웨이브렛 변환을 이용한 부분방전신호의 잡음제거 특성

이 현동° 주 재현* 김 기채° 박 원주° 이 광식° 이 동인°
° 영남대학교 전자정보공학부 * 거재대학 전기과

Noise elimination of PD signal using Wavelet Transform

Hyun-Dong Lee° Jae-Hyun Ju* Ki-Chai Kim° Won-Zoo Park° Kwang-Sik Lee° Dong-In Lee°
°Yeungnam University *Koje College

Abstract - In this paper, As the wavelet transform has the properties of multi-resolution analysis and time- frequency domain localization, application of wavelet transform is used at partial discharge(PD) signal detected by electromagnetic wave detection method to extract PD signal's various frequency component and its time domain. therefore we can analyzed PD signal's time-frequency domain simultaneously. On the other hand, using wavelet transform denoising process, inclued noise signal in detected PD signal is well elimiated. we can propose the true shape of PD signal.

1. 서 론

가스절연개폐장치(Gas Insulated Switchgear : GIS)나 변압기 등과 같은 고전압 전력기기의 절연진단의 필요성이 대두되고 있다. 경제적인 유지보수와 신뢰성 향상을 위해 기기의 운전중에 이상유무를 검출할 수 있는 항시감시시스템의 확립이 대단히 중요하다. 전력기기의 내부에서 절연성이 저하하여 절연파괴가 되기 전의 전구현상으로 거의 모든 경우가 부분방전(Partial Discharge : PD)을 수반하고 있다. PD가 발생하게 되면 방사전자파를 방사하게 되는데, 이때 발생하는 전자파를 기기 외부의 적절한 위치에서 검출하여 기기의 이상 상태를 검출하고자 하는 연구가 진행되고 있다. 전자파를 이용한 전력기기의 결함 검출에 관한 연구는 주로 방전원으로부터 발생하는 방사전자파의 주파수 스펙트럼을 실험적으로 고찰하고 있는 것이 대부분이고, PD가 갖는 일시적인 시간영역에 관해서는 다루고 있지 않다[1][2][3][4].

한편, PD에 의해 발생하는 전자파는 주파수 대역이 저주파에서 GHz 대역에 이르기까지 광범위하게 분포되어 있으며, 그 신호는 아주 미약하고 주변환경의 여러잡음에 쉽게 영향을 받기 때문에 PD신호와 잡음의 판별은 대단히 어려운 실정이다.

이러한 관점에서 본 연구에서는 전력용기기의 절연상태를 상시감시할 수 있는 전자파 검출법(방사전자계법)에 의한 시스템을 구축하여, PD신호를 시간영역에서 측정한다. 측정된 신호에 대하여 새로운 시간-주파수 해석의 도구인 웨이브렛 변환을 이용하여 시간과 주파수 영역에서의 동시 분석과 잡음제거기법을 이용하여 잡음이 제거된 PD신호를 제시하고자 한다.

2. 웨이브렛 변환

웨이브렛 변환은 푸리에 변환이 주어진 신호를 사인(sine)과 코사인(cosine)기저함수를 이용하여 표현하는 것과는 달리 일정한 시간-주파수 정보를 가지는 기저함수(basic function)로서 주어진 신호를 표현한다. 그래서 푸리에 변환이 정제적 신호해석에 유리한 반면에 웨이브렛 변환은 비정제적 신호(non-stationary signal) 해석에 커다란 장점을 가지게 된다. 웨이브렛 변환에 사용되는 기저함수로써는 스케일링(scaling) 함수와 마더웨이브렛(mother wavelet)이 있으며 모 웨이브렛은 다음 식처럼 표현된다.

$$\Psi_{a,\tau}=\frac{1}{\sqrt{a}}\Psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) \quad (1)$$

여기서, a는 스케일링 파라미터(scaling parameter)이고 τ는 천이 파라미터(translation parameter)이며, $a^{\frac{1}{2}}$는 정규화 인자(normalization factor)이다.

웨이브렛 변환은 연속 웨이브렛 변환과 이산 웨이브렛 변환으로 분류된다.

이산신호(discrete signal) $s(t)$에 대한 연속시간 영역에서 웨이브렛 변환(CWT: Continuous Wavelet Transform)과 이산 웨이브렛(DWT : Discrete Wavelet Transform)은 다음 식처럼 주어진다.

$$CWT(a,\tau)=\frac{1}{\sqrt{a}}\int s(t)\Psi^{*}\left(\frac{t-\tau}{a}\right)dt = \langle s(t),\ \Psi_{a,\tau}(t)\rangle \quad (2)$$

식 (2)에서 스케일링 파라미터와 천이 파라미터가 다음의 식(3)과 같이 표현될 경우 이산 웨이브렛 변환이 얻어진다.

$$a=2^{m},\ \tau=n2^{m} \quad m,\ n\in \text{정수} \quad (3)$$

$$DWT(m,n)=2^{-\frac{m}{2}}\sum_{k}s(k)\Psi\left(2^{-\frac{m}{2}}k-n\right) \quad (4)$$

식 (2)와 식(4)로부터 이산 웨이브렛은 연속 웨이브렛을 샘플화하여 변형시킨 형태이다. 그리고 웨이브렛은 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

(i) $\omega=0$ 에서 $\Psi(\omega)=0$ 즉, $\int\Psi(t)dt=0$:dc 성분이 0이다.

(ii) 밴드패스(bandpass) 신호이다.

(iii) 시간영역에서 영(zero)으로 빠르게 감소한다.

특징 (i)은 웨이브렛 변환이 역변환이 존재하기 위한 조건이며, 특징(ii)은 주파수영역에서 웨이브렛 함수의 특징을 나타낸다. 특징 (iii)은 실제적인 웨이브렛 변환에서 시간영역에서의 분해능을 좋게 하기 위한 조건이 된다.

마더웨이브렛의 형태는 Morlet, Haar, Shannon, Meyer, Daubechies 등 만들어 낸 사람들에 따라서 다양하며 각각의 모 웨이브렛이 가지고 있는 신호 분해의 특성과 장점에 따라서 응용되는 분야는 다를 수 있다.

WT는 잡음이 첨가된 신호에서 잡음을 제거하는 특징을 가지고 있으므로, 잡음에 영향을 많이 받는 PD 신호의 잡음제거에 우수한 특징을 가지고 있다. 잡음을 제거하는 방법으로는 여러가지가 있지만, 대개의 경우 그 원인을 제거하는 것보다는 결과로서 나오는 잡음을 필터로 감쇄시키는 방법이 주로 사용되고 있다. Donoho와 Johnstone에 의해 웨이브렛 잡음제거 기법이 개발되었으며, 웨이브렛을 이용한 잡음제거 과정은 다음과 같다.

(i) 잡음 성분을 정규화한다.

(ii) Hard 또는 Soft thresholding 방법으로 웨이브렛 도메인에서 thresholding을 수행한다.

Hard thresholding과 soft thresholding은 다음과 같다.
Hard thresholding

$$\delta_{\lambda}^{H} = \begin{cases} S(t), & \text{if} |S(t)| > \lambda \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

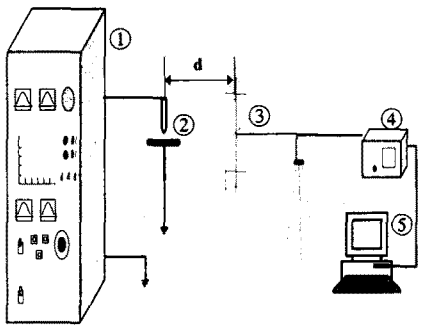
Soft thresholding

$$\delta_{\lambda}^{S} = \begin{cases} \text{sgn}(S(t))(|S(t)| - \lambda) & \text{if} |S(t)| > \lambda \\ 0 & \text{if} |S(t)| \le \lambda \end{cases}$$

여기서 λ는 임계값으로서

$\lambda = \sqrt{2\log(n)}(2\sigma) / \sqrt{n}2^{(J-j)/2}$, n은 각 스케일에서의 샘플수를 나타내며, σ는 웨이브렛 도메인상에서의 각 스케일의 표준편차를 가리키며, J는 각 스케일로 $(j = j_0, \cdots J)$이다.

3. 실험장치 및 방법



① 전원부 ② 전극부 ③ 안테나
④ 오실로스코프 ⑤ PC

그림 1 실험장치도

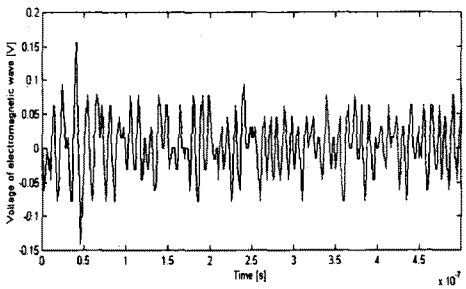
Fig. 1 Experimental set-up diagram

그림 1은 본 연구에 이용한 실험장치도를 나타낸 것으로, PD를 모의하기 위한 전극부와 전원부, 방사전자파를 측정하기 위한 센서로서의 바이코니칼 안테나와 시간파형을 관찰하기 위한 디지털 오실로스코프(Digital Oscilloscope: OSC), 데이타 전송을 위한 GPIB와 분석을 위한 퍼스널 컴퓨터(Personal Computer:PC)로 이루어져 있다.

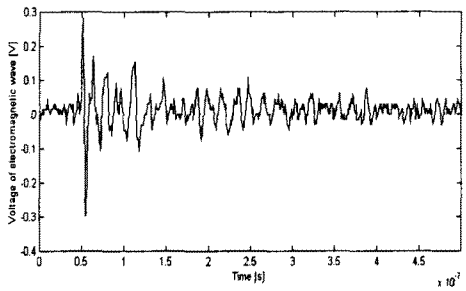
전원부는 교류 고전압 발생장치(입력 : AC 220[V], 1 ϕ, 60[Hz], 출력 : AC 15/30 [kV],Pultec Electronics Co.Ltd.)를 사용하였고, 전극부는 침대 평판전극(gap : 3[cm], 침단 각도 : 15[°], 평판 전극 직경 : 10[cm], 전극재료 : SUS304)을 이용하여 불평등전계를 형성하여 부분방전을 모의하도록 하였다. 한편, 전극의 배치는 중력에 대하여 수평방향으로 하고, 전원인가측에 침전극을 접지측에 평판전극을 배치하였다. 실험을 실시하기 전의 전자파 노이즈인 배경잡음과 PD의 방사전자파의 측정은 주파수 대역이 30~300[MHz]의 대역특성을 가진 바이코니칼 안테나(EMCO 3110)을 전극부의 중심에서 1[m]떨어진 위치에 설치하여 측정하였으며, 전극부와 안테나의 배치는 수직상태를 기본으로 하였다. 이는 침대 평판전극에 방전시 전극부가 송신안테나의 역할로서 전자파를 방사한다고 보았을 때 수신 안테나와 동일한 편파특성을 가지도록 하기 위함이다.

방사전자파의 시간파형의 관측은 디지털 오실로스코프(Lecroy 9350AL, bandwidth(0~1GHz), sampling rate(1 GSa/s), sensitivity range (2mV/div~1V/div))를 이용하여 sampling rate를 1 GSa/s 로 하여 측정하였다. 측정된 파형의 데이타는 GPIB(General Purpose Interface Bus)를 통하여 PC(Personal computer)로 전송하였다.

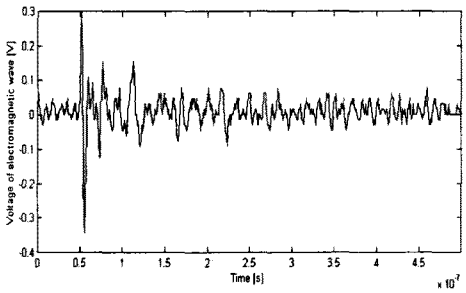
4. 결 론



(a) 배경잡음의 전자파 파형



(b) 인가전압 7[kV]일때의 전자파 파형

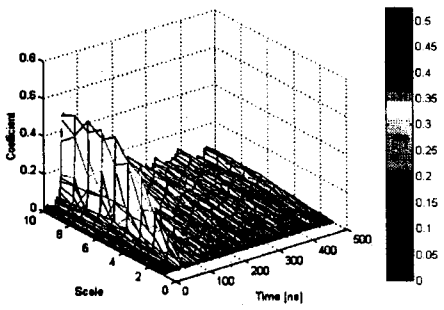


(c) 인가전압 10[kV]일때의 전자파파형

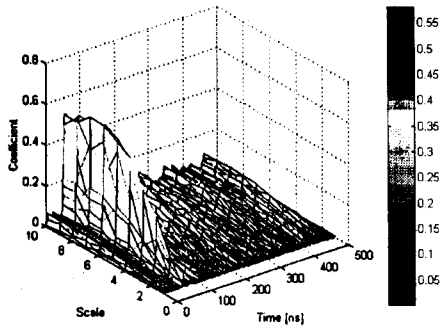
그림 2 배경잡음과 부분방전시의 전자파파형

Fig. 2 Waveform of electromagnetic wave in background noise and partial discharge

그림 2의 (a)~(c)는 실험하기전의 실험실 주변환경의 배경잡음과 PD발생시 방사되는 방사전자파의 시간파형을 나타낸 것으로 (a)는 배경잡음 (b)는 인가전압 7[kV] (c)는 인가전압 10[kV]일때의 시간파형이다. PD신호가 일시적인 시간정보를 가지고 있으므로, 관측시점에서 대략 100[ns]동안의 지속시간 동안의 파형에 대한 차이를 확인할 뿐, 전체적인 형태는 정부로 진동하는 펄스적인 모양이다. 시간파형에 대한 최대치와 최저치의 정보는 다음과 같다. 배경잡음에서는 최대치(Max)가 0.156[V]이고, 최저치(Min)가 -0.140[V]이고, 인가전압 7[kV]에서는 Max가 0.281[V], Min이 -0.296[V]이며, 인가전압 10[kV]에서는 Max가 0.296[V], Min이 -0.345[V]로 단지 진폭이 증가함을 알수 있다.



(a)인가전압 7[kV]일때의 연속웨이브렛 변환



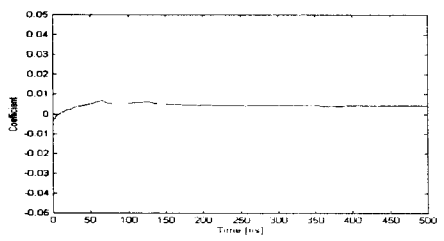
(b)인가전압 10[kV]일때의 연속웨이브렛 변환

그림 3 부분방전시의 전자파파형의 연속 웨이브렛 변환

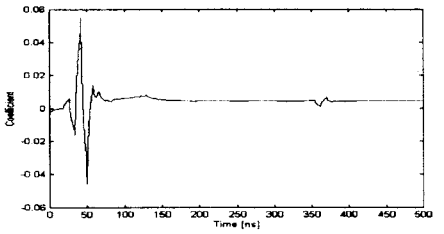
Fig. 3 CWT of electromagnetic wave in PD signal

그림 3은 새로운 시간-주파수 영역의 신호 해석도구인 웨이브렛 변환을 이용하여 전극시스템에서 부분방전이 발생하였을 때의 전자파 파형에 대하여 연속 웨이브렛 변환한 것이다. 그림 3의 (a)는 인가전압 7[kV]일때의 전자파 파형을 CWT한 것이고, (b)는 인가전압 10[kV]일때의 전자파 파형을 CWT한 것이다. 연속 웨이브렛 변환시 채택된 모웨이브렛은 전자파 파형의 신호가 크기가 작고, 짧은 지연특성과 빠른 감쇄, 그리고 진동하는 형태를 가지므로, 신호의 형태를 고려하여 daubechies family의 'db2' 를 이용하였으며, 스케일을 1에서 10까지 변화시켰다. 스케일은 주파수를 의미하는 것으로, 스케일이 낮을수록 고주파 성분을 나타내고, 스케일이 높을수록 저주파 성분을 나타낸다. PD 신호는 일시적인 시간영역을 가지며, 신호가 가지는 고주파 성분보다는 저주파 성분에서 특징을 나타내고 있다.

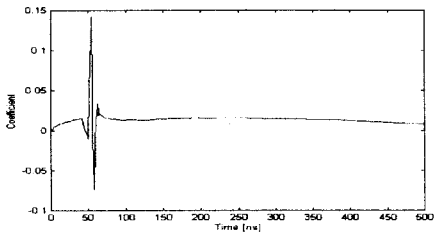
CWT를 이용하므로서 시간과 주파수에 따른 peak와 valley특성을 자연스럽게 파악할 수 있다. 시간영역에서 event의 위치를 명확하게 확인할 수 있다.



(a) 배경잡음의 잡음제거된 파형



(b) 인가전압 7[kV]일때 잡음제거된 파형



(c) 인가전압 10[kV]일때 잡음제거된 파형

그림 4 노이즈제거기법에 의한 전자파 파형

Fig. 4 Electromagnetic wave after wavelet denoising process

그림 4는 배경잡음과 PD발생시의 전자파 파형을 웨이브렛 변환의 노이즈제거기법을 이용하여 신호에 포함된 노이즈를 제거한 후의 전자파 파형을 나타낸 것이다. 노이즈 제거시의 thresholding의 임계값으로는 각 단계의 고주파 성분의 최대값을 임계값으로 선정하였으며, soft thresholding을 사용하였다. 신호에 포함되어 있는 노이즈를 제거함으로서 PD발생시의 전자파 파형을 명확히 제시할 수 있고, 배경잡음과의 구별도 쉽게 할 수 있다.

5. 결 론

비주기적이고 일시적인 시간영역을 갖으며, 주변잡음에 대하여 상당한 영향을 받는 PD에 대하여, PD발생시 발생하는 방사전자파를 바이코니칼 안테나와 OSC를 이용한 시간영역의 전자파 파형을 분석하였다. 시간영역의 전자파 파형을 새로운 시간-주파수 해석의 도구인 웨이브렛 변환을 이용하여 시간-주파수 분포를 동시에 잘 나타내었으며, event가 일어난 시간시점과 그때의 주파수 성분을 명확히 알 수 있었으며, 노이즈제거기법을 이용하여 신호에 포함되어 있는 노이즈 성분을 제거함으로서 배경잡음과 PD 발생시의 전자파 파형을 쉽게 구별할 수 있음을 제시하였다.

[참 고 문 헌]

[1]. M.Doi, H.Muto, H.Fujii, M.Kamei, "Frequency spectrum of various partial discharges in gas", ISEIM, pp.441~444, 1998.

[2]. Yasuyuki Tsutsumi, Kun Ono, "Electromagnetic Noise Spectra of Corona Discharge at Point to plane Electrodes in Air", 電學論A, 111卷8号, 平成3年

[3]. 荒井健次 外2人"空氣およびSF6ガス中短ギャップ放電 波形と放射電磁波", 電學論A, 109卷3号, 平成元年.

[4]. 이현동,이광식, "부분방전에 의한 방사전자파의 시간·주파수 영역 분석", 대한전기학회 고전압 및 방전 응용기술 연구회 춘계학술대회 2001. pp. 140~142.