

정상신호의 위상 추정을 이용한 전력 품질 왜곡 신호의 압축에 관한 연구

정영식, 박찬웅
인천대학교 전기공학과

A Study of the Compression for the Power Quality Disturbance Signal by using the Phase Estimation of Stationary Signal

Young-Sik Chung, Chan-Woong Park
University of Incheon, Dept. of Electrical Engineering

Abstract - This paper introduces a compression algorithm for power quality disturbance signal via the discrete wavelet transform, DWT. Algorithm to estimate a time delay from the power quality disturbance signal is proposed. Pseudo-stationary signal is constructed from the estimated time delay. A difference signal or nonstationary signal is obtained by removing a pseudo-stationary signal from a disturbance signal. DWT is applied to a difference signal. The threshold is applied to reduce a number of coefficients. Simulation results show the reasonable compression ratio while keep low signal distortion.

1. 서 론

전력공급자는 전력 산업의 구조개편에 따라 공급 전력의 품질이 전력 공급 회사를 평가하는 중요한 기준으로 사용됨에 따라 전력품질 오염의 원인 파악과 책임규명을 중요시하게 되었다. 이에 따라, 전력품질을 개선시키려는 노력과 더불어 이를 감지할 수 있는 시스템의 개발의 필요성이 요구된다. 전력 소비자 측에 발생한 경제적 손실이나 전력계통 장애에서 발생한 어떤 전기적 장애에 대한 기록데이터로부터 장애요인을 분석하는데 사용되며, 일반적으로 사고 발생 후 분석이 이루어진다. 따라서 중앙 모니터 센터에 신호들을 전송하고, 추후 분석을 하기 위해서는 데이터를 저장할 필요가 있다. 디지털 장애기록기는 전력시스템의 주요 위치에 연결되어 전압 및 전류를 모니터하여 장애가 발생하면 기록 저장하여 데이터를 통신채널을 통해 중앙에 전송된다. 이때 발생되는 데이터양이 방대하여 전송 또는 저장에 어려움이 존재하며 또한 적절한 시간 내에 문제를 분석하고 문제를 경감시킬 수 있는 해법을 열기가 쉽지 않게 되었다. 따라서 전송 및 저장의 효율성을 높이기 위한 데이터 압축방법에 많은 관심을 갖게 되었다.

과도장애를 발생시킨 전력신호에 대한 압축 방법으로 웨이브렛 변환을 사용한 알고리듬들이 최근에 다수 발표되었다. 이산 웨이브렛 변환(DWT)은 신호의 특성을 보존하면서 중복되는 부분을 제거함으로서 높은 압축효과를 얻을 수 있으므로 데이터 압축에 많이 활용된다. 정상신호의 기본 정보들을 추정하고 그 정보들로부터 얻은 유사 정상신호를 전력품질 왜곡 신호에서 제거하면 노이즈 성분만을 가진 비정상 신호를 얻게 된다. 이 신호는 sparse한 성질로 인해 대부분의 값이 0에 근접한 값을 가지며 왜곡 정보에서 비교적 큰 값을 나타낸다. 이 비정상 신호만을 DWT에 적용하여 압축하여 전송 또는 저장함으로서 전력품질 왜곡 데이터의 압축을 이를 수 있다. 본 연구에서는 전력품질 왜곡 신호의 정상상태 신호를 추정하여 왜곡성분의 신호에 대해 DWT를 적용하는 데이터 압축 알고리듬을 제안한다.

2. 유사정상신호 추정

정상상태 전력신호는 정현파로 기본주파수와 일정한 진폭을 갖는 신호이다. 즉,

$$v(t) = V_m \sin(\omega t + \theta^*) = V_m \sin(\omega(t-t_0)) \quad (1)$$

여기서 정상상태 전력신호의 주파수와 크기는 알고 있으므로 시간이동 t_0 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$t_0 = t - \frac{1}{\omega} \sin^{-1}\left(\frac{v(t)}{V_m}\right) \quad (2)$$

전력품질 왜곡신호 $f(t)$ 는 정상상태 신호에 왜곡 $n(t)$ 가 중첩된 신호이다.

$$f(t) = v(t) + n(t) \quad (3)$$

왜곡신호 $f(t)$ 에서 정상상태 신호의 시간이동을 구할 수 없다. 그러나 데이터 압축의 목적이 신호의 중복 부분(redundancy)을 줄여 처리할 데이터의 동적변화를 줄이는 것이다. 전력품질의 과도현상 왜곡이 발생하는 기간과 크기가 정상신호의 것보다 상대적으로 작음을 고려하면 왜곡신호 $f(t)$ 를 사용하여 근사적인 시간이동 값을 추론하여 유사정상신호(pseudo-stationary signal)를 추정한다.

$$\tilde{t}_0 = t - \frac{1}{\omega} \sin^{-1}\left(\frac{f(t)}{V_m}\right) \quad (4)$$

그림 1은 시간이동을 추정하는 알고리듬을 보여준다. 입력신호 $f(t)$ 에 대해 식(4)을 적용한 결과에 절대 값을 취한다. 그림 2(a)는 시간이동 $\tilde{t}_0 = 9 \text{ ms}$ 을 갖는 정상신호에 백색잡음이 섞인 환경에서 커패시터 스위칭 현상이 0.052초에서 0.059초까지 발생한 신호이다. 그림 2(b)는

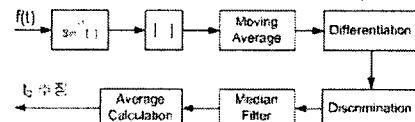


그림 1. 시간이동 추정 알고리듬

식(4)의 결과에 절대 값을 취한 후 이동평균 필터를 적용한 것이다. 식(4)의 결과로 나타나는 데이터는 부분적 선형으로 계단 형으로 증가하며, 잡음 또는 왜곡으로 인해 평탄하지 않으므로 이동평균필터를 적용하여 평활한 후 후방 차분방정식을 적용하였다. 그림 2(c)는 후방차분을 적용한 결과로 평탄한 부분에서는 그 차가 매우 작으며 기울기를 갖고 증가하는 곳에서는 그 값이 상대적으로 크다. 일정한 값을 갖고 있는 평탄한 부분을 추출하기 위해 문턱 값 $m(t)$ 을 식(5)과 같이 적용하였으며 그림 2(d)에 나타나 있다.

$$m(t) = \begin{cases} 0 & MA\{|\tilde{t}_0|\} < \theta \\ 1 & MA\{|\tilde{t}_0|\} \geq \theta \end{cases} \quad (5)$$

여기서 θ 는 표준편차이다. 문턱 값 적용결과 산발적으로 발생되는 0과 1의 부분을 통합하기 위해 메디안 필터를 적용하여 그림 2(e)를 얻는다. 여기서 0의 부분에 해당되는 절대치 값들의 평균을 구한 후 최소값을 선택한다. 이 예에서 구한 추정 시간이동은 $\tau=9.1\text{ ms}$ 으로 정상 신호의 시간이동과 큰 차이가 나지 않는다.

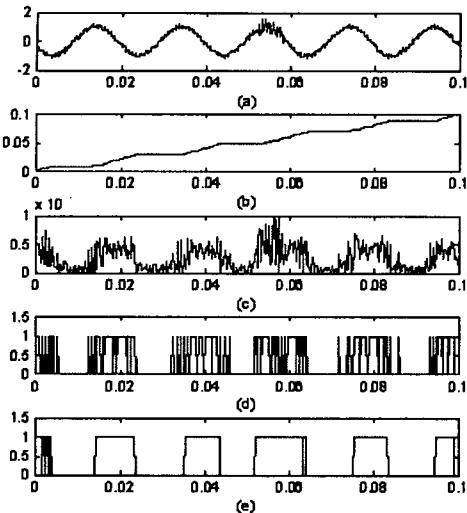


그림 2 (a) 웨곡신호 $f(t)$ (b) 식 (4)의 결과에 절대값을 취한 후 이동평균 적용 (c) 후방차분방정식 적용 (d) 문턱값 적용 (e) 메디안 필터 적용

3. 이산웨이브렛

전력품질 웨곡 신호에서 다양한 형태의 웨곡검출, 해석 및 압축에 적용된 웨이브렛 변환의 효과에 대해 많은 연구들이 수행되었으며 좋은 결과들을 보여주고 있다. DWT(discrete wavelet transform)는 다해상도 분해 방법이 사용되며, 입력신호를 특정 필터를 사용하여 다양한 스케일의 해상도를 갖는 서로 다른 신호들로 분해한다. 그림 3은 다해상도 분해 과정을 나타낸 것으로 신호 $c_j[n]$ 을 저역통과필터 $h[n]$ 과 고역통과필터 $g[n]$ 을 통해 고주파수 성분 $d_{j-1}[n]$ 과 저주파수 성분 $c_{j-1}[n]$ 의 부분으로 두 단계분리를 하는 것이다. $d_{j-1}[n]$ 은 $c_j[n]$ 의 세부(detail)한 부분을 나타내며, $c_{j-1}[n]$ 은 $c_j[n]$ 의 근사(approximate)한 부분을 나타낸다. 다음 단계에서는 $c_{j-1}[n]$ 이 두 부분으로 분리되는 과정을 거치게 되며, 이러한 과정을 반복한다. 각 분해 단계에서 분해된 신호들의 길이는 이전 단계 신호 길이의 절반이 된다.

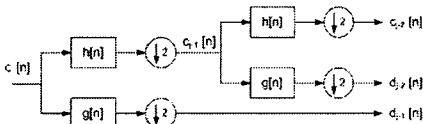


그림 3. 두 단계 다해상도 분해

모웨이브렛 함수가 정규직교함수일 경우 두 필터는 QMF 필터로 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$c_{j-1}[n] = \sum_k h[k-2n] c_j[k] \quad (6)$$

$$d_{j-1}[n] = \sum_k g[k-2n] c_j[k] \quad (7)$$

$$g[n] = (-1)^n h[-n] \quad (8)$$

전력신호에 고주파수 성분이 많이 존재한다면 분해 신호 $d[n]$ 계수들에는 웨란의 특성을 나타내는 비교적 큰 값들의 계수들이 존재하지만 많은 계수들은 0에 가까운 값을 갖거나 매우 작은 값을 갖는다. 이러한 성질을 sparse하다고 하며 전력신호 압축에 활용할 수 있는 유용한 성질이다.

웨이브렛 변환에 활용할 수 있는 모웨이브렛 함수는 다양하게 있으며, 응용의 성격에 따라 그 결과 역시 다양하다. 전력품질 응용에서 장애 검출, 국부화(localization) 및 분류에 가장 많이 사용되는 웨이브렛은 Daubechies 웨이브렛이다. Daubechies 웨이브렛은 정규직교 웨이브렛이며, 다양한 필터 길이를 사용할 수 있다. 참고문헌 [5]에 의하면 Daub4 필터는 필터 길이가 짧으며, 다른 웨이브렛보다 시간상에서 더 잘 국부화(localize)하는 것으로 알려져 있다.

4. 데이터 압축

데이터 압축의 목적은 신호가 갖고 있는 중복된 정보들을 제거함으로서 신호 정보를 표현하는데 필요한 데이터 수를 줄이는 것이다. 따라서 데이터 압축에서 DWT의 성능은 적은 수의 계수들에 신호 전체 에너지가 얼마나 많은 부분이 집중되어 있는가에 따라 결정된다.

DWT는 전력품질 장애들을 효과적으로 검출하고 분리해낼 수 있으며, 장애들에 관련된 DWT 계수들의 크기는 장애가 없는 곳의 계수들보다 매우 크다. 또한 sparse한 성질을 가지므로 등성등성 뛰어 나타난다. 이러한 특성들은 전력품질 장애 데이터를 압축하는 효율적인 방법을 이끌어 낼 수 있다. 이때 장애들에 관련된 에너지 역시 sparse 성질로 인해 특정 해상도 단계에 집중되어 나타나므로 에너지가 집중된 부분들의 계수만 취하고 나머지는 제거함으로서 더욱 효과적인 압축이 가능하다.

전력품질 웨곡 신호 $f(t)$ 를 나타내는 웨이브렛 계수들을

$$C_{signal} = [c_0 | d_0 | d_1 | \cdots | d_{J-1}] \quad (9)$$

여기서 J 는 해상도 단계들의 전체수를 나타낸다.

서로 다른 해상도 단계들에서 $f(t)$ 의 에너지 분포는 C_{signal} 의 norm을 구해 나타낼 수 있다.

$$E_{signal} = [\|c_0\| \|d_0\| \|d_1\| \cdots \|d_{J-1}\|] \quad (10)$$

$$\|c_0\|_2 = \left[\sum_{k=-\infty}^{\infty} |c_0(k)|^2 \right]^{1/2} \quad (11)$$

$$\|d_j\|_2 = \left[\sum_{k=-\infty}^{\infty} |d_j(k)|^2 \right]^{1/2} \quad (12)$$

압축은 DWT 영역에서 전력 장애들과 관련된 웨이브렛 변환계수들은 보유하고, 상대적으로 매우 작은 계수 값을 갖고 있는 장애가 발생하지 않은 곳의 계수들을 제거함으로서 상당한 양의 데이터 압축을 이를 수 있다.

압축된 신호로부터 장애신호 복구는 DWT 합성을 통해 이를 수 있다. 문턱값(threshold) 적용으로 전체 웨이브렛 변환계수들의 상당한 부분을 제거하는 압축과정은 재구성시 일부정보를 손실하게 한다. 그러나 대부분의 이들 계수들은 잡음과 관련된 계수들이므로 재구성된 신호의 웨곡정도는 낮다고 할 수 있으며, 장애에 관련된 웨이브렛 변수들이 보존되어 있으므로 장애들은 재구성 신호에 잘 나타나 있다. 그림 4는 웨이브렛 변환을 사용한 일반적인 압축과정을 나타내고 있다.

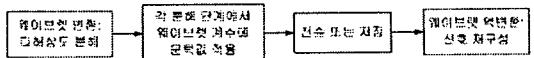


그림 4 웨이브렛 변환을 사용한 압축 방법

그림 5는 본 논문에서 제안하고자 하는 알고리듬을 나타내고 있다. 전력왜곡 신호를 입력신호로 받고 이 입력신호로부터 기본정보에 해당하는 진폭, 위상, 주파수 등을 추정한다. 상용전력의 경우 정상상태 전력의 진폭과 주파수는 이미 알고 있는 데이터지만 위상정보는 알 수 없다. 따라서 2절에서 설명한 위상 추정방법을 통해 위상을 구하여 유사정상신호를 얻는다. 유사정상신호에 해당되는 기본 정보들을 그림 2(b)와 같이 코드화하여 전송한다.

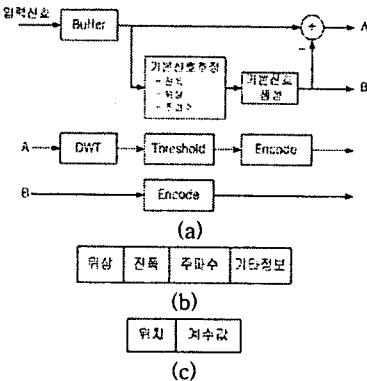


그림 5. (a) 신호 압축 알고리즘, (b) 유사정상신호 정보 부호화 (c) DWT 계수 부호화

전력품질 왜곡신호에서 유사정상신호를 제거하면, 과도 현상 또는 비정상신호, 오차를 함유하고 있는 신호를 얻게 된다. 이 신호에 DWT를 적용하여 웨이브렛 계수들을 얻는다. 이 계수들에 문턱값 식(13)을 적용한다.

$$\eta = (1-\mu) \max\{|d[n]| \} \quad (13)$$

여기서 $0 \leq \mu \leq 1$ 이며, 만약 $\mu=0.9$ 이면 문턱값은 절대치 $|d[n]|$ 의 최대값에 10%에 해당된다. η 보다 작은 계수들은 제거하고 더 큰 값들만 보유한다. 이런 문턱값 적용으로 잡음에 의한 계수들을 제거하는 효과도 이룰 수 있으며 왜곡신호에서 왜곡을 판단하는데 필요 없는 계수들을 제거함으로서 상당량의 데이터를 감소시킬 수 있다. 그림 5(c)와 같이 남아있는 계수들만 계수들의 위치와 값을 전송 또는 저장한다.

5. 모의실험

실험에 사용되는 그림 6의 전력 장애신호는 16[ms]에서 50[ms]까지 전압강하가 15%되었으며 커페시티 스위칭 현상이 52[ms]에서 65[ms]까지 발생하였고 전압상승이 70[ms]에서 90[ms]까지 15% 발생한 신호에 백색잡음이 가해진 신호이다. 시간이동 $t_0=9$ [ms]이다. 이 신호에서 구한 유사정상상태 시간이동은

$t_0=9.12$ [ms]으로 나타났으며 그림 6의 신호에서 유사정상상태 신호를 제거한 신호 그림 7의 차이신호에 제안된 압축알고리듬을 적용하였다. 여기에서 사용된 웨이브렛 함수는 Daubechies 4이다.

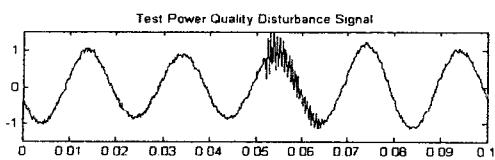


그림 6. 전력품질 장애 신호

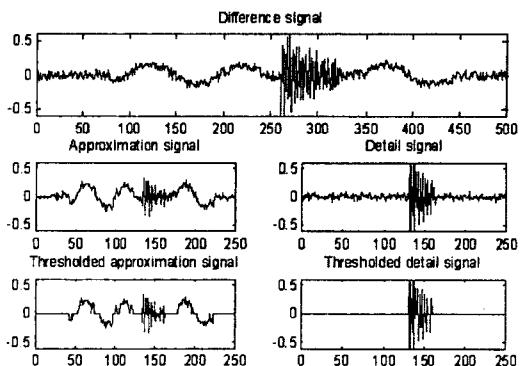


그림 7. 차이신호에 DWT를 적용한 후 문턱값 적용.

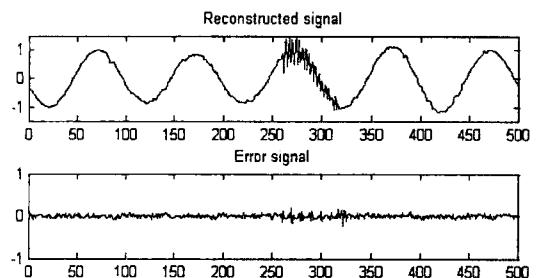


그림 8. 복구된 신호와 오차신호

문턱값이 적용된 후 균사화된 신호를 나타내기 위해 필요한 계수는 93개이며, 상세신호에 대한 계수의 수는 18개였다. 그림 8은 복구된 신호와 오차를 보여주고 있으며 정규화된 최소자승오차는 4.7×10^{-3} 이다.

6. 결 론

본 논문은 전력품질 왜곡신호에서 시간이동을 추정하여 얻은 유사정상신호를 장애신호에서 제거한 후 얻은 차이신호에 대해 압축을 하는 알고리듬을 제안하였다. 신호를 나타내는 계수의 수를 현저하게 줄여 높은 압축률을 얻을 수 있었다. 다행상도 분해시 어느 수준까지 분해를 수행하여 최적 단계를 구하는 연구가 지속적으로 이루어져야 한다.

[참 고 문 헌]

- [1] S. Santos, E. J. Powers, and W. M. Grady, "Power Quality Disturbance Data Compression using Wavelet Transform Methods," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, pp. 1250-1256, July 1997.
- [2] T. B. Littler and D. J. Morrow, "Wavelets for the Analysis and Compression of Power System Disturbances," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 14, pp. 358-362, April 1999.
- [3] M. Vetterli, "Wavelets, Approximation, and Compression," IEEE Signal Processing Magazine, pp. 59-73, Sept. 2001.
- [4] M. V. Wickerhauser, Adapted Wavelet Analysis from Theory to Software, IEEE Press, New York, USA, pp. 237-298, 1994.
- [5] N. S. D. Brito, B. A. Souza, F. A. C. Pires, "Daubechies wavelets in Quality of Power", 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Athens, Greece, Oct. 1998 pp.511-515.