿을 사용하였다.



(a) Scaling function (b) Wavelet function
그림 3. Daubechies 4 wavelet

Daubechies 4 웨이블릿을 이용한 순간전압강하 검출을 확인하기 위해서 Matlab을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

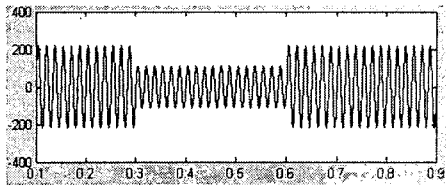


그림 4. 순간전압강하 신호

시뮬레이션을 위해 220V, 60Hz의 전원신호가 0.3초 동안 0.5pu의 순간전압강하가 발생하도록 하였다. 이때 신호의 샘플링 주파수는 3840Hz이다.

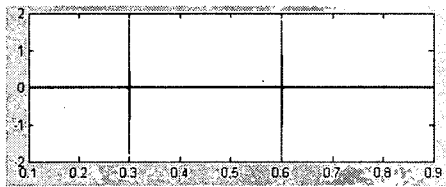


그림 5. 이상전원 level 1 웨이블릿 계수(d1)

그림 5는 순간전압강하의 시작점과 끝점을 정확하게 검출하고 있음을 알 수 있다. 그러나 그림 5는 전원신호에 잡음이 전혀 존재하지 않는 이상적인 전원에서 순간전압강하가 발생한 것으로 실제 전원은 잡음신호를 포함하고 있다.

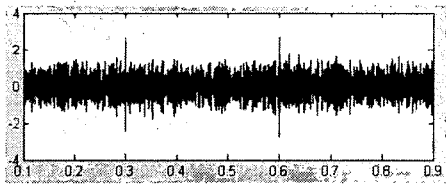
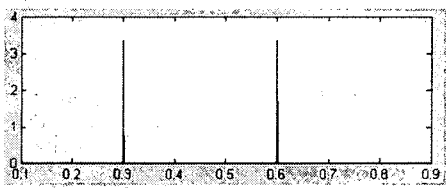
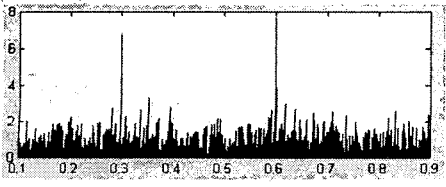


그림 6. 잡음신호를 포함한 전원의 d1

그림 6은 잡음신호를 포함하고 있는 경우를 나타내고 있다. 실제 신호를 분석하는 경우 잡음으로 인하여 순간전압강하의 시작점과 끝점을 분석하는데 곤란함을 알 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 계수를 제공하여 얻은 값을 사용하였다.



(a) 이상전원 level 1의 제공 웨이블릿 계수



(b) 잡음전원 level 1의 제공 웨이블릿 계수

그림 7. 제공 웨이블릿 변환 계수

그림 7의 (a)와 (b)는 각각 그림 5와 그림 6의 제공 웨이블릿 변환 계수를 나타낸다. 순간전압강하의 시작점과 끝점을 확연히 구분할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 순간전압강하의 시작점과 끝점을 검출하기 위해서 웨이블릿 변환을 사용하였다. 웨이블릿 변환은 FT와 달리 주파수 정보뿐만 아니라 시간에 대한 정보를 제공하여 전력 외란의 분석에 효과적이며 시뮬레이션을 통하여 그 우수성을 확인하였다.

잡음신호가 있는 경우 고주파수에 민감한 level 1의 웨이블릿 계수는 순간전압강하의 검출에 어려움이 있었으나 제공 웨이블릿 변환 계수를 이용하여 시작점과 끝점의 검출을 용이하게 하였다.

그러나 잡음신호의 영향이 훨씬 큰 경우 제공 웨이블릿 변환 계수를 이용한 검출이 곤란해진다. 따라서 잡음신호의 영향을 줄이기 위한 기법의 보완 및 실제 계통에 적용하여 실험을 통한 검증이 향후과제라 하겠다.

(참 고 문 헌)

- [1] S. Santoso, E.J. Powers, W.M. Grady, P. Hofmann, "Power quality assessment via wavelet transform analysis", IEEE Trans. Power delivery, Vol. 11, No. 2, pp924-930, 1996
- [2] D.C. Robertson, O.I. Camps, J.S. Mayer, W.B. Gish, "Wavelets and electromagnetic power system transients", IEEE Trans. Power deliver, Vol. 11, No. 2, pp1050-1058, 1996
- [3] S.H. Huang, C.T. Hsieh, C.L. Huang, "Application of wavelets to classify power system disturbances", Electric power systems research, Vol. 7, Issue : 2, pp87-93, 1998
- [4] C.H. Kim, R. Aggarwal, "Wavelet transform in power system. I. General introduction to the wavelet transforms", IEEE Power engineering journal, Vol. 14, Issue : 2, pp81-87, 2000
- [5] C.H. Kim, R. Aggarwal, "Wavelet transforms in power systems. II. Examples of application to actual power system transients", IEEE Power engineering journal, Vol. 15, Issue : 4, pp193-202, 2001
- [6] C. Parameswariah, M. Cox, "Frequency characteristics of wavelets", IEEE Trans. Power delivery, Vol. 17, No. 3, pp800-804, 2002

본 연구는 한국과학재단
 목적기초연구지원으로 수행되었음
 과제번호: R01-2000-000267-0