

웨이브렛 변환을 이용한 전력품질 신호 압축

정영식, 김철
인천대학교 전기공학과

Wavelet Transform Based Compression of Power Quality Signal

Young-Sik Chung, Cheol Kim

Dept. of Electrical Engineering, University of Incheon

Abstract - The choice of threshold is an important in the compression algorithms. It plays a major role in the removal of coefficients which are not preserved the important features. In this paper two threshold method, hard threshold(HTH) and soft threshold (STH) are applied to the suggested wavelet based compression algorithm of power quality signal and compared the compression ratio and NMSE. The simulation results show that STH is better than HTH.

1. 서 론

전력품질 및 전력모니터링이 요구되는 모든 분야에서 현재 제기되고 있는 데이터 저장 및 데이터 전송 문제는 처리할 데이터의 양이 매우 크기 때문이다. 따라서 데이터를 압축하고 데이터를 저장하는 방법이 요구되고 있으며, 다양한 방법들이 제시되어 왔다. 지금까지 사용된 전력품질 모니터링 및 압축 해법으로 디지털 신호처리 및 인공지능 기법을 사용하여 전력품질 외란의 분류, 검출 및 압축들에 적용하였다. 이들 방법들은 주로 모니터링된 신호의 스펙트럼 분석을 주로 하여, 전력품질 지수를 측정하였다. 또한 디지털 기법은 전력시스템 관점에서 외란들을 식별하고 검출하는데 적용되어 왔으며, 긍정적인 결과들을 보여주었다.

스펙트럼 해석에는 푸리에 해석을 주로 사용하였으며, 모든 시간 구간에 존재하는 주파수 성분들을 정확하게 집어낼 수 있어, 정상상태 전력신호(stationary power signal)에는 매우 강력한 해석 기법이라고 할 수 있다. 그러나 푸리에 해석의 가장 큰 단점 중의 하나는 주파수 영역으로 변환시 시간 정보를 잃어버린다는 것이다. 즉, 어떤 시간대에 어떤 주파수가 존재하는지 알지 못한다. 주파수 변환시 특정 외란이 어느 곳에서 발생하는지 알지 못하는 것이다. 대부분의 전력품질 신호들은 다양한 외란들과 과도특성들이 내포되어 있는 비정상신호(non-stationary signal)이므로 푸리에 해석을 적용하는데 어려움이 있다. 이러한 어려움을 극복하기 위해 Dennis Gabor는 신호에 윈도우(windowing)을 하는 기법을 적용하여 신호를 윈도우 함수를 통해 얻은 작은 부분들에 푸리에 해석을 하는 STFT(short-time fourier transform)을 제안하였다. 이 방법은 신호를 시간과 주파수의 2차원 함수로 나타내어 신호의 시간과 주파수 사이의 관계를 알 수 있게 하였다. 이 방법은 신호의 외란들이 언제 어떤 주파수를 갖고 발생하는지에 대한 정보를 제공하지만, 정확도에 한계를 갖고 있으며, 이 한계는 윈도우 함수의 크기에 달려있다. STFT는 시간과 주파수 정보를 제공하지만, 일단 윈도우의 크기가 정해지면 모

든 주파수에 동일하게 적용이 된다. 이러한 단점을 극복하기 위해 웨이브렛 해석(wavelet analysis)이 제안되었으며, 전력품질 신호의 외란 식별 및 검출, 압축에 활발하게 적용이 되고 있으며, 좋은 결과들을 보여주고 있다. 웨이브렛 해석은 다양한 크기의 윈도우를 사용하는 것으로 생각할 수 있다. 낮은 주파수 정보를 얻기 위해서는 시간영역에서 긴 창을 사용하고 높은 주파수 정보를 얻기 위해서는 짧은 창을 사용한다. 웨이브렛 해석에서는 시간-주파수를 사용하기 보다는 시간-스케일을 사용한다.

본 논문에서는 이산 웨이브렛 변환(DWT, discrete wavelet transform)을 사용하여 전력품질 신호를 압축하는 알고리즘을 제안한다. 웨이브렛을 근간으로 하는 압축 알고리즘은 압축하는 과정에 원래 신호의 일부분을 잃어버리는 손실 압축이지만 상당히 높은 압축율을 얻을 수 있다. 물론 손실이 없는 압축도 가능하지만 상대적으로 압축률이 작아진다. 손실 압축(lossy compression)은 외란 신호의 중요하지 않는 특성들은 제거하고 중요한 특성들만을 저장하여 적절한 오차 수준을 유지하는 방법이다.

전력품질 신호는 정현파에 다양한 외란들이 중첩되어 있는 신호로 해석할 수 있다. 따라서 전력품질 신호는 정상상태 성분과 비정상상태 신호로 분리하여 처리한다면 효율적으로 압축을 시도할 수 있다. 신호처리 알고리즘 중의 하나인 분리(split)-합성(merge)은 복잡한 문제를 일정한 수의 부집단으로 분해하여 처리한 후 다시 합치는 방법이다. 각 부집단은 상대적으로 덜 복잡한 독립된 문제로 표현될 수 있으며, 더 쉽게 문제 해결에 접근할 수 있게 된다. 각 부집단에서 처리된 결과들을 다시 통합하여 원하는 결과를 얻는 방식이다.

본 논문에서는 전력품질 신호를 정상상태 신호와 비정상상태 신호로 분리하여 각각의 신호에 대해 부호화 또는 압축을 시도하여 저장 또는 전송을 한다. 손실 압축시 적용되는 문턱값(threshold value)은 압축률과 복구시 발생하는 왜곡의 정도에 크게 영향을 미치는 요소이다. 본 논문에서는 전력품질 신호에 적용할 수 있는 효율적인 문턱값 적용에 대해 알아본다.

2. 유사정상상태 신호 분리

모니터를 통해 얻은 전력품질 신호는 과도성분과 정상상태 성분이 중첩되어 있는 신호로 모델화할 수 있다. 임펄스 과도성분(impulsive transient)은 정상상태 전압 또는 전류에서 급작스러운 변화를 일으키는 것으로 발생 기간은 마이크로 초 동안 발생한다. 대부분의 경우 임펄스 성분의 발생 원인이 번개이다. 스위칭 과도현상은 스

위칭 현상이 발생될 때 전압 또는 전류의 급격한 변화 요인이 된다. 정상상태는 두 부류로 분리할 수 있다. 하나는 짧은 기간 동안의 변화이며, 다른 하나는 긴 기간 동안의 변화이다. 짧은 기간의 정상상태 성분에 해당되는 외란은 상승(swell) 또는 강하(drop) 등이 있다. 강하는 몇 사이클 동안 0.1 pu에서 0.9 pu 정도로 값이 떨어지는 것이며, 상승은 1.1 pu에서 1. pu 사이에서 값이 상승하는 것을 의미한다. 긴 기간의 변화에 해당되는 외란은 1분 이상 발생하는 현상을 전압 상승 또는 전압강하 등을 의미한다고 할 수 있다. 전력품질 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y(n) = f(n) + s(n) + t(n) + v(n) \quad (1)$$

여기서 $y(n)$ 은 모니터링 신호, $f(n)$ 은 기본파, $s(n)$ 은 정상상태 외란성분, $t(n)$ 은 과도성분 그리고 $v(n)$ 은 잡음 성분으로 독립적이고 동일하게 분포(i.i.d.)된 정규분포 $N(0, \sigma^2)$ 이다. 이 성분들 이외에 다양한 현상들을 더 부가할 수 있다. 정현파 전력신호는 다음과 같다.

$$f(n) = V_m \sin(\omega n + \theta^\circ) \quad (2)$$

식 (1)로부터 정현파 전력신호 (2)를 추출해 낼 수 있다면 전력신호의 크기, 주파수 및 위상의 값으로부터 전력신호를 생성할 수 있으며, 나머지 신호들만을 압축을 하여 보낸다면 상대적으로 매우 적은 양으로 신호를 나타낼 수 있을 것이다. 따라서 식 (1)을 전력신호와 외란들이 포함된 두 성분의 신호로 분리할 수 있다. 즉,

$$y(n) = f(n) + e(n) \quad (3)$$

여기서

$$e(n) = s(n) + t(n) + v(n) \quad (4)$$

식 (1)에서 전력신호 성분을 추출하는 방법은 참오문헌 [2]에서 제시한 방법을 사용한다. 이 방법은 정현파 전력신호를 추정하여 유사정상상태 신호 $\tilde{f}(n)$ 를 얻으며 모니터링 신호 $y(n)$ 에서 제거하여 전력신호 추정에서 발생하는 오차와 외란들이 포함된 신호 $\tilde{e}(n)$ 을 얻는다. 이 방법은 split-merge 알고리즘을 적용한 것으로 다양한 성분들이 포함된 전력품질 신호를 분리(split)하여 부신호(sub-signal)들을 만들어 각각에 대해 적절한 알고리즘을 적용하여 얻은 결과들을 통합(merge)하여 원하는 결과를 얻는 것이다. 여기서는 유사정상상태 신호 $\tilde{f}(n)$ 와 나머지 신호 $\tilde{e}(n)$ 으로 분리하여 각각에 대해 압축을 시도한다.

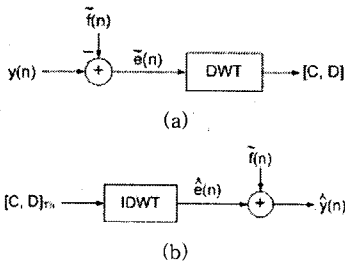


그림 1. (a) 비정상신호 분리(split) 및 DWT 적용
(b) 역DWT 적용 및 통합(merge)

3. 전력품질 신호 압축

데이터 압축의 기본적인 목적은 신호가 갖고 있는 중복된 정보들을 제거하여 신호 정보를 표현하는데 필요한 데이터수를 줄이는 것이다. 변환(transformation)을 사용한 압축은 재구성시 발생하는 오차를 적절한 수준으로 유지하면서 가장 중요한 특징을 보이는 값들은 보존하고

상대적으로 덜 중요한 값들을 제거하는 것이다. 즉, 특정 문턱값을 넘어서는 신호의 중요한 특성들을 나타내는 진폭이 큰 값들이나 계수들은 보존하고 문턱값보다 낮은 값들이나 계수들은 0으로 한다. 그러므로 이러한 0의 값들이 많을수록 더 큰 압축을 이룰 수가 있다.

전력품질 신호는 일반적으로 기본파와 외란들이 중첩되어 있어 고주파수 성분들이 비교적 많이 존재한다. 따라서 분리 알고리즘을 적용하여 기본파와 유사한 정상상태 신호와 외란신호로 분리하여 각각에 대해 필요한 정보를 추출하여 전력품질을 나타내는데 필요한 데이터수를 상당히 줄일 수 있다. 유사정상상태 신호 $\tilde{f}(n)$ 는 기본적으로 정현파라는 가정 아래 크기와 위상, 주파수 값을 알 수 있다면 이 값들로부터 간단하게 구할 수 있다. 유사정상상태 신호가 제거된 나머지 신호는 비정상상태 신호 $\tilde{e}(n)$ 이다. 이 비정상상태 신호 $\tilde{e}(n)$ 에 DWT의 적용 알고리즘인 다해상도 분해(multi-resolution analysis, MRA)를 적용한다. 비정상상태 신호에서 외란에 관련된 DWT 계수 $[C; D]$ 들은 발생되지 않은 부분의 계수들보다 상대적으로 매우 크며, sparse한 성질 때문에 음성 특성 나타나는 특징을 보인다. 따라서 외란에 대한 정보를 갖고 있는 계수들은 보유하고 나머지 계수들은 제거하여 전체적으로 계수의 수를 급격히 줄이는 방법으로 문턱 값이 적용된 계수 $[C; D]_{Th}$ 를 얻는다. 이때 문턱 값을 어떻게 적용하는가에 따라 압축율에도 영향을 미치며, 압축후 복구된 신호와 원래의 신호 사이에 발생하는 오차에도 커다란 영향을 미치게 된다.

다해상도 분해에 문턱값을 적용하는 방법으로 크게 두가지로, 전역문턱 값(global threshold)과 지역문턱 값(local threshold) 방법이다. 전역문턱 값은 웨이블릿 계수들 전체에서 문턱 값을 구해 적용하는 방법으로 하나의 문턱 값만 존재하며, 지역문턱 값은 각 분해 단계에서 적절한 문턱 값을 적용하여 처리하는 방법으로 분해 단계 수만큼의 문턱 값들이 존재한다. 본 논문에서는 지역문턱 값을 사용한다. 문턱 값을 적용하는 다양한 방법들이 제안되고 있으며, 본 논문에서 보편적으로 사용되는 2가지 문턱 값 적용 방법 hard threshold와 soft threshold를 비교 검토한다.

• Hard threshold:

$$x_m(n) = \begin{cases} x(n) & |x(n)| \geq \lambda \\ 0 & |x(n)| < \lambda \end{cases} \quad (5)$$

• Soft threshold:

$$x_m(n) = \begin{cases} \text{sgn}\{x(n)\} \cdot (|x(n)| - \lambda) & |x(n)| \geq \lambda \\ 0 & |x(n)| < \lambda \end{cases} \quad (6)$$

여기서 $x_{Th}(n)$ 은 $x(n)$ 을 문턱 값을 적용한 값이며, λ 는 문턱 값이다.

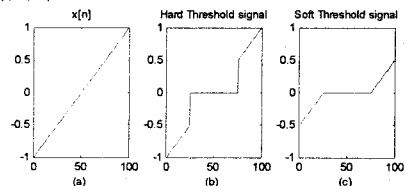


그림 2. (a) 원래신호 (b) hard threshold를 적용한 신호 (c) soft threshold를 적용한 신호

그림 2는 입력 신호 $x(n)$ 에 문턱 값을 $\lambda = 0.5$ 로 하였을 경우에 나타나는 hard threshold(HTH)와 soft threshold(STH) 결과를 보여준다. 다해상도 해석에서 문턱 값 λ 의 선택은 각 단계에 따라 달라지며 다음 식을 적용하여 얻는다.

$$\lambda_n = (1 - \mu) \max\{|d_n|\} \quad (7)$$

여기서 d_n 은 n-번째 단계의 계수를 나타내며, μ 는 문턱 값 인수로 $0 \leq \mu \leq 1$ 의 값을 갖는다. 만약 $\mu = 0.8$ 이면 문턱 값은 d_n 의 절대 값에 20%에 해당된다. 가우스 분포를 갖는 백색잡음의 존재하는 경우 잡음의 크기를 고려한 문턱 값으로 보정 인수를 문턱 값에 곱하여 사용한다.

$$\sigma_n = \frac{MAD\{d_n\}}{0.6745} \quad (8)$$

여기서 MAD는 median absolute deviation이며, 0.6745는 가우스 분포 갖도록 하기 위한 값이다.

4. 모의실험

현재 사용되는 전력품질 모니터들은 60[Hz] 전력에서 한 사이클 당 256 샘플들을 갖고 있다. 이 샘플링은 높은 주파수의 과도현상들을 모두 얻기 힘들지만, 데이터 저장 및 전송을 위해서 이 샘플링의 한계를 갖고 있다. 모의실험에 사용되는 신호는 모의실험에 사용되는 전력 품질 신호에는 자주 발생하는 외란들이 전압강하(sag), 전압상승(swell)과 커패시터 스위칭 현상들을 정현과 정상신호에 중첩해 놓았다. 이 신호에 백색잡음을 가해 그림 3과 같은 파형의 matlab 프로그램을 사용하여 만들었다. 웨이블릿 계수는 웨이블릿 모함수 Daubechies 4를 사용하였다.

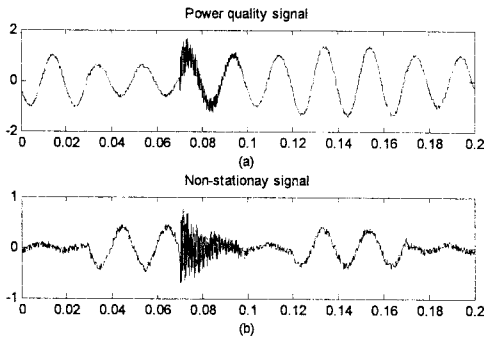


그림 3. (a) 모의실험에 사용된 전력품질 신호 (b) 유사 정상 상태 신호를 제거한 비정상상태 신호

비정상상태 신호에 다해상도 해석을 적용하여 구한 웨이블릿 계수 [C, D]에 두 가지 문턱 값 방법을 적용하여 압축율과 정규화된 평균제곱오차(normalized mean square error, NMSE)의 값을 비교하였다. 압축율은 전체 계수들과 0의 값을 갖는 계수들의 비로 영비율이 60%라면 40%의 계수들만을 사용하여 원래의 신호를 복구할 수 있음을 의미한다. 평균제곱오차가 작을수록 복구된 신호가 원래의 신호와 더 근접함을 나타낸다. 높은 압축률과 작은 평균제곱오차를 갖는 것이 바람직하겠지만, 이 둘을 동시에 얻기가 힘들다. 응용에 따라 두 척도를 적절하게 사용한다. 그림 (4)는 HTH를 적용한 것이며, 그림 (5)는 STH를 적용한 것이다. 두 방법 모두 동일한 문턱 값 $\mu = 0.3$ 을 적용하였다. 두 방법 모두 상당히 작은 제곱평균값으로 HTH는 5.1×10^{-3} 이며, STH는 2.9×10^{-3} 이다. 압축오차 신호를 보면 STH가 HTH보다 오차 신호가 더 균등하며 커패시터 스위칭 현상이 발생한 곳의 오차가 더 작으며 상대적으로 균등함을 볼 수 있다. 영압축률은 HTH가 56.2%이며 STH가 51%로 HTH가 조금 높지만 상대적으로 제곱평균값이 떨어진다.

다. 두 알고리즘 모두 전력신호에 포함된 백색잡음을 제거하고 있음을 볼 수 있으며, 전력품질 신호의 외란들을 잘 보유하고 있다.

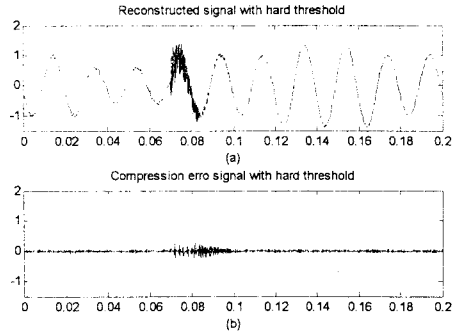


그림 4. Hard threshold 적용 (a) 복구 신호 (b) 오차신호

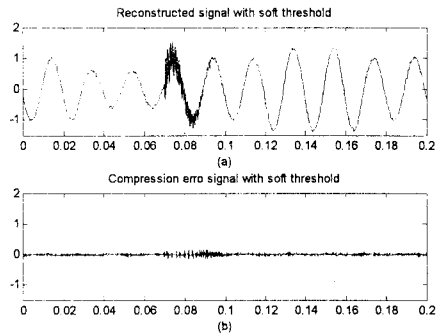


그림 5. Soft threshold 적용 (a) 복구 신호 (b) 오차신호

5. 결 론

본 논문에서는 split-merge 알고리즘을 적용하여 유사정상상태 신호와 비정상상태 신호로 분리하여 비정상상태 신호에 다해상도 해석을 적용한 압축에 문턱값 적용 방법에 따른 압축률과 제곱평균값을 비교 검토하였다. Hard threshold와 soft threshold 방법에서 원래의 신호에 HTH 방법이 더 근접했지만 압축률에서 STH 방법이 다소 높은 것으로 나타났다. 백색잡음이 많이 포함된 경우에는 STH 방법이 더 잡음을 잘 제거하면서 신호를 표현하는데 필요한 데이터를 잘 보유하고 있음을 볼 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] C. A. Duque, M. V. Ribeiro, F. R. Ramos, and J. Szczupak, "Power quality event detection based on the divide and conquer principle and innovation concept," IEEE Trans, Power Del., vol. 20, no. 4, pp. 2361-2369, Oct. 2005.
- [2] 정영식, "웨이블릿 변환을 이용한 전력품질 데이터 압축에 관한 연구," 전기학회논문집, 54권 12호, pp.561-566, 2005.
- [3] M. V. Ribeiro, C. A. Duque, and J. M. T. Romano, "An improved method for signal processing and compression in power quality evaluation," IEEE Trans, Power Del., vol. 19, no. 2, pp. 464-471, Apr. 2004.
- [4] S. Santos, W. M. Grady, E. J. Powers, J. Lamoore, and S. C. Bhatt, "Characterization of distribution power quality events with fourier and wavelet transform," IEEE Trans, Power Del., vol. 15, no. 1, pp. 247-254, Jan. 2000.