

웨이블릿 변환을 이용한 실시간 전력품질 감시 시스템의 구현

이교성*, 임상욱, 이용재, 김도훈, 김양모
 충남대학교 전기공학과

A Real Time Power Quality Monitoring System Using The Wavelet Transform

Lee Kyo-Sung*, Yim Sang-Wook, Lee Yong-Jea, Kim Do-Hun, Kim Yang-Mo
 Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University

Abstract - The wavelet transform can apply various lengths of windows according to the amount of signal frequencies. So characteristics of nonstationary disturbances were found to be more closely monitored by the wavelet transform. In this paper, the wavelet transform is applied to the algorithm for monitoring various power quality disturbances. And personal computer monitoring system was developed.

1. 서 론

현대 신호 분석의 기초인 푸리에 변환은 시간에 따라 변하지 않는 정적인 신호의 분석에 매우 효과적이다. 그러나 시간에 따라 변화하는 신호의 동특성을 추적하는데 있어서 푸리에 변환은 적합하지 않다. 이는 푸리에 변환이 주파수에 대한 정보만을 제공할 뿐 시간에 대한 정보를 제공하지 못하기 때문이다. 이러한 한계를 극복하기 위해 푸리에 변환에 창문함수(Window Function)라 불리는 시간에 의존하는 가중함수를 붙인 국소 푸리에 변환(Short-Time Fourier Transform : STFT)이 도입되었다. 그러나 국소 푸리에 변환은 창문함수의 크기가 고정되어 시간 분해능이 일정하므로 정확한 시간 추적에 문제점을 가지고 있다.

반면 웨이블릿 변환(Wavelet Transform : WT)은 주파수에 따라 다른 시간 분해능을 제공한다. 따라서 주기가 긴 저주파 신호에 대하여는 큰 시간 분해능을 적용하고, 주기가 짧은 고주파 신호에 대하여 시간 분해능을 작게 하여 정밀한 분석이 가능하다.

본 논문에서는 각종 전기전자 장비에 악영향을 미치는 순간전압강하와 기타(순간전압상승, 순간정전) 전력의란을 검출 및 분류하고 이를 PC에 저장하는 일련의 전력품질 감시시스템을 구현하였다. 짧은 시간동안 발생하는 전력의란의 검출을 위해서 웨이블릿 변환을 이용하였으며 실험을 통하여 그 성능을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 The Wavelet Transform

주어진 신호 또는 함수 $f(t)$ 를 분석하거나 그의 특성을 파악하기 위해서 정현파와 같은 단순 주기함수를 제외하고는 그 신호 자체를 직접 다루는 것은 효과적이지 못하다. 신호를 효율적으로 다루는 방법 중에 하나는 적당한 신호의 모임을 정하여 그에 적절한 신호 $\psi_n(t)$ 를 이용하여 주어진 신호를 재구성하는 것이다.

$$f(t) = \sum_n a_n \psi_n(t) \tag{1}$$

이 때 a_n 은 위의 급수전개식의 계수이다. 주기신호의 처리에서 주로 사용하는 것은 푸리에 급수 전개식으로, 사용된 $\psi_n(t)$ 는 정현함수와 여현함수로 이루어진 $e^{jmn\omega t}$ 이다.

신호 및 영상처리에서 전통적으로 많이 이용되는 방법인 푸리에 변환(Fourier Transform : FT)은 적당한 주파수 간격으로 얻은 푸리에 계수를 통하여 신호의 스펙트럼 정보를 분석할 수 있게 한다. 그러나 그 특성상 주파수 영역에서만 신호를 분석할 수 있어 신호의 시간 정보와 주파수 정보를 동시에 파악할 수 없다는 단점을 갖고 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 창문함수(Window function)라 불리는 시간에 의존하는 가중함수를 붙인 국소 푸리에 변환(Short-Time Fourier Transform : STFT)이 도입되었다. STFT는 주파수 영역과는 독립적인 창문함수를 기존 푸리에 변환에 가중함수로 붙여 사용하므로, 분석영역이 시간-주파수에 대해 항상 일정하다. 따라서 시간의 변화에 따라 그 특성이 변화하는 신호를 효율적으로 분석할 수 없다는 단점을 가지고 있다.

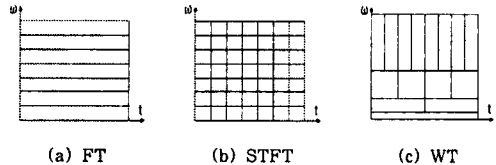


그림 1. FT, STFT, WT의 시간-주파수 창

웨이블릿 변환은 이러한 단점을 보완하여 STFT보다 더 효율적인 시간-주파수 분석을 가능하게 한다. 웨이블릿 변환을 식 (2)에 나타내었다.

$$W_{\psi}f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \tag{2}$$

웨이블릿 변환은 적절히 주어진 기본함수 $\psi(t)$ 를 팽창 또는 수축으로 척도구성(scaling)하고 평행이동(shift)한 결과로 생기는 함수들을 이용한다. 팽창은 척도구성 변수 a 에 의해 조절되고, 이는 적당한 주파수 대역에 대응된다. 평행이동은 시간축에 대한 것이며 이동 간격은 척도구성 변수에 따라 다르다. 이때 기본함수 $\psi(t)$ 를 모 웨이블릿(Mother wavelet)이라고 부른다. 즉, 웨이블릿 변환은 신호의 재구성을 위한 $\psi_n(t)$ 로 모 웨이블릿을 사용한 것으로 변환의 결과는 FT에서와 마찬가지로 신호의 재구성을 위한 계수를 나타내며 모 웨이블릿은 다음과 같은 특징을 가진다.

(1) 웨이블릿은 평균이 0인 함수이다.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \tag{3}$$

(2) 시간 또는 공간에서 국지적인 신호의 분석을 위해서 웨이블릿은 그 중심에서 멀어짐에 따라 그 크기가 빠르게 감소한다.

푸리에 변환과 마찬가지로 웨이블릿 변환도 이산 웨이블릿 변환(The Discrete Wavelet Transform : DWT)으로 나타낼 수 있다.

$$DWT[m, k] = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_n x[n] g\left[\frac{k - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right] \quad (4)$$

$a = a_0^m$, $b = nb_0 a_0^m$ ($a_0 > 1$, $b_0 > 0$)이고 m 과 n 은 양의 정수이다. 따라서 m 의 증가에 따라 a 가 커지면, 주파수 축은 짧고 시간 축은 길게되고 반면에 a 가 작으면 시간 축이 짧고 주파수 축이 긴 시간-주파수 창을 가지게 된다. 본 논문에서는 일반적으로 사용하는 $a_0 = 2$, $b_0 = 1$ 을 적용하여 DWT를 사용하였다.

식 (4)를 다시 쓰면

$$DWT[m, n] = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_k x[k] g[a_0^{-m} n - k] \quad (5)$$

이고, 이는 FIR 디지털 필터의 형태를 가지고 있고 $g[a_0^{-m} n - k]$ 는 필터의 임펄스 응답임을 알 수 있다.

2.2 전체 시스템 구성 및 외란 검출 알고리즘

본 논문에서는 외란의 시점과 끝점의 검출을 위해서 웨이블릿 변환을 이용하였다.

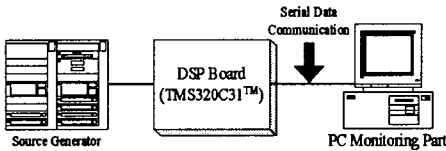


그림 2. 실험을 위한 전력품질 감시 시스템 구성도

취득된 전압은 DSP(Digital Signal Processor) 보드에서 가공되며 외란으로 판단되면 외란의 종류와 지속시간, 외란의 실효치를 연산하여 PC로 전송하도록 하였다.

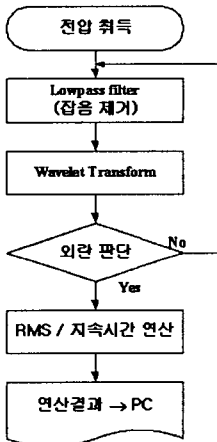


그림 3. 전력품질 감시시스템 전체 알고리즘

그림 3은 전력품질 감시 시스템의 전체 알고리즘을 나타내고 있다. 외란의 검출 과정은 크게 3가지 Mode로 나누었다.

- (ㄱ) Mode 0 : 전력외란 미발생
- (ㄴ) Mode 1 : 전력외란 발생
- (ㄷ) Mode 2 : 외란 지속 ~ 외란 종료

웨이블릿 변환은 외란의 시점과 끝점의 검출을 위해서 적용하였다. 또한 모 웨이블릿으로 4개의 필터 계수를 가지는 Daubechies 2 웨이블릿을 사용하였다. 웨이블릿 변환은 신호의 변화에 민감하여 외란이 발생한 경우 웨이블릿 변환을 수행한 결과는 급격한 변화를 보인다. 이때 웨이블릿 변환을 수행하여 얻은 SDC(Squared Detail Coefficient)가 임계값을 초과하면 외란이라 판단하고 Mode 1을 수행한다. 임계값을 초과하지 않는 경우 Mode 0을 계속 수행한다.

Mode 1에서는 먼저 실효치를 계산하여 외란 여부를 판단하고 외란의 종류와 실효치를 얻으며 동시에 외란의 지속시간 연산을 위하여 카운트를 계속한다.

Mode 2에서는 지속시간을 계속 카운트하며 외란의 끝점을 검출하고 외란의 종류와 실효치 그리고 외란의 지속시간을 PC로 전송하도록 하였다.

2.3 하드웨어 구성 및 PC 감시부

그림 4는 제작된 전력품질 감시 시스템을 나타내고 있다. 전력이란 신호의 생성을 위해서 전원시뮬레이터(AA2000XG)를 사용하였으며 50MHz TMS320C31™을 메인 프로세서로 하는 DSP 보드에서 제안한 알고리즘에 따라 취득된 전압을 가공하도록 하였다.



그림 4. PC와 연동하는 전력품질 감시 시스템



그림 5. 전원시뮬레이터(AA2000XG, TAKASAGO)

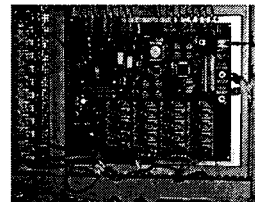
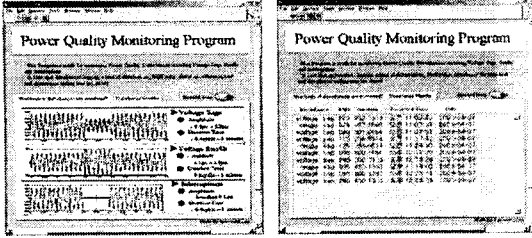


그림 6. TMS320C31™ DSP Board

DSP 보드는 12kHz의 주파수로 전압을 취하여 제안된 알고리즘에 적용하였다. 가공된 전압이 외란으로 판명되면 외란의 종류와 실효치, 그리고 외란의 지속시간을 연산하고 Z85C30 직렬통신(RS232C) 컨트롤러를 이용하여 PC로 전송하도록 하였다.



(a) Main Window (b) Data 감시부

(c) 저장된 Data 파일

시간	종류	사건ID	이동값	
11:00:40	2000-04-07			
voltage sag	879	952.3333	11:02:39	2000-04-07
voltage sag	878	952.1666	11:07:51	2000-04-07
voltage sag	868	891.6666	11:17:42	2000-04-07
voltage sag	175	254.0516	11:28:08	2000-04-07
voltage sag	125	254.0516	12:17:38	2000-04-07
voltage sag	805	886.1666	12:18:28	2000-04-07
voltage sag	895	886.3333	12:19:28	2000-04-07
voltage sag	895	854.1333	12:19:38	2000-04-07
voltage sag	895	886.3333	12:19:48	2000-04-07
voltage sag	895	854.1333	12:25:35	2000-04-07

그림 7. Power Quality Monitoring Program

PC로 전송된 정보는 그림 7의 (b)와 같이 전송된 시간과 함께 표시되도록 하였으며 외란에 대한 정보가 전송될 때마다 지속적으로 업데이트 될과 동시에 파일로 저장되도록 하였다.

2.4 실험 결과

제안된 알고리즘을 적용하여 반복적으로 실험을 수행하며 전원시플레이터의 입력과 측정값을 비교하였다. 여러 전력 외란 중에서 발생빈도가 가장 높은 순간전압강하의 검출을 주 목표로 하였으며 부가적으로 순간전압상승과 순간정전의 검출에도 제안된 알고리즘을 적용하였다.

표 1. 순간전압강하 검출(기준전압 = 150V)

전원시플레이터		측 정 값		Error	
RMS (V)	지속시간 (ms)	RMS (V)	지속시간 (ms)	RMS (%)	지속시간 (cycle)
100	45	101	45.1666	1	0.01
80	900	81	900.1666	1.25	0.01
80	500	82	501.3333	2.5	0.08
80	300	81	300.6666	1.25	0.04
80	50	81	50.1666	1.25	0.01
60	800	61	800.1666	3.33	0.01
50	200	52	200.6666	4	0.04

표 2. 순간전압상승 검출(기준전압 = 150V)

전원시플레이터		측 정 값		Error	
RMS (V)	지속시간 (ms)	RMS (V)	지속시간 (ms)	RMS (%)	지속시간 (cycle)
210	495	211	496.0000	0.48	0.06
210	675	211	658.6666	0.95	0.10
190	600	192	600.1666	1.05	0.01
190	300	191	300.1666	0.52	0.01
185	200	187	300.8333	1.07	0.05

표 3. 순간정전 검출(기준전압 = 150V)

전원시플레이터		측 정 값		Error	
RMS (V)	지속시간 (ms)	RMS (V)	지속시간 (ms)	RMS (%)	지속시간 (cycle)
10	687	15	687.8333	50	0.05
10	687	14	688.5000	40	0.09
5	900	13	900.3333	160	0.02
5	900	12	900.8333	140	0.05

표 1~3은 전원시플레이터 입력과 측정치를 비교하고 오차를 나타낸 것으로 반복적으로 측정된 값에서 추출한 것이다.

순간전압강하와 순간전압상승의 경우 외란 검출에 우수한 성능을 보였다. 측정된 실효치는 평균적으로 평균적으로 1%의 오차를 나타내었고 지속시간의 경우 평균 0.06주기(1/1000초)의 오차를 나타내었다.

그러나 순간정전의 경우, 측정된 지속시간의 오차는 순간전압강하, 순간전압상승과 비슷하였으나 실효치의 경우 상당히 큰 오차를 나타내었다. 이는 실효치를 계산하는 과정에서 순간정전 전압값으로 변화하는 과도상태의 전압값의 영향으로 큰 오차를 나타내었다.

3. 결 론

본 논문에서는 전력외란의 검출을 위해서 웨이블릿 변환을 적용하여 DSP를 기반으로 운용되는 실시간 전력품질 감시 시스템을 구현하였다. 센싱 보드에서 취득된 전압은 웨이블릿 변환을 통하여 외란의 발생 시점을 검출하고 실효치를 계산하여 외란으로 판명되는 경우, 외란의 종류 판별 및 실효치를 구하도록 하였다. 외란의 시작과 마찬가지로 종료 시점 또한 웨이블릿 변환을 이용하여 검출하고 외란의 지속시간을 연산한 후, 외란의 종류, 실효치, 지속시간을 PC로 전송, 전송된 정보는 창에 표시됨과 동시에 파일로 저장되는 일련의 전력품질 감시 시스템을 구성하였다.

구성된 전력품질 감시 시스템은 외란의 정보를 추적하여 외란에 대한 분석뿐만 아니라 차후 전력품질 향상을 위한 보상기 및 대책 판단시 유용한 정보를 제공할 것으로 판단된다.

향후 제안된 알고리즘의 최적화와 PC 감시부의 기능 향상으로 전력품질 감시 시스템의 기능을 극대화 하고자 한다.

[참 고 문 헌]

- [1] N.H.Woodley, L.Morgan, A.Sundaram, "Experience with an Inverter Based Dynamic Voltage Restorer", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.14, No.3, July, pp.1181-1186, 1999
- [2] M.F.Alves and T.N.Ribeiro, "Voltage Sag : An Overview of IEC and IEEE Standards and Application Criteria", Proceedings of the IEEE Transmission and distribution conference, Vol.2, pp.585-589, 1999
- [3] C.H.Kim and R.Agfarwal, "Wavelet transform in power systems Part 1", Power engineering Journal, Vol.15, pp.81-87, 2000
- [4] "Recommended practice for monitoring electric power quality", IEEE Standard 1159-1195, 1995
- [5] T.K.Abdel-Galil, E.F.Saadany and M.M.A. Salama, "Effect of new deregulation policy on power quality monitoring and mitigation techniques", Proceedings of the IEEE/PES transmission and distribution conference and exposition, Vol.1, pp.554-560, 2001
- [6] S.Santoso, E.J.Powers, W.M.Grady and G.J.Hofmann, "Power quality assessment via wavelet transform analysis", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.11, No.2, pp.924-930, 1996
- [7] 이교성, 이용제, 임상욱, 조봉구, 김양모, "DSP를 기반으로 운용되는 전력품질 감시 시스템", 대한전기학회 EMECS학회 춘계학술대회 논문집, pp.173-175, 2003

본 연구는 한국과학재단
목적기초연구지원으로 수행되었음
과제번호: R01-2000-000267-0