Power Quality Disturbances Detection Technique using Filter Bank and Adaptive Filters

윤 재 준* · 이 정 규** · 손 상 욱*** · 배 현 덕†
(Jae-Jun Yun · Jeong-kyu Lee · Sang-Wook Sohn · Hyeon-Deok Bae)

Abstract - In power quality monitoring, it is very important to detect disturbances (sag, swell, transient, and interruption) accurately. In this paper, a detection method for power quality disturbances by combining the filter bank system and adaptive filter is proposed. To decompose power signal, binary tree structured filter bank system is designed. In the filter bank system, the fundamental filter bank(QMF bank) is used as a module in each decomposing level. An adaptive filter is used to improve the detection accuracy of disturbances for each subband signal. In the adaptive filter, the measure of estimated error change is used to detect singular points of power quality disturbances. Computer simulations were performed on synthetic signals which have disturbances to assess the performance of the proposed method.

Key Words : QMF bank, Adaptive filtering, Measure of error change, Power quality, Disturbance

1. 서 론

최근 들어 대전력 스위칭 소자와 다양한 비선형 부하의 사용 증가로 인해 전력품질에 대한 관심이 증대 되고 있다. 그리고 소비자들에 의한 고품질 전력 신호에 대한 요구 또한 증가하고 있다. 따라서 전력 신호 외란의 모니터링은 전력계통에서 중요한 관심사항 중의 하나이다. 특히, 외란의 정보를 검출, 저장하고 외란 신호를 실시간으로 보상하기 위해서는 전압 강하(voltage sag), 전압 상승(voltage swell), 정전(interruption), 과도현상(transient) 등의 효과적인 검출은 매우 중요하다[1].

대표적인 전력품질 모니터링 표준으로는 IEC 61000-4-30과 IEEE 1159가 있으며, 이 두 표준에서는 전력품질 외란 검출에 전압의 실효값이 사용된다[1][2]. 전압의 실효값을 이용하는 검출기법은 단순하여 널리 이용되나, 실효값 계산에서 반주기나 한주기의 창(window)을 이용하므로 실효값의 해상도와 외란 검출능력이 창의 길이에 좌우되는 단점이 있다. 특히 짧은 구간의 외란인 과도현상의 경우는 검출이 불가능 할 수도 있다. 최근 들어 전력품질 외란 검출기법으로 특정 모델에 기반한 잔여(residual) 신호를 이용하는 기법과 DWT(discrete wavelet transform)을 이용하는 기법이 유용한 것으로 알려져 있다[3]~[6]. DWT 기법은 전력신호를 부

밴드로 분해하므로 외란 검출에서 시간영역 해상도를 향상시킬 수 있다. DWT 기반 기법은 실효치를 사용하는 방법에 비해 외란의 위치를 보다 정확하게 검출 할 수 있으나, 외란의 트리거링점(triggering point or singular point) 검출에는 보다 복잡한 계산이 요구되며 하드웨어로 실현이 어렵다는 단점이 있다.

본 논문에서는 필터뱅크와 적응필터를 결합하는 새로운 전력품질 외란 검출기법을 제안한다. 제안된 방법에서는 기본 필터뱅크를 설계하고, 이 필터뱅크를 모듈로 사용하는 전체 필터뱅크 시스템을 구성하여 전력 신호를 분해한다[7]. 필터뱅크에서 부밴드로 분해된 전력신호에 적응필터[9][10]를 적용하고 적응필터 오차신호의 변화 정도를 계산하여 외란 검출과 외란의 트리거링점 검출에 이용한다[11]. 적응필터를 각 대역의 분해된 신호에 적제안할 경우 주로 높은 대역에서 추정된 오차신호를 이용하여 외란과 외란의 트리거링점 검출 정확도를 높일 수 있다. 제안 기법의 성능 평가와 타당성 검증에 IEC 61000-4-7에 의거한 합성신호에 대해 시뮬레이션을 수행한다.

2. 필터뱅크를 이용한 전력 신호의 분해

필터뱅크 시스템은 신호를 부밴드 신호로 분해하는 유용한 도구로 잘 알려져 있다. 또한 신호의 특성이 통계적으로 비정상(non stationary) 환경에서 웨이브렛 변환과 거의 동일한 성능을 가지는 특징이 있다. 신호분해에 이용되는 필터뱅크시스템 중 DWT 혹은 DWPT(discrete wavelet packet transform)와 유사한 성능을 가지는 시스템은 2진 트리구조(binary tree structure)를 가진다. 2진 트리구조 필터뱅크시스템은 완전복원(perfect reconstruction)이 가능한

* 준 회 원 : 충북대학교 전기공학과 석사과정
** 준 회 원 : 충북대학교 전기공학과 석사과정
*** 정 회 원 : univ. of Texas at Austin Post Doc.
† 교신저자, 정회원 : 충북대학교 전자정보대학 전기공학과 교수
E-mail : hdbae@cbnu.ac.kr
접수일자 : 2011년 9월 24일
최종완료 : 2011년 11월 22일

QMF (quadrature mirror filter)를 기본필터뱅크 모듈로 사용하여 전체 필터뱅크시스템을 구성한다. 기본 필터뱅크의 구조는 그림 1과 같으며, 여기서 $X(n)$ 은 입력 신호, $Y_L(n)$ 은 저역통과 테시메이션(decimation)신호, $Y_H(n)$ 은 고역통과 테시메이션 신호이며, $H_{LP}(z)$ 와 $H_{HP}(z)$ 는 각각 저역통과 필터, 고역통과 필터이다.

그림 1 기본 필터뱅크 구조

Fig. 1 Structure of fundamental filter bank

필터 출력 $Y_L(n)$, $Y_H(n)$ 과 z -변환은 다음과 같이 표현된다.

$$Y_L = \frac{1}{2} [H_{LP}(z^{1/2})X(z^{1/2}) + H_{LP}(-z^{1/2})X(-z^{1/2})] \quad (1)$$

$$Y_H = \frac{1}{2} [H_{HP}(z^{1/2})X(z^{1/2}) + H_{HP}(-z^{1/2})X(-z^{1/2})] \quad (2)$$

그림 1의 기본필터뱅크를 하나의 모듈로 다단으로 접속하여 2진 트리구조 필터뱅크시스템을 구성하면 그림 2와 같다. 그림 2의 필터뱅크시스템은 입력 신호의 다해상도 분해가 가능하며, 신호분해에 필요한 레벨(level) 수 L 과 신호가 분해되는 대역 수 M 과의 관계는 $M=2^L$ 이다. 그리고 소요되는 기본필터뱅크 수는 $M-1$ 이다. 그림 2의 필터뱅크시스템으로 분해된 부밴드 신호 $y_i (i=0,1,2,...,(M-1))$ 의 주파수 대역은 그림 3과 같다.

그림 2 2진 트리구조 필터뱅크시스템

Fig. 2 Binary-tree structured filterbank system

그림 3 부밴드 신호 $y_i (i=0,1,...,(M-1))$ 의 주파수 대역

Fig. 3 Frequency band of subband signals $y_i (i=0,1,...,(M-1))$

일반적으로 전력신호 외란은 높은 주파수 성분을 포함하므로 그림 2의 필터뱅크시스템으로 분해된 높은 주파수 대역의 부밴드 신호를 이용할 경우 외란의 검출이 용이하다. 그림 2의 필터뱅크시스템에서는 기본필터뱅크가 다단으로 이용되므로 시스템 지연이 문제가 될 경우는 기본필터뱅크를 IIR(infinite impulse response)필터로 설계하는 것이 유리하다.

3. 적응 필터링을 이용한 외란 검출

전력품질 외란 검출에서 외란의 시작 시점과 끝나는 시점인 특이점(singular point) 검출은 매우 중요하다. 일반적으로 특이점은 전력신호가 급작스럽게 변화하는 점이라 볼 수 있으므로 외란 검출에서 트리거링 점과 동일하게 간주된다. 필터뱅크시스템에서 분해된 높은 주파수 성분의 부밴드 신호를 적응필터로 처리하여 외란의 트리거링 점을 쉽게 검출할 수 있다. 외란의 트리거링 점 검출에 사용되는 적응필터는 적응예측기로서 그림 4와 같다.

그림 4 전력품질 외란의 트리거링점 검출을 위한 적응 필터

Fig. 4 Adaptive filter for detecting triggering point of power quality disturbance

그림 4에서 입력신호 $y_i(n)$ 은 필터뱅크시스템에서 분해된 부밴드 신호이고, $z^{-\Delta}$ 는 지연 요소이며 $W(Z)$ 는 원 신호를 예측하기 위한 적응필터이다. 그리고 $e_i(n)$ 은 오차로서 부밴드 신호(y_i)와 적응예측기 출력 $\hat{y}_i(n)$ 의 차 신호이다. 적응필터의 출력 $\hat{y}_i(n)$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{y}_i(n) = W(n) * y_i(n - \Delta) \quad (3)$$

적응 예측기의 필터 계수의 갱신 식은 LMS(least mean square) 알고리즘을 사용하면 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{W}(n+1) = \hat{W}(n) + \mu y(n - \Delta) e_i(n) \quad (4)$$

여기서 μ 는 스텝 사이즈이다. 만약 전력신호가 외란으로 인해 갑작스런 변화가 있으면 이 변화에는 높은 주파수 성분이 많이 포함되어있으므로 분해된 각 부밴드 신호에도 높

은 주파수 성분이 포함된다. 높은 주파수 성분을 적응필터로 처리하면 원 신호와 예측된 신호와의 오차신호를 얻을 수 있다. 이 예측된 오차신호의 변화를 이용하면 전력품질 외란의 특징점을 보다 용이하게 검출할 수 있다. 각 부밴드에서 적응 필터의 오차 $e_i(n)$ 의 변화 전력은 다음과 표현할 수 있다.

$$E_i(n) = |e_i(n) - e_i(n-1)|^2 \quad (i=0,1,\dots,M-1) \quad (5)$$

비교적 큰 값의 전력 변화량을 가지는 다수 부밴드에서 변화 전력의 누적 값은 다음과 같다.

$$E = \sum E_i \quad (6)$$

식 (5), 식 (6)에 적절한 문턱레벨(threshold level)을 설정함으로써 트리거링 검출 정확도를 높일 수 있으며, 아울러 이로부터 외란 구간의 검출 또한 가능해진다.

4. 시뮬레이션

제안된 방법의 성능을 3가지 시뮬레이션을 통하여 검증한다. 정현 신호 모델링 기법을 이용 전력신호의 전압강하(voltage dip)와 짧은 과도현상(short transition) 파형을 합성하여 시뮬레이션하며, IEEE Project Group 1159.2 에서 제공하는 테스트 신호에 대해서도 성능을 검증한다.

4.1 정현신호 모델을 이용한 전압강하(Voltage dip) 신호

첫 번째 시뮬레이션에서는 정현신호를 다음과 같이 모델링 한다.

$$x(n) = \sum_{i=1}^M a_i \cos(iw_1 n + \phi_i) + w(n) \quad (7)$$

여기서 a_i 는 크기, ϕ_i 는 초기 위상, iw_1 은 고조파, $w(n)$ 은 백색잡음이며 전력 $\sigma_w^2 = 1.0$ 로 한다. 고조파는 한국전력에서는 최소 25차 이상, 40차 이내를 권장하고 있으나, 여기에서는 계통에서 주요 문제가 되고 있는 홀수 고조파만을 다루고, 그 크기는 IEC 표준 61000-4-7을 따르며 표 1과 같다.

표 1 기수 고조파 전압 크기의 전형적인 레벨

Table 1 Typical level of odd harmonics voltage magnitude

Odd Harmonics Non-multiple of 3	Harmonic Voltage [%]	Odd Harmonics multiple of 3	Harmonic Voltage [%]
5	6	3	5
7	5	9	1.5
11	3.5	15	0.4
13	3	21	0.3
$17 \leq h \leq 37$	$2.27 \frac{17}{h} - 0.27$	$21 \leq h \leq 39$	0.2

고조파로 합성된 정현신호 모델에 전압강하를 IEC 61000-4-11의 전압강하 3등급(voltage dips class 3) 기준을 따라 40% 강하가 12주기 동안 발생한 것으로 한다. 샘플링 주파수는 7680Hz (=128sample/cycle)이다.

제안기법을 이용 식 (7) 및 표 1로 합성된 신호를 제안기법으로 처리한 결과가 그림 5와 같다. 그림 5는 위로부터 합성된 신호 $x(n)$, 각 부밴드에서 적응필터 오차신호의 변화 전력 $E_i(i=0,1,\dots,7)$ 이다. 그림 5의 결과로부터 제안기법이 전압강하 외란의 특징점 검출에 유용하게 사용될 수 있을 알 수 있다. 그리고 주파수가 높은 대역의 부밴드 오차 신호 변화 전력이 전력신호의 급작스런 변화를 잘 나타내고 있음을 알 수 있다. 그림 6은 전력품질 외란 지점 검출 성능을 실효치 기법과 비교한 결과이다. 그림 6에서 맨위는 전압강하 현상을 가지는 원 신호이며, 두 번째는 전압강하 구간에서 반주기 창을 이용하여 구한 실효치이며 마지막 신호는 제안기법에서의 E_i 신호를 나타낸다. 그림 6 두 번째 신호 그림에서 중간의 횡선(빨간 선)은 전압강하에서 일반적인 문턱 레벨인 0.9pu를 표시한 것이다.

그림 5 제안기법을 이용한 전압강하 외란 처리 결과
(위로부터 입력신호, 각 부밴드에서 오차전력 E_i)

Fig. 5 Processing results of voltage dip disturbance by the proposed method (top to bottom : input signal, power change of error signals E_i in each subband)

그림 6의 결과로부터 전압강하가 $t_1 = 0.500130\text{sec}$ 에서 시작되고 $t_2 = 0.700000\text{sec}$ 에서 끝나는 입력신호에 대하여 실효치기법과 제안기법의 특징점 검출결과를 정리하면 표 2와 같다.

그림 6 실효치 기법과 제안기법의 트리거링점 검출 결과
Fig. 6 Triggering points detection results of rms based method and the proposed method

표 2 전압강하 외란에 대한 특이점(t_1, t_2) 검출 결과

Table 2 Singular points(t_1, t_2) detection results of voltage dip disturbance

Methods	Actual values(s)	Detected values(s)	Deviation(%)
Half cycle RMS	$t_1 = 0.500130$	$t_1 = 0.502343$	0.4426
	$t_2 = 0.700000$	$t_2 = 0.706250$	0.8929
One cycle RMS	$t_1 = 0.500130$	$t_1 = 0.503125$	0.5988
	$t_2 = 0.700000$	$t_2 = 0.713802$	1.9717
Proposed Method	$t_1 = 0.500130$	$t_1 = 0.499088$	0.2083
	$t_2 = 0.700000$	$t_2 = 0.697005$	0.4278

표 2의 결과로부터 실효치기법의 경우 반주기 창을 사용한 경우가 한주기 창을 이용할 경우보다 좋은 성능을 보이며, 제안된 방법은 반주기 창을 이용한 실효치 기법과 비교하여 보다 정확한 검출결과를 보임을 알 수 있다.

4.2 정현 신호 모델을 이용한 짧은 구간 과도(short transient) 신호

두 번째 시뮬레이션에서는 실효치 기법으로 측정하지 못하는 순간적인 외란인 짧은 구간의 과도 신호에 대하여 제안된 방법의 성능을 검증한다. 첫 번째 시뮬레이션에서 사용한 정현 신호 모델을 이용하여, 두 번의 다른 짧은 과도 신호를 인가한다. 첫 번째는 120%의 전압상승이 1.302083ms 동안 $t_1=0.503125$ 에서 발생, 두 번째는 20% 전압강하가 0.651041ms 동안 $t_2=0.5$ 에서 인가7에서 발생하게 한다. 두 번의 과도현상은 실효치 기법의 경우 사용되는 창의 길이로 인해 검출이 되지 않는다.

그림 7 제안기법을 이용한 짧은 과도 외란 처리 결과 (위로부터 입력신호, 각부밴드에서 오차전력 E_i)

Fig. 7 Processing results of short transient disturbance by the proposed method (top to bottom : input signal, power change of error signals E_i in each subband)

그림 7에서 짧은 구간 과도신호에 대한 제안기법의 처리 결과를 나타내었다. 그림 7은 위에서부터 합성된 신호 $x(n)$, 각 부밴드에서 적응필터 오차신호의 변화 전력 E_i ($i=0, \dots, 7$) 이다. 표 3은 그림 7의 결과로서, 제안된 방법을 이용한 짧은 구간 과도현상에 대한 특이점 검출 결과이다.

표 3 짧은 과도 외란에 대한 특이점(t_1, t_2) 검출 결과

Table 3 Singular points(t_1, t_2) detection results of short transient disturbance

Methods	Actual values(s)	Detected values(s)	Deviation (%)
Proposed Method	$t_1 = 0.503125$	$t_1 = 0.501171$	0.3882
	$t_2 = 0.573437$	$t_2 = 0.570963$	0.4314

4.3 IEEE Project Group 1159.2의 테스트 신호

마지막으로 IEEE Project Group 1159.2 에서 제공하는 테스트 신호를 이용하여 제안된 방법의 성능을 검증한다. 이 신호는 샘플링 주파수가 15360Hz (=256sample/cycles)의 신호로 약 3주기 동안 순간 정전(momentary interruption)이 발생하였고, 총 6주기의 신호로서 그림 8의 위와 같다.

그림 8로부터 원신호가 그리 급격하게 변화하지 않으므로 높은 주파수 성분이 많지 않음을 알 수 있다. 이 신호를 제안기법을 이용 처리하여 첫 번째 부밴드에서의 오차전력 변화 E_1 를 나타낸 것이 그림 8의 아래 신호이다. 이 결과로

부터 입력신호의 주파수가 낮은 대역에 집중되어 있는 경우 첫 번째 부밴드 오차 신호만으로 특이점의 검출이 가능함을 알 수 있다.

그림 8 IEEE project group 테스트 신호의 특이점 검출을 위한 제안기법 처리결과

Fig. 8 Processed result of the IEEE project group test signal for singular point detection

5. 결 론

본 논문에서는 QMF बैं크를 이용하여 2진 트리구조를 갖는 필터뱅크 시스템을 설계하여 외란이 포함된 전력신호를 분해하고, 분해된 부밴드 신호를 적응 예측기로 처리하여 특이점을 검출하는 방법을 제안하였다. 적응 예측기 오차신호의 전력 변화를 이용 외란에 포함된 높은 주파수 성분을 추출함으로써 전력품질 외란의 특이점 검출에서 정확도를 향상시킬 수 있음을 보였다.

전력 외란 신호의 특이점 검출을 위해 보편화되어 사용되고 있는 실효치 방법과 제안된 방법의 성능을 세가지의 시뮬레이션을 통해 비교 검증하였다. 제안된 방법은 실효치 방법에 비해 높은 정확도를 보였으며, 짧은 구간의 과도 외란을 포함하는 신호의 특이점도 검출이 가능함을 보였다. 제안 기법을 이용 다양한 전력품질 외란 대해 검출된 특이점의 특성을 파악하여, 기준을 세워놓는다면, 전력 외란 신호의 특이점 검출뿐 아니라 전력신호 사건 분류에도 적용 가능할 것으로 본다.

감사의 글

"이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 20110005227)"

참 고 문 헌

- [1] IEEE Standard 1159-1995, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, Jun. 1995.
- [2] IEC Std 61000 series, "Basic Electromagnetic Compatibility Publication", March, 2004.
- [3] Math H. J Bollen, Irene Y. H. Gu, Surya Santodo, et al "Bridging the gap between signal and power", Vol.26, Issue4, pp.12-31, July 2009.
- [4] Math H. J Bollen and Irene Y. H. Gu, Signal Processing of Power Quality Disturbances, Hoboken, NJ:Wiley-Interscience, 2006.
- [5] Josif T. Tomic, Miodrag D. Kusljevic, and Vladimir V. Vujicic, "A New Power System Digital Harmonic Analyzer," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.22, No.2, pp.772 - 780, Apr. 2007.
- [6] Y. Z. Liu and S. Chen, "A wavelet based model for on-line tracking of power system harmonics using Kalman filtering," Proc. of IEEE Power Eng. Soc. Summer Meeting, Vol.2, pp.1237 - 1242, Jul. 2001.
- [7] P. P. Vaidyanathan, Multirate Systems and Filter Banks, Englewood cliffs, NJ:PH, 1993.
- [8] S. Haykin, Adaptive Filter Theory, 4th ed. Upper Saddle River, NJ:PH, 2002.
- [9] J. Barros and R. I. Diego, "Analysis of Harmonics in Power Systems Using the Wavelet-Packet Transform," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. 57, No. 1, pp. 63-69, Jan. 2008.
- [10] 손상욱, 최훈, 배현덕, "적응 부밴드 필터링을 이용한 전력계통 시변주파수와 고조파 검출 및 추적," 전기학회논문지, 제54권, 제8호, pp.679-687, 2009. 4.
- [11] 윤재준, 이정규, 손상욱, 배현덕. "필터뱅크를 이용한 전력품질 사건의 트리거링점 검출," 2011년도 대한 전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 2017-2018, 2011. 7.

저 자 소 개

윤 재 준 (尹 在 駿)

2010년 충북대학교 전기공학과 졸업
2010년 3월~현재 충북대학교 석사과정.
관심분야 : 필터뱅크, 적응신호처리, 전력품질, FPGA
Tel : 043-261-2474
E-mail : jjyun@cbnu.ac.kr

이 정 규

2011년 충북대학교 전기공학과 졸업
2011년 3월~현재 충북대학교 석사과정
관심분야 : 적응신호처리, 전력품질
Tel : 043-261-2474
E-mail : ggangjg@cbnu.ac.kr

손 상 욱 (孫 尙 郁)

2004년 충북대학교 전자공학과 졸업
2006년 동 대학원 전자공학과 석사
2011년 동 대학원 전기공학과 박사
2011년 9월~현재 univ. of Texas at
Austin Post Doc.
관심분야 : 적응신호처리, Blind신호처리,
FPGA, 전력품질
E-mail : sohn6523@austin.utexas.edu

배 현 덕 (裴 鉉 應)

1977년 한양대학교 전자공학과 졸업
1980년 서울대학교 전자공학과 석사
1992년 동 대학원 전자공학과 박사
1994년~1995년 : 미국 시라큐스 대학 전
기전자컴퓨터공학과 방문교수
1987년 3월~현재 충북대학교 전자정보
대학 전기공학과 교수
Tel : 043-261-2474
Fax : 043-263-2419
E-mail : hdbae@cbnu.ac.kr