Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, Vol. 19, No. 10, p. 976, October 2006.

논 문 19-10-16

고압전동기 고정자권선의 절연결함에 대한 특징추출기법

Feature Extraction Technique for Insulation Fault of High Voltage Motor Stator Winding

박재준[1,a], 이성룡[2], 문대철[2]
(Jae-Jun Park[1,a], Sung-Young Lee[2], and Dae-Chul Mun[2])

Abstract

Multi-resolution Signal Decomposition (MSD) Technique of Wavelet Transform has interesting properties of capturing the embedded horizontal, vertical and diagonal variations within an image in a separable form. This feature was exploited to identify individual partial discharge sources present in multi-source PD pattern, usually encountered during practical PD measurement. Employing the Daubechies wavelet, feature were extracted from the third level decomposed and reconstructed horizontal and vertical component images. These features were found to contain the necessary discriminating information corresponding to the individual PD sources and multi-PD soruces.

Key Words : Wavelet transform, Multi-resolution signal decomposition(MSD), PD pattern, Feature extraction, High voltage motor stator winding

1. 서 론

부분방전(Partial Discharge)측정은 오래전에 발전기에서 이루어져왔다[1], 그러나 오늘날에도 여전히 고압전동기나 발전기의 PD를 어떻게 진단을 실행하여야 하는지 표준화된 규칙이나 또는 독특한 과정이 없다. 그렇지만, 구체화된 조건에서 고압전동기 고정자권선으로부터 계측된 PD펄스들의 상호관계에 대하여 오랜 시간에 걸쳐 상당하게 노력하여 오고 있다[2,3]. PD 계측에 대해서 여러 가지 수단과 방법으로 수년 동안에 걸쳐 다양하게 진행하여 오늘날에 이르게 된 것이다.

연구에 있어서 가장 문제가 된 것은 PD발생원의 identification에 대한 PD데이터를 획득하여 처리하는 것이다. 이러한 각기 다른 PD발생원을 분류하기위하여 지난 수십년 동안 이 분야에 많은 연구결과를 발표하여왔다. 그 중 여러 가지 특징추출기법을 통하여 실행되어져 왔다. 그렇지만, 이들 접근의 대부분은, 한 개의 방전원만을 활성화되어진 것으로 가정하였고 그리고 현장에서도 그와 같이 추측하게 된 것이다. 이러함에도 불구하고, PD 측정은 고압전동기나 발전기 진단을 위하여 가장 중요한 도구중 하나라고 말하고 있다. 그러나 완벽한 측정수단으로 볼 수는 없다. 고압전동기 고정자권선의 절연진단을 얻기 위하여, PD측정은 항상 다른 기법과 결합하여 사용되어져왔다 가령, 육안검사(Visual Inspection), 절연저항, 코아손실(Core Loss)와 Wedge 견고성 측정 등이 있다. 더더욱 고압전동기 PD측정의 경우, 다중방전원(Multiple PD Sources)은 동시적으로 존재하고 있고, 그리고 그들 특성의 징후(Signature)가 전체에 걸쳐 PRPD (phased Resolved Partial Discharge)패턴에 겹쳐져, 복잡한 패턴의 결과를 가져온 것이다. 비전문가들의 경우는 유일한 하나의 방전원 또는 다중방전원으로부터 징후가 발생된다 하더라도 식별하기는 매우 어려울 것이다. 그래서 수많은 연구결과를 분석검토로부터 얻어진 결과는 다중방전원 PD패턴

1. 중부대학교 전기전자공학과
(충남 금산군 추부면 대학로 101)
2. 호서대학교 정보통신공학과
a. Corresponding Author : jjpark@joongbu.ac.kr
접수일자 : 2006. 7. 5
1차 심사 : 2006. 9. 8
심사완료 : 2006. 9. 19

인식은 아직 해결되지 못하는 문제로 확인되어 본 연구에서도 필요성을 갖게 된 것이다.

이러한 이유로 본 연구에서는 실제모델코일을 단일 및 다중 부분방전원을 설계 제작하여 PRPD 패턴을 계측하였다. 또한 디지털화된 각각의 단일 방전원 PD패턴을 웨이블렛 영상신호처리를 이용하여 중첩된 PD패턴을 구하였고, 중첩된 다중방전원 PD패턴을 분리할 수 있는 기법을 연구하였다. 이러한 PRPD패턴을 영상화하여 결국은 결함신호를 이용하여 정확한 결함진단을 내리는 것이 본 연구의 목표이므로 본 논문에서는 새롭게 제안된 특징추출기법인 웨이블렛 영상신호처리인 MSD (Multi-resolution Signal Decomposition)의 알고리즘으로 PD영상을 구하여 결함신호를 분류할 수 있는 신경망의 전처리 입력까지의 정량화된 특징추출계수를 구하는 것이 연구 목적이다.

2. 부분방전 패턴의 웨이블렛 변환[4-7]

2.1 개개의 방전원과 다중방전의 PD패턴

다중방전원 PD패턴으로부터 개개의 PD원으로 신호를 분리하는 것은 어려운 과제중 하나이다. 개개의 부분방전원 4개 즉 내부방전, 보이드 방전, 슬롯방전, 연면방전을 그림 1(a),(b),(c),(d)에서 나타내고 있으며, 그림 1(e)은 그림 1(b)와 (d)를 디지털적으로 두개의 단일방전원을 겹쳐놓아 (Super-imposing) 얻어진 PD패턴이다. 두 개의 방전원의 PD군집부분을 같은 위상으로 두 개의 방전원을 중첩시킨 경우이다. 만일 위상의 천이를 통하여 중첩된다면 현실성이 없는 결과를 가져오게 될 것이다. 본 연구에서는 이런 점에 착안하여 진폭 및 위상의 천이 없이 완전 중첩된 결과의 다중 방전원으로서, 만일 두 개의 단일방전원을 중첩하였을 때, 두개의 동일한 위상영역에서 펄스패턴이 완전중첩된다면, 어떤 전문가도 식별하기 어려울 것이다. 그러나 개개의 방전마다 위상영역이 약간의 차이를 가져오고 그리고 진폭 값의 차이를 가져오기 때문에 분명히 식별은 가능할 것이다. 보통, 실제적인 PD측정에서 개개의 방전원은 부분적이든 전적이든 중첩될 수 가 있다. 그러한 조건하에서 완전중첩이 아니면 육안으로는 식별이 가능하게 될 것이다. 이러한 경우 영상의 신호처리로서는 식별하기 어렵고, 단지 PRPD의 방식을 통하여 육안으로 식별이 가능한 경우로 본다.

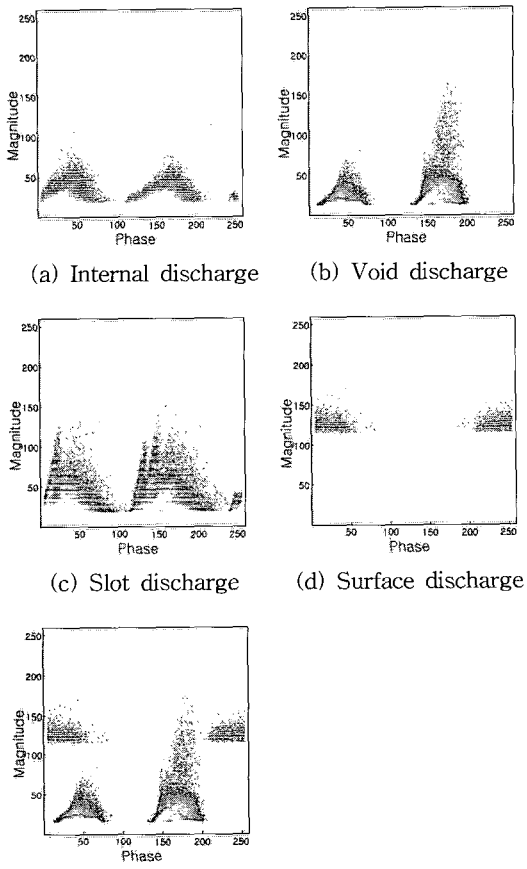


그림 1. 개개의 방전원과 다중방전원의 PD패턴.
Fig. 1. PD patterns of individual discharge sources and multi-discharge source.

2.2 기초가 되는 영상 웨이블렛의 원칙

입력신호 또는 영상을 분석하는데 있어서 웨이블렛의 이용은 참으로 흥미롭고, 분석 및 분리하는데 도움이 된다. 그림 2의 경우는 보이드 방전의 영상을 64 gray-scale로서 나타낸 PD패턴을 보여주고 있다. 56개의 계수를 가지는 Daubechies 웨이블렛을 이용하여 MSD의 Level-3로 적용한 결과를 의미한다. Level-3로 분해한 4개의 Sub-image는 다음과 같다. 즉, Approximate(A), Horizontal(H), Vertical(V), Diagonal(D)를 그림 2에 나타내었다. 보이드방전의 원형 및 4개의 Sub-image를 그림3에 각각 나타내었다. 그림 3(a)에서는 원형의 영상, 그림 3(b)의 경우는 Approximate, 그림 3(c)의 경

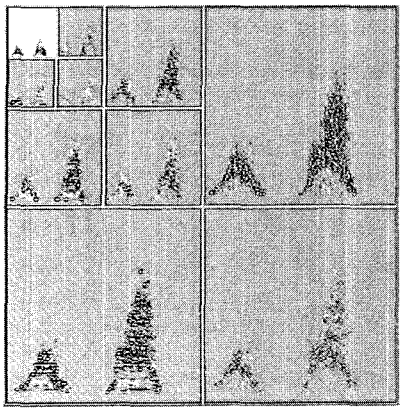


그림 2. 보이드 방전의 웨이블렛 변환과 MSD.
Fig. 2. Wavelet transform and MSD of void discharge.

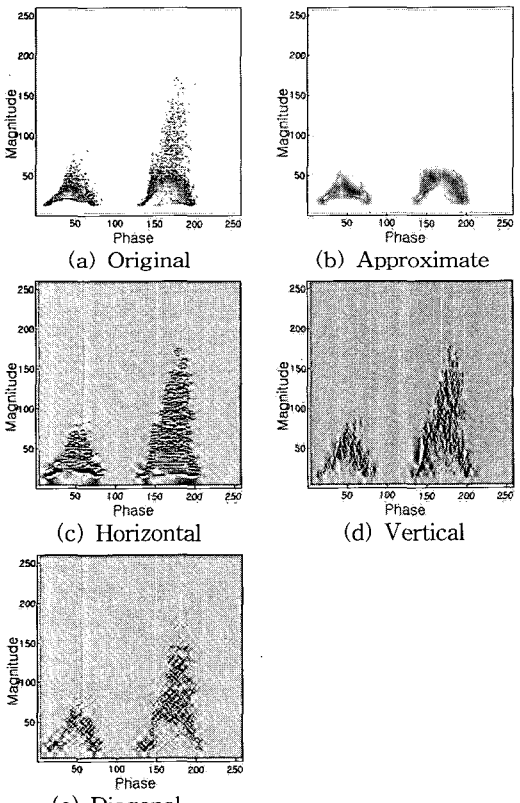
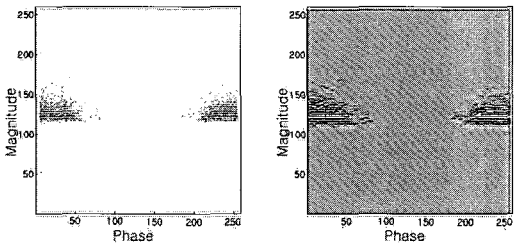


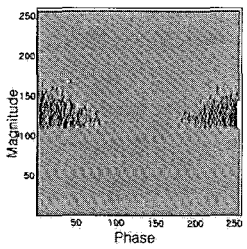
그림 3. 보이드방전 패턴영상의 레벨-3에서의 분해와 합성.
Fig. 3. Decomposition and reconstruction for pattern image of void discharge applying Level-3.

우 Horizontal, 그림 3(d)의 경우 Vertical, 그림 3(e)의 경우 Diagonal 영상을 나타내었다. 그러면 각각의 Sub-image 영상 중 Approximate는 원형영상에 매끄러운 버전(smooth version)을 말하고, Horizontal과 Vertical 그리고 Diagonal의 sub-image는 원형영상에 숨어있는 것을 나타내는 경우이다.

4개의 서브영상들 중에서 Horizontal과 Vertical 그리고 Diagonal의 선택은 향후 결함신호 분류에 필요한 특징추출 및 신경망의 입력으로 사용하기 위하여 필요한 것이다. 또한 MSD의 분해레벨 및 Mother Wavelet의 선정은 각각의 서로 다른 레벨에서 모든 영상의 합성(Inverse Wavelet Transform)에 의하여 철저한 조사가 필요한 것이다. 그림 4(a)와 그림 5(a)는 연면방전원 과 보이드방전원 각각에 대한 원형신호를 나타내고 있다. 또한 그림 6(a)은 그림 4(a)와 그림 5(a) 개개의 방전원을 디지털적으로 나타낸 PD패턴의 원형신호이다. 그림 4(b), 5(b), 6(b)은 그림 4(a) ~ 6(a)의 방전원에 대한 레벨-3의 Horizontal sub-image을 나타내고 있다. 원형의 PD패턴은 인가전압위상각 정극성과 부극성으로 구성된 사인파로 동기된 PRPD 패턴으로 구성된 영상이다. 전체 영상의 구성은 Horizontal의 경우 픽셀수를 256개로 정규화한 영상으로 재편집하였고, 정극성/부극성 각각 128픽셀 즉, 256픽셀로 정규화로 구성하였다. PD패턴은 특정부분의 위상에서 일정한 진폭의 크기를 갖는 펄스의 발생만을 기록하였고, 정극성과 부극성이 같은 양상을 나타내고 있다. 다음에는 개개의 방전원과 중첩된 방전원에대한 수직성분의 영상에 대하여 설명하기로 한다. 그림 4(c) ~ 6(c)은 연면방전, 보이드방전, 중첩된방전의 Vertical sub-image을 나타내고 있다. 펄스가 군집된 수직방향 성분의 뚜렷한 영상의 구분이 존재한다. 결국은 다중 방전원 그림 6은 H의 영상과 V의 영상을 시각적으로 보아서도 쉽게 개개의 방전원과 뚜렷히 특징을 갖고 있음을 알 수 있었다. 중요한 것은 그들 안에 존재하는 각각의 영상을 분리할 수 있는 형으로 이용할 수 있다는 점이다. 그런 분리는 본 연구에서 개발한 근본적인 영상처리과정을 준수하여 실시하면 가능하게 될 것이다. 원형영상의 패턴을 위상축이나 진폭크기의 축에 전혀 자리이동 없이 실시하였기 때문에 실제의 중첩된 방전원을 모의하여 발생된 다중방전원 패턴분류 및 식별에 적용하면 다중방전원의 패턴을 쉽게 구할 수 있을 것이다.



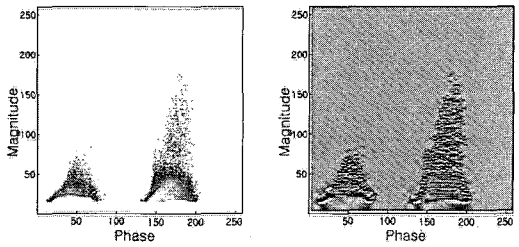
(a) Original (b) Horizontal



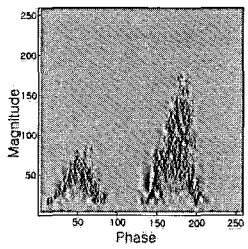
(c) Vertical

그림 4. 연면방전패턴의 horizontal과 vertical 영상.

Fig. 4. Horizontal and vertical sub-image of surface discharge patterns.



(a) Orignal (b) Horizontal



(c) Vertical

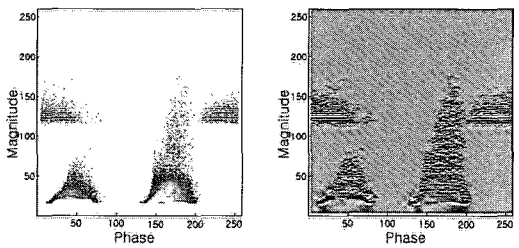
그림 5. 보이드방전패턴의 horizontal과 vertical 영상.

Fig. 5. Horizontal and vertical sub-image of void discharge patterns.

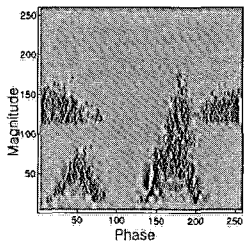
3. 특징추출(Feature Extraction)[4-7]

이전에 설명하였듯이, 레벨-3으로 웨이블렛 변환을 실시하면 4개의 sub-image(32×32)를 얻게 된다. 이런 크기의 Horizontal과 Vertical의 영상만을 역변환시켜 원형의 영상과 동일한 크기의 영상(256×256)으로 재구성한 것이다.

개개의 방전원으로 분리할 수 있는 중첩된 방전원 역시 PD패턴을 나타낼 수 있는 현격한 특징을 가지고 있다. 개개의 방전원 및 중첩된 방전원들에서 발생된 방전펄스 군집들은 위상(phase)과 크기(magnitude)위치를 가지고 있다. 그리고 위상에 대하여 분포하고 있다. 그리하여 결함신호의 최종목적은 신호분류(Classification)을 위한 것으로, 본 연구에서는 Horizontal과 Vertical image을 적절한 다른 정량화된 값으로 나타낼 필요가 생긴 것이다. 적절한 특징벡터를 형성하기 위하여 영상의 수직과 수평성분(즉, 크기방향과 위상방향)의 평균화과정을 실시하였다. 위상방향의 평균화과정은 크기정보를 포함하고 있고, 크기방향의 평균화 과정은 위상방향의 정보를 가지고 있다. 특징추출과정은 요약하여 표현하면 다음과 같이 표현할 수가 있다.



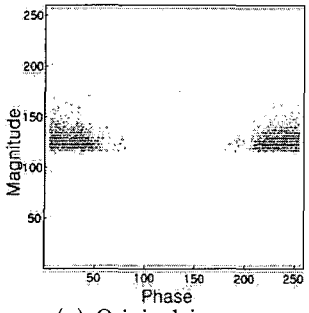
(a) Original (b) Horizontal



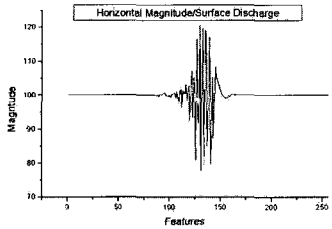
(c)Vertical

그림 6. 중첩된 이중방전패턴의 horizontal과 vertical 영상.

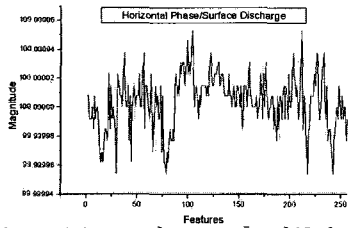
Fig. 6. Horizontal and vertical sub-image of superimposing double discharge patterns.



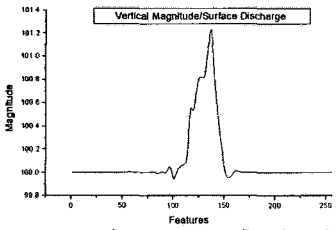
(a) Original image



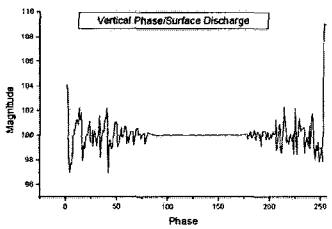
(b) Horizontal image의 magnitude축 평균값 특징추출



(c) Horizontal image의 phase축 평균값 특징추출



(d) Vertical image의 magnitude축 평균값 특징추출



(e) Vertical image의 phase축 평균값 특징추출

그림 7. 표면방전에 대한 horizontal 과 vertical 영상의 특징추출(개개의 방전원).

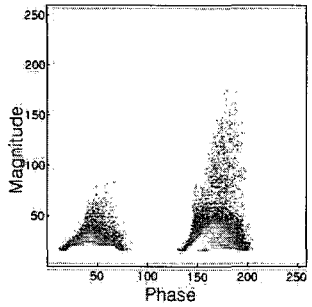
Fig. 7. Averaging feature extraction of horizontal and vertical for surface discharge (individual discharge).

크기의 평균화 과정: 영상픽셀들은 위상축으로부터 보여준 정보를 평균화 한 것이다. 이것은 크기정보를 평균한 것이며 그리고 분류를 위하여 매우 중요한, 위상 정보는 보류시킨 결과이다. 현격한 특징을 유지하여 나타낼 수가 있다. 그리고 이들 계수벡터를 1×256의 길이로 표현하였다. 이 길이는 더 이상 줄이지 않았다. 이유는 어느 방전에서도 이용하기위해서는, 특정위상에만 펄스의 발생을 기대할 수는 없기 때문이다.

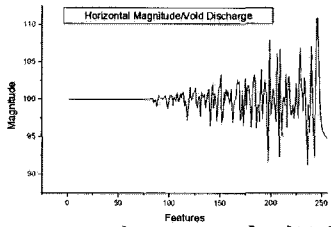
위상의 평균화 과정: 평균화는 크기 축 즉, 위상 값이 평균화된 것으로부터 보여준 영상을 실행한 것이다. 이들 벡터들은 분류를 위하여 중요한 크기정보만을 포함하고 있다. 위상축을 따라 군집된 펄스의 중첩에도 불구하고 그들은 크기 축을 따라 나타낼 때 분리할 수가 있는 것이다. 그들의 벡터들은 위에서 언급된 경우처럼 1×256으로 나타낼 수 있다. 마지막 특징추출 벡터는 Horizontal sub-image에서 Magnitude의 평균값인 256벡터와 Phase의 평균값인 256벡터, Vertical sub-image에서 Magnitude의 평균값 256벡터 Phase의 평균값 256벡터를 1차원적인 형태인 1×1025벡터로 표현한 것이다. 즉, 각각의 특징vectors들이 결국 결함신호를 분류하는데 있어서 PD패턴을 표현하는 정량화된 값으로 나타낼 수 있는 것이다. 그림 7~9에서는 개개의 방전원인 PD패턴과 중첩된 PD패턴의 magnitude의 평균화 과정에서 특징추출결과와 phase의 평균화 과정에서 특징 추출된 결과를 나열하였다.

그림 7은 결함신호들의 분류를 위하여 사용된 패턴에 대한 특징추출의 결과를 나타낸 것이다. 이것은 표면방전 PD패턴의 MSD에 적용한 4개의 각기 다른 서브영상들 사이 Horizontal과 Vertical를 나타낸 것이다.

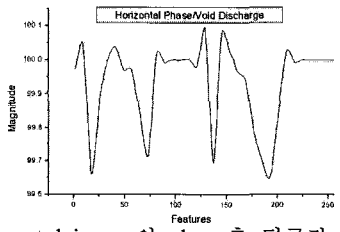
그림 8은 보이드 방전에 대한 PD패턴의 MSD의 응용에 대한 결과를 나타낸 것이다. 또한 그림 9는 그림 7과 8의 원형영상을 이용하여 어떤 위상의 천이없이 디지털적으로 중첩한 다중 방전원으로서 중첩된 결함신호의 특징추출을 나타낸 것이다. 그림 7(b), 8(b), 9(b)는 수평의 서브영상에 대한 위상축을 이용하여 그들의 크기를 정규화 함으로서 얻어진 256픽셀에 대한 256특징추출벡터의 결과를 나타낸 것이다. 그림 7(c), 8(c), 9(c)는 수평의 서브영상에 대한 크기 축을 이용하여 그들의 위상을 정규화 함으로서 얻어진 256픽셀에 대한 256특징추출벡터의 결과를 나타낸 것이다. 그림 7(d), 8(d), 9(d)는 수직의 서브영상에 대한 위상축



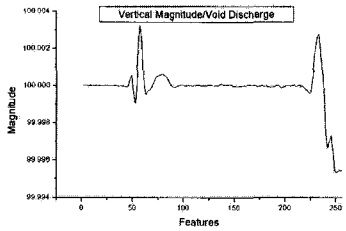
(a) Original image



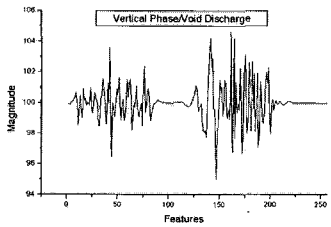
(b) Horizontal image의 magnitude축 평균값 특징추출



(c) Horizontal image의 phase축 평균값 특징추출



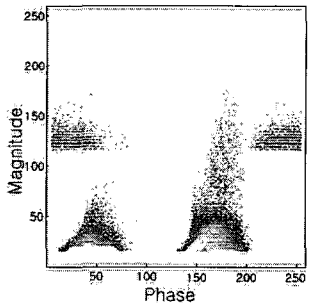
(d) Vertical image의 magnitude축 평균값 특징추출



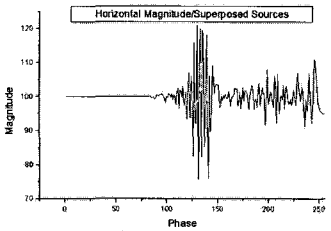
(e) Vertical image의 phase축 평균값 특징추출

그림 8. 보이드방전에 대한 horizontal 과 vertical 영상의 특징추출(개개의 방전원).

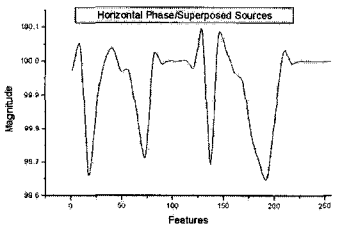
Fig. 8. Averaging feature extraction of horizontal and vertical for void discharge (individual discharge).



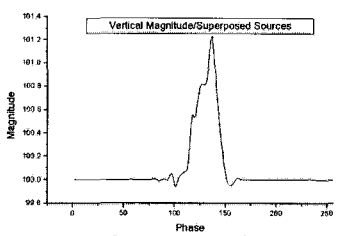
(a) Original image



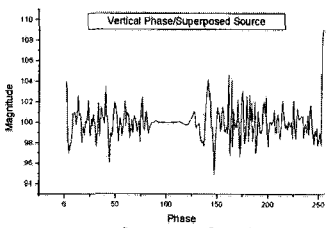
(b) Horizontal image의 magnitude축 평균값 특징추출



(c) Horizontal image의 phase축 평균값 특징추출



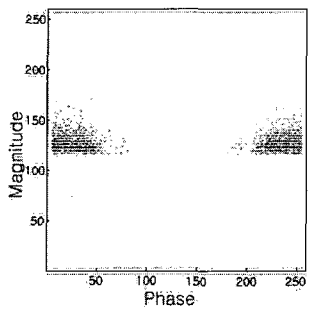
(d) Vertical image의 magnitude축 평균값 특징추출



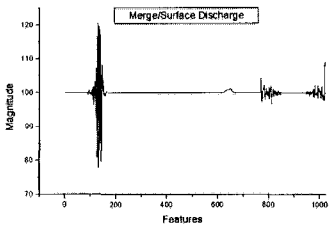
(e)Vertical image의 phase축 평균값 특징추출

그림 9. 중첩된 방전원에대한 horizontal과 vertical 영상의 특징추출(다중 방전원).

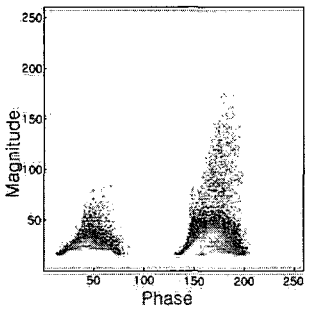
Fig. 9. Averaging feature extraction of horizontal and vertical for superimposing (surface+ void) discharge.



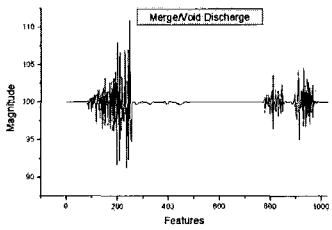
(a) PD pattern of surface discharge



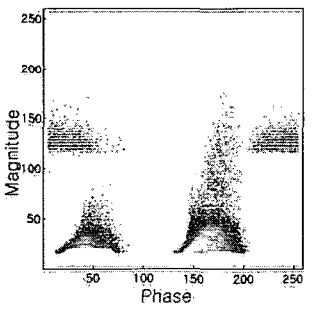
(b) Feature extraction



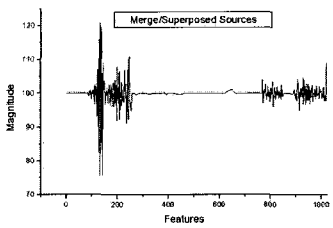
(c) PD pattern of void discharge



(d) Feature extraction



(e) PD pattern of superimposed discharge sources



(f) Feature extraction

그림 10. 개개의 방전원과 중첩된 방전원에대한 전체적인 특징추출 결과.
Fig. 10. Total feature extraction for individual and superimposed discharge sources.

을 이용하여 그들의 크기를 정규화 함으로서 얻어진 256픽셀에 대한 256특징추출벡터의 결과를 나타낸 것이다. 그림 7(e), 8(e), 9(e)는 수직의 서브영상에 대한 크기축을 이용하여 그들의 위상을 정규화 하여 얻어진 256픽셀에 대한 256특징추출벡터의 결과를 나타낸 것이다.

마지막 특징추출결과는 다음과 같은 평균화된 위상과 크기벡터에 의하여 형성된 결과이다. H_Mag_256과 H_Phase_256벡터들은 수평의 크기평균값을 그리고 위상평균값을 V_Mag_256과 V_Phase_256은 수직성분의 위상의 크기와 위상의 평균벡터를 말한다. 그때 특징추출벡터를 1차원적으로 결과를 나타낸 것이다. H_Mag_256+H_Phase_256+V_Mag_256+V_Phase_256로 1024특징추출 벡터를 표현한 것이다. 그림 11은 결함신호의 분류를 위한 자료처리과정의 흐름 도를 나타낸 것이다.

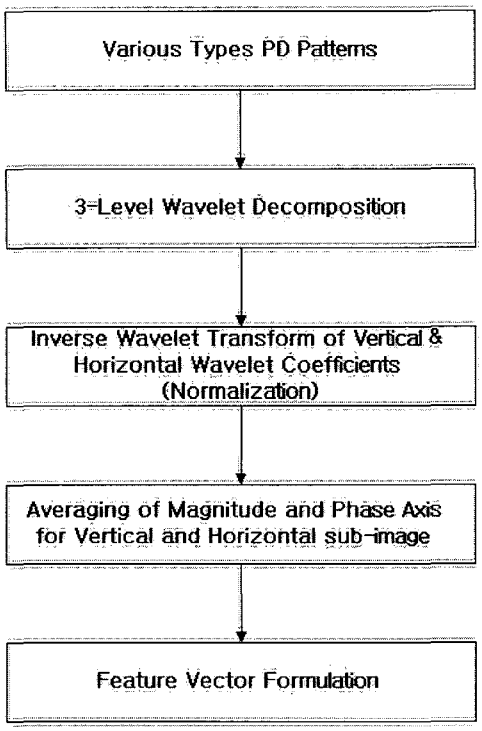


그림 11. 자료의 처리과정.
Fig. 11. Image data processing.

4. 결 론

부분방전은 지금까지 단일방전원에서 만이 국한되어 연구가 진행되어왔다. 다중방전원의 부분방전 패턴인식 및 중첩된 결함신호의 분리와 같은 해결하여야 할 과제로서 인식되어왔다. 본 연구에서는 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 이산 웨이블렛 변환기법인 Multi-resolution Signal Decomposition and Reconstruction을 이용하여 단일방전 및 다중방전원의 결함신호에 디지털기법을 적절히 적용하여 superimposing된 PD패턴을 영상화하였다.

단일방전원의 경우 내부방전과 보이드방전, 슬롯방전 및 표면방전을 모의한 PD패턴을, 다중방전원으로는 보이드+연면방전을 중첩한 결과의 영상을 얻었다. 2-Dimension에서 적용된 Daubechies Wavelet의 level-3를 적용한 결과 embedded된 4개의 sub-images들 approximate, horizontal, vertical, diagonal 이 포함되었다. 이중 분리할 수 있는 두개의 sub-image인 horizontal과 vertical을 중심으로 단일 및 다중방전원 결함신호에 적용하여 위상축을 중심으로 한 진폭축의 평균화된 특징추출 계수와 진폭축을 중심으로 한 위상축의 평균화한 특징추출 계수 값을 얻었다. 그 결과 각각의 PD패턴의 영상을 정량화된 계수값으로 얻을 수 있었고 그리고 패턴에 따른 각각의 계수값 변화특징을 분명하게 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2005년도 산업자원부 전력산업연구개발사업 전력선행기술(R-2005-B-139)에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

참고 문헌

[1] J. S. Johnson, "Slot discharge detection between coils surfaces and core of high-voltage stator winding", Trans. Amer. Inst. Electr. Eng., Vol. 70, p. 1993, 1951.

[2] B. J. Beggs, I. J. Kemp, and A. Wilson, "Characterization of discharge phenomena in voids", IEEE Inst. Symp. Electr. Insul., Toronto, p. 145, 1990.

[3] G. C. Stone, "Advancements during the past quarter century in on-line monitoring of motor and generator winding insulation", IEEE Trans. Dielectric. Insul., Vol. 9, p. 746, 2002.

[4] E. M. Lalitha and L. Satish, "Wavelet analysis for classification of multi-source PD patterns", IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7, No. 1, p. 40, 2000.

[5] R. K., Young, "Wavelet theory and applications", Kluwer Academic Publications, p. 30, 1993.

[6] A. Primer, "Introduction to wavelet and wavelet transforms", Prentice Hall, p. 1, 1998.

[7] G. Strang and T. Nguyen, "Wavelet and filter banks", Wellesley-Cambridge Press, p. 174, 1997.