

## 프랙탈 및 통계적 방법을 이용한 HFPD 분석

### HFPD Analysis Using Fractal and Statistical Methods

정영일, 임용배, 김덕근

(Jung Young-Il, Lim Yong-Bae, Kim Duck-Keun)

#### Abstract

The HFPD measurement method is a technique to analyze aging state of high voltage insulation materials and detect higher frequency signals than conventional PD measurement method therefore it takes less noise effect and could execute active line measurement.

It is possible to analyze main discharge phenomena and obtain access to aging progress occurred in insulation materials through accumulation of HFPD signals during determined interval and expression of fractal dimension using statistical process of accumulated signals.

In this study, the statistical parameters (skewness & kurtosis) and fractal dimensions are changed by discharge patterns that is shown up different characteristics with applied voltages and times.

**Key Words** : HFPD, Fractal, Statistical Method, Skewness, Kurtosis

#### 1. 서론

산업사회의 발달로 인해 전력설비의 고전압·대용량화, 소형화 및 전력의 안정적 공급이 요구되고 있으며, 설비사고를 예방할 수 있는 관리·운용에 대한 투자가 지속적으로 이루어지고 있다. 그러나, 전력설비의 신뢰성 향상을 위해 많은 기술적 방법 및 정밀제어가 적용되고 있지만 내부의 작은 결함, 절연체 표면의 불규칙성, 불순물 혼입 등이 피할 수 없는 문제점으로 나타나고 있다. 이러한 결함은 운전중 열적, 기계적, 전기적, 환경적 스트레스로 인해 정상전압에서도 부분방전이 발생하고 결함부위에 전계가 집중되어 최종적으로 설비사고를 유발하게 된다. 부분방전 검출을 통한 절연 열화 진단법은 전력설비의 장시간 운전중 치명적인 절연파괴의 원인이 되는 부분방전 신호를 검출하고, 해석 알고리즘을 통해 절연체 열화도를 파악할 수 있는 진단기법으로서 현재는 HFPD(High Frequency Partial

Discharge) 측정 및 분석이 주로 연구되고 있다.

접지선에서 신호를 검출하는 기존의 부분방전 측정 시스템은 환선상태에 적용할 수 없으며, 측정 대상체와 병렬로 캐패시터를 연결하고 전원입력 장치를 이용해 측정하기 때문에 대용량 전력설비 진단은 계속 시스템의 규모나 비용 때문에 적용에 한계가 있다. 실제 부분방전 펄스는 낮은 주파수 영역에서부터 수 MHz까지의 정보를 갖고 있는데 기존의 PD측정 시스템은 수백 kHz대역의 펄스신호를 검출하기 때문에 고주파 영역의 신호에 대한 데이터 손실이 따르며, 다중접지 방식의 경우에는 접지선을 통한 측정은 외부 노이즈의 영향을 많이 받게 되고 접지상태가 불량한 경우에는 검출할 수 없는 단점이 있다. 또한 별도의 전원장치를 통해 설비에 전원이 입력되므로 시험중 기기에 또 다른 스트레스를 가해줄 가능성이 높다.

본 연구에서는 환선상태에서 HFPD 측정을 통해 얻어진 데이터를 한 주기의 동일 위상구간에 누적하고, 누적 빈도수의 변화에 따른 방전신호의 재현성에 대한 관계 및 통계적 분석을 통한 방전 패턴의 상관관계를 분석하였다. 또한 누적된 방전패턴을 프랙탈 차원값으로 나타내고 절연체 열화에 따른 프랙탈 차원의 변화에 대하여 연구하였다.

전기안전시험연구원 진단연구2팀  
(경기도 가평군 외서면 상천리 27번지)  
Fax: 031-580-3111  
E-mail : mailcode@lycos.co.kr

## 2. 실험 방법

본 연구에서는 고압설비 중 가장 광범위하게 이용되고 있는 고압 유도전동기를 대상으로 하였으며, 회전기 사고 중 가장 높은 비율을 차지하고 있는 고정자 권선에 대한 가속열화 실험을 위해 3.3kV급 100HP, 3상 고압 유도전동기 고정자 권선을 모델링한 실험용 모델코일(motorette)을 국내 고압 유도전동기 제작업체 3개사에 의뢰하여 제작하였다.

고압 회전기는 설계시에 정격전압의 400~500%의 절연내력을 기준으로 설계하기 때문에 시료 인가전압을 13~15kV로 하여 가속열화 실험을 실시하였다. 모델코일에 AC 13~15kV의 고전압을 약 500V/sec의 속도로 승압하여 가속 열화시키고 이때 발생하는 부분방전 신호를 활성상태로 측정한다. CT형 RF센서로 검출한 신호를 활성 RF진단장비(RFPAM-991D, M&B 영국)로 관측하고, 오실로스코프(Textronix 7401A, 1GHz)의 입력력으로 전달한다. 컴퓨터와 GPIB 인터페이스를 통해 설정된 시간동안 입력되는 전체 신호를 한 주기의 위상 구간에 누적하여 통계적 방법 및 프랙탈 수학을 이용해 HFPD 패턴을 분석한다. 본 연구에서 이용한 HFPD 측정 시스템 구성도는 그림 1과 같다.

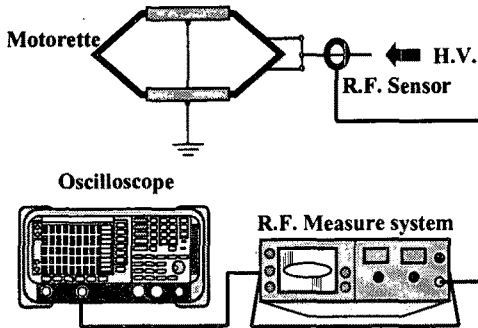


그림 1. HFPD 측정 시스템.  
Fig. 1. HFPD measurement system.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 인가전압에 따른 HFPD 특성

서로 다른 전압을 동일시간 인가하였을 때 발생하는 부분방전 패턴을 RF센서로 측정하여 그림 2에 나타냈다. 일반적으로 기체의 유전율은 고체의 유전율보다 작기 때문에 보이드 내에 형성되는 전계는 유전체 전체의 전계보다 높게되며, 공기의 절연파괴 전압이 고체 절연물의 절연파괴 전압보다 낮기 때문에 보이드에서 부분

방전이 지속된다. 인가전압이 높아지면 보이드 내에 형성되는 전계가 더욱 상승하여 절연체 열화가 가속된다. 13kV를 인가한 후 2시간이 지난 경우에는 방전량의 크기가 비교적 작은 방전신호의 빈도수가 높게 나타나지만, 15kV가 인가된 경우에는 방전량의 크기가 13kV보다 크게 나타난다.



(a) 13kV



(b) 15kV

그림 2. 인가전압에 따른 HFPD 패턴(2시간 후).  
Fig. 2. HFPD patterns according to applied voltages(2hours later).

### 3.2 인가시간에 따른 HFPD 특성

고압 회전기의 경우 운전중 복합적인 열화요인에 의해 장기간 사용할 경우 절연체 열화가 진행되며, 시간의 경과와 더불어 나타나는 방전패턴도 변하게 된다. 그림 3은 시료에 13kV를 인가한 후 시간의 경과에 따른 방전패턴 변화를 보여준다. 시료에 전압이 인가된 직후에는 방전량이 낮은 부분방전 신호들이 주된 방전 형태로 나타나는 패턴을 보여주지만 인가시간이 길어짐에 따라 절연체 열화가 진행되어 방전량의 크기도 증가하고 전체적인 방전 빈도수도 증가한다.



(a) 5시간 후



(b) 80시간 후

그림 3. 인가시간에 따른 HFPD 패턴.

Fig. 3. HFPD patterns according to applied times.

### 3.3 통계적 방법을 이용한 패턴분석

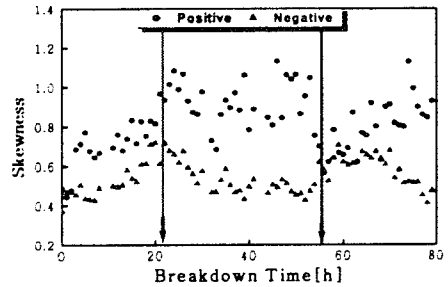
절연체 열화로 발생하는 부분방전 펄스는 비주기적이고 재현성이 낮은 특성을 갖고 있으며, 발생 및 진전 메카니즘이 매우 복잡하기 때문에 대표값이나 특징값 추출이 어렵다. 또한 외부 노이즈의 영향에 민감하기 때문에 방전 신호와 노이즈의 구분이 전혀 불가능한 경우도 있다. 이러한 부분방전 패턴을 분석하기 위해서는 최소 100주기 이상의 데이터를 추정하는 것이 일반적이며, 본 연구에서는 180주기의 방전 신호를 각각의 위상에 대해 누적하는 방법을 이용해 통계적 분석을 실시하였다. 부분방전 신호가 비주기적이고 랜덤하지만, 각 위상각에 대해 많은 데이터값을 누적시키면 정규분포 패턴을 추정하게 된다.

계측기에 입력되는 방전신호를 컴퓨터로 받아들이며  $\phi-q-n$  분포특성을 그래프로 나타내고 각각의 위상각에 누적된 데이터의 positive 반주기 및 negative 반주기 파형에 대한 왜도(skewness :  $S_k$ )값과 첨도(kurtosis :  $K_u$ )값을 계산하여 절연체 열화에 따른 왜도와 첨도값의 변화를 분석하였다. 왜도 및 첨도값은 분포패턴의 비대칭도를 나타내는 함수로서 왜도값은 방전 패턴의 위상분포 변화추이를 알 수 있으며, 첨도값은 방전 패턴의 방전량 밀집도 변화추이를 알 수 있다.

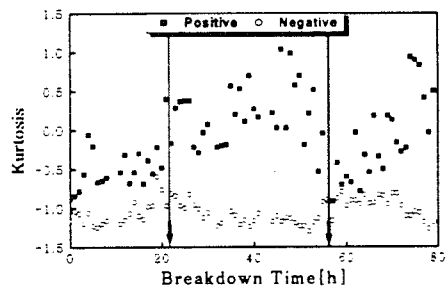
그림 4는 인가전압 13kV에서 절연과피 발생대까지 왜도값과 첨도값의 변화특성을 나타낸다. 왜도 및 첨도값 변화영역을 크게 3단계로 구분할 수 있는데 첫 번째 단계는 전압을 인가한 직후부터 값이 계속 증가하는 특성을 보인다. 이 영역은 초기단계로서 시료 내부의 보이드 존재나 경화상태 등의 시료 초기특성을 파악할 수 있는 구간으로서, 내부의 미소결함 때문에 초기에 부분방전량이나 빈도수가 증가하는 특성을 보이게 된다. 초기특성이 나타난 후 일정시간이 경과되면 값이 감소하거나 일정하게 유지되는 특성을 나타낸다.

두 번째 단계로 왜도 및 첨도값의 변화가 감소하거나 일정한 편차를 갖고 진동하는 특성 구간이 나타난다. 이 단계는 열화진행 단계로서 절연체에 부분방전이 발생하여 절연내력이 감소하는 영역이다. 마지막 단계로 왜도값이 다시 증가하는 특성을 나타내는 구간이다. 이 단계는 열화말기 단계로서 절연체의 부분방전량과 빈도수가 증가하며 절연과피로 인해 사고가 발생하게 된다.

이런 왜도 및 첨도값의 변화는 인가전압이 높아질수록 시료의 초기특성을 나타내는 구간의 영역이 작아지고 열화말기 단계의 특성을 나타내는 영역이 증가하게 된다. 즉 열화진행이 가속되는 것을 의미한다.



(a) 왜도



(b) 첨도

그림 4. 13kV에서 왜도와 첨도값의 변화 특성.

Fig. 4. The characteristics of skewness and kurtosis values variance in case of 13kV.

### 3.4 프랙탈 차원을 이용한 패턴분석

그림 5는 AC 15kV까지 승압하면서 발생하는 방전 패턴을 프랙탈 차원화한 결과이다. Negative 반주기 방전 패턴의 프랙탈 차원값이 positive 방전 패턴의 프랙탈 차원값보다 크게 나타나는데 이것은 절연체 내부 방전보다 표면방전이나 슬롯의 모서리 부분에 전계가 집중하여 생기는 방전현상 때문이다. 또한, 인가전압이 상승하면 발생하는 방전량과 빈도수가 모두 증가하기 때문에 프랙탈 차원값도 인가전압에 비례해 증가하는 특성을 나타낸다.

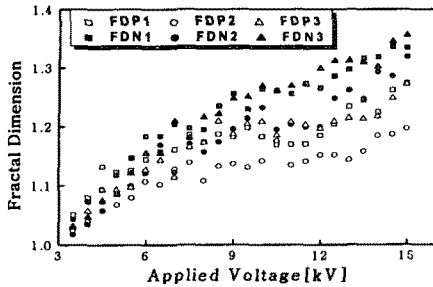
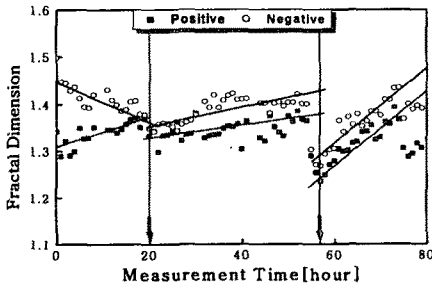
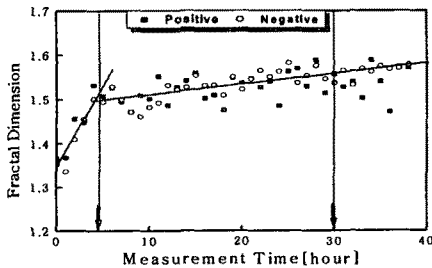


그림 5. 인가전압에 따른 프랙탈 차원 변화.  
Fig. 5. The change of fractal dimension according to applied voltages.



(a) 13kV



(b) 15kV

그림 6. 인가시간에 따른 프랙탈 차원 변화.  
Fig. 6. The change of fractal dimension according to applied times.

그림 6의 (a)처럼 절연과피 때까지 프랙탈 차원이 증가와 감소를 반복하는 특성은 인가전압이 낮은 경우에 주로 나타나는 현상이며, 표면방전이나 코로나 방전과 함께 절연체 내부의 트리잉의 진전이 반복되기 때문이다. 그림 (b)와 같이 프랙탈 차원값이 계속 증가하는 특성을 보이는 경우는 인가전압이 비교적 높은 경우에 주로 발생하고 인가된 전압이 높을수록 프랙탈 차원값이 급격히 증가하며 일정한 프랙탈 차원값에 도달하는

시간이 짧아지는 특성을 나타낸다. 인가전압이 낮은 경우 프랙탈 차원값은 1.25~1.45정도의 값을 갖으며, 전압이 높은 경우에는 1.4~1.6차원 정도의 값을 갖는다.

#### 4. 결론

HFPD 측정을 통해 얻어진 데이터를 한 주기의 동일 위상구간에 누적하여 통계적 방법 및 프랙탈 차원을 이용해 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 왜도값 변화를 통해 HFPD신호의 위상분포를 파악할 수 있으며, 첨도값을 통해 방전량이 큰 신호의 밀집도를 알 수 있다. 따라서 통계적 파라미터를 이용하면 주된 방전현상을 예측할 수 있다.
2. 인가전압이 상승하면 프랙탈 차원값이 증가하고, 표면방전이 발생하면 negative 반주기의 프랙탈 차원이 높게 나타나며 절연체 내부에서 방전이 발생하면 positive와 negative 반주기의 프랙탈 차원값이 거의 비슷하게 나타난다.
3. 인가전압이 낮은 경우에는 절연과피가 발생할 때까지 1.25~1.45사이의 프랙탈 차원을 나타내며, 인가전압이 높은 경우에는 1.4~1.6차원 사이의 값을 갖는 것으로 나타났다.

#### 참고 문헌

- [1] H. Borsi, "A PD Measuring and Evaluation System Based on Digital Signal Processing", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.7. No. 1, February 2000.
- [2] Greg Stone, "Importance of Bandwidth in PD Measurement in Operating Motors and Generators", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7 No. 1, pp. 6~11, February 2000.
- [3] B. A. Fruth, D. W. Gross, "Partial Discharge Signals Generation Transmission and Acquisition", IEE Proceeding on Science of Measurement Technology, Vol. 142, No.1, pp. 22~28, January 1995.

본 연구는 산업자원부 전력산업연구개발사업 지원에 의해 연구되었습니다.