

전력품질 외란신호의 압축에 관한 연구

정영식, 박찬웅
인천대학교 전기공학과

Compression of Power Quality Disturbance Signal

Young-Sik Chung, Chan-Woong Park
University of Incheon

Abstract - This paper introduces a compression technique for power quality disturbance signal via MRA. The proposed approach is based on a energy at each resolution level. The compression effect can be achieved by thresholding the energies.

1. 서 론

전력품질 분야는 과거 20여년동안 상당히 발전해 왔으며, 전기적 환경에서 동작되는 기기 및 전기적 환경을 모니터링하고 측정할 수 있는 계측기 역시 상당히 변화하였다. 전자적 장치들은 전력 시스템에서 전력공급과 접지에 문제를 일으킬 수 있는 제공물이 될 수도 있으며 또한 희생물이 될 수도 있다. 이에 따라, 전력품질을 개선시키려는 노력과 더불어 이를 감시할 수 있는 시스템의 개발의 필요성이 요구된다. 전력품질 신호의 외란 특징과 분류는 IEEE std. 1159 및 519에 정의되어있다. IEEE std. 1159에서는 전력품질을 “전력계통에서 특정시간에 특정장소에서 전압 및 전류의 특성을 특정지우는 다양한 형태의 전자기적 현상”으로 정의하였다 [1]. 전력 시스템의 성능을 분석하고 관리하기 위해 전력시스템의 주요 위치에 디지털 장애기록기(digital fault recorder)를 설치하여 전압과 전류를 모니터링하며 장애 발생 시 데이터를 기록한다.

전력 소비자 측에 발생한 경제적 손실에 대한 요인 분석 및 전력계통 장비에서 발생한 어떤 전기적 장애에 대한 분석을 위해 기록된 데이터를 사용하며, 일반적으로 사고 발생 후 분석이 이루어진다. 따라서 중앙 모니터링 센터에 신호들을 전송하고, 추후 분석을 하기 위해서는 데이터를 저장할 필요가 있다. 디지털 장애기록기는 전력 시스템의 주요 위치에 연결되어 전압 및 전류를 모니터링하여 장애가 발생하면 기록 저장하여 데이터를 통신채널을 통해 중앙에 전송된다. 전력품질에서 발생하는 외란들은 넓은 범위의 주파수 스펙트럼을 갖고 있으므로 이러한 외란들을 정확하게 기록하기 위해서는 샘플링 주파수가 높아야 하며, 일반적으로 전력품질 모니터는 1~4 MHz의 샘플링 주파수를 갖는다. 따라서 이러한 모니터로 수집된 데이터의 양은 엄청나며, 이 데이터를 그대로 전송하기에는 비효율적이며, 저장하기 위한 메모리 용량이 매우 커야하므로 처리비용 역시 적지 않게 들것이다. 또한 적절한 시간 내에 문제를 분석하고 문제를 경감시킬 수 있는 해법을 얻기가 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 알고리즘들이 최근에 다수 발표되었다. 이산 웨이브렛 변환(DWT)은 신호의 특성을 보존

하면서 중복되는 부분을 제거함으로써 높은 압축효과를 얻을 수 있으므로 데이터 압축에 많이 활용된다.

DWT는 다해상도 해석(multi-resolution analysis, MRA) 방법을 사용하여 구현되며, 입력신호를 다양한 스케일의 해상도를 갖는 다른 신호로 분해한다. MRA는 서로 다른 전력품질 외란들을 검출하고 위치를 확인하는데 적용되었으며, 상당히 정확한 결과들을 보여주었다. 또한 전력품질 신호들에 대한 압축 도구로서 적용되었으며 좋은 압축결과를 보여주었다. 본 논문에서는 MRA를 사용한 압축에서 각 해상도의 계수들에 대한 에너지 분포를 이용한 압축알고리즘을 제안한다.

2. 데이터 압축

데이터 압축의 목적은 신호가 갖고 있는 중복된 정보들을 제거함으로써 신호 정보를 표현하는데 필요한 데이터 수를 줄이는 것이다. 따라서 데이터 압축에서 DWT의 성능은 적은 수의 계수들에 신호 전체 에너지에서 얼마나 많은 부분이 집중되어 있는가에 따라 결정된다. 외란들에 관련된 DWT 계수들의 크기는 외란이 발생되지 않은 곳의 계수들보다 상대적으로 매우 크며, sparse한 성질 때문에 듬성듬성 나타난다. 이러한 특징들은 전력품질 외란 데이터를 압축하는 효율적인 방법을 이끌어 낼 수 있다. 압축은 DWT 영역에서 전력 외란들과 관련된 웨이브렛 변환계수들은 보유하고, 상대적으로 매우 작은 계수 값을 갖고 있는 외란이 발생하지 않은 곳의 계수들을 제거함으로써 상당한 양의 데이터 압축을 이룰 수 있다[2].

압축된 신호로부터 외란신호 복구는 DWT 합성을 통해 이룰 수 있다. 문턱 값(threshold) 적용으로 전체 웨이브렛 변환계수들의 일정 부분들을 제거하는 압축과정에 의해 복원을 하면 불가피하게 일부정보들을 손실하게 된다. 그러나 대부분의 이들 계수들은 잡음과 관련된 계수들이므로 재구성된 신호의 왜곡 정도는 낮다고 할 수 있으며, 외란에 관련된 웨이브렛 변수들이 잘 보존되어 있으므로 외란들은 복원 신호에 잘 나타나 있다. 다해상도 분해에서 문턱 값을 적용하는 두 가지 방법이 있다. 첫 번째 방법은 전역 문턱 값(global threshold)으로 웨이브렛 계수들의 전체에서 문턱 값을 구해 전체적으로 적용하는 방법으로 하나의 문턱 값만 존재한다. 두 번째 방법은 지역 문턱 값(local threshold)으로 각 분해 단계에서 적절한 문턱 값을 적용하는 것으로 스케일 단계의 수만큼 문턱 값들이 존재한다. 문턱 값은 식 (1)로부터 얻어 적용한다.

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

여기서 μ 는 문턱 값 인수로 $0 \leq \mu \leq 1$ 이며, 만약

$u=0.9$ 이면 문턱 값은 절대치 $d[n]$ 의 최대값의 10%에 해당된다. η 보다 작은 계수들은 제거하고 더 큰 값들만 보유한다. 이런 문턱 값 적용으로 잡음에 의한 계수들을 제거하는 효과도 이룰 수 있으며 외란 신호에서 외란을 판단하는데 필요 없는 계수들을 제거함으로써 상당량의 데이터를 감소시킬 수 있다.

신호 $f(t)$ 을 웨이브렛 변환 후 계수들에 문턱 값을 적용한 후 N 개의 계수를 사용하여 재구성 된 신호를 $f_N(t)$ 라 하면 다음과 같은 norm 오차 $e(N)$ 을 갖는다.

$$\|f(t) - f_N(t)\|_2 \sim e(N) \quad (2)$$

만약 N 이 무한대로 모든 계수를 다 사용할 수 있다면 $e(N)=0$ 이 될 것이다. 하지만 웨이브렛 계수들이 증가하면 그 만큼 압축에서의 효율성은 떨어진다. 또한 어떤 웨이브렛 모함수(mother wavelet)를 선택했는가에 따라 $e(N)$ 의 값이 달라질 것이다. 그러므로 적절한 웨이브렛 모함수를 찾아 원래의 신호에 가장 근사한 함수를 찾아 압축하는 것이 필요하다.

웨이브렛 변환에 활용할 수 있는 웨이브렛 모함수는 다양하게 있으며, 응용의 성격에 따라 그 결과 역시 다양하다. 전력품질 응용에서 외란 검출, 국부화(localization) 및 분류에 가장 많이 사용되는 웨이브렛 모함수는 Daubechies 웨이브렛이다. Daubechies 웨이브렛은 정규 직교 웨이브렛이며, 다양한 필터 길이를 사용할 수 있다. 참고문헌 [3]에 의하면 Daub4 필터는 필터 길이가 짧으며, 다른 웨이브렛보다 시간상에서 더 잘 국부화하는 것으로 알려져 있다.

3. 다해상도 분해

DWT는 다해상도 해석 방법을 사용하여 구현되며, 입력 신호를 특정 필터를 사용하여 다양한 스케일의 해상도를 갖는 서로 다른 신호들로 분해한다.

주어진 전력품질 신호는 스케일 단계 0에 있으며 부공간(subspace) V_0 안에 존재한다. 스케일 단계 J 에서 V_0 는 DWT를 사용하여 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_0 = V_J \oplus W_J \oplus W_{J-1} \oplus \dots \oplus W_1 \quad (3)$$

이 식은 신호는 DWT를 통해 적절히 선택된 해상도 스케일 단계 J 측, 부공간 V_J 에서의 근사 계수(approximation coefficients)와 각 스케일 단계 j 측, 부공간 W_j , $1 \leq j \leq J$ 에서 상세 계수(detail coefficients) 또는 웨이브렛 계수들로 정확하게 나타낼 수 있음을 의미한다.

그림 1은 다해상도 분해 과정을 나타낸 것으로 신호 $c_j[n]$ 을 저역통과필터 $h[n]$ 와 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 상세 부분을 나타내며, $c_{j-1}[n]$ 은 $c_j[n]$ 의 근사 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.

웨이브렛 모함수가 정규직교함수일 경우 두 필터는 QMF 필터로 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$c_{j-1}[n] = \sum_k h[k-2n]c_j[k] \quad (4)$$

$$d_{j-1}[n] = \sum_k g[k-2n]c_j[k] \quad (5)$$

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

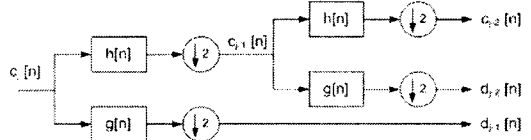


그림 1. 두 단계 다해상도 분해

전력품질신호에는 일반적으로 기본파와 과도현상들이 결합된 고주파수 성분들이 많이 존재하므로, 분해 신호 $d_j[k]$ 계수들에는 외란의 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.

서로 다른 해상도 단계들에서 전력품질 왜곡 신호 $f(t)$ 을 나타내는 웨이브렛 계수들을

$$C_{signal} = [c_0 | d_0 | d_1 | \dots | d_{J-1}] \quad (7)$$

여기서 J 는 해상도 단계들의 전체수를 나타낸다.

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

$$E_{signal} = [\|c_0\| \|d_0\| \|d_1\| \dots \|d_{J-1}\|] \quad (8)$$

여기서

$$\|c_0\|_2 = \left[\sum_{k=-\infty}^{\infty} |c_0(k)|^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

$$\|d_j\|_2 = \left[\sum_{k=-\infty}^{\infty} |d_j(k)|^2 \right]^{1/2} \quad (10)$$

압축은 DWT 영역에서 전력 장애들과 관련된 웨이브렛 변환계수들은 보유하고, 상대적으로 매우 작은 계수 값을 갖고 있는 장애가 발생하지 않은 곳의 계수들을 제거함으로써 상당한 양의 데이터 압축을 이룰 수 있다. 따라서 식 (8)을 사용하여 각 해상도 단계에서 에너지 분포가 일정한 문턱 값(threshold)보다 작은 경우에는 해당 단계에 있는 계수들을 모두 0으로 처리하게 되면 전체적으로 나타낼 수 있는 계수들의 수가 줄어들게 되어 압축의 효과를 이룰 수 있다. 압축된 신호로부터 장애신호 복구는 DWT 합성을 통해 이룰 수 있다. 그림 2에 압축 흐름도를 나타내었다.

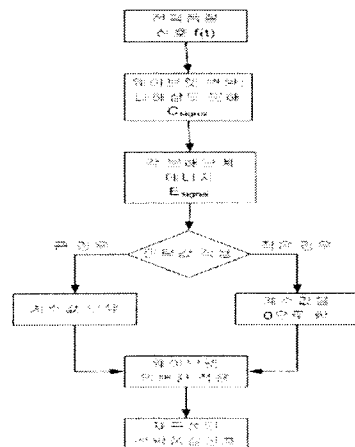


그림 2 압축 흐름도

문턱 값 적용으로 전체 웨이블렛 변환계수들의 상당한 부분을 제거하는 압축과정은 재구성시 일부정보를 손실하게 한다. 그러나 대부분의 이들 계수들은 잡음과 관련된 계수들이므로 재구성된 신호의 왜곡정도는 낮다고 할 수 있으며, 장애에 관련된 웨이블렛 변수들이 보존되어 있으므로 장애들은 재구성 신호에 잘 나타나 있다.

압축률을 더 높이기 위해서 문턱 값 보다 더 큰 에너지 분포를 갖고 있는 해상도 단계에 존재하는 계수들에 대해 또 다른 문턱 값을 적용하여 상대적으로 값이 작은 계수들을 0으로 함으로서 더 높은 압축률을 얻을 수 있다. 그러나 압축률이 높아질수록 상대적으로 압축오차는 커질 것이며, 원래의 전력품질 신호보다 왜곡이 더 많을 것이다. 그러나 전력품질 신호에서 과도현상을 나타내는 부분들은 정상상태 부분보다 계수들의 값이 크므로 비교적 잘 유지된다.

데이터 압축의 정도를 나타내는 척도로서 영-비율(zero ratio, ZR)과 압축오차(compression error, CE)를 사용한다. 다해상도 분해와 문턱 값 적용을 통해 가능한 웨이블렛 계수들에서 0의 값이 많을수록 압축률이 더 높으므로 압축 전과 압축 후의 영의 비율로서 압축정도를 나타낸다. 만약 주어진 신호가 N 개의 샘플을 갖고 있고, 압축 후에 N_0 개의 0을 갖고 있다면 영-비율은 다음과 같다.

$$ZR = \frac{N_0}{N} \times 100 [\%] \quad (11)$$

더 높은 영-비율은 더 많은 데이터가 압축되어져서 더 작은 데이터로 신호를 나타낼 수 있음을 의미한다.

문턱 값이 적용된 압축 신호로부터 원래의 신호를 완전하게 복원할 수 없으며, 압축오차가 존재한다. 이 압축오차는 원래의 신호와 복원된 신호 사이의 정규화된 평균 제곱오차(normalized mean-square error, NMSE)로 정의되며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$CE = \frac{\|f(t) - \hat{f}(t)\|_2}{\|f(t)\|_2} \quad (12)$$

여기서 $f(t)$ 은 원래의 신호이며 $\hat{f}(t)$ 은 복원된 신호이다.

높은 압축 효율과 높은 압축의 정확도를 가질 수 있는 것이 데이터 압축의 주된 목적이겠지만 하나를 얻으려면 다른 하나에서 그에 상당하는 비용을 치러야 한다. 따라서 이 두 척도사이에서 허용 가능한 왜곡 수준에서 압축을 한다면 상당히 좋은 압축을 이룰 수 있다.

4. 모의실험

실험에 사용되는 그림 3의 전력품질 외란신호는 matlab 프로그램을 사용하여 모의한 전력외란파형으로 16[ms]에서 50[ms]까지 전압강하가 20%되었으며 커패시터 스위칭 현상이 52[ms]에서 65[ms]까지 발생하였고 전압상승이 70[ms]에서 90[ms]까지 20% 발생한 신호에 백색잡음이 가해진 신호이다. 시간이동 $t_0 = 9 [ms]$ 이다. 본 논문의 프로그램 역시 matlab을 사용하여 알고리즘을 구현하였다. 여기에서 사용된 웨이블렛 모함수는 Daubechies 4이다. 각 해상도의 상세계수들에 대한 에너지 분포는 그림 4(a)에 나타 있으며, 최대 에너지 값의 30%를 문턱 값으로 설정하여 적용한 결과가 그림 4(b)에 나타나 있다. 제거된 에너지에 해당하는 단계에 있는 계수들은 0으로 설정되어 전체적으로 압축 효과를 이룰 수 있다. 여기서 영-비율은 54.89%이며, NMSE는 8.7×10^{-3} 이다. 에너지 분포에 적용되는 문턱 값을 더 낮추게 되면 영-비율은 감소될 것이며 압축효과는 줄어들게 되겠지만 NMSE 값

이 더 작게 되어 원래의 신호에 더 근접된 신호를 얻을 수 있다. 그림 5는 복구된 신호와 압축 오차 신호를 보여준다.

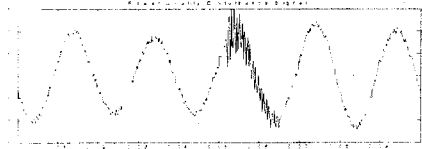


그림 3. 전력품질 외란신호

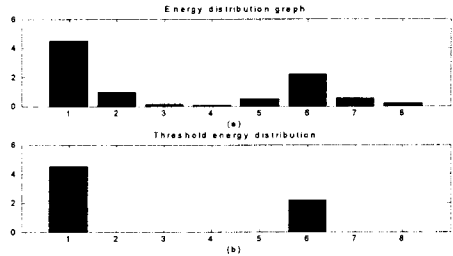


그림 4. 에너지 분포 (a) 문턱 값 적용 전 (b) 문턱 값 적용 후

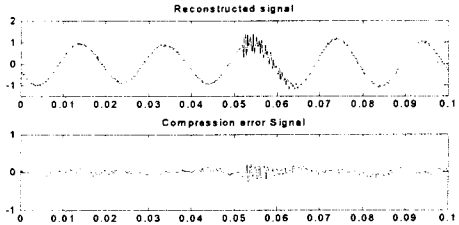


그림 5. 복구된 신호와 압축오차 신호

5. 결 론

본 논문은 전력품질 외란 신호에 다해상도 분해를 적용하여 각 단계에서 에너지를 구하였다. 문턱 값보다 더 큰 에너지를 갖고 있는 단계들의 계수들은 그대로 보존하고 작은 에너지를 갖고 있는 단계들의 계수들을 0으로 설정하여 압축효과를 이루는 알고리즘이다.

[참 고 문 헌]

- [1] IEEE, IEEE Recommended Practices for Monitoring Electric Power Quality, IEEE Standard 1159-1995, 1995.
- [2] M. Vetterli, "Wavelets, Approximation, and Compression," IEEE Signal Processing Magazine, pp.59-73, Sept. 2001.
- [3] N. S. D. Brito, B. A. Souza, F. A. C. Piracs, "Daubechies wavelets in Quality of Power", 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Athens, Greece, Oct. 1998 pp.511-515.
- [4] M. V. Wickerhauser, Adapted Wavelet Analysis from Theory to Software, IEEE Press, New York, USA, pp. 237-298, 1994.
- [5] L. Shang, J. Jaeger, R. Kerbs, "Efficiency Analysis of Data Compression of Power System Transients using Wavelet Transform", IEEE Bologna PowerTech Conference, June 23-26, Bologna, Italy.