

K-means를 이용한 열화 형태의 패턴화에 관한 연구

이덕진^{1,a}

¹ 극동대학교 유비쿼터스IT학과

A Study on Pattern Making of Degradation Type Using K-means

Deok-Jin Lee^{1,a}

¹ Department of Ubiquitous IT, FAR-EAST University, Eumseong 369-700, Korea

(Received November 5, 2014; Revised November 12, 2014; Accepted November 18, 2014)

Abstract: It has been confirmed that the inner defect of transformer and the perfect diagnosis for aging are closely related to safe electric power transmission system and that the detection of accident and diagnosis technique turn out to be very important issues. Since electric power machinery consists of various kinds of components, however, it is very difficult to make a diagnosis for aging by one parameter. Thus, diagnosis for aging is feasible only through the combination of various parameters. Recently, various expert systems have been developed and applied to diagnosis for aging, but they are not yet reliable enough to apply to the real system. In this paper, XLPE which is ultra high voltage cable insulator material were chosen to investigate the influence of void on insulator material using partial discharge. Obtained data have been processed by PRPD (phased resolved partial discharge) distribution function and K-means. And statistical and cluster distribution of partial discharge have been analysed and investigated.

Keywords: K-means, Aging, Partial discharge, XLPE, PRPD

1. 서 론

최근 전력수요의 증대에 따른 전력케이블이나 전력기기 등의 초고압화·대용량화가 추세에 따라 전력기기 등의 전기절연열화·파괴에 의한 사고의 위험성이 점점 증가되고 있다. 더욱이 고도 정보화 사회의 발전에 따른 이제까지 경시되었던 순시정전이 매우 중요한 문제로 전기절연열화·파괴에 대한 많은 연구개발이 진행되어지고 있다 [1,2].

절연재료에서 요구되어진 특성에서는 전기적 특성, 기계적 특성, 열적 특성, 물리화학적 특성 등이 복합적으로 동작하여 절연재료의 열화현상이 나타나며, 이러한 물성에 대해 초기제품의 안전검사에 의해 충분히 시행 되어지고 기준치에 대한 규정도 제시되어지고 있다. 그러나 장시간 사용은 절연재료의 열화로 인한 제 특성 변화를 나타나게 되고, 생산공정상에 발생하는 보이드는 절연재료의 제 특성을 급격히 감소시키는 특징을 가지고 있다.

이를 검출할 수 있는 다양한 방법이 시도되어 최근에는 PD 검출기법을 주로 사용하고 있지만, 미소한 PD 검출에 대한 하드웨어 개발은 급속히 발전된 것에 비해 진단 솔루션은 1970년대 개발된 PRPD 검출기법을 적용하고 있다 [1,3,4].

a. Corresponding author; djlee@kdu.ac.kr

Copyright ©2014 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

따라서 본 논문에서는 고분자절연재료의 보이드 유무에 따른 방전신호를 위상각(ϕ)-방전전하량(q)-발생빈도수 (n)으로 측정하여, PRPD 기법과 K-mean 알고리즘을 이용하여 방전패턴을 분석하여, 새로운 진단 솔루션을 제시하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 K-means 알고리즘

클러스터링 기법은 크게 평면적 클러스터링과 계층적 클러스터링의 두 가지로 나눌 수 있다. 평면적 클러스터링에 속하는 알고리즘은 일반적으로 미리 몇 개의 클러스터로 나누어 질 것으로 예상하고 클러스터링을 수행한다. 그 중 잘 알려진 것으로는 K-means와 그 응용 알고리즘, EM 알고리즘 등이 있다 [5-7].

본 논문에 적용한 K-means 알고리즘의 기본이론은 무한히 많은 수의 입력벡터를 미리 정해진 K개의 대푯값 (중심값)으로 사상시키는 집단화 알고리즘으로써 임의의 입력벡터에 대한 Vector Quantizer의 양자화에러를 최소가 되도록 반복적으로 클러스터의 중심값을 갱신하는 알고리즘이다 [5,8,9]. 즉, 신호 데이터를 통해 얻고자 하는 군집의 개수를 사용자가 지정하도록 되어있고, 사용자가 지정한 개수만큼의 군집중점을 다차원 측정 공간상에 위치시킨다.

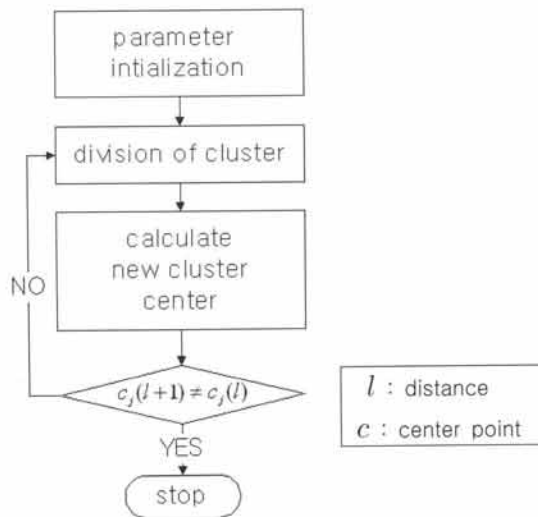


Fig. 1. Flow chart of K-means algorithm.

객체들은 군집 ($S(l)$)들의 임시 평균벡터들 중에서 가장 가까운 군집에 할당되며, 모든 객체 ($x^{(p)}$)들이 이러한 방법으로 분류된 후 군집은 새로운 군집중심 ($c_k(l)$)이 계산된다. 이렇게 수정된 군집중심은 신호 데이터의 재분류 근거로 사용된다. 군집중심의 위치가 더 이상 변하지 않을 때까지 알고리즘의 반복이 지속된다.

그림 1은 적용된 K-means 알고리즘의 흐름도를 나타내고 있다. K-means 알고리즘에 의한 집단화 과정은 4단계로 구분할 수 있으며, 각 단계별 특성을 정리하면 아래와 같다 [5,10].

단계 1 초기화 과정으로 임의의 K개의 입력 특징벡터를 선택하여 K개의 클러스터의 중심점 벡터 $\{c_1(l), c_2(l), \dots, c_K(l)\}$ 로 설정한다.

단계 2 군집화 단계로 K개의 클러스터 중심점 벡터와 각 입력 특징벡터에 대한 유클리드 거리를 측정하여 입력벡터를 거리가 가장 작은 클러스터의 멤버벡터로 집단화한다.

$$\text{만약 } \|x^{(p)} - c_j(l)\| < \|x^{(p)} - c_i(l)\|$$

(모든 $i = 1, 2, \dots, K, i \neq j$ 이면 $x^{(p)} \in S_j(l)$ 이다.)

단계 3 중심점 갱신단계로 각 클러스터의 멤버벡터를 통해 클러스터의 중심점을 갱신한다.

$$c_j(l+1) = \frac{1}{N_j} \sum_{x^{(p)} \in S_j(l)} x^{(p)}$$

여기서, N_j 는 클러스터집합 S_j 에 소속된 멤버벡터의 수

단계 4 갱신되는 값이 없으면 작업을 종료하고 중심점이 갱신되면 단계 2로 되돌아가 반복하여 수행한다.

2.2 PD 검출

부분방전 특성인 $\phi-q-n$ 분포를 고찰하기 위해 AVO Co.에서 제작한 부분방전 측정장치를 이용하여 방전전하량을 검출하였다. 검출기에 교정기 (calibration signal coupler)를 연결하여 부분방전 측정장치를 50 pC으로 교정하여 최대 검출전하량을 600 pC 이하로 설정한 후 측정하였다.

PD 검출은 결합 시료를 실리콘오일 내에 함침하여 측정하였으며, 측정데이터는 DAQ보드를 거쳐 컴퓨터로



Fig. 2. Experimental equipment of partial discharge.

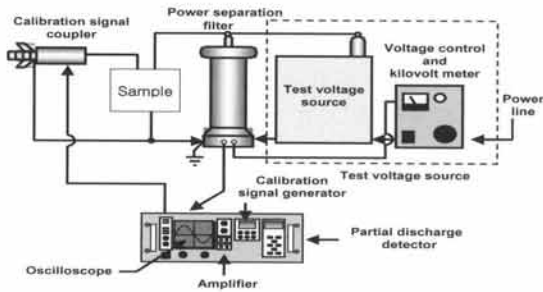


Fig. 3. Partial discharge detection circuit.

저장하였다.

또한, 측정데이터는 전압인가 후 10 sec (600 cycle) 동안 발생하는 방전을 검출하였으며, 데이터 처리는 LabView를 이용하여 발생한 위상과 전하량을 사인파 한주기에 적층한 후 동일전하량의 값이 동일위상에서 발생한 것을 방전빈도수로 처리하였다. 또한, C++를 이용하여 군집화 알고리즘을 구현하였으며, 방전위상 (ϕ) 과 방전전하량 (q)에 대한 중심점 (centroid), 편차 및 군집개수를 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 $\phi-q-n$ 분포

1) 무보이드

무보이드 시료의 부분방전 패턴 분포를 그림 4에 나타내었으며, 그림 (a)는 전압 6 kV 인가 시 방전분포이다. 정극성영역에서는 $5^\circ \sim 115^\circ$ 위상에서 방전이

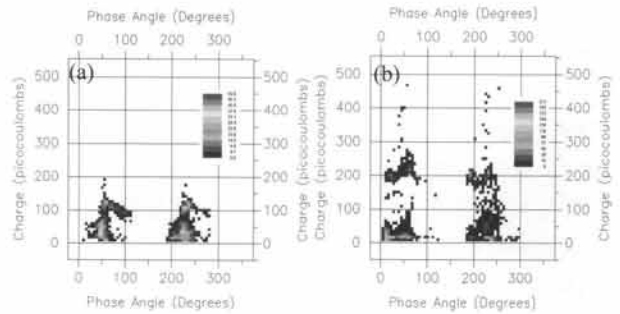


Fig. 4. $\phi-q-n$ distribution of XLPE (no void). (a) 6 kV and (b) 10 kV.

발생하였고, 전하량이 200 pC인 큰 방전도 발생하였으나, 대부분은 50 pC 이하의 전하량을 나타내었다. 최대 방전발생 빈도수도 전체 600주기 중에서 42회로 전체주기의 7%에 해당하는 방전이 발생하였다. 부극성영역에서는 $191^\circ \sim 281^\circ$ 부극에서 방전이 발생하였으며, 최대방전전하량은 정극성영역과 비슷하지만 주로 발생하는 방전은 110 pC으로 정극성영역에 비해 높은 방전이 발생하였다.

최대방전빈도수는 52로 방전발생빈도는 크지 않음을 확인할 수 있었다. 그림 (b)는 전압을 10 kV 인가했을 때의 방전분포로서, 정극성영역에서는 전압 6 kV의 방전발생위상보다 넓어져 $5^\circ \sim 130^\circ$ 에서 발생함을 확인하였다. 또한 최대 방전전하량이 470 pC인 큰 방전도 발생하였다. 그러나 대부분은 전하량이 50 pC 이하인 방전이 주를 이루고 있으며, 최대방전발생빈도수는 112회를 얻었다. 부극성영역은 $180^\circ \sim 300^\circ$ 영역으로 방전발생 위상영역이 6 kV보다 증가하였으며, 최대방전전하량이 470 pC인 큰 방전도 발생하였다. 최대방전발생빈도수는 212회를 얻었다. 전압의 증가에 따라 방전발생빈도수, 방전전하량 및 방전발생위상의 증가를 나타내는데 이는 전압의 증가에 따라 전자주입의 증가되기 때문이라고 생각된다. 또한, 방전 패턴은 6 kV일 때 100 pC 이하의 방전 부분과 100~200 pC인 두 개의 그룹이 형성되었다가 전압의 증가에 따라 100~200 pC 영역의 방전이 200 pC이상의 값으로 상승되는 현상을 나타내었다. 인가전압에 따른 부분방전측정결과 4.5~6 kV에서 방전이 개시되었으나, 방전이 발생하지 않는 경우도 있고, 방전이 발생하였어도 빈도수가 10회 이하의 낮은 값으로 발생하고, 방전전류도 5.4 pA로 매우 낮은 값을 나타냈다. 따라서 모든 실험에서 방전이 발생하기 시작하고, 전체 방전빈도수가 100회 이상 인 6 kV의 이후의 방전

패턴에 대하여 조사하였다. 6 kV의 방전패턴은 정부극성영역에서 각각 두 개의 삼각형이 쌓여져 있는 형태를 나타내었으며, 인가전압이 10 kV에서는 발생위상영역이 넓어지고, 방전전하량이 증가하여, 삼각형의 밑변이 넓어지고, 위쪽에 형성된 삼각형이 위로 올라가는 형태를 나타내었다. 또한 정부극성의 발생위상이 대칭패턴을 나타내므로 유전체 경계면의 방전 패턴이라고 말할 수 있다 [1,3].

2) 보이드시료

보이드 특성을 알아보기 위해 XLPE 판상시료의 중심에 인공보이드(지름 2 mm)를 삽입한 후 보이드 삽입시료를 상부층으로, 보이드가 없는 층을 하부층으로 적층하여 인가전압에 따른 부분방전을 측정하였다.

그림 5는 측정된 부분방전의 $\phi-q-n$ 분포를 나타내고 있으며, 그림 (a)는 전압 5kV 인가시 $\phi-q-n$ 분포로 정극성 영역에서는 $0^\circ\sim 80^\circ$ 위상에서 방전이 발생하였다. 정극성 영역에서는 5° 와 50° 위상에서 방전이 집중적으로 나타났으며, 방전발생빈도수는 5° 에서 140회, 50° 에서 212회 발생하였다. 또한 전하량이 200 pC 이상인 방전도 발생하였으나, 그 빈도수는 1회에 그쳤으며, 대부분의 방전은 25 pC인 방전이였다. 부극성 영역에서는 $180^\circ\sim 300^\circ$ 부근에서 방전이 나타났으며, 최대방전전하량은 정극성영역과 비슷한 192 pC이었다. 주로 방전이 발생하는 위상도 190° 와 220° 에서 나타났으며, 최대방전빈도수는 25 pC의 방전이 231회 발생하였다. 그림 (b)는 전압을 7 kV로 승압하였을 때의 $\phi-q-n$ 분포로서, 정극성 영역에서는 방전이 $0^\circ\sim 130^\circ$ 로 방전발생영역이 증가하였으며, 방전전하량도 500 pC 이상인 큰 방전도 발생함을 확인할 수 있었다. 그러나 대부분은 전하량이 25~50 pC인 방전이였다.

방전이 주로 발생하는 위상의 5 kV와 동일하게 정·부극성 영역에서 각각 2 지점에서 발생함을 확인할 수 있었다. 또한 보이드시료의 방전은 위상이 변화는 위치 (0° 와 180°)에서 방전이 개시되었으며, 무보이드 시료 보다 방전발생위상은 정극성 영역에서는 $5^\circ\sim 130^\circ$ 에서 $0^\circ\sim 80^\circ$ 로 줄었지만, 방전빈도수는 2배 이상 발생함을 확인할 수 있었다. 또한, 방전패턴도 무보이드 시료에서는 삼각형모양이 위아래로 놓인 형상을 나타내었지만 보이드 시료에서는 두 개의 삼각형이 좌우로 겹쳐 있는 형상을 나타내고 있음을 확인하였다. 또한 XLPE 무보이드 시료에서는 6 kV 전압을 인가했을 때 방전발생빈도수가 정극성 영역에서는

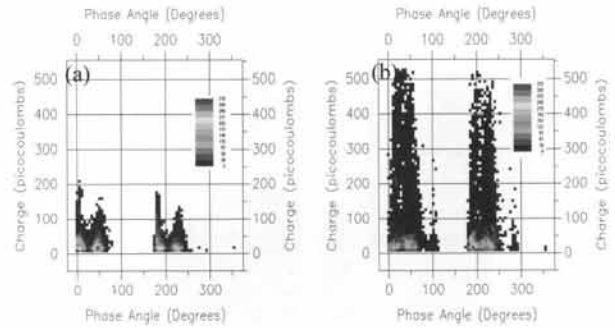


Fig. 5. $\phi-q-n$ distribution of XLPE (air void). (a) 5 kV and (b) 7 kV.

1,936회, 부극성 영역에서는 2,174회 발생하였으며, 보이드 시료에서는 정극성 영역에서 5,860회로 무보이드 시료 보다 3배 증가하였으며, 부극성 영역에서는 12,511회로 무보이드 시료 보다 6.5배 증가하였다.

이것은 보이드로 인해 전자의 이동이 용이해지기 때문에 방전발생빈도수가 급증한다고 생각된다. 또한 보이드 방전패턴도 정(+)의 반주기와 음(-)의 반주기에서 대칭패턴을 형성하므로 유전체 경계면의 방전 패턴이라고 할 수 있다 [1,3].

3.2 K-means 해석

1) 무보이드 시료

6 kV 전압을 인가한 후 검출된 부분방전 신호를 K-means을 이용하여 군집화를 시켜보았다.

Table 1. $\phi-q$ cluster distribution of XLPE (6 kV).

Angle [deg]	Discharge [pC]	Object	Variance	Max Distance
44.92	32.58	289	4.13	6.33
46.38	78.29	263	4.43	6.80
46.69	143.38	121	4.83	8.22
91.20	32.26	124	4.24	6.60
91.38	116.58	105	4.94	7.89
209.45	33.84	212	3.82	5.82
222.42	77.30	246	4.24	7.77
227.04	127.98	134	4.71	8.97
243.62	34.50	193	3.72	5.60
281.30	30.31	80	3.61	7.85

군집화 결과 정극성 영역에서는 45° 에서 가장 많은 객체를 포함하고 있으며, 이 군집의 객체 간 편차도

Table 2. $\phi-q$ cluster distribution of XLPE (10 kV).

Angle [deg]	Discharge [pC]	Object	Variance	Max Distance
31.02	43.71	681	4.67	6.35
37.42	116.12	510	5.45	9.81
48.43	351.53	257	6.17	13.17
49.38	229.96	322	6.06	8.86
85.95	45.42	365	5.35	9.64
217.41	40.07	816	4.91	7.15
219.78	204.95	355	5.72	9.98
222.39	104.11	564	5.44	9.00
225.20	325.47	230	6.27	12.06
294.11	46.04	187	5.83	9.84

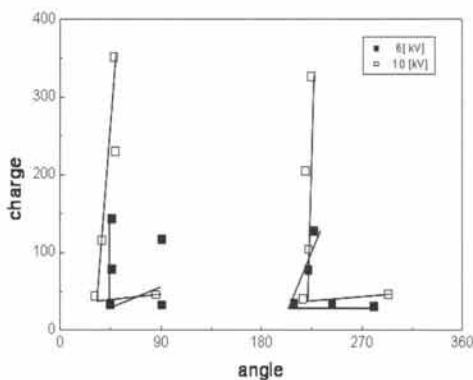


Fig. 6. Centroid distribution of $\phi-q$ cluster (no void, XLPE).

4.13으로 정극성 영역에서 가장 작은 값을 나타내고 있다. 부극성 영역에서는 222° 위상에서 가장 많은 객체인 246개의 객체를 포함하고 있으며, 객체 간 편차는 4.24를 나타내고 있다. 또한, 정극성 영역에서는 45°부근에서 형성된 군집과 부극성 영역에서는 215° 부근에서 많은 객체를 포함하였으며, 이는 방전분포가 정부극성의 앞부분에 방전이 집중되어져 있음을 의미한다.

표 2는 무보이드 XLPE시료에 전압을 10 kV로 승압시킬 때 클러스터 분포를 나타낸 것으로 정극성 영역에서 32°에서 가장 많은 681개의 객체를 포함하고 있으며, 객체 간 편차도 4.67로 가장 작은 값을 나타낸다. 부극성 영역에서는 217°에서 가장 많은 816개의 객체를 포함하고 있으며, 객체 간 편차는 4.91로 가장 낮은 값을 나타내고 있다. 전압의 증가로 최대 객체 포함 군집의 위상이 45°에서 32°로, 222°에서 217°로 앞서서 나타남을 확인할 수 있었다.

그림 6은 무보이드 XLPE시료에서 $\phi-q$ 클러스터에 대한 centroid의 분포를 나타낸 것이다.

2) 보이드시료

표 3은 XLPE 보이드시료에 5 kV를 인가할 때 발생하는 $\phi-q$ 클러스터의 분포를 나타낸 것으로 centroid 점은 49°~285° 위상에서 형성되었으며, 정극성 영역에서는 66°에서, 부극성 영역에서는 222°에서 가장 많은 객체인 각각 774과 613개의 객체를 포함하였다. 객체 간 편차는 정극성 영역에서는 48.9°에서 724개의 객체를 포함하고 4.92로 최소의 값을 나타내었으며, 부극성 영역에서는 205.61°에서 362개의 객체를 포함하고 4.09의 최소 편차를 나타내었다.

Table 3. $\phi-q$ cluster distribution of XLPE (5 kV).

Angle [deg]	Discharge [pC]	Object	Variance	Max Distance
48.90	45.71	724	4.92	7.71
57.20	245.35	379	5.46	8.45
57.59	366.72	328	5.80	11.89
65.70	134.89	772	5.26	8.61
96.62	63.58	549	5.08	7.37
205.61	39.92	362	4.09	6.16
221.79	99.57	613	4.62	8.70
221.81	160.65	423	4.78	9.89
240.04	41.67	424	4.19	6.19
285.14	41.45	151	4.58	8.88

Table 4. $\phi-q$ cluster distribution of XLPE (6 kV).

Angle [deg]	Discharge [pC]	Object	Variance	Max Distance
34.63	59.86	1,135	5.35	8.00
48.14	279.53	1,251	5.83	9.41
49.88	418.67	929	6.36	10.72
50.49	164.59	1,483	5.81	9.24
88.57	63.09	869	5.66	8.28
210.71	52.76	971	5.02	6.88
216.94	325.30	613	5.93	13.52
218.94	222.79	985	5.21	9.26
222.55	134.66	1,186	5.34	9.25
267.52	51.30	733	5.26	9.94

표 4는 XPLE 보이드시료에 인가전압을 6 kV로 승압하였을 때의 클러스터 분포를 나타낸 것으로 정극성 영역에서 48°에서 1,251개의 객체로 가장 많이 포함하고 있으며, 부극성 영역에서는 223°에서 1,186의 객체를 포함하고 있다. 편차는 정극성 영역에서는 34.63°에서 1,135개의 객체를 포함하며 최소 편차인 5.35을 나타내었으며, 부극성 영역에서는 210.71°에서 971개의 객체를 포함하며 최소편차인 5.03을 나타내었다. 또한, 전압이 6 kV로 승압하면서 군집의 centroid 분포가 5 kV보다 앞선 위상에서 나타났으며, 객체 간 편차가 증가함을 확인할 수 있었다.

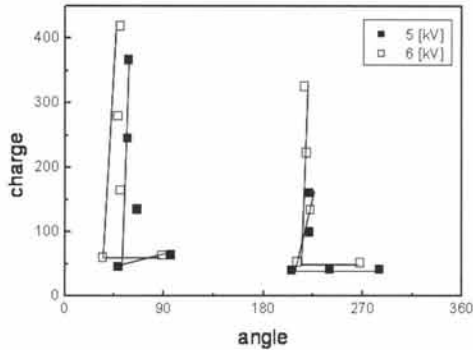


Fig. 7. Centroid distribution of $\phi-q$ cluster (air void, XLPE).

그림 7은 XLPE 보이드시료의 centroid 분포를 나타낸 것으로 정·부극성 영역에서 전압의 증가로 centroid의 전하량 분포가 증가하였으며, 무보이드 시료 보다 정극성영역에서 전하량이 높은 centroid가 형성되었다. 이는 보이드로 인해 전자주입이 용이하게 되어 부극성에서 주입되는 전하이 이동이 활발해지기 때문이라고 사료된다.

4. 결론

K-means를 이용한 열화 형태의 변화에 대해 조사한 결과 보이드 유무에 관계없이 부분방전 패턴은 유전체 경계면에서 발생하는 대칭적 패턴이었으며, 인가전압 6 kV에서 보이드 시료는 원시료보다 방전전류 및 전체 방전전하량은 6배 증가함을 확인하였다.

K-means 해석결과 전압의 증가로 centroid 전하량

분포는 넓어지고, 위상의 분포는 감소하는 것을 확인하였으며, 모두 L자 분포를 나타냄을 확인할 수 있었다.

감사의 글

'이 연구는 2013년도 극동대학교 교내연구비 지원에 의하여 수행된 것임 (FEU2013R05).'

REFERENCES

- [1] T. Y. Kim and J. W. Hong, *KIEE International Transactions on Electrophysics and Applications*, 5-C, 155 (2005).
- [2] E. Kuffel and W. S. Zaengl, *Pergamon Press*, 1 (1970).
- [3] G. Wu, X. Jiang, H. Xie, and D. H. Park, *Proc. of The 6th ICPADM*, 558 (2000).
- [4] T. Shimakage, K. Wu, T. Okamoto, and Y. Suzuoki, *IEEJ Trans. FM.*, 124, 277 (2004).
- [5] K. Uchida, T. Hirata, and H. Takehana, *T. IEE Japan*, 115-B, 1185 (1995).
- [6] J. B. MacQueen, *Proc. of Mathematical Statistics and Probability* (University of California Press, 1967). p. 281.
- [7] P. Drineas, A. Frieze, R. Kannan, S. Vempala, and V. Vinay, *Machine Learning*, 56, 9 (2004).
- [8] M. Ester, H.-P. Kriegel, J. Sander, and X. Xu, *Proc. of KDD*, 226 (1996).
- [9] M. Ankerst, M. M. Breunig, H. P. Kriegel, and J. Sander, *Proc. of ACM SIGMOD*, 28, 49 (1999).
- [10] F. Hoppner, F. Klawonn, and R. Kruse, *Thomas Runkler (John Wiley & Sons Ltd, 1999)*. p. 1-59.