

논문 20-10-13

K-means 군집화 기법을 이용한 개폐장치의 부분방전 패턴 해석

Analysis of Partial Discharge Pattern of Closed Switchgear using K-means Clustering

변두균<sup>1</sup>, 김원종<sup>1,a</sup>, 이강원<sup>1</sup>, 홍진웅<sup>1</sup>

(Doo-Gyoon Byun<sup>1</sup>, Weon-Jong Kim<sup>1,a</sup>, Kang-Won Lee<sup>1</sup>, and Jin-Woong Hong<sup>1</sup>)

Abstract

In this study, we measured the partial discharge phenomenon of inside the closed switchgear, using ultra wide band antenna. The characteristics of  $\Phi$ -q-n in the normal state are stable, and confirmed at less than 0.01, but in proceeding states, about 2 times larger. And in the abnormal state, it grew hundreds of times larger compared with normal state. According to K-means analysis, if slant of discharge characteristics is a straight line close to "0" and standard deviation is small, it is in a normal state. However if we can find a peak from K-means clusters and standard deviation to be large, it is in an abnormal state.

Key Words : Partial discharge, K-means, Clustering, Normal, Proceeding, Abnormal

1. 서론

안정적 전력 에너지의 공급 문제는 급속한 산업 발전에 따른 전력수요의 증가와 비례하여 끊임없이 요구로 전력설비의 운용 신뢰성 확보는 매우 중요하게 취급되고 있다. 전력설비의 고장이나 사고의 원인은 사용자의 부주의나 천재지변과 같은 불가피한 경우도 있으나, 대부분은 설비의 절연성능 약화와 이로 인한 절연파괴가 가장 영향을 많이 미치는 것으로 보고되고 있다[1-3]. 통계에 의하면 절연열화가 각종 전기사고 원인의 45 %를 차지하고 있어 절연이 설비수명을 좌우하는 가장 중요한 요소임을 알 수 있다[4,5].

본 논문에서는 개폐장치(closed switchgear)에서 발생하는 부분방전의 유형 즉, 정상상태, 요주의상태, 비정상상태를 광대역(ultra wide band : UWB) 안테나와 오실로스코프를 이용 측정 한 후, K-

means 군집화기법을 이용 패턴별 부분방전 데이터의 분포 특성을 해석한 결과를 소개한다.

2. 실험

2.1 실험장치

전력설비의 절연 열화는 회전기에서 뿐만 아니라 개폐장치에서도 같은 메커니즘에 의해 진행된다. 열화 초기에는 개폐장치를 구성하고 있는 케이블 및 접속재, 변성기기 등의 절연물 내에서 작은 보이드가 발생하고, 여기에 교류 또는 충격파와 같은 고전압이 인가되면 보이드의 유전율은 절연물에 비해 작기 때문에 이 부분에서 방전이 발생하게 된다. 케이블이나 수지 함침 절연물에서는 절연물 내부의 보이드가 절연파괴 원인의 대부분으로 보고되고 있다[6,7].

따라서, 이와 같은 개폐장치의 절연열화를 감시 및 진단하기 위해서는 고정자 코일, 케이블 등 내부기기의 방전 현상을 측정하는 것이 가장 확실한 방법이다. 부분방전 현상은 설비의 절연열화 징후가 있을 때 다른 징후에 비해 가장 빠른 응답 특성을 가지고 있기 때문이다. 부분방전 현상은 수ns 동안에 수MHz 범위의 전자파를 발생하므로 안테나를

1. 광운대학교 전기공학과, 충북대학교 중전기 미래기술개발연구센터 (서울시 노원구 월계동 447-1)  
a. Corresponding Author : ealab@kw.ac.kr  
접수일자 : 2007. 8. 21  
1차 심사 : 2007. 9. 13  
심사완료 : 2007. 9. 20

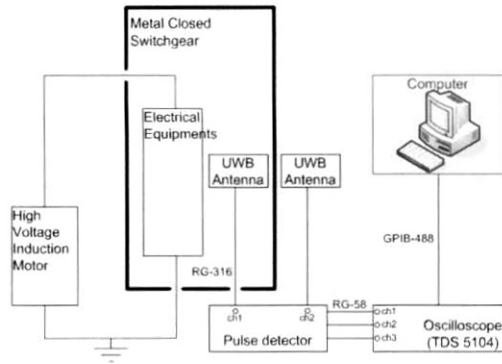


그림 1. 부분방전측정시스템의 구성.  
Fig. 1. Configuration of the PD measurement system.

이용하여 검출하며 부분방전 신호는 주위 노이즈 신호에 비해 크기가 매우 작기 때문에 광대역 안테나를 사용한다. 협대역 안테나를 사용 시에는 수신 주파수가 한정되어 있어 어느 정도의 주위 노이즈 구분은 가능하나 부분방전의 특성이 광대역으로 방사되므로 신호를 누락시킬 염려가 있다 [8-10]. 개폐장치 내에 설치된 설비로부터 부분방전이 발생하면 수MHz에서 수GHz 대역의 전자파가 발생하는데, 이를 특정 주파수 대역만 필터링하고 교류 인가전압에 의한 과도성 펄스를 60 Hz와 동기화시키면 펄스 발생간격  $\Phi$ 는 좁아지고 펄스 크기  $q$ 는 커지며, 개수  $n$ 은 증가한다.

이번 연구에서는 이들 요소 중 펄스의 개수를 측정하여 진단 시스템에 전송하고 수신된 펄스 수를 부분방전 추이곡선을 참고로 설정한 절대값과 비교하여 이상 유무를 확인하였다. 그림 1과 같이 광대역안테나를 폐쇄형 개폐장치내부와 외부에 설치하고 부분방전 검출기, 오실로스코프 등으로 장치를 구성하여 전자파를 측정하였다.

## 2.2 측정

유형별 부분방전 기준값에 의해 정상상태, 요주의상태, 비정상상태가 나타나는 위치에서 400~800 MHz의 전자파를 검출할 수 있는 반 지향안테나를 사용하여 측정하였다. 그림 2는 3.3 kV VCB 패널에서 측정된 부분방전 데이터로서 기록계를 이용한 그래프로 x축은 시간을, y축은 pps를 나타낸다. 검출된 데이터는 정상상태의 부분 방전값으로 50~70 pps로 매우 안정적임을 알 수 있다. 그림 3은

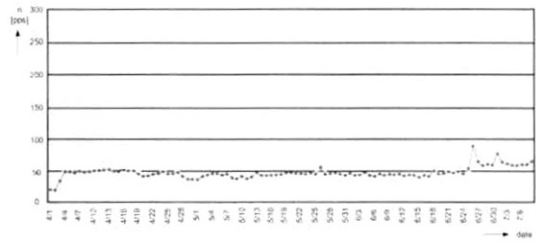


그림 2. 정상상태의 부분방전 데이터(기록지).  
Fig. 2. PD data of normal state (recording paper).

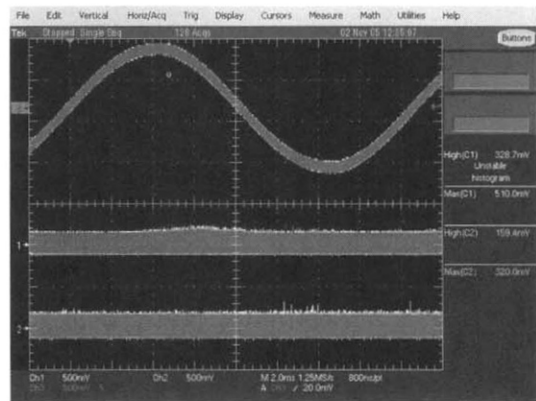


그림 3. 정상상태의 부분방전 신호(오실로스코프).  
Fig. 3. PD data of normal state (oscilloscope).

동일한 조건에서 측정한 오실로스코프 데이터로 그림에서 채널 1은 패널 내의 UWB 안테나로부터 얻은 부분방전 신호이고 채널 2는 패널 외부에서 수집한 잡음 신호이고 채널 3은 입력 전원과 동기화된 신호로 위상을 나타내고 있다. 측정 기간 동안 모든 데이터가 안정적인 검출값을 유지하고 있어 설비의 절연 상태가 매우 양호함을 나타내고 있다. 정밀 진단 결과를 보면 오실로스코프의 파형에서 미약한 크기를 가진 파형이 검출되기도 하지만 비 주기적인 특성을 가지고 있어 매우 양호한 절연 상태로 해석된다.

동일한 방법으로 22.9 kV 패널에서의 부분방전을 측정한 것이 그림 4와 5로 대부분 100 pps를 중심으로  $\pm 50$  pps 정도의 값을 확인 할 수 있으며, 간헐적으로 500~600 pps의 값도 나타남을 확인할 수 있다.

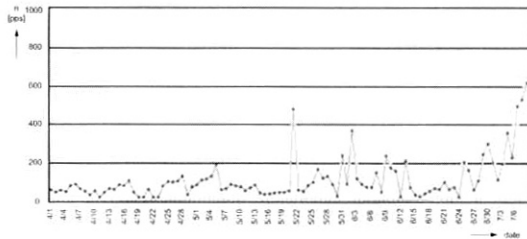


그림 4. 요주의상태의 부분방전 데이터 (기록지).  
Fig. 4. PD data of proceeding state (recording paper).

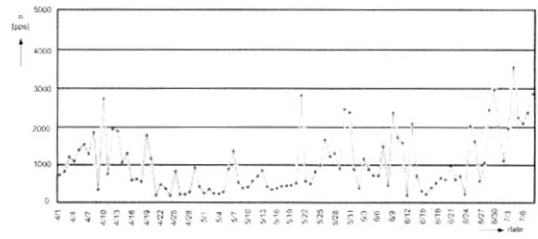


그림 6. 비정상상태의 부분방전 데이터 (기록지).  
Fig. 6. PD data of abnormal state (recording paper).

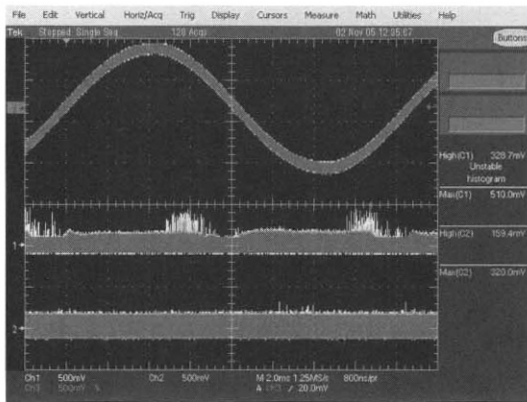


그림 5. 요주의상태의 부분방전 신호(오실로스코프).  
Fig. 5. PD data of proceeding state (oscilloscope).

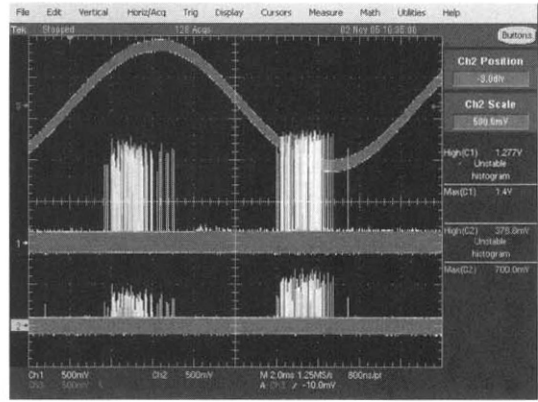


그림 7. 비정상상태의 부분방전 신호(오실로스코프).  
Fig. 7. PD data of abnormal state (oscilloscope).

오실로스코프 측정 데이터 분석 결과 이 부분에서의 방전 현상은  $90^\circ$ 를 약간 지난 위상에서 발생하여  $180^\circ$  이내에서, 그리고  $270^\circ$ 를 지나  $360^\circ$  이전에서 나타나고 있음을 확인하였다. 약간의 열화에 의한 부분방전이 미약하게 발생하는 것으로 판단된다. 그림 6은 3.3 kV 전동기 콘덴서 반에서 발생하는 부분방전 현상의 측정 결과로 90일간의 부분방전 측정값 대부분이 500 pps를 상회하고 있고 2000 pps 또는 3000 pps를 상회하는 것도 검출하였으며 배전반 내 전력설비의 절연 이상이 있음을 알 수 있다. 동일 신호를 오실로스코프로 측정한 것이 그림 7과 같이 현저한 크기의 부분방전 현상을 확인하였다. 측정 데이터의 신뢰성 확보를 위하여 외부 노이즈에 의한 영향인지를 확인코자 콘덴서 인가 전압을 차단하자 오실로스코프의 전자파 신호가 검출되지 않고 사라져, 콘덴서반 내에서 발생하고 있는 부분방전 현상임을 알 수 있었다.

### 3. 결과 및 고찰

K-means 알고리즘의 기본이론은 무한히 많은 수의 입력 값을 미리 정해진 K개의 대표값 즉, 중심값으로 사상시키는 집단화 알고리즘으로 임의 입력 벡터의 아날로그 값을 디지털화하는 과정에서 양자화 에러를 최소화하기 위해 반복적으로 클러스터의 중심 값을 갱신하는 알고리즘이다[11]. 즉 신호 데이터를 통해 얻고자 하는 군집의 개수를 사용자가 지정하고, 지정한 개수만큼의 군집 중심점을 다차원 측정 공간 위에 위치시키는 것이다.

그림 8은 정상상태 내부에서 발생한 부분방전 신호에 대한 K-means 분포로 군집 개수는 양·음 위상 영역에서 각각 10개씩 설정하였다.

양극성 영역에서는 위상  $170.91^\circ$ 에서 최소 크기인 0.126, 위상  $134.55^\circ$ 에서 최대 크기인 0.163으로 분포하고 있으며, 이들 군집의 평균값은 0.1382

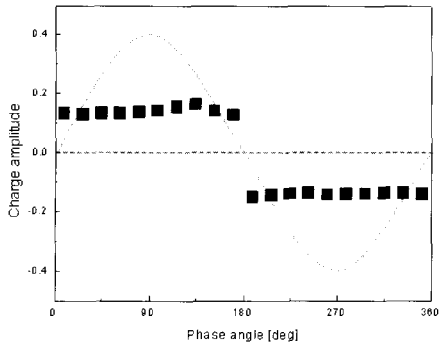


그림 8. 정상상태의 군집 분포.  
Fig. 8. Cluster distribution of normal states.

이고 표준편차의 크기는 0.0117로서 거의 직선적으로 변화함을 확인할 수 있다.

음극성 영역에서는 위상 약 332° 에서 0.137, 위상 약 189° 에서 -0.1512까지 분포함을 확인하였다. 이들 분포 값으로부터 평균값 -0.1412, 표준편차  $4.3 \times 10^{-3}$ 을 얻었으며 음극성 영역의 편차는 양극성 영역 편차의 37 %정도로 음극성 영역의 직선성이 양극성 영역에 비해 매우 우수함을 확인할 수 있었다. 표 1은 정상상태에서의 군집 간 분포값으로 군집에 포함된 객체 수는 양극성에서 대부분 1000 개를 포함하고 있으며, 음극성은 500개 정도이다. 또 객체 간 평균거리는 양·음 극성 모두 4.5의 값을 가지고 있으며, 중심점과 군집 객체 간 최대 거리는 8.9로 거의 동일한 형태를 나타내고 있다. 이러한 현상은 대부분의 방전신호의 크기가 안정적으로 나타나고 있음을 의미한다.

따라서 K-means 군집화에 의한 부분방전 패턴 해석 결과 정상상태는 위상에 대한 방전 특성의 기울기가 거의 "0"에 가까움을 확인하였다.

표 1. 정상상태의 군집 분포.  
Table 1. Cluster distribution of normal states.

Classification	Phase Angle [deg]	Amplitude	Object Number	Average Distance	Max. Distance	
+	cluster 2	26.676	0.1274	990	4.455	8.892
	cluster 4	62.424	0.1311	994	4.473	8.928
	cluster 6	98.352	0.1401	1002	4.509	9.000
	cluster 8	134.550	0.1629	1008	4.537	9.054
	cluster10	170.910	0.1262	1012	4.554	9.090
-	cluster 2	206.712	0.1440	495	4.455	8.892
	cluster 4	242.460	0.1371	497	4.473	8.928
	cluster 6	278.334	0.1416	500	4.500	8.982
	cluster 8	314.478	0.1375	504	4.536	9.054
	cluster10	350.892	0.1417	507	4.563	9.108

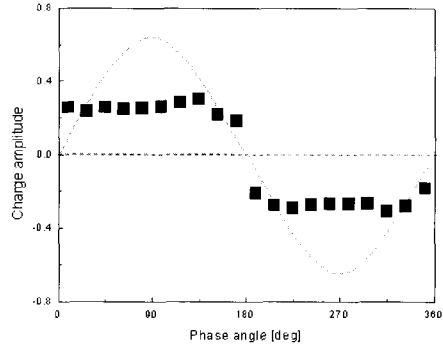


그림 9. 요주의상태의 군집 분포.  
Fig. 9. Cluster distribution of proceeding states.

그림 9는 요주의상태의 방전신호에 대한 분포를 나타낸 것으로 양극성 영역에서는 위상 170.89° 에서 최소 크기 0.091, 위상 134.48°에서 최대 크기 0.3으로 분포하고 있다. 이들 군집의 평균값은 0.2485이고 평균편차는 0.0325로 요주의상태는 정상상태에 비하여 180 % 커짐을 알 수 있다.

음극성 영역에서는 위상 350.89°에서 최소값 0.186, 위상 314.48° 에서 최대값 0.3082의 크기로 분포하고, 이들 군집분포의 평균값은 0.2624, 표준편차 0.0372로서 양극성 영역의 표준편차가 음극성 영역 표준편차의 약 87 %로 다소 높은 직선성을 보이고 있다. 표 2는 요주의상태에서 발생한 방전신호의 군집 간 분포값을 나타낸 것으로 군집에 포함된 객체 수는 양·음극성에서 약 500 개를 포함하며, 정상상태에 비해서 양극성의 경우 방전 객체수가 감소하였음을 확인하였다.

객체 간 평균거리 및 중심점과 군집객체 간 최대 거리는 양·음극성이 유사한 크기를 나타내었으나, 양극성이 음극성보다 전체적으로 약간 작은 값을

표 2. 요주의상태의 군집 분포.  
Table 2. Cluster distribution of proceeding states.

Classification	Phase Angle [deg]	Amplitude	Object Number	Average Distance	Max. Distance	
+	cluster 2	26.622	0.2360	494	4.446	8.874
	cluster 4	62.334	0.2458	498	4.482	8.946
	cluster 6	98.316	0.2568	501	4.509	9.000
	cluster 8	134.478	0.3000	504	4.537	9.054
	cluster10	170.892	0.1824	507	4.563	9.108
-	cluster 2	206.658	0.2756	494	4.446	8.874
	cluster 4	242.370	0.2744	498	4.482	8.946
	cluster 6	278.316	0.2674	501	4.509	9.000
	cluster 8	314.478	0.3082	504	4.537	9.054
	cluster10	350.892	0.1856	507	4.563	9.108

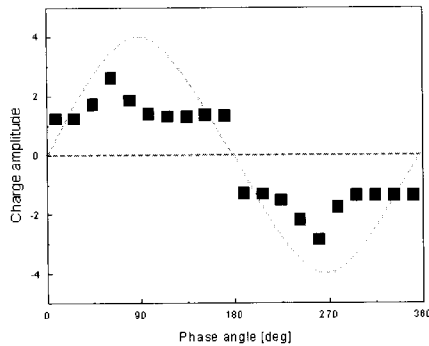


그림 10. 비정상상태의 군집분포.  
Fig. 10. Cluster distribution of abnormal states.

나타내었다. 따라서 요주의상태의 군집 간 분포 특성은 적은 분산을 나타내며, 크기는 정상상태에 비하여 약 40 % 커짐을 확인하였다.

그림 10은 비정상상태에서 발생하는 방전신호에 대한 K-means분포를 나타낸 것으로 양극성 영역에서는 위상 약 27° 에서 최소 크기이고 위상 63° 에서 최대 크기로 분포하고 있으며, 평균 1.5162, 표준편차 0.43으로 이는 정상상태의 양극성 표준편차의 36.75 배, 요주의상태의 표준편차의 13.23 배에 해당하는 매우 큰 폭임을 알 수 있다.

또 음극성 영역에서도 위상 189° 에서 최소 크기 1.302, 위상 261° 에서 최대 2.86으로 분포되어 있으며, 이들 음극성 군집의 평균은 1.6455, 표준편차는 0.51로서 정상상태 음극성의 편차의 118.6 배, 요주의상태 표준편차의 13.7 배에 해당하는 큰 변화를 확인할 수 있었다.

표 3은 비정상상태에서 발생한 방전신호의 군집 간 분포를 나타낸 것으로, 군집에 포함된 객체수는 양·음극성에서 약 500개를 포함하고 있으나, 양극성

표 3. 비정상상태의 군집 분포.  
Table 3. Cluster distribution of abnormal states.

Classification	Phase Angle [deg]	Amplitude	Object Number	Average Distance	Max. Distance	
+	cluster 2	26.694	1.222	496	4.464	8.910
	cluster 4	62.424	2.593	497	4.499	8.929
	cluster 6	98.352	1.372	501	4.513	9.000
	cluster 8	134.514	1.278	504	4.536	9.054
	cluster10	170.910	1.317	506	4.554	9.090
-	cluster 2	206.766	1.312	496	4.464	8.910
	cluster 4	242.550	2.200	498	4.496	8.947
	cluster 6	278.478	1.762	500	4.507	8.982
	cluster 8	314.604	1.373	503	4.527	9.036
	cluster10	350.910	1.372	506	4.554	9.090

영역의 위상 62° 부근에서 큰 방전크기를 가지는 군집이 집중되어 있고 음극성 영역에서는 위상 260° 부근에서 큰 방전이 집중됨을 확인할 수 있다. 이는 비정상상태의 부분방전 분포 특성은 양·음극성 영역에서 공히 피크가 나타남을 의미하며, 특히 비정상상태의 방전량 크기와 분산 폭은 정상상태의 약 11 배와 59 배로 각각 커짐을 알 수 있었다.

#### 4. 결론

K-means 군집화 기법을 이용한 개폐장치의 유형별로 측정된 부분방전 패턴을 해석한 결과

1) 정상상태의 방전 특성은 매우 안정적이고 0.01 이하의 작은 값으로 분포하나, 요주의상태의 방전 특성은 정상상태의 약 2 배 정도 크고, 비정상상태는 정상상태의 수백 배임을 확인하였다.

2) K-means 군집화 해석 결과, 위상에 대한 방전 특성의 기울기가 "0"에 가깝고 표준편차가 매우 작으면 정상상태이고, 표준편차의 분포가 정상상태보다 약 40 % 크며 양·음 영역의 일정 위상에서 작은 피크가 나타나면, 요주의상태임을 알 수 있었다.

3) 방전량 크기와 분산 폭이 정상상태의 약 10 배와 60 배로 커지면 비정상상태임을 확인하였고, 특히 방전신호의 위상에 대한 군집분포에서 매우 큰 피크가 나타남을 확인하였다.

#### 참고 문헌

- [1] S. Matsumoto, "Recent technology of sensing, monitoring, diagnosis, and maintenance for aged electric power and energy system", IEEJ Trans. PE., Vol. 126, No. 6, p. 574, 2006.
- [2] G. C. Stone, E. A. Boulter, I. Culbert, and H. Dhrrani, "Electrical Insulation for Rotating Machines", New York, IEEE Press, Wiley, p. 86, 2004.
- [3] 電氣學會, "絶縁材料の劣化と機器・ケーブルの絶縁劣化判定の實態", 電氣學會技術報告, No. 752, p. 75, 2000.
- [4] S. Urabe, S. Yoshihara, T. Shirakashi, and Y. Hotoda, "Study on aging property of hydrophobic epoxy system for outdoor insulation", Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Vol. 3, p. 2181, 2002.
- [5] 河村達雄, 田中紀捷, "電氣設備の診断技術", 電氣學會, p. 117, p. 150, 2003.

- [6] F. H. Kreuger, "Partial discharge detection in high-voltage equipment", Butterworths, High-voltage engineering at the technical university, Delft, p. 29, p. 95, 1989.
- [7] L. Yangqing, L. Fangcheng, X. Baoan, and C. Zhiye, "A new method using ultrasonic for partial discharge pattern recognition", ICPST, Vol. 2, p. 1004, 2002.
- [8] Q. Chen, Y. Wang, and X. Wie, "The UHF method for measurement of partial discharge and interface suppression", Proc. of International Symposium on Electrical Insulating Materials 2005, Vol. 3, p. 829, 2005.
- [9] Y. Tian, P. L. Lewin, A. E. Davies, and Z. Richardson, "AE detection of PD in polymeric insulation", High Voltage Engineering Symposium, Conference Publication, No. 467, C, IEEE, Vol. I, p. 82, 1999.
- [10] Y. Li, F. Lu, B. Xin, and Z. Chen, "A new method using ultrasonic for partial discharge pattern recognition", Proc. of international Conference on Power System Technology 2002, Vol. 2, p. 13, 2002.
- [11] D. Pollard, "Strong consistency of k-means clustering", The Annals of Statistics, Vol. 9, No. 1, p. 135, 1981.