

웨이블렛 변환 기법을 이용한 절연 시스템 진단에 관한 연구

장진강*, 임윤석*, 이영상*, 김성훈**, 김재환*
 광운대학교 전기공학과*, 순천청양대학 전기설비과**

A Study on the Insulation System Diagnosis using the Wavelet Transform Method

Jin-Kang Jang*, Yun-Seog Lim*, Sung-Hong Kim**, Jae-Jun Park***, Jae-Hwan Kim*

* Dept. of Electrical Engineering Kwangwoon Univ.,
 ** Electrical Facilities, Suncheon Chongam College,

Abstract - 웨이블렛 기법은 비주기적 신호의 해석에 있어 새롭게 적용되고 있는 방법이다. 이 방법은 Fourier Transform(FT), the Fast Fourier Transform(FFT), Least Square Method 방법과는 달리 시간-주파수 분석을 통해 비주기적 파도 신호의 감지와 특징 추출이 용이하다.

이에 본 연구에서는 이러한 통계적 기법과는 달리 부분 방전 발생 신호를 시간-주파수 영역에서 연속적으로 분석 가능한 웨이블렛 기법을 이용하여, 시간에 따른 절연체의 열화를 해석 및 진단하기로 한다.

부분 방전 현상을 나타내는 데이터는 방대하므로 진단을 위해 해석 정보에서 특정한 특징을 추출하며 이를 바탕으로 체계화된 데이터 베이스를 구성하는 기반을 마련한다. 해석에 필요한 신호는 복합감지 시스템(부분방전 시스템, 음향방출 시스템)을 이용하여 수집하였다.

주제어 : 웨이블렛 변환, FFT, Feature Extraction

1. 서 론

최근에 기기의 고압, 대용량화 됨으로서 절연의 중요성이 높아져 가고 있으며, 이로 인해 고전압 장치의 절연성능을 시험, 진단하기 위한 다양한 분석 기법들이 소개되고 있다. 더우기 절연 성능을 저하시키는 부분 방전 메커니즘을 해석함에 있어서는 고전적 추정 방법인 위상각에 따른 $\phi-q-n$ 파라미터를 이용한 통계적인 기법들이 널리 사용되어 왔다.[2]-[5] 그러나, 본 연구에서는 이러한 통계적인 기법과는 달리 부분 방전 발생 신호의 시간-주파수 특성을 분석할 수 있는 새로운 기법을 이용하여, 시간에 따른 절연체의 열화를 해석할 수 있는 기술에 관하여 검토하려한다. 이를 위해, 신호처리분야에서 널리 사용되는 주파수-크기 분석법인 FFT 스펙트럼 해석이 아닌 시간 흐름에 따른 주파수 분석이 가능한 웨이블렛 기법을 이용하여 연구하기로 한다.

2. 본 론

2.1 실험 장치

음향방출 시스템을 이용한 부분방전 검출 복합시스템을 사용하여 분석하려는 부분방전 신호를 검출하였다.[1] 시료에 가해지는 전압은 110V 상용전압을 승압시켜 15[kV]로 유지하고, 실험에 사용된 시료는 전력용 케이블 재료로 많이 쓰이고 있는 가교폴리에틸렌(XLPE)으로 제작하였으며, 1.5[mm]의 간격을 갖는 침대-평판 전극 구조를 구성하였다.

음향 방출 신호를 얻기 위하여 하부전극에는 250kHz~600kHz 대역의 출력을 갖고, 최대 공진 주파수가 500kHz대역인 음향 센서를 사용하였으며, 평판 전극 아래 10 [mm]되는 위치에 설치하였다. 또한 센서에 연결된 증폭기(pre-amp)는 센서의 공진 주파수에 맞춰 설

계된 것으로서 100[kHz]-1[MHz] 대역에서 최대 공진 주파수를 갖는다.

2.2 실험 데이터 수집

센서로부터 출력된 신호는 디지털 오실로스코프를 거치면서 일정한 시간 간격으로 샘플링되어 인터페이스 카드를 거쳐 컴퓨터에 저장된다. 디지털 오실로스코프의 샘플링 주파수(f_s)는 각각 50, 25, 10MS/s 로 나누어 설정한다. 이는 음향센서의 최대 출력 주파수의 2배를 훨씬 초과하는 샘플링 주파수 비율이다. 연속적 원동으로 부분방전 신호를 검출하는 것은 오실로스코프를 통해 획득된 신호가 너무 방대한 데이터(125,000pt/1 detect)이기 때문에 해석하기에 곤란하다. 이에 AC 전압이 인가된 후 일정한 시간 간격을 가지고 오실로스코프를 통해 획득된 데이터가 컴퓨터로 전송되고(5분 간격) 이 저장된 신호를 일정한 간격으로 구획 분할한 후, FFT 기법을 이용하여 분석하였다. 이후 비주기적 신호를 분석하는데 적용되는 방법인 웨이블렛 기법을 적용하였다. 먼저 획득 신호와 유사성이 높은 웨이블렛 원형 함수를 설정하고 원신호와 마더 웨이블렛을 비교하여 그 유사성을 측정하고, 이를 바탕으로 특징을 추출하였다.

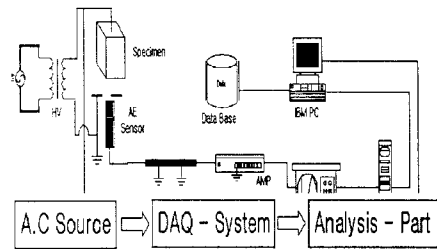


그림 1. 실험장치 블록선도
 Fig. 1. Block Diagram of Experimental Device

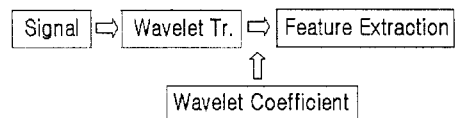


그림 2. 웨이블렛 계산 개념도
 Fig. 2. Computation Scheme

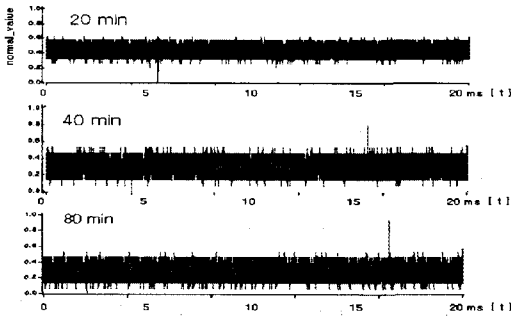


그림 3. 시간에 따른 측정 데이터
Fig 3. Obtained Signal Display on time

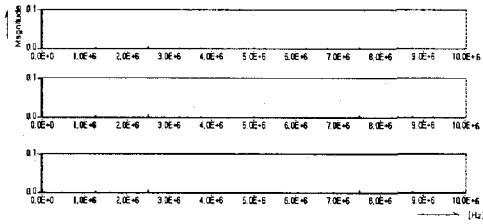


그림 4. 측정 데이터에 대한 FFT 결과
Fig 4. Result of FFT on Obtained data

2.2 웨이블릿 변환 이론

지금까지는 정상 신호를 변환하기 위한 방법으로 Fourier 변환이 많이 사용되어 왔다. 그러나 아주 짧은 주기를 가지면서 급격히 변화는 비주기 신호에서는 전체 주파수축에 대하여 넓게 퍼지는 양상을 보이게 된다.

정현파가 아닌 신호에 대하여 해석하는 방법으로 Short time Fourier Tr. 해석 방법이 Gabor에 의해서 나오게 되었다. 이는 신호를 일정한 크기의 해석 윈도우를 사용하여 윈도우의 크기에 따라 결정되는 극히 제한되는 제한된 범위에 대한 정보만을 제공하고, 빠른 과도 현상이 일어나는 신호에 대해서는 정확한 분석이 이루어지지 어렵다. 이에 가변적인 윈도우를 얻을 수 있는 방법인 웨이블릿 변환이 사용되게 되었다. [5],[11]

2.2.1 마더 웨이블릿 변환

웨이블릿 변환(Wavelet Tr.)은 원형함수를 시간에 따라 scaling과 shift를 통해 원신호와의 비교가 이루어지고, 그 유사성이 계수값의 크기로 표현되며 신호를 재구성하는 기법이다. 이 방법은 STFT가 일정한 윈도우를 취하므로 나타나는 분해능의 한계를 극복할 수 있게 해준다.

마더 웨이블릿 $\psi(t)$ 는 짧고 진동하는 함수로서 평균값이 0이고 양쪽 끝에서 급격하게 감쇄하는 형태를 갖는다. 웨이블릿은 마더 웨이블릿 $\psi(t)$ 를 scaling과 shift 시켜 얻어진 함수들의 집합 $\Psi_{a,b}(t)$ 이며, 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1)$$

여기서, a: scaling factor, b: shift factor 이다. 웨이블릿의 기저들은 모웨이블릿 $\psi(t)$ 의 스케일링 및 병진하므로 얻어진다.

웨이블릿 변환식은 다음 식과 같이 표현된다.

$$W_{\psi}f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int f(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2)$$

2.2.1 이산 웨이블릿(Discrete Wavelet Tr.)

이산 웨이블릿 변환은 식(5)의 변환식에서 a, b 인자

를 이산치로 나타냄으로써 이루어진다. 이산 웨이블릿 함수는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\Psi_{2^j}(t) = 2^j \psi(2^j t) \quad (j=0, -1, -2, -3, \dots) \quad (3)$$

여기서, j는 scaling 지수를 의미하며, 시간 t에서의 크기 인자 2^j 을 사용하였을 때, 입력 $x(t)$ 에 대한 웨이블릿 변환은 다음과 같이 표현된다.

$$d_{2^j} = D_{2^j}[x(t)] = x(t) * \Psi_{2^j}(t) \quad (4)$$

여기에서, $D_{2^j}[x(t)]$ 는 2^j 의 웨이블릿 변환 연산자를 나타낸다. 결국 웨이블릿 계수 d_{2^j} 는 주어진 신호 $x(t)$ 와 이산 웨이블릿 함수 $\Psi_{2^j}(t)$ 의 상승 적분에 의해 구해지게 된다.

2.2.3 다중 해상도 웨이블릿 변환

이산 웨이블릿의 확장으로 직교벡터공간에서 웨이블릿 함수를 변화시키기에 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 웨이블릿을 만들어서 적용하는 과정을 거치게 된다. 다시 말해 2^j 만큼 확장된 식 (6)에 있는 이산 웨이블릿 함수 $\Psi_{2^j}(t)$ 를 시간축에 대해 $2^{-j}n$ 천이시키고

$$\sqrt{2^{-j}} \text{로 정규화함으로써,} \\ \sqrt{2^{-j}} \Psi_{2^j}(t - 2^{-j}n) \quad (5)$$

의 정규직교 웨이블릿이 구성된다. 다중 해상도 웨이블릿 변환 (multiresolution wavelet transform)은 웨이블릿 함수를 정규 직교기저에서 적용함으로써 주어진 신호의 특성을 분해하여 나타내는 알고리즘이라 할 수 있다. j를 0에서 -j까지 적용하여, 해석하고자 하는 신호의 approximation 성분 $A(j)$ 와 detail 성분 $D(j)$ 로 나누어 나가는 것이다. 이 분해 과정은 원신호 S를 각각 고차, 저차 필터로 분해하는 과정과 같다. 이는 다음과 같이 재구성되어진다.

$$S = cD_1 + cD_2 + cD_3 + \dots + cD_n + cA_n \quad (6)$$

이산 웨이블릿 변환은 아래의 계산 과정을 반복하면서 수행되게 된다. 우선 정규 직교의 경우에 scaling 함수와 웨이블릿 함수는 다음과 같이 표현된다.

$$\phi(n) = \sum_{k=0}^N g(k) \phi(2n - k) \quad (7)$$

$$\Psi(n) = \sum_{k=0}^N h(k) \psi(2n - k) \quad (8)$$

여기에서, $g(n)$ 과 $h(n)$ 은 각각 scaling과 웨이블릿 필터 계수를 나타낸다. 이때 주어진 이산 신호 $x(n)$ 을 $j = 0$ 일때의 scaling 함수에 적용하면

$$x(n) = \sum_{k=0}^N a^k \phi(n - k) \quad (9)$$

가 되고, 식(12)의 $x(n)$ 을 $j=1$ 인 경우에 적용하면, $x(n) = A_{2^1}[x(n)] \mid D_{2^1}[x(n)]$ 으로 표현된다.

$A_{2^1}[x(n)], D_{2^1}[x(n)]$ 은 각각 $j=1$ 일 때의 approximation, detail 성분을 나타낸다.

$A_{2^1}[x(n)], D_{2^1}[x(n)]$ 성분을 수식으로 전개하면 다음과 같다.

$$A_{2^1}[x(n)] = \sum_{k=0}^N a_{2^1}(k) \phi_{2^1}(n-2k) \quad (10)$$

$$D_{2^1}[x(n)] = \sum_{k=0}^N d_{2^1}(k) \Psi_{2^1}(n-2k)$$

분해능인 j값의 변화에 따른 신호 $x(n)$ 의 분해과정은 보통 $j = \log_2 N$ (여기서, N은 $x(n)$ 의 데이터 수)일 때까지 반복되며,

$$\begin{aligned}
 A_{2^{i-1}}[x(n)] &= A_2[x(n)] + D_2[x(n)] \\
 &= \sum_{k=0}^N a_2(k) \psi_2(n-2^i k) \\
 &\quad + \sum_{k=0}^N d_2(k) \Psi_2(n-2^i k)
 \end{aligned} \tag{11}$$

로 나타낼 수 있다.[6]-[9]

2.3 부분방전신호에 웨이블릿 변환의 적용

2.3.1 웨이블릿 기법의 적용

웨이블릿을 부분 방전 해석에 적용하기 위해 'Meyer', 'Morlet', 'Daubechies', 'Mexican Hat' 등의 여러 원형 웨이블릿 함수 중에서 'Daubechies' 함수를 선택하였고, 이를 6-level의 분해 과정을 거치면서 db4-db12 까지 차례대로 수행하였다.[12],[13]

2.3.2 웨이블릿 변환을 이용한 특징 벡터 추출

'db12' 변환에 따른 특징 추출(feature extraction)을 위해 신호 S에 웨이블릿 기법을 적용한 후, 윈도우를 5 segment(4ms/1seg)분할하였으며, 이후 변환에 의해 구해진 정량화된 값에 절대값을 취하고, 각 구획에 대한 합을 구하였다.

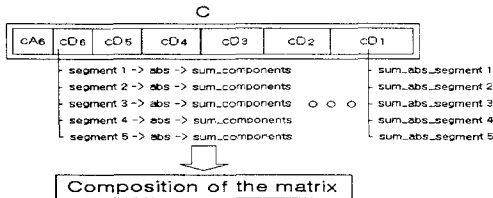


그림 5. 특징 추출을 위한 계산 과정

Fig 5. Computing method for feature extraction

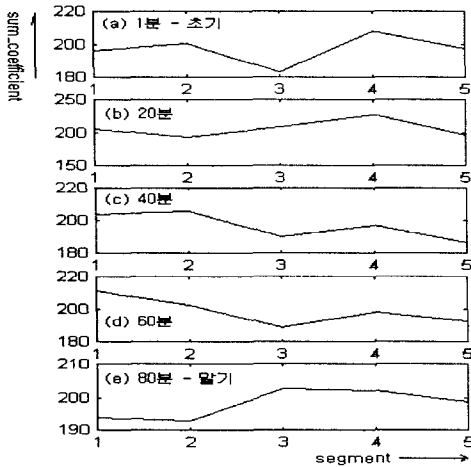


그림 6. 구획에 따른 계수합의 변화

Fig 6. Variation of sum_segment on the segment (Detail 6-level)

이는 각 구획내의 면적을 나타내는 것이다. 여기서는 Detail-6의 값을 기준으로 시간에 따른 각 구획내 합의 결과를 관찰하였다. (20분 간격으로 적용)

3. 결 론

본 논문에서는 획득 데이터에 대한 FFT 방법을 시도 해 보았지만 특이할 만한 변화를 찾아 볼 수 없었다. 이에 time scaling과 shift의 변화를 통해 원형 함수와 원신호와의 유사성을 비교 및 다중 분해할 수 있는 방법을 부분 방전 신호에 적용하여 보았다. 먼저 여러 원형 함수와 부분 방전 신호와의 유사성을 확인하였으며, 그 중 최적의 계수값을 나타내는 함수인 'db12' 웨이블릿을 선정하였다. 변환으로부터 얻어진 계수값을 특징 벡터로 사용하기 위해 윈도우를 일정한 시간으로 구획 분할하였으며, 각 구획 영역내의 계수들의 합을 산출하였다. 시간의 증가에 따라 segment 2,3,4 의 값이 증가 하는 것을 알수가 있다. 특히 이들 벡터값은 절연물의 열화 과정 동안 말기로 갈수록 적어지는 양상을 볼 수 있었다.

앞으로 더 많은 특징 벡터의 추출과 이들을 통계적으로 처리하는 방법을 연구해야 할 것이며, 더 많이 획득 된 데이터를 이용하여 데이터 베이스를 구축 작업이 필요하다.

(감사의 글)

이 연구는 한국전력공사 지원에 의하여 기초전력 공동연구소 주관(관리번호 98-281)으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

(참 고 문 헌)

- [1] Sung-Hong Kim et al. "A life prediction of insulation degradation using computer system", ICEE'98, Proceedings, Vol. 2, 869-872, 1998.
- [2] E. Gulski and F. H. Kreuger, "Computer aided recognition of discharge sources", IEEE Trans. Elect. Insul. Vol. 27, 82-92, 1992.
- [3] 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.
- [4] A. Kriyda, "Automated Recognition of Partial Discharges", IEEE Trans. Die. and Elect. Insul. Vol. 2, 796-821, 1995.
- [5] Stephane G. Mallat, "A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation", IEEE Trans. on Pattern Recognition and Machine Intelligence, Vol. 11, No. 7, pp. 674-693, July 1989.
- [6] C. Sidney Burrus and Ramesh A. Gopinath and Haitao Guo, "Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms: A Primer", Prentice-Hall, 1997.
- [7] Charles K. Chui, "An Introduction to Wavelets", Academic Pr., 1992.
- [8] Stephane G. Mallat, "A Wavelet Tour of Signal Processing", Academic Pr., 1998.
- [9] 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.
- [10] Yusheng Quan, Ning Gao, Guanjun 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.
- [11] 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.
- [12] M. Misiti, G. Oppenheim, "Wavelet TOOLBOX", The MATH Works Inc.
- [13] M. Mukai, T. Okano, et. al., "Study on Degradation Diagnosis of Partial Discharge in a Void by Wavelet Analysis", International Symposium on Electrical Insulating Materials, 1995