

음향방출신호에 대한 이산웨이블렛 변환기법의 적용

Application of Technique Discrete Wavelet Transform for Acoustic Emission Signals

* 박재준, * 김연수, * 김민수, * 김진승, ** 백관현, *** 송영철,
**** 김성홍, ***** 권동진

(* Jae-Jun Park, * Meyoun-Soo Kim, * Min-Soo Kim, * Jin-Seong Kim, ** Kwan-Hyun Beak, ***
Young-Chul Song, **** Sung-Hong Kim, ***** Dong-Jin Kweon)

Abstract

The wavelet transform is the most recent technique for processing signals with time-varying spectra. In this paper, the wavelet transform is utilized to improved the assessment and multi-resolution analysis of acoustic emission signals generating in partial discharge. This paper especially deals with the assessment of process statistical parameter using the features extracted from the wavelet coefficients of measured acoustic emission signals in case of applied voltage 20[kv]. Since the parameter assessment using all wavelet coefficients will often turn out leads to inefficient or inaccurate results, we selected that level-3 stage of multi decomposition in discrete wavelet transform. We applied FIR(Finite Impulse Response)digital filter algorithm in order to suppression for random noise. The white noise be included high frequency component denoised as decomposition of discrete wavelet transform level-3. We make use of the feature extraction parameter namely, maximum value of acoustic emission signal, average value, dispersion, skewness, kurtosis, etc. The effectiveness of this new method has been verified on ability a diagnosis transformer go through feature extraction in stage of aging(the early period, the last period)

Key Words(중요용어) : Acoustic Emission Signals, Discrete Wavelet Transform,
FIR Digital Filter, Feature Extraction, Multi-Decomposition

1)

1. 서론

최근 전기 기기의 고전압, 대용량화됨으로 하여 안정적이고 효율이 좋은 전력의 공급이 절실히 요구되고 있다. 이에 따라 전력 기기인 변압기나 전력 케이블을 비롯한 전력 계통과 절연 시스템에 있어서 절연 성능의 향상을 위한 중요성이 어느 때 보다 높다 하겠다. 전력의 대용량화는 절연시스템의 열화와 절함을 가져오게 되는 주요한 원인이 된다. 절연 시스템의 약화를 가져오게 되면 곧바로 부분 방전이 발생되어 곧 전로 파괴에 이르게 된다. 이런

* 중부대학교 정보공학부
(충남 금산군 추부면 중부대학교,
Fax: 0412-750-6751
E-mail : jjpark@joongbu.ac.kr)
** 두원공과대학 전기과
*** 광운대학교 전기공학과
**** 순천청암대학 전기설비과
***** 한전전력연구원

변압기와 같은 전력기기가 절연 파괴에 이른다던 상상을 초월한 대 혼란과 손실이 막대하리라고 생각한다. 한 예로서 금년 여의도 지하 전력 구에서 전력 사고는 국가의 정보망 및 재산상의 피해를 보여주는 좋은 예가 될 수 있다고 할 것이다. 종래의 신호 해석 및 분석을 통한 진단 방법으로 위상각에 따른 $j - q - n$ 분포 패턴을 널리 이용하여 연구되어 왔고 실용화를 하고 있다.

종래의 디지털신호처리의 기법으로서 주파수-크기 분석법인 FFT 스펙트럼 해석을 주로 이용하였지만, 최근에서는 시간의 흐름에 따른 주파수 분석에 탁월한 웨이블릿 변환기법을 이용하고 있다. 이런 절연 파괴를 미연에 방지하기 위해 대용량 및 소용량 변압기를 상시 진단하기 위해 변압기내의 부분방전 시 발생된 음향방출신호를 추출하는데 multi-resolution (multi-win dow)를 사용하여 고주파 신호 영역과 저주파 신호영역 모두를 분리하여 비선형적인 신호(초음파신호=음향 방출신호, 부분 방전 신호)의 계수를 통한 특징추출을 통한 연구를 실시하고자 한다.

II 실험방법 및 디지털 신호처리 과정

1. Data acquisition System

Data Acquisition System은 Digital Oscilloscope을 이용하게 되면 real time으로 data를 pc로 전송받기 어려운 점 때문에 본 연구에 적합한 A/D Converter를 설정하였습니다. ULTRAVIEW에서 생산된 12bit A/D board로서 80MHZ/Dual 40MHZ를 처리할 수 있으며, 최대 80MS/S 샘플링을 가지고 있으며 2-Channel로 구성되었으며, 차폐된 동축 케이블 (Shield coaxial cable)을 통하여 음향센서로부터 신호가 A/D보드로 입력되도록 구성하였습니다. 본 연구에서는 위상각을 고려하지 않은 단일AE 채널만을 이용하여 4Mbyte A/D보드의 버퍼메모리를 갖는 PCI버스방식을 가지고 있다. Sampling Rate는 체적의 상태라고 생각되는 8Ms/s을 유지하였으며, 4M byte 데이터를 실시간 획득하는데 걸리는 시간은 $125[ms] = 0.125[s]$ 이었다. 3분 동안 데이터를 획득하고 1분 동안의 휴지시간을 두고 절연파괴시 까지 연속적으로 계측을 실시하였다. 4M byte의 정보는 2진 정보로 되어 있으므로 Visual C++ 6.0으로 Interface 프로그램을 작성하여 10진 형식으로 코드 변환을 실시하였다. 동시에 4 M byte의 데이터를 나타낼 수 없으므로 EXCEL창에서 쉽게 나타낼 수 있도록 하기 위해서 64등분하는 프로그램을 작성하여 파일로 분류 선별하였다. 한 file내의 신호 point

수는 16384개의 Point 를 가지게 되므로 한 파일동안 데이터를 획득하는데 소요되는 시간은 $1.95[ms]$ 이었다. 음향방출 신호의 한 point동안 시간은 $0.12 [\mu s]$ 가 된다

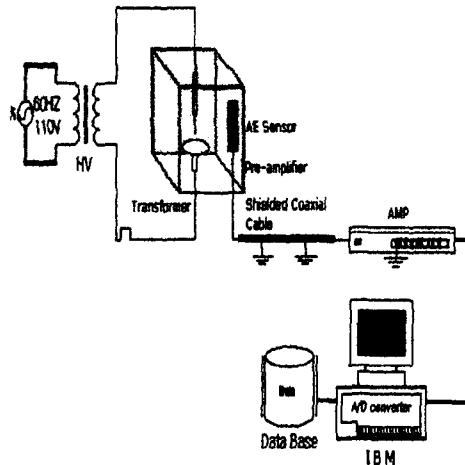


그림 1. 실험장치

2. Digital Filter

본 연구에서 사용된 필터는 시스템의 랜덤 노이즈 제거에 용이한 디지털 필터 중 한 기법으로서 FIR(finite impulse response)디지털 필터를 이용하여 랜덤 노이즈를 제거하였고 그리고 화이트 노이즈 제거에 용이한 이산 웨이블릿 변환을 통하여 화이트 노이즈를 제거하였다. FIR 디지털 필터의 장점은 입력 신호에 의존하여 자동적으로 계수(coefficients)를 조정 할 수 있다는 점이다. 그림2에서 나타낸 것처럼 본 연구에서 적용한 FIR디지털필터의 구조를 보여주고 있다.

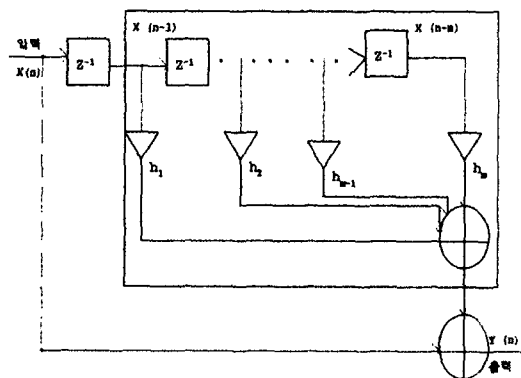


그림2. 디지털 FIR 필터의 구조

3. 마더웨이블릿 선정

Mother Wavelet의 선정은 각기 다른 신호의 변화를 탐지하고 위치를 확인하는데 중요한 역할을 하게 된다. 따라서 Mother Wavelet의 선정은 연속된 신호의 성질과 종류에 달려있다 할 것이다. 본 연구에서 사용된 음향 방출 신호는 low-amplitude, short duration, fast decaying 그리고 oscillating하는 형태의 신호이므로 우선 Mother Wavelet를 선정하기 위해서 두 종류의 Mother Wavelet인 Haar Mother Wavelet과 Daubechies' Mother Wavelet의 알고리즘을 위해서 사용된 각각의 필터계수를 표1에서 나타내고 있다.

Daubechies Mother Filter Coefficients	
저주파	.026749f, -.016864f, -.078233f, .266864f, .602949f, .266864f, -.078233f, -.016864f, .026749f
고주파	0.000f, -.045636f, .028772f, .295636f, -.557543f, .295636f, .028772f, -.045636f, 0.00f

표1. Daubechies' 마더 웨이블렛의 필터계수

4. 다중해상도 웨이블렛 변환 (multi-resolution Wavelet Transform)

이산 웨이블렛의 확장으로 직교벡터공간에서 웨이블렛 함수를 변화시키에 따라서 다양한 크기의 해상도로 신호 $x(t)$ 에 포함되어 있는 성분들을 분석할 수 있게 된다. 이를 위해 다중 해상도 신호 분할 알고리즘이 소개되었으며, 이는 신호성분을 단계별로 더욱 세밀하게 표현하는 웨이블렛을 만들어서 적용하는 과정을 거치게 된다. 다시 말해 2만클 확장된 식 (1)에 있는 이산 웨이블렛 함수 $\psi 2^j(t)$ 를 시간 축에 대해 $2^{-j}n$ 천이 시키고, $\sqrt{2^{-j}}$ 로 정규화 함으로써, 함수를 $\psi 2^j(t)$ 를 시간 축에 대해 $2^{-j}n$ 천이시

키고, $\sqrt{2^{-j}}$ 로 정규화 함으로써,

$$\sqrt{2^{-j}} \Psi_2(t - 2^{-j}n) \quad (4)$$

웨이블렛이 구성된다. 다중 해상도 웨이블렛 변환 (multiresolution Wavelet Transform)은 웨이블렛 함수를 정규 직교기저에 적용함으로써 주어진 함수 특성을 분해하여 나타내는 알고리즘이라 할 수 있다. 웨이블렛은 고주파와 저주파를 단계별로 분리 적용하여 level-1, level-2.....로 분해하여간다. 그 역의

과정을 합성 즉, 역웨이블렛(IDWT)이라고 한다. 이산웨이블렛의 과정 및 그 역의 과정인 역웨이블렛을 그림3에서 나타내고있다.

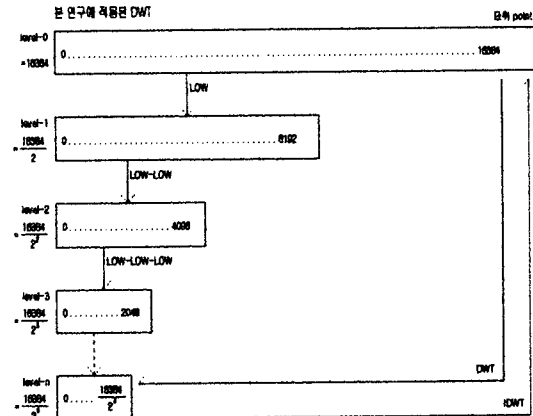


그림3. 본 연구에 적용된 이산웨이블렛 변환의 분해와 합성

그림3에서 볼 수 있듯이 고주파성분과 저주파성분이 적절히 분해되고 있음을 볼 수 있으며, 분리된 에너지는 웨이블렛 변환레벨을 증가시킴에 따라 저주파 쪽으로 에너지가 집중되어 가는 과정을 볼 수 가있다. 일반적으로 웨이블렛변환을 적용했을 때 90[%] 이상의 에너지성분이 저주파 쪽으로 집중된다.

5. 자료처리의 흐름도

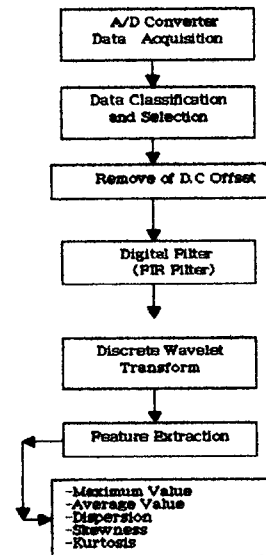


그림4. 자료처리의 흐름도

6. 특징추출 (Feature Extraction)

이산웨이블렛의 다중분해능을 이용하여 특징을 추출하기 위해서 원 신호를 DWT의 레벨을 0,1,2,3,4로 하여 원 신호의 형태를 그대로 유지되는 레벨을 찾아, 그 레벨로 고정하여 각각의 통계파라미터에 이용한다. 원 신호의 포인트 수는 16384 Point인데 이산웨이블렛을 Level-1로 하면 원 신호에 대한 에너지가 만 $\frac{1}{2}$ 량에 해당된 포인트 수를 갖게 된다.

Level-2 로 하면 2^2 (4배)만큼 압축되어지고, Level-3로 하면 2^3 (8배)만큼, Level-4로 하면 2^4 (16배)압축되어진다. 계속하여 레벨을 높여주어 Level-n 로 되면 2^n 만큼으로 압축되어진다. 즉

Level-3으로 하면 16384포인트의 신호가 2048의 웨이블렛 계수로, Level-4로 하면 웨이블렛의 계수가 1024포인트의 신호로 압축되어 표현될 수 있으므로 최적의 웨이블렛의 레벨을 선정하여 특징을 추출하면 된다. 본 연구에서는 Level-3으로 고정하여 통계적인 파라미터에 적용하였다.

1. Maximum Value
2. Average Value
3. Dispersion
4. Skewness
5. Kurtosis

III. 결과 및 검토

1. 디지털 필터

디지털 신호처리방법으로 연속적인 노이즈는 입력 신호로부터 예보자 연속 신호를 마이너스 한만큼 노이즈를 줄일 수 있다. 시간 영역에서 작용한 이런 예보 알고리즘이 노이즈의 통계적 특성으로 이용하고 있다. 이 음향방출신호에 자체 알고리즘하여 FIR 디지털 필터를 이용한 결과를 나타내고 있다. 그림 5의 경우 랜덤 노이즈를 포함한 원형신호를 나타내고 있다. 그림 6에서는 FIR(Finite Impulse Response) 알고리즘을 적용한 결과 상당한 정도의 노이즈가 제거된 상태를 볼 수가 있다.

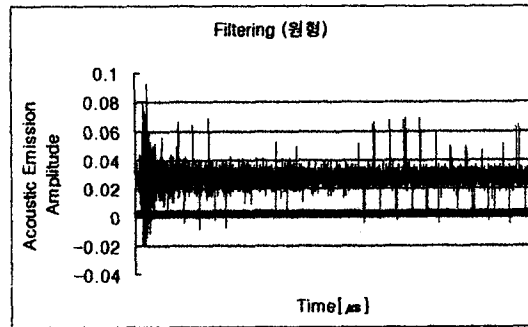


그림 5. 랜덤 노이즈를 포함한 원형신호

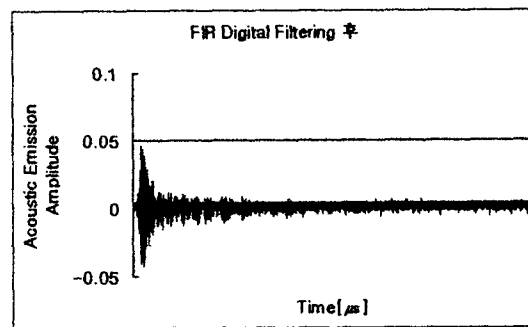


그림 6. FIR 디지털 필터링 후의 노이즈가 제거된 상태신호

그림 7에서는 고주파의 성분이 포함된 화이트 노이즈가 포함된 상태의 신호를 나타내고 있다. 화이트의 노이즈 제거기법으로서는 웨이블렛 레벨 3을 분해함으로써 노이즈가 억제될 수가 있다. 그림 8에서는 노이즈가 제거된 상태를 볼 수가 있다.

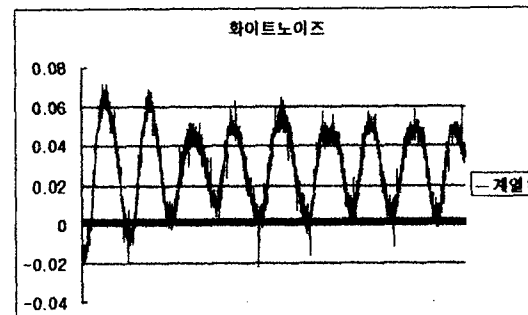


그림 7. 고주파의 성분이 포함된 화이트 노이즈

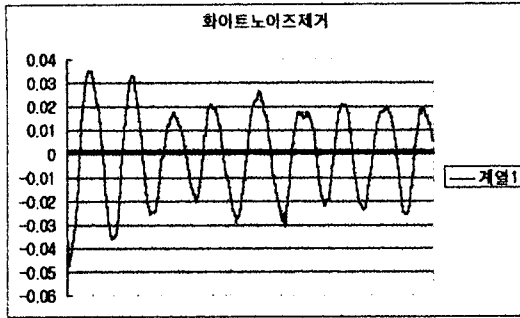


그림 8. 이산웨이블렛을 통한 화이트 노이즈 제거

2. 음향방출신호

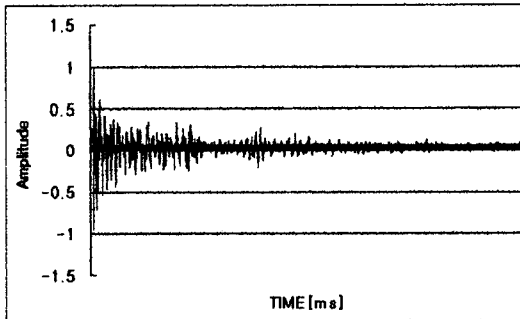


그림 9. 실측된 전형적인 음향방출신호

부분방전 시 발생된 음향방출신호의 전형적인 신호 파형을 그림 9에서 나타내었다. 신호의 포인트 수는 24576포인트로서 2.825[ms]의 시간동안 측정된 신호이다. 계측된 모든 음향방출신호의 전반적인 특징은 신호 전반부에서는 급상승하여 급강하되는 형태를 나타내고 있으며, 부분방전신호 발생원이 모의 변압기 중앙에 위치하여 부분방전이 일어나면 음향의 전파에 의하여 다른 벽면에 부딪쳐 다시 반사되어오게 되므로 이는 echo에 의하여 음향펄스의 파가 길어지고 있다고 사료된다.

3. 변압기내 부분 방전시 열화정도에 따른 음향 방출신호의 패턴

(1) Daubechies' Discrete Wavelet Transform를 음향방출신호에 적용

① 변압기 부분방전 시 발생된 음향방출 열화 초기 신호

열화초기 음향방출신호의 패턴으로서 그림10에서 나타내고있다. 음향방출 열화 초기신호는 중기 및

말기신호에 비하여 발생 펄스진폭이 크고, 발생신호의 duration time 이 상대적으로 길기 때문에 excel 상에서 나타내기 쉬운 정도인 16384 포인트만으로 나타내고있다. 음향방출 파형은 지수 함수적인 형태이지만, 말기의 음향방출신호보다 좀더 완만한 지수 함수 형태의 신호가 다수의 신호형태로 표현되고 있다. 인가전압이 20[KV]의 경우 펄스발생주기가 짧아져서 쌍방의 펄스가 많이 발생됨을 알 수가 있었다. 열화의 말기신호는 초기에 비하여 진폭이 낮고, 펄스의 duration time도 극히 짧은 시간동안의 신호로서 단발성의 펄스가 다수의 신호의 특징으로 나타나고 있다. 역시 지수함수적인 펄스의 형태를 이루고 있지만 초기에 비하여 기울기가 더욱 큰 지수함수의 형태를 가진 신호로서 나타내고 있다. 뒤 절에서 언급하겠지만 통계적인 특징 중에서 왜도 및 첨도도의 영향을 주고있는 한 요인이 된다.

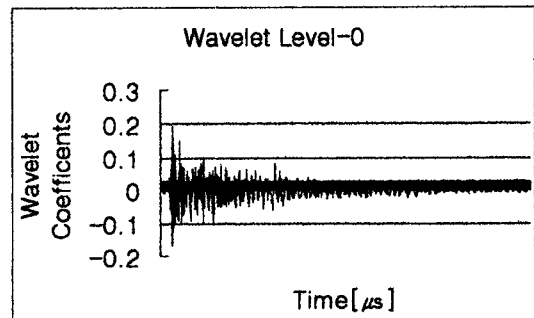


그림 10. Daubechies 이산 웨이블렛 Level-0(원형)

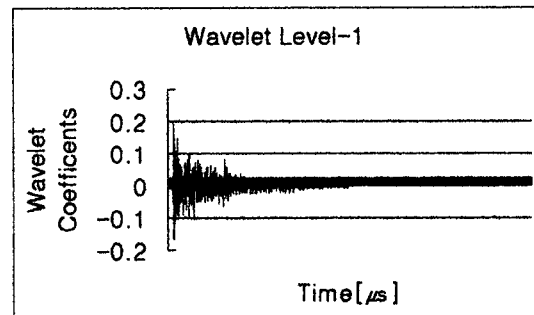


그림 11. Daubechies 이산웨이블렛 Level-1

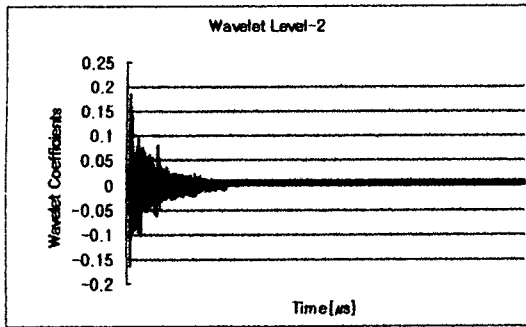


그림 12. Daubechies 이산웨이블렛 Level-2

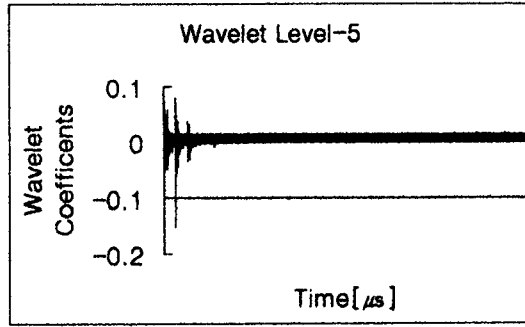


그림 15. Daubechies 이산웨이블렛 Level-5

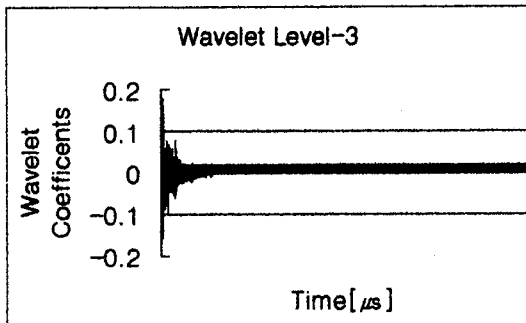


그림 13. Daubechies 이산웨이블렛 Level-3

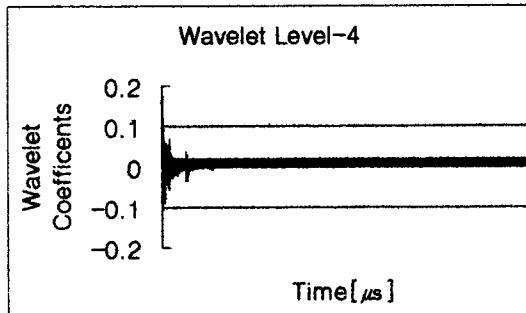


그림 14. Daubechies 이산웨이블렛 Level-4

열화상태	열화 초기	열화 말기
통계파라미터		
웨이블렛 계수최대값	0.2268	0.1625
평균	0.020330	0.0111
분산	0.003771	0.000179
왜도	2.8437	4.2254
첨세도	14.141	24.81

표2. 열화 초기 및 말기 특징 추출

부분방전시 발생된 음향방출신호를 Daubechies'마더 웨이블렛 이산 필터계수를 표1에서 나타내었다. Visual C++ 6.0으로 다중-분해능 이산웨이블렛를 자체 알고리즘한 결과 음향방출신호에 적용한 결과를 그림10에서 15까지 각 레벨인 Level-0, Level-1, Level-2, Level-3, Level-4 까지 나타내었다. 본 연구에서 특징추출을 위한 통계파라미터에 적용하기 위해서 DWT의 Level-3으로 고정하여 모든 신호를 DWT하였다.20[KV] 인가시, 열화초기 및 말기신호의 특징을 추출한 결과 표2에서 그 결과를 나타내었다. 하나의 파일에서 나타낸 신호는 16384포인트인

$\frac{16384}{2^3}$ 개의 2048포인트의 Zero Cross 의 Positive 값을 재배열하여 각 통계파라미터에 적용하였다. Daubechies'이산웨이블렛이 음향방출신호의 분석 및 합성에 용이함을 알 수가 있었다.

IV. 결론

본 연구에서 다음 같은 결론을 얻을 수가 있었다. 마더웨이브렛의 선형시 HAAR의 이산웨이브렛은 음향방출신호에 부적합하고, Daubechies' Discrete Wavelet Transform이 부분방전시 발생된 음향방출신호에 적합하다는 사실을 알 수가 랜덤 노이즈의 제거기법으로서 FIR Digital Filter의 알고리즘으로 상당한 노이즈가 제거될 수가 있었다.

1. DWT의 Multi-Decomposition시 Level-3가 특징추출 위해서 사용되었다.

2. 열화초기-말기 신호패턴의 특징을 추출한 결과에 대해서

(1) 초기에서는 펄스의 진폭이 말기에 비하여 상대적으로 크지만, 말기에서는 작았다.

(2) 초기상태에서는 펄스발생 duration time이 길고 말기에서는 단발성펄스로서 극히 짧았다.

(3) 15[KV] 보다 20[KV]인가할 때 초기 상태에서도 신호의 발생시간이 상대적으로 짧아짐을 알 수가 있었다.

(4) 왜도 및 첨쇄도의 경우도 초기와 말기에서 공통적으로 지수함수적인 펄스 즉, 신호전반부에서 높다가 급강하하는 형태를 이루고 있었다.

그러나 말기에서는 급강하하는 정도가 더욱 커서 왜도 및 첨쇄도가 초기에 비하여 상대적으로 컸다.

3. 15[KV]인가시, 초기상태 신호의 경우 duration time 이 크게 되는 경우는 부분방전 신호원이 모의 변압기 내부 중앙에 위치하여 발생된 신호가 사방벽면의 반사에 기인될 수가 있다고 사료됩니다. 그러나 20[KV]인가시 duration time 이 더욱 짧아져서 16384포인트 내(1950[ms])두개의 펄스의 발생빈도가 높아졌다.

감사의 글

이 연구는 한국전력공사 지원에 의하여 기초전력 공동연구소 주관(관리번호 99-지-02호)으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

[1] Santosh Kumar Pandey and L. Satish, "Multiresolution Signal Decomposition: A New Tool For Fault Detection in Power Transformers During Impulse Tests", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.13, No.4, pp1194-1200,

1998

[2] Stefan Pittner and Sagar V. Kamarthi, "Feature Extraction From Wavelet Coefficients for Pattern Recognition Tasks", IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.21, NO.1, pp 83-88, 1999

[3] Xiaoli Li, Shen Dong, Zhejun Yuan, "Discrete Wavelet Transform for Tool Breakage Monitoring", International Journal of Machine Tools & Manufacture 39(1999) 1935-1944

[4] E. Gulski and F. H. Kreuger, "Computer aided recognition of discharge sources", IEEE Trans. Elect. Insul. Vol. 27, 82-92, 1992.

[5] R. E. James and B. T. Phung, "Development of computer-based measurements and their application to PD Pattern analysis", IEEE Trans. Die. and Elect. Insul. Vol. 2, 838-856, 1995.

[6] C. Sidney Burrus and Ramesh A. Gopinath and Haitao Guo, "Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms: A Primer", Prentice-Hall, 1997.

[7] Gerald Kaiser, "A Friendly Guide to Wavelets", Springer-Verlag, 1994.

[9] Stephane G. Mallat, "A Wavelet Tour of Signal Processing", Academic Pr., 1998.

[8] Stephane Mallat and Wen Liang Hwang, "Singularity Detection and Processing with Wavelets", IEEE Trans. on Information Theory, Vol. 38, No. 2, pp. 617-643, March 1992.

[9] Yusheng Quan, Ning Gao, Guan Jun Zhang, Zhang Yan, "Wavelet Transform Applying in Partial Discharge Measurement", Conference of the 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Arlington, Virginia, USA, June 7-10, 1998.

[10] Vetterli M., and C. Herley, "Wavelets and Filter Banks: Theory and Design", IEEE Trans. on Signal Processing, Vol. 40, No. 9, pp. 2207-2232, Sept 1992.