

웨이브렛 변환을 이용한 순시전압저하 측정에 관한 연구

김상익 · 정영식

인천대학교 전기공학과

1. 서론

현대의 산업계에서 많은 기기들은 민감한 전자부품들을 사용하고 있다. 이들 기기들은 전압의 변동에 민감하게 반응하여 오동작을 일으킬 수 있으며, 이로 인해 산업현장의 안전에 영향을 미치는 주요 요인이 되기도 한다. 특히 순시적인 전압 강하를 허용하지 않는 중요한 부하기기의 사용이 급증하고 있다. 따라서 순시전압저하(instantaneous voltage sag)는 전기의 신뢰성과 안전성에 위협을 주는 요인이다. 또한 순시전압저하를 포함하여 순시정전, 전압변동, 고조파, 플리커와 같은 순시적인 미소외란은 전력품질을 크게 위협하고 있다. 우리 나라에 있어서는 전력품질 저하(기존의 정전이 아니고, 순시성향의 전력품질)에 의해, 간 약 27~65억원 정도의 손실이 발생하는 것으로 분석되었으며, 이를 토대로 한 우리 나라 전체의 피해액은 연간 약 2,700~6,500억원 정도에 달할 것으로 추정하고 있다. 또한 반도체 산업에서만 연간 약 2000억원의 손실이 발생하는 것으로 추정되고 있다. 미국의 경우에 있어서 보고서(EPRI, 1993년)에 의하면 피해액은 연간 약 \$260억(약 23.4조원)정도로 추정되고 있다.[1]

본 논문에서는 전기안전의 문제와 관련하여, 수용가의 부하변동이나 전력계통의 고장, 전력공급 지역 내의 큰 부하변동, 전력공급설비 불량 등으로 발생하는 순시전압저하에 대하여 웨이브렛 해석(wavelet analysis)을 적용하여 전압저하가 발생하는 위치 및 전압값을 측정함으로써 순시전압저하의 특성을 파악한다.

2. 전력품질의 정의와 평가지표

전력품질이란, 전력회사의 측면에서 보면 공급신뢰도로서 수용가측면에서 보면 수용가의 전기설비에 공급되는 전력의 상태(또는 특성)으로서 정의될 수 있다. 전력품질의 정도를 나타내는 평가지표로서는 일반적으로 주파수유지율, 전압유지율 및 정전횟수(시간) 등이 사용되어 왔으나, 최근에는 미소외란에 대하여 민감하게 영향을 받는 고도부하기기들에 대한 대책마련의 일환으로서 순시전압저하, 순시전압상승, 고조파, 전압불평형, 순간정전, 서어지와 같은 미소 외란의 요소들이 고려되고 있다. 전력품질의 평가 지표로서 IEEE Standard 1159-1995, "Recommended Practice on Monitoring Electric Power Quality"에서 전압의 RMS값 변동에 대해 정의하고 있다.[1] 다음은 평가지표 대상의 하나인 순시전압저하에 대하여 간략하게 설명한다.

· 순시전압저하(Instantaneous voltage sag, dip) : 일반적으로 단기간(short-duration) 전

압저하란 정격주파수에서 지속시간이 0.5사이클에서 1분정도, 전압저하의 정도가 실효치 기준 0.1 p.u. 에서 0.9 p.u. 인 현상을 말한다. 이 중에서 특히 지속시간이 0.5사이클에서 30사이클정도가 되는 전압저하현상을 순시전압저하라고 말한다.

표 1.은 일본 전기학회 기술 보고서 제 581호에서 보고된 전력품질의 문제에 대한 자료로 전력 품질에 영향을 미치는 평가지표에 대한 %비율을 나타낸다.[3]

Table 1. 전력품질 문제의 경향

| | | | | |
|-------|------|-----|------|--------|
| 구분 | 고조파 | 정전 | 플리카 | 순시전압저하 |
| 비율[%] | 47 | 11 | 11 | 8 |
| 구분 | 전압변동 | 불평형 | 이상전압 | 기타 |
| 비율[%] | 4 | 4 | 8 | 7 |

3. 웨이브렛 변환원리와 적용

3.1 Fourier Transform과 Short-Time Fourier Transform

웨이브렛 변환 분석의 이해를 위해서는 기본적인 푸리에 변환(FT)의 의미를 파악하고 있어야 한다. 신호에 있어서 어떤 시계열을 분석할 때 중요하게 생각되어지는 것은 시계열에 어떠한 성분이 포함되어 있는가를 아는 것일 것이다. 이를 수학적으로 분석하는 방식이 푸리에 해석이다.



Figure 1. Time and Frequency domain by fourier transform method

하지만 푸리에 해석에 있어 지적되어지는 결점은 시간 영역에서 주파수 영역으로 변환되어질 때 시간에 대한 정보가 사라진다는 것이다. 그림 1.을 보면 오른쪽 파트에서 보여 지는 주파수 영역에서의 피크(peak)가 시간 영역에서는 언제 나타나는 것인지를 알 수가 없다는 것이다. 즉, 푸리에 변환은 신호를 처리함에 있어서 전 구간에 대하여 적분을 행하므로 국부적인 특성(locality)을 만족하지 못함으로 이러한 단점을 개선하기 위한 방법으로 STFT가 나오게 되었다. 하지만, STFT는 일단 window가 선택되면 시간-주파수 해상도가 전체 시간-주파수 영역에서 고정되어 지는 단점이 있다. 따라서 STFT의 고정된 window를 사용함으로써 발생하는 해상도 한계를 극복하기 위해서 시간-주파수 영역 안에서 시간과 대역폭을 변경하여 다해상도 해석(multiresolution analysis)을 할 수 있는 웨이브렛 변환이 제안되었다.

3.2 웨이브렛 변환(Wavelet Transform)

3.2.1 연속 웨이브렛 변환(CWT)

연속시간 웨이브렛 변환(Continuous Wavelet Transform-CWT)은 시간상에서 서로 다른 스케일과 위치를 갖는 웨이브렛 항들로 주어진 신호를 나타내어 신호를 분해하는 것이다. 이 과정은 주어진 신호와 웨이브렛 모함수(mother wavelet)에서 파생된 다양한 웨이브렛 함수들 사이에서 유사성을 계산하여 얻을 수 있다. 따라서 CWT의 결과는 웨이브렛 모함수의 선택에 따라 달라진다. 주어진 신호에 얼마나 유사한 웨이브렛 인가에 따라 특징을 추출하는데 좋은 결과를 얻을 수도 있고, 없을 수도 있다.

3.2.2 이산 웨이브렛 변환(DWT)

이산 웨이브렛 변환(Discrete Wavelet Transform-DWT)은 시간영역 파형을 웨이브렛 영역으로 변환을 한다. 즉, 서로 다른 분해 스케일에서 웨이브렛 변환 계수들에 의해 나타내어진다. 적절한 마더 웨이브렛을 선택해야 된다는 점은 CWT와 유사하지만, 빠른 과도해석을 하는데 있어서는 짧은 웨이브렛 이 바람직하고, 긴 과도현상을 해석할 때는 상대적으로 긴 웨이브렛이 더 효율적이다[2]. 즉, 하나의 응용에 적절한 웨이브렛이 다른 응용에 언제나 적절하게 적용할 수 있는 것은 아니다.

3.3 웨이브렛 변환 적용(Application of wavelet transform)

본 논문에서는 wavelet packet transform이라 불리우는 Binary-tree wavelet transform(BTWT)이 이용되어진다[4,5]. 이것은 보편적인 DWT 사용에 있어서 일반화되었다. $\Phi(t)$ 및 $\Psi(t)$ 는 각각 스케일 함수 및 웨이브렛 모함수 함수이다. 그리고 웨이브렛 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$\Psi^0(t) = \Phi(t) \text{ 및 } \Psi^1(t) = \Psi(t)$$

잘 알려진 “two-scale equations”를 이용하면 다음과 같은 웨이브렛 기저함수(wavelet basis)를 구성할 수 있다.

$$\Psi_{j,k}^{2i}(t) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \Psi^{2i} \left(\frac{2^j k - t}{2^j} \right) = \sum_n h(n) \Psi_{j-1, 2k-n}^i(t) \quad (1)$$

$$\Psi_{j,k}^{2i+1}(t) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \Psi^{2i+1} \left(\frac{2^j k - t}{2^j} \right) = \sum_n g(n) \Psi_{j-1, 2k-n}^i(t) \quad (2)$$

여기서 i 는 node number, j 는 decomposition level, 그리고 $h(n)$ 와 $g(n)$ 는 quadrature mirror filters(QMF)의 한 쌍으로써, 저역통과 필터와 고역통과 필터이다. 주어진 시간 영역함수 $x(t)$ 에 대한 웨이브렛 변환 계수 j -번째 level에 k -번째 point는 순환적 방법으로 계산되어질 수 있다.

$$d_j^{2i}(k) = \sum_n h(n) d_{j-1}^i(2k-n) \quad (3)$$

$$d_j^{2i+1}(k) = \sum_n g(n) d_{j-1}^i(2k-n) \quad (4)$$

Binary-tree wavelet 분해는 그림 2.에 나타내었다. 원 신호의 파형은 2^N 개 데이터를 가진다. 웨이브렛 변환 계수 $d_j^{2i}(k)$ 는 저역통과 필터 $h(n)$ 의 시퀀스 $d_{j-1}^i(k)$ 에 의해서

얻어지고, 식 (3)에서와 같이 2의 멱수로 다운샘플링 되어진다. 계수 $d_j^{2^{i+1}}(k)$ 는 고역 통과 필터 $g(n)$ 을 사용하여 유사한 방식에 의해서 얻어진다. Node의 번호 즉, j-번째 단계의 대역들은 2^j 이고, 각 node들은 2^{N-j} 데이터 또는 계수를 가진다. 각각의 대역에 대한 복구는 업 샘플링을 포함하는 반전 과정을 가진다.

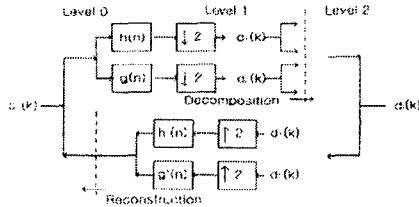


Figure 2. Binary-tree wavelet decomposition and reconstruction

4. 실험결과 및 고찰

본 논문에서 적용되어지는 웨이브렛은 빠른 과도해석에 유리한 짧은 웨이브렛을 이용한다. 적용되어진 웨이브렛은 Daubechies Wavelet(DW)으로 비교적 짧은 db2, db3, db4까지의 웨이브렛을 적용하였으며, db6의 비교적 긴 웨이브렛을 사용하여 짧은 웨이브렛과의 차이점을 비교하여 순시전압저하의 신호를 분석하고 특성화시킨다. 본 실험은 matlab을 이용하여 프로그램 되었으며, 모의실험에 사용되는 전압 파형은 7680Hz 즉, 60Hz당 128 point를 이용하여 샘플링 되어진 주파수는 기본 주파수 주기 60Hz를 가진다. 모의실험에 이용되어진 파형은 웨이브렛 변환으로부터 분석되며, 측정되어진 RMS 값은 [1]에 나타나있는 전압변동 RMS값에 의하여 순시전압저하의 범주에 적당하지, 아니면 그 외의 외란이나 단순 과도현상인지를 파악할 수 있을 것이다. 외란 발생시의 전압값은 다음의 식과 같이 나타내어질 수 있다. [4]

$$V_m = \sqrt{\frac{V_0^2 T w - w(T - T_1) - 0.5 \sin 2w(T - T_1)}{0.5wT_1 + 0.25 \sin 2wT_1}} p.u \quad (5)$$

여기서 V_0 는 최하위 대역의 전압 rms값이며, w 는 기본 주파수이고, T_1 은 외란이 지속되어진 시간을 나타낸다. 또한, 각 node별 rms값은 [4]를 참조한다.

· 순시전압저하 파형(1, 2)

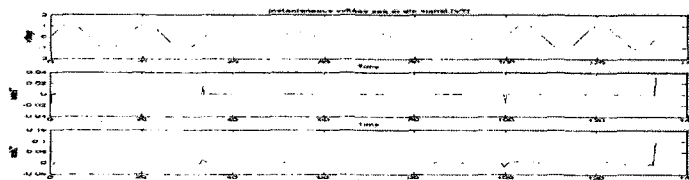


Figure 3. Instantaneous voltage sag(1)

Table 2. Rms, total rms and v_m value of sag for separately node(I)

| Node | Harmonic | db2 | db3 | db4 | db6 |
|--------------|----------|--------|--------|--------|--------|
| 0 | 1st | 0.7708 | 0.7844 | 0.7835 | 1.0270 |
| 1 | 3rd | 0.1914 | 0.1738 | 0.2235 | 0.1126 |
| 2 | 5th | 0.0503 | 0.0549 | 0.0384 | 0.0966 |
| 3 | 7th | 0.0125 | 0.0300 | 0.0649 | 0.0650 |
| 4 | 9th | 0.0128 | 0.0140 | 0.0213 | 0.0099 |
| 5 | 11th | 0.0032 | 0.0050 | 0.0078 | 0.0138 |
| 6 | 13th | 0.0008 | 0.0113 | 0.0246 | 0.0219 |
| 7 | 15th | 0.0002 | 0.0026 | 0.0069 | 0.0118 |
| Total rms | | 0.7960 | 0.8061 | 0.8189 | 1.0402 |
| V_m [p.u.] | | 0.3405 | 0.4373 | 0.4314 | 1.3247 |

표 2.에서 보여 지는 값들은 각각의 웨이브렛 db2, db3, db4, db6에 대하여 node별 rms 값과 외란 발생시의 전압값을 나타내어 주고 있다. 실험결과 빠른 과도현상에 있어서는 짧은 웨이브렛이 알맞음을 알 수 있다. 그림 3.에서 외란은 66.7[ms]시간 동안 발생하였으며, 외란 발생시의 'db2~db4'까지의 전압값은 0.34 p.u., 0.44 p.u., 0.43 p.u., 으로 나타났다. 이 값들은 전력품질 평가지표의 기본특성에 알맞은 값으로써 위 파형을 순시전압저하의 외란 파형으로 간주할 수 있다.

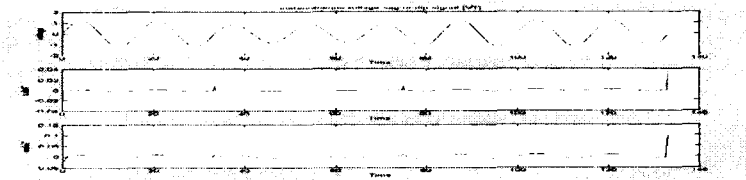


Figure 4. Instantaneous voltage sag(2)

Table 3. Rms, total rms and v_m value of sag for separately node(2)

| Node | Harmonic | db2 | db3 | db4 | db6 |
|--------------|----------|--------|--------|--------|--------|
| 0 | 1st | 0.8134 | 0.8278 | 0.8268 | 1.0838 |
| 1 | 3rd | 0.2019 | 0.1834 | 0.2359 | 0.1188 |
| 2 | 5th | 0.0530 | 0.0580 | 0.0405 | 0.1020 |
| 3 | 7th | 0.0132 | 0.0317 | 0.0685 | 0.0686 |
| 4 | 9th | 0.0135 | 0.0148 | 0.0225 | 0.0105 |
| 5 | 11th | 0.0034 | 0.0053 | 0.0082 | 0.0146 |
| 6 | 13th | 0.0008 | 0.0119 | 0.0260 | 0.0232 |
| 7 | 15th | 0.0002 | 0.0028 | 0.0073 | 0.0124 |
| Total rms | | 0.8400 | 0.8507 | 0.8642 | 1.0977 |
| V_m [p.u.] | | 0.6319 | 0.6920 | 0.6826 | 2.0853 |

표 3.에서 보여 지는 값에 있어서 db6에서는 다른 웨이브렛에 비하여 오차가 있음을

알 수 있다. 그림 4.에서 외란은 41.7[ms]시간 동안 발생하였으며, 외란 발생시의 'db2~db4'까지의 전압값은 0.63 p.u., 0.69 p.u., 0.68 p.u., 으로 나타났다. 이 값들은 전력 품질 평가지표의 기본특성에 알맞은 값으로써 위 파형을 순시전압저하의 외란 파형으로 간주할 수 있다. 그림 3과 4의 차이점은 같은 순시전압저하의 파형이지만 외란의 발생 시간과 외란 전압값이 다르다는 것이다.

5. 결 론

본 연구는 순시전압저하의 신호에 웨이브렛 변환(WT)을 적용하였다. 실험의 결과 순시전압저하는 길이가 짧은 웨이브렛(db2, db3, db4)이 비교적 긴 웨이브렛(db6)에 비하여 각 node에 따른 rms값과 외란발생시의 전압값 측정에 있어서 적당함을 알 수 있었다. 또한 실험에 의하여 측정되어진 외란 발생시의 전압값과 전력품질의 평가지표와 비교하여 실험시의 신호가 순시전압저하의 기본특성을 따르고 있음을 알 수 있었다. 즉, 미소 외란의 발생은 외란시 전압값의 크기가 외란의 형태를 결정한다고 볼 수 있을 것이다. 본 연구는 전력품질 문제중 산업용 수용가에 있어 가장 큰 문제점을 지니고 있는 순시전압저하에 대하여 분석하고 특성화하였다. 전력품질을 향상과 전기의 신뢰성, 안정성을 위해서는 열악한 전력품질 문제로 인하여 큰 경제적인 손실을 입고 있음을 인지하고, 이와 함께 지속적인 외란 발생의 모니터링이 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

- [1] 김지홍, 이상동, 김명찬, 이현원, 이준엽, "전력 품질과 동적 순간전압강하 보상기의 적용(상)", 전기저널 2000. 12월
- [2] S. Sanloso, E. J. Powers, and W. M. Grady, "Electric Power Quality Disturbance Detection Using Wavelet Transform Analysis", Proc. IEEE-SP Inter. Sym. on Time-Frequency and Time-scale analysis, PA, Oct, 1994.
- [3] 김세동, "전력품질 향상을 위한 전원설비의 신뢰도 향상대책 기술", 전력기술인 KEEA NEWS 2000
- [4] E. Y. Hamid, Z. Kawasaki, H. Yoshida and H. Doi, "Wavelet Analysis of Voltage Disturbances for Power Quality Applications", Trans. IEE Japan, Vol. 122-B, No. 2, 2002.
- [5] E. Y. Hamid, N. Yokoyama and Z. Kawasaki, "Rms and Power Measurements: A Wavelet Packet Transform Approach", Trans. IEE Japan, Vol. 122-B, No. 5, 2002.
- [6] Wickerhauser, M.V, "Adapted wavelet analysis from theory to software", IEEE Press, New York, USA, 237-298, 1994.