

웨이브렛 변환을 이용한 Voltage Sag 검출

論文

49A - 9 - 1

The Detection of Voltage Sag using Wavelet Transform

金 喆煥* · 高 榮勳**

(Chul-Hwan Kim · Young-Hun Ko)

Abstract - Wavelet transform is a new method for electric power quality analysis. Several types of mother wavelets are compared using voltage sag data. Investigations on the use of some mother wavelets, namely Daubechies, Symlets, Coiflets, Biorthogonal, are carried out. On the basis of extensive investigations, optimal mother wavelets for the detection of voltage sag are chosen. The recommended mother wavelet is 'Daubechies 4(db4)' wavelet. 'db4', the most commonly applied mother wavelet in the power quality analysis, can be used most properly in disturbance phenomena which occurs rapidly for a short time. This paper presents a discrete wavelet transform approach for determining the beginning time and end time of voltage sags. The technique is based on utilising the maximum value of d_1 (at scale 1) coefficients in multiresolution analysis(MRA) based on the discrete wavelet transform. The procedure is fully described, and the results are compared with other methods for determining voltage sag duration, such as the RMS voltage and STFT(Short-Time Fourier Transform) methods. As a result, the voltage sag detection using wavelet transform appears to be a reliable method for detecting and measuring voltage sags in power quality disturbance analysis.

Key Words : Voltage Sag, Power Quality, Wavelet Transform

1. 서 론

'Power Quality'란 용어는 1980년대 후반 이후로 전력산업에서 가장 중요한 관심사 중의 하나가 되었으며, 개개 형태의 전력계통의 외란(Disturbance)들의 집합의 개념이다. 최근 전력 분야에서 전력품질(Power Quality)에 대한 개념이 전력회사 및 전력의 최종 사용자인 수용가에서 관심의 대상이 되고 있다. 이는 가정이나 사무실, 혹은 산업체에서 사용이 급증하고 있는 개인용 컴퓨터, 통신기기 등의 외란에 민감한 전자부품 또는 전력전자 장비가 증가하고 있기 때문이다. 따라서, 상업 혹은 산업 수용가는 점점 더 이러한 전자 장비 성능에 의존적이 되고 전력의 품질에 대한 관심이 높아지고 있으며 양질의 전력공급의 요구는 앞으로 더욱 늘어갈 것이다[1-5].

웨이브렛(Wavelet)은 1980년대 초에 소개된 이후 순수/응용과학 및 공학 등에서 급속히 발달하였고 현재 여러 분야에 적용되어 계속 응용되고 있다. 웨이브렛 변환은 영역의 크기가 가변되는 윈도우를 사용하여 획일화되지 않은 주파수 영역으로 신호를 분석하며 신호처리를 위한 여러 응용분야에서 많은 관심의 대상이 되고 있다[6,8]. 특히, 저주파수 정보를 더욱 정확하게 원하는 곳에서는 긴 시구간 윈도우를

사용하고, 고주파수 정보를 원하는 곳에서는 짧은 시구간 윈도우를 사용하는 방법은 지역적인 임펄스와 진동을 갖는 신호의 분석을 향상시키므로 전력품질 외란 검출에 적합한 신호 분석법이라 할 수 있다[9,15].

본 논문에서는 전력품질에 영향을 미치는 여러 가지 외란 중 voltage Sag의 검출방법을 제시하였다. Voltage sag는 일시적으로 전압이 감소하는 현상으로 voltage sag로 인한 피해를 최소화하기 위해서는 정확한 시간을 검출하는 것이 무엇보다 중요하다. 따라서, 기존의 voltage sag 검출방법으로는 전압의 RMS를 이용하는 방법이 있으나, 1주기씩 전압의 RMS를 구하므로 샘플링 오차도 포함되기 때문에 정확한 시간 추정이 어렵다. 본 논문에서는 웨이브렛 변환을 이용하여 외란이 발생하는 시점과 소멸하는 시점을 자동적으로 검출하는 알고리즘을 제시하였다. 제시된 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 전자기 과도해석 프로그램인 EMTP(Electromagnetic Transient Program)를 이용하여 모의하였다. 또한, 여러 가지의 웨이브렛 모함수(Mother Wavelet)중에서 Voltage Sag의 검출에 가장 적합한 마더 웨이브렛을 선정하였고, 선정된 마더 웨이브렛을 이용하여 Voltage Sag 검출 알고리듬을 제시하였다. 웨이브렛 변환을 이용한 검출방법은 전력 품질을 감시하면서 외란이 발생하는 시점을 검출하므로 신속하고 정확하게 외란의 원인을 파악하고 이에 대한 해결책을 찾을 수 있다. 따라서, 외란에 의해서 발생하는 크고 작은 손실을 예방함으로써 전력 공급회사, 수용가, 부하기기 설비회사들에게도 경제적인 관점에서 효율적이라

* 正會員 : 成均館大 電氣·電子 및 컴퓨터 工學部 教授 · 工博

** 準會員 : 대우통신 R&D Center

接受日字 : 2000年 2月 10日

最終完了 : 2000年 7月 10日

고 할 수 있다. 또한, 웨이브렛 변환을 이용한 검출결과와 전압의 RMS를 이용한 검출결과, STFT (Short-time Fourier Transform)를 이용한 검출결과를 비교 분석하였다.

2. Voltage Sag

배전 계통에서 전력 품질 외란에 영향을 미치는 요소 중 가장 일반적인 현상이 Voltage Sag이다. 민감한 전자 장치의 증가로 인하여 Voltage Sag와 같은 외란은 소비자에게 종대한 관심사중의 하나일 뿐만 아니라 전력의 생산자도 손실 없이 양질의 전력을 공급하기 위해서 계통을 모니터링하고 이에 대한 대처 방안이 중요시 되고 있다.

Voltage Sag는 매우 짧은 시간(0.5~30[cycle]) 동안 일시적으로 실효전압이 0.1~0.9[pu]로 감소하는 현상이다. 주로 전동기의 기동시 정격속도로 가속하는 동안, 전력계통에서 고장이 발생하여 고장을 제거하기 위해서 스위치가 작동할 때, 과도 부하의 변화에 의해서 발생한다. Voltage Sag는 시스템의 고장 상태와 관계가 있으나 그리 흔한 현상은 아니다. 단상 지락사고시 전전상의 순간적인 전압상승으로 나타난다.

Voltage Sag의 발생은 크기와 지속시간에 관련하여 컴퓨터 장치나 다른 제어장치들이 충단 될 수 있으며 데이터 손실도 초래한다. Voltage Sag의 크기는 전력계통상에서 고장의 위치와 소비자와의 거리, 지속시간은 고장이 발생한 순간부터 제거될 때까지의 시간으로 결정된다.

기존의 Voltage Sag의 검출 방법으로는 전압의 RMS(Root Mean Square)를 이용하는 방법이 있으며, RMS 방법에서 Voltage Sag는 주어진 시간의 범위 내에서 전압의 RMS 감소로 정의되어진다.

전압의 RMS는 다음 식 (2-1)과 같이 한 주기를 샘플링 한 값으로 계산되어진다.

$$V_i^{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=i}^{i+N-1} V_j^2} \quad (2-1)$$

여기서, N은 한 주기당 샘플링된 개수이고, V_j 는 j 번째 샘플의 전압을 나타내고, V_i^{rms} 는 i 번째 샘플에서 계산되어진 전압의 RMS를 나타낸다. Voltage Sag의 발생 시간과 소멸 시간을 결정하는 방법은 여러 가지 방법이 있지만, 전압의 RMS 한계값으로 결정되어진다. 발생 시간은 보통 전압의 RMS가 처음으로 0.95[pu]로 떨어지는 지점으로 결정된다. 소멸 시간은 다시 전압의 RMS가 0.95[pu]로 증가하는 지점으로 정한다. 이러한 방법은 1주기씩 전압의 RMS를 구하므로 샘플링의 오차도 포함되기 때문에 정확한 시간 추정이 되지 못한다.

3. 웨이브렛 변환을 이용한 Voltage Sag 검출

3.1 마더 웨이브렛

마더 웨이브렛 $\Psi_{a,b}(t)$ 는 대부분 짧고 진동적인 함수로서 적분값이 0이며, 양 끝에서 급격히 감쇄하는 형태를 가진다. 식(3-1)은 마더 웨이브렛의 형태를 나타낸다.

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3-1)$$

여기서, a는 scale(dilation) 성분을 나타내고, b는 shift(translate) 성분을 의미한다. scale은 신호의 팽창이나 수축의 의미이고, shift는 이동의 의미이다.

이러한 마더 웨이브렛과 원 신호와의 유사성을 비교하여 외란 검출을 수행하게 된다. 웨이브렛에는 여러 가지의 마더 웨이브렛이 존재한다. 하지만, 적용되는 마더 웨이브렛에 따라 외란 검출의 능력에는 상당한 차이가 발생한다. 따라서, 외란 검출에 적절한 마더 웨이브렛을 선정하는게 무엇보다 중요하다.

본 논문에서 적용된 마더 웨이브렛은 Daubechies(db N), Symlets(SymN), Biorthogonal(BiorN), Coiflets(Coif N)의 총 20가지의 마더 웨이브렛을 Voltage Sag 검출 알고리듬에 적용하였다. Voltage Sag 검출 알고리듬은 다음 절에서 소개하였다.

Voltage Sag의 발생시간과 소멸시간, 연산량 등을 고려하여 외란 검출에 가장 적합한 마더 웨이브렛을 선정하였으며, 표 1은 각각 마더 웨이브렛의 검출 결과를 보여주고 있다.

표 1 마더 웨이브렛의 검출 결과

Table 1 Detection Results using mother wavelet

웨이브렛 모함수		발생시간추정 평균오차[Cycle]	소멸시간추정 평균오차[Cycle]
Daubechies	2	0.4695	0.0563
	4	0.0424	0.0361
	6	0.0511	0.0421
	8	0.4636	0.0488
	10	0.0499	0.0479
Symlets	2	0.4695	0.0540
	3	0.0488	0.0358
	4	0.0511	0.0398
	5	0.0414	0.5029
	6	0.0511	0.0428
	8	0.0538	0.0421
Coiflets	2	0.0511	0.0375
	3	0.0538	0.0421
	4	0.0538	0.0421
	5	0.0566	0.0431
	1.3	2.2360	4.0520
Biorthogonal	2.6	0.0511	0.0376
	3.1	0.0419	0.0383
	4.4	0.0511	0.0453
	6.8	0.0538	0.0421

표 1에서 보는 바와 같이 Voltage Sag의 발생시간 추정에서 Biorthogonal 1.3을 제외한 19개의 마더 웨이브렛은 검출 능력이 있었다. 발생시간 추정 결과는 sym5, biro3.1, db4, sym3, db10 웨이브렛 순으로 우수한 결과를 보여주었다. 소멸시간 추정에서는 sym5, bior1.3을 제외한 18개의 마더 웨이브렛이 검출 능력을 가지고 있었다. 소멸시간 추정 결과는 sym3, db4, coif2, bior2.6, bior3.1 순이었다. 따라서, 본 논문에서 Voltage Sag를 검출하기 위해서 선정된 마더 웨이브렛은 발생시간 추정과 소멸시간 추정에서 고르게 우수한 결과를 나타낸 db4 마더 웨이브렛이다.

Daubechies 웨이브렛은 Ingrid Daubechies가 이산 웨이브렛 분석을 실용화 할 수 있도록 만든 orthonormal 웨이브렛

이다. db4 마더 웨이브렛은 Daubechies 마더 웨이브렛 중 4개의 tap을 가지고 있고 웨이브렛 길이가 8샘플인 scaling 필터이며, 짧은 시간동안 발생하는 과도 현상의 검출에 적합하여 전력 품질에 영향을 미치는 외란 검출에 적합한 마더 웨이브렛이라 할 수 있다.

3.2 이산 웨이브렛 변환(Discrete Wavelet Transform)

웨이브렛 변환은 연속변환 (Continuous Wavelet Transform : CWT)과 디지털 개념이 도입된 이산 변환 (Discrete Wavelet Transform : DWT)으로 나누어진다. 본 논문에서는 디지털 개념을 도입한 이산 웨이브렛 변환을 사용하였다.

어떤 신호에 대해 정확한 웨이브렛 분석을 수행하려면 모든 scale에 대한 웨이브렛 계수(Wavelet Coefficient)를 계산해야 한다. 여러 단계의 웨이브렛 변환을 수행하게 되면 방대한 양의 데이터가 생기고 분석시간도 길어진다. 따라서, 1988년 Mallat에 의해서 개발된 2의 역승 형태에 기초한 이산 웨이브렛 변환을 사용한다면 효율적이라고 할 수 있다.

다음 식 (3-2)는 이산 웨이브렛 변환을 나타내고 있다.

$$D_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_k S[n] \cdot \psi \left[\frac{k - na_0^m}{a_0^m} \right] \quad (3-2)$$

여기서, a_0^m 은 scale의 변수이고, na_0^m 은 shift의 변수이며, $S[n]$ 은 원신호를 나타낸다.

일반적으로 신호에 대한 저주파 성분은 신호의 고유한 특성을 나타내고 고주파 성분은 신호에 대한 미세한 특성을 나타낸다. 웨이브렛 변환에서는 이와 같은 특성을 Approximation(A)과 Detail(D)로 칭한다. Approximation은 고차 스케일을 통해서 얻어지며 신호의 저주파 성분을 나타내고, Detail은 저차 스케일을 통해서 얻어지며 고주파 성분을 나타낸다. 따라서, 이산 웨이브렛 수행과정은 고역 필터(D)와 저역 필터(A)의 2가지 필터링의 개념으로 해석된다.

웨이브렛 다분해능(Multiresolution Analysis : MRA)은 신호를 여러 형태의 고역필터 성분들로 나누기 위해서 웨이브렛 필터 뱅크를 사용한다. 즉, 저역필터를 통해서 얻어지는 신호는 또 다른 두 개의 저역필터(cAn)와 고역필터(cDn)로 분해되고, 이 저역 필터를 통과한 신호는 다시 두 개의 필터로 분해되며, 이러한 과정은 Detail 성분이 한 개의 샘플로 구성될 때까지 계속 수행된다.

따라서, 여러 개의 고역 필터(D1, D2, D3, …, Dn)와 저역 필터(A1, A2, A3, …, An)로 구성된 웨이브렛 필터 뱅크가 있을 때, 원신호 S는 다음 식 (3-3)와 같이 재구성될 수 있다.

$$S = D1 + D2 + D3 + \dots + Dn + An \quad (3-3)$$

이산 웨이브렛을 수행하는 과정은 저역 분해 필터와 고역 분해 필터로 수행되며, 이러한 여러 개의 필터를 연속적으로 구성한 것을 웨이브렛 필터 뱅크라 한다.

고역필터와 저역필터로 나누어 데이터가 처리되므로, 데이터 양이 많아질 수 있다. 따라서, 필터에서 얻은 데이터의 양을 줄이기 위해서 down-sampling이라는 기법을 사용한다. Down-sampling은 고역 필터와 저역 필터에 입력될 데이터를 매 2번째 샘플점마다 통과시키는 원리이다[8]. 따라

서, 웨이브렛 필터 뱅크를 사용하는 이산 웨이브렛 변환의 가장 중요한 장점중의 하나는 down-sampling을 통해서 얻어지는 낮은 연산량이므로 보다 신속하게 처리 할 수 있다.

3.3 Voltage Sag 모델링

다음 그림 1은 본 논문에서 모의한 모델 계통이다. IEEE 배전계통 13모선이 고, 115[kV]의 전원을 가지고 용량은 1100[MVA]이다[15].

Bus 92와 Bus 75 구간은 3상 지중 케이블이고, Bus 84와 Bus 52 구간은 단상 지중 케이블이며, 나머지 구간은 가공 선로이다. 그림 1의 모델 계통도를 이용하여 지속시간과 크기가 다른 총 20가지의 Voltage Sag를 EMTP를 이용하여 모의하였으며, 데이터는 Bus 71에서 취득하였다. 샘플링 주파수는 3840[Hz], 즉 한 주기당 64 샘플로 샘플링 하였고, 총 모의 시간은 500[ms]이다.

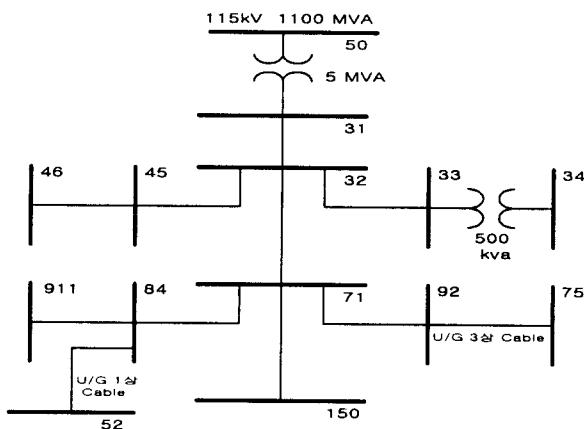


그림 1 모델 계통

Fig. 1 Model system

3.4 Voltage Sag 검출 기법

본 논문에서 사용된 Voltage Sag 검출의 전체적인 흐름은 EMTP에서 모의한 3상 전압을 입력으로 받아, 16 bit A/D 변환을 거치고 저역통과 필터(Butterworth 2차)를 통과시키고, 필터링된 신호를 STFT와 전압의 RMS, 웨이브렛 변환 등 3가지 검출 알고리듬에 적용하여 Voltage Sag 검출 능력을 비교하였다.

3.4.1 STFT를 이용한 Voltage Sag 검출 알고리듬

다음 그림 2는 STFT를 이용한 Voltage Sag 검출 알고리듬이다.

기본주파수(60[Hz]) 성분을 포함하는 전압을 이용하여 i 번째 전압값이 c보다 작게 되면 그 때의 시간을 T1이라고 저장한다. i+1번째부터 다시 입력을 받아 들여 전압 값이 c보다 크게 되면 그때의 시간을 T2라고 저장하고 T2와 T1의 차이를 계산하여 조건에 만족되면 T1과 T2의 시간과 지속시간을 출력하게 되며 Voltage Sag 검출을 종료한다. 여

기서, c 는 상수로서 기본주파수를 포함하는 전압의 최대 값을 이용하여 결정되며, 적용 시스템에 의존한다.

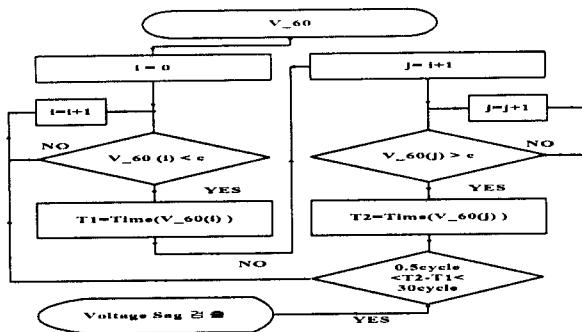


그림 2 STFT를 이용한 검출 알고리듬

Fig. 2 Detection Algorithm using STFT

3.4.2 전압의 RMS를 이용한 Voltage Sag 검출 알고리듬

다음 그림 3은 전압의 RMS를 이용한 Voltage Sag 검출 알고리듬이다.

전압을 입력으로 받아 1주기씩 전압의 RMS를 구한다. 여기서, 주기는 한 주기를 64 샘플링 하였으므로 $T=64$ 이다. Moving window를 사용하여 한 샘플씩 이동하면서 전압의 RMS를 구하게 된다. 만약, $V_{RMS}(i)$ 가 0.9[pu]보다 작게 되면 그때의 시간 $T1$ 을 저장하고, ($i+1$)번째 샘플, 즉 j 번째 샘플부터 한 주기씩 전압의 RMS를 구하게 되며, $V_{RMS}(j)$ 가 0.9[pu]보다 큰 값이면 조건을 만족할 때까지 계속 반복 수행한다. 앞의 조건에서 만족되면, 두 번째 $V_{RMS}(j)$ 가 0.9[pu]보다 크게 되면 그 때의 시간을 $T2$ 라고 저장한다. $T2$ 와 $T1$ 의 차이, 즉 Voltage Sag 지속 시간이 조건에 만족하면 Voltage Sag 검출이라는 메시지와 $T1$, $T2$ 시간과 지속시간을 화면에 출력하고, 그렇지 않으면 다시 새 입력을 받게 된다.

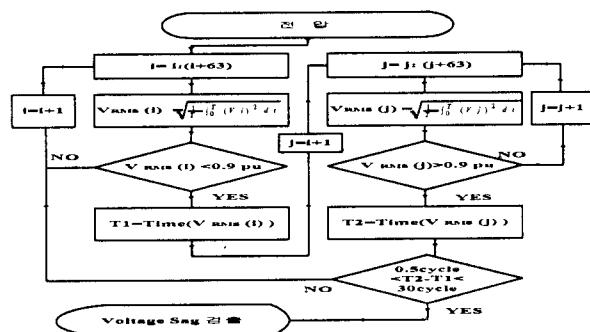


그림 3 전압의 RMS를 이용한 검출 알고리듬

Fig. 3 Detection algorithm using RMS voltage

3.4.3 웨이브렛 변환을 이용한 Voltage Sag 검출 알고리듬

다음 그림 4는 웨이브렛 변환을 이용하여 Voltage Sag를

검출하는 알고리듬이며, $T=64$ 이다. 입력은 Butterworth 2차 필터를 통과한 전압이 사용되어지고 db4 (Daubechies 4) 웨이브렛을 이용하여 1단계 분석을 수행한다. 1단계 분석을 하면 고주파수 영역(d1)과 저주파수 영역(a1)이 얻어지며, d1에서 계수의 최대 값과 두 번째 최대 값을 정하고, 각각 대응하는 시간($t1, t2$)을 계산한다. 최대 값을 구하고 두 번째 최대 값을 구할 때 최대 값을 가지는 지역에서 d1 계수 값의 중첩을 막기 위해서 5 샘플 정도의 값을 제외시켰다. db4 웨이브렛은 순간적으로 변화하는 과도현상이 나타날 때 높은 계수 값을 나타내므로 Voltage Sag가 발생하는 점과 끝나는 점에서 최대 계수 값을 가지게 된다. $t1$ 과 $t2$ 의 차이가 Voltage Sag의 지속시간이므로, 지속시간이 0.5~30[Cycle] 내에 만족하면 다음 단계를 수행하고 만족하지 않으면 다시 입력을 받게 된다. 지속시간이 조건을 만족하면 a1 계수들의 RMS_a1을 구한다. RMS_a1이 0.1~0.9[pu]를 만족하면 Voltage Sag는 검출되고 $T1$ 과 $T2$ 및 지속시간을 화면에 출력하고, 그렇지 않으면 다시 입력을 받아 웨이브렛 변환을 재 수행한다.

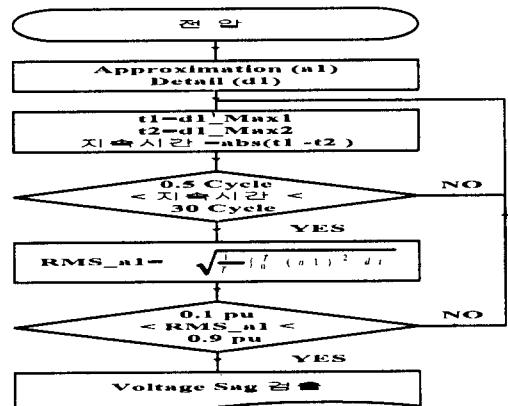


그림 4 웨이브렛 변환을 이용한 검출 알고리듬

Fig. 4 Detection algorithm using wavelet transform

4. 결과 및 고찰

4.1 STFT를 이용한 Voltage Sag 검출 결과

그림 5, 그림 6은 Voltage Sag가 발생한 외란을 STFT한 것이다. 그림 5 (a)는 기본주파수를 포함한 전압 변동을 나타내고, 그림 5 (b)는 3고조파 성분의 전압 변동, 그림 5 (c)는 5고조파 성분의 전압 변동, 그림 5 (d)는 7고조파 성분의 전압 변동을 나타낸다.

또한, 그림 6 (a)는 직류 성분, 그림 6 (b)는 2고조파 성분, 그림 6 (c)는 4고조파 성분, 그림 6 (d)는 6고조파 성분을 포함한 전압 변동을 보여주고 있다.

STFT를 이용한 검출 알고리듬에서는 기본주파수의 전압 변동을 이용하였다. 왜냐하면, 직류성분이나 다른 고조파 성분들의 전압 변동 값이 일정한 규칙이 없었고, 기본파 성분의 전압변동은 3.625로 일정한 값을 유지하였다.

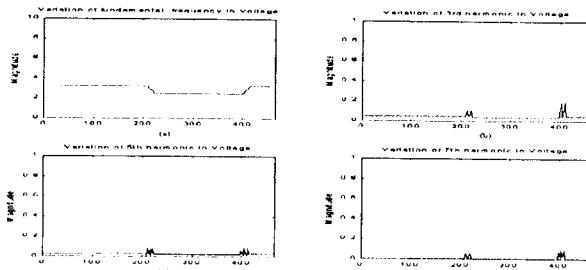


그림 5 기본주파수와 홀수고조파의 전압 변동

Fig. 5 Voltage variation of fundamental and odd harmonic components

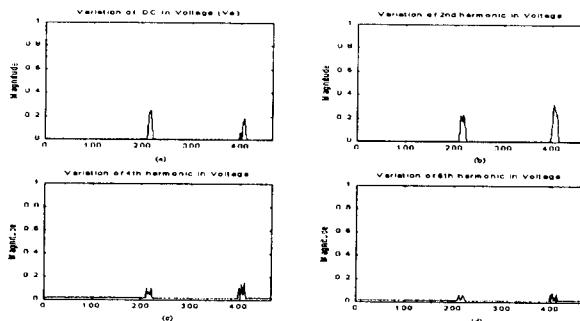


그림 6 직류성분과 짝수고조파의 전압 변동

Fig. 6 Voltage variation of dc and even harmonic components

표 2 STFT를 이용한 검출 결과

Table 2 Detection results using STFT

경우	발생 시간		소멸 시간		지속 시간 [cycle]
	시간 추정 [ms]	오차 [cycle]	시간 추정 [ms]	오차 [cycle]	
1	298.6405	0.1345	439.1159	0.0638	8.429
2	196.6657	0.0687	330.8979	0.0419	8.054
3	94.6909	0.0498	404.7775	0.0287	18.605
4	121.7454	0.0195	222.6796	0.0539	6.056
5	176.8950	0.0681	364.1957	0.1365	11.238
6	331.9384	0.0575	428.7103	0.0918	5.806
7	232.0447	0.0543	428.7103	0.0918	11.800
8	190.4233	0.0374	422.4670	0.0760	13.923
9	143.5972	0.0514	405.8180	0.0755	15.733
10	194.5846	0.0531	313.2083	0.0413	7.117
11	73.8797	0.0029	247.6531	0.1328	10.426
12	144.6377	0.0359	396.4530	0.0596	15.109
13	224.7608	0.0229	372.5202	0.0744	8.866
14	130.0699	0.0510	404.7775	0.0755	16.482
15	260.1398	0.0864	392.2908	0.0595	7.929
16	281.9915	0.0403	445.3593	0.0456	9.802
17	211.2335	0.0692	414.1425	0.0914	12.175
18	258.0587	0.0863	353.7901	0.0894	5.744
19	161.2867	0.0520	444.3187	0.1702	16.982
20	238.2880	0.0233	352.7495	0.1518	6.868
	평균 오차	0.0532 [cycle]	평균 오차	0.0826 [cycle]	

표 2는 STFT를 이용한 검출 결과를 보여주고 있다. 표 2에서 알 수 있는 바와 같이 STFT를 이용하여 검출 알고리듬에 적용한 결과 모든 외란에 대해 모두 검출 가능하였

다. 발생시간 추정 오차는 평균 0.0532[cycle]이고, 소멸시간 추정 오차는 평균 0.0826[cycle]이다.

4.2 전압의 RMS 이용한 Voltage Sag 검출 결과

다음 그림 7은 전압과 전압의 RMS 변동을 나타내며, 그림 7(a)는 전압 파형이고, 그림 7(b)는 전압의 RMS 변동이다. 그림 7에서 Voltage Sag의 발생시간 추정결과는 221.0938 [ms]이고, 발생시간 추정 오차는 약 0.624[cycle]이었다. 소멸시간 추정결과는 420.8333[ms]이고, 소멸시간 추정 오차는 약 0.381[cycle]이며, Voltage Sag의 지속 시간은 약 11.984[cycle]이다.

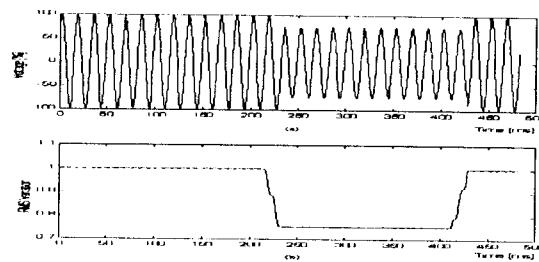


그림 7 순시전압과 RMS 전압의 변화

Fig. 7 Variation of the instantaneous voltage and RMS voltage

다음 표 3은 전압의 RMS를 이용하여 Voltage Sag 검출 결과이다. Voltage Sag의 발생시간 추정 결과, 소멸시간 추정 결과, 오차, 지속시간 등을 나타내고 있다. 발생시간의 추정은 평균 0.3307[cycle]오차를 나타내고, 소멸시간 추정은 평균 0.1887[cycle]오차를 나타낸다.

표 3 전압의 RMS를 이용한 검출 결과

Table 3 Detection results using RMS voltage

경우	발생 시간		소멸 시간		지속 시간 [cycle]
	시간 추정 [ms]	오차 [cycle]	시간 추정 [ms]	오차 [cycle]	
1	302.3438	0.3566	435.9375	0.2546	9.000
2	202.3438	0.4094	326.8229	0.2026	18.473
3	110.1563	0.9778	392.9688	0.6799	17.953
4	127.0833	0.3398	218.7500	0.1818	6.484
5	178.6458	0.1731	360.6771	0.0746	11.906
6	335.4167	0.2662	426.5625	0.0371	6.453
7	237.5000	0.3816	420.8333	0.3808	11.984
8	193.4896	0.2214	419.5313	0.1001	14.547
9	145.5729	0.1699	402.8646	0.1017	16.422
10	200.5208	0.4092	310.6771	0.1106	7.594
11	76.5625	0.2102	244.0104	0.0858	11.031
12	152.0833	0.4826	392.4479	0.1807	15.406
13	227.3438	0.1778	369.2708	0.1205	9.500
14	134.8958	0.3405	402.3438	0.0706	17.031
15	261.7188	0.1811	386.7188	0.2749	8.484
16	285.9375	0.2770	443.2292	0.0823	10.422
17	213.5417	0.2077	410.9375	0.1009	12.828
18	261.7188	0.3059	349.7396	0.1536	6.266
19	166.9271	0.3904	436.7188	0.2856	17.172
20	243.4896	0.3354	345.3125	0.2945	7.094
	평균 오차	0.3307 [cycle]	평균 오차	0.1887 [cycle]	

4.3 웨이브렛 이용한 Voltage Sag 검출 결과

그림 8은 db4 웨이브렛을 이용한 4단계까지 분해시 웨이브렛 변환 결과를 보여준다. 그림 8 (a)는 Butterworth 2차 필터를 통과한 전압 과형이고, 그림 8 (b)는 1단계 웨이브렛 변환을 수행하였을 때 a1 계수 값들을 나타내며, 그림 8 (c)는 d1 계수 값, 그림 8 (d)는 d2 계수 값, 그림 8 (e)는 d3 계수 값, 그림 8 (f)는 d4 계수 값들을 나타낸다.

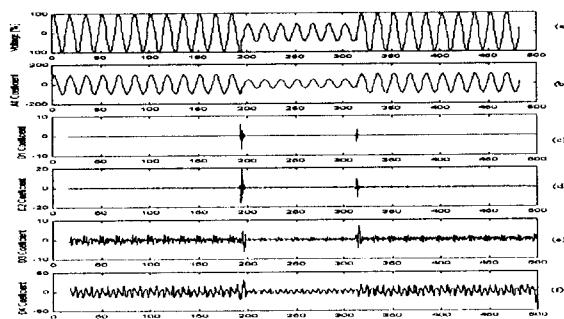


그림 8 db4 웨이브렛을 이용한 웨이브렛 변환 결과

Fig. 8 Results of the wavelet transform using db4 wavelet

표 4 웨이브렛 변환을 이용한 검출 결과

Table 4 Detection results using wavelet transform

경우	발생 시간		소멸 시간		a1 계수의 RMS [pu]	지속 시간 [cycle]
	시간추정 [ms]	오차 [cycle]	시간추정 [ms]	오차 [cycle]		
1	297.1354	0.0441	441.1458	0.0579	0.536	8.641
2	196.0938	0.0344	329.6875	0.0151	0.624	8.016
3	94.5313	0.0403	403.9063	0.0236	0.878	18.562
4	121.8750	0.0273	221.0938	0.0412	0.536	5.953
5	176.5625	0.0482	361.1979	0.0433	0.396	11.078
6	332.0313	0.0631	427.8154	0.0381	0.376	5.781
7	231.7708	0.0378	427.8154	0.0381	0.748	11.797
8	190.6250	0.0495	420.8333	0.0220	0.307	13.182
9	143.4896	0.0449	403.9063	0.0392	0.279	15.625
10	194.5313	0.0499	311.7188	0.0481	0.469	7.031
11	73.6979	0.0383	246.3542	0.0549	0.342	10.359
12	144.5313	0.0295	396.3542	0.0536	0.713	15.109
13	225.0000	0.0372	370.8333	0.0268	0.442	8.750
14	129.6875	0.0281	402.8646	0.0393	0.342	16.391
15	259.6354	0.0561	390.6250	0.0405	0.418	7.859
16	282.2917	0.0583	445.5729	0.0583	0.577	9.797
17	210.6771	0.0358	411.9792	0.0384	0.327	12.078
18	257.5521	0.0559	353.1250	0.0495	0.681	5.734
19	160.9375	0.0311	441.1458	0.0201	0.455	16.812
20	238.5417	0.0385	351.0417	0.0493	0.358	21.062
	평균 오차	0.0424 [cycle]	평균 오차	0.0361 [cycle]		

샘플링 주파수는 3840[Hz]이므로, d1 계수 값에서는 1920~960[Hz], d2 계수 값에서는 960~480[Hz], d3 계수 값에서는 480~240[Hz], d4 계수 값에서는 240~120[Hz]의 주파수 성분을 나타낸다. 본 논문에서 외란 발생시 고주파의 발생으로 검출이 용이한 d1 계수 값들을 이용하여 Voltage Sag 검출을 수행하였다. 그림 8 (c)에서 보는 바와 같이 Voltage

Sag가 발생하는 시점과 끝나는 시점에서 매우 높은 계수 값을 가짐을 알 수 있다.

표 4는 여러 가지 경우의 Voltage Sag가 발생했을 때 db4 웨이브렛을 이용한 검출 결과를 보여준다. 총 20가지 경우에 대해서 적용하였으며, 발생시간 추정 결과와 소멸시간 추정 결과, 오차를 나타내고 있다.

Daubechies 4(db4) 웨이브렛 변환을 이용한 Voltage Sag 검출은 총 20가지 경우에 대해서 모두 검출 가능하였고, 시작점 추정에서 평균 0.0424[cycle]의 오차를 나타내고 소멸시간 추정에서 평균 0.0361[cycle]의 오차를 보여주고 있다.

4.4 Voltage Sag 검출 결과 비교

다음 그림 9은 STFT, 전압의 RMS, 웨이브렛 변환 3가지 검출 방법을 이용한 결과 발생시간 추정 오차를 나타내고 있다.

db4 웨이브렛을 이용한 검출 방법은 전압의 RMS를 이용한 검출 방법보다 월등히 우수하였고, STFT와는 부분적으로 약간의 차이를 보여주고 있지만, 평균적으로 웨이브렛 변환을 이용한 검출 방법이 낮은 오차율을 보여주고 있다.

평균 오차는 전압의 RMS를 이용한 방법이 0.3307[cycle]이고, STFT를 이용한 방법은 0.0532[cycle], db4 웨이브렛을 이용한 방법은 0.0424[cycle]이다.

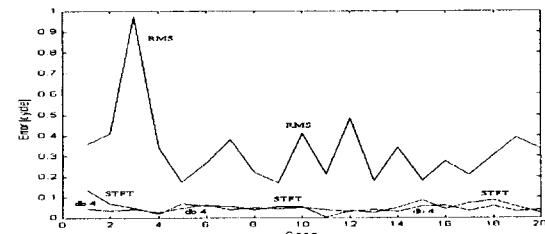


그림 9 발생시간 추정 오차

Fig. 9 Estimation error of starting time

그림 10은 STFT, 전압의 RMS, 웨이브렛 변환 3가지 검출 방법을 이용한 결과 소멸시간 추정 오차를 나타내고 있다.

전압의 RMS를 이용한 검출 방법은 한 가지 경우를 제외하고는 웨이브렛 변환을 이용한 방법보다 오차가 상당히 크고, STFT를 이용한 방법과는 부분적으로 우수하지만, 전체적으로는 큰 오차를 보여준다.

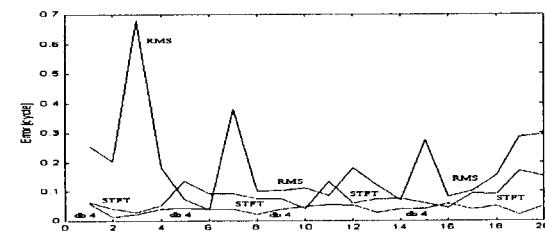


그림 10 소멸시간 추정 오차

Fig. 10 Estimation error of ending time

STFT와 db4 웨이브렛을 비교해 보면, db4 웨이브렛을 이용하여 웨이브렛 변환을 사용한 검출 방법이 2가지 경우를 제외하고는 낮은 오차를 보여주고 있다.

평균 오차는 전압의 RMS를 이용한 방법이 0.1887[cycle]이고, STFT를 이용한 방법은 0.0826[cycle], db4 웨이브렛을 이용한 방법은 0.0361[cycle]이다. 따라서, Voltage Sag의 발생시간 추정과 소멸시간 추정 모두 db4 웨이브렛을 이용한 검출 방법이 전압의 RMS와 STFT를 이용한 방법보다 우수한 결과를 보여주었다.

5. 결 론

전력품질 외란에 대해 전력회사, 부하기기 회사, 수용가의 관심이 증대되고 있다. 따라서, 최근 여러 가지 검출 방법이 제시되고 있다.

본 논문에서는 전력품질에 영향을 미치는 여러 가지 외란 중에서 가장 빈번히 발생하는 Voltage Sag를 EMTP를 이용하여 모의하였으며, 웨이브렛 변환을 이용한 검출 방법을 제시하였다.

기존 Voltage Sag의 검출 방법인 전압의 RMS를 이용한 방법과 신호 분석법의 하나인 STFT를 이용한 방법, 웨이브렛 변환을 이용한 방법, 총 3가지 검출 방법의 성능을 비교 분석하였다. 전압의 RMS를 이용한 방법은 전압의 RMS의 크기로 검출하였고, STFT를 이용한 방법은 직류 성분과 여러 고조파 성분들의 전압 변동 중에서 기본파 성분을 포함하는 전압의 크기로 검출 알고리듬을 수행하였으며, 웨이브렛 변환을 이용한 방법은 db4 마더 웨이브렛을 이용하여 1 단계 분석 수행 시 d1 계수 값을 이용하여 검출 알고리듬을 수행하였다. 그 결과 웨이브렛 변환을 이용한 방법이 우수한 결과를 보여 주었다.

추후 연구 목표는 Voltage Sag 이외의 전력품질에 영향을 미치는 다양한 외란에 대한 검출 알고리듬을 연구하고, 각각의 외란들을 종합적으로 검출 할 수 있는 알고리듬 개발이다. 또한, 외란 발생원인에 대한 분석과 대처 방법에 관한 연구가 요망된다.

참 고 문 헌

- [1] M. B. Hughes and J. S. Chan, "Canadian National Power Quality Survey", in 12th International Conference on Electricity Distribution, IEE Conference Publication No. 373, 1993.
- [2] Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, H. Wayne Beaty, "Electrical Power Systems Quality", McGraw-Hill.
- [3] Surya Santoso, Ir, "Application of Wavelet Transform Analysis to the Detection and Localization of Power Quality Disturbance", Thesis, The Univ. of Texas at Austin, August 1994.
- [4] 남상원, "특징벡터 결합과 신경회로망을 이용한 전력외란 자동식별", 기초전력공학공동연구소, 최종보고서, 1997.
- [5] Shyh-Jier Huang, Cheng-Tao Hsieh, Ching-Lien Huang, "Application of Mother Wavelets to Supervise

Power System Disturbance", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 14, No. 1, January 1999.

- [6] David C. Robertson, Octavia I. Camps, Jeffrey S. Mayer, William B. Gish, "Wavelet and Electro-magnetic Power System Transients", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, No. 2, pp. 1050-1058, April 1996.
- [7] Antony C. Parsons, "A Wavelet-Based Procedure for Automatically determining the Beginning and End of Transmission System of Voltage Sags", IEEE 0-7803-4403-0, pp.1310-1315, 1998.
- [8] S. Santoso, "Power Quality Disturbance Data Compression using Wavelet Transform Methods", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.12, No.3, pp.1250-1257 , July 1997.
- [9] Wilson E. Kazibwe, Musoke H. Sendaula, "Electrical Power Quality Control Techniques", Van Nostrand Reinhold.
- [10] J. Liu, P. Pillay, " An Insight into Power Quality Disturbance using Wavelet Transform Multiresolution Analysis", IEEE Power Engineering Review, Vol.19, No.9, pp. 59-60, September 1999.
- [11] N.S.D.Brito, " Daubechies Wavelets in Quality of Electrical Power", Proc. ICHQP98, pp.511-515, 1998.
- [12] IEEE 1159, "Recommended Practice on Monitoring Electric Power Quality", Draft 6, December 1994.
- [13] M. Misiti, G. Oppenheim, "Wavelet Toolbox", The MATH WORKS Inc. 1996.
- [14] C. Sidney Burrus, Ramesh A. Gopinath, HaitaoGuo, "Introduction to Wavelets and Wavelet Transform", Prenticehall, 1998.
- [15] A. Bonner, "Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, January 1996, pp. 466-474.

저 자 소 개



김 철 환 (金 喆 煥)

1961년 1월 16일생. 1982년 성균관대 전기
공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학
과 졸업(공박). 현재 성균관대 전기 전자
및 컴퓨터공학부 교수

Tel : 031-290-7124, Fax : 031-290-7955
E-mail : chkim@yurim.skku.ac.kr



고 영 훈 (高 榮勳)

1975년 7월 7일생. 1998년 성균관대 전기
공학과 졸업. 2000년 동 대학교 대학원 전
기 전자 및 컴퓨터공학과 졸업(석사). 현
재 대우통신 R&D Center 연구원.

Tel : 031-789-6576, Fax : 031-789-6569
E-mail : yhko@i.dwt.co.kr