

분포통계를 이용한 XLPE의 부분방전 패턴해석

김탁용, 홍진웅
광운대학교 전기공학과

Analysis of The Partial Discharge Pattern in XLPE using Statistical Distribution

Tag-Yong Kim and Jin-Woong Hong
Dept. of Electrical Engineering, Kwangwoon Univ.

Abstract : 최근 전기에너지의 사용비율은 해가 거듭될수록 증가되고 있으며, 경량화·소형화로 인한 전력기기의 스트레스가 증가되었다. 또한 고압송전으로 인해 전기적 사고는 대형사고를 유발하므로 전력기기의 수명예측은 매우 중요한 과제이다. 이에 본 논문에서는 XLPE 절연체의 보이드 유무에 따른 부분방전 패턴을 K-means 분포통계항수를 이용하여 부분방전 패턴의 그룹화를 시도하였다. 또한 전하량과 방전빈도수의 분포를 비교하기 위해 위상-전하량 및 위상-전하량-빈도수에 의한 그룹의 centroid 이동 변화에 대하여 조사하였다. 그 결과 보이드가 존재하는 경우 전하량의 높은 점에서 중심점을 형성하였고, 방전발생위상의 차이는 크지 않았다. 또한 위상-전하량의 클러스터보다 위상-전하량-빈도수의 클러스터에서 객체간 편차가 더 커짐을 발견하였다.

Key Words : Partial Discharge Pattern, XLPE, Statistical Distribution, K-means, Centroid, Cluster, Object

1. 서 론

21세기에는 사람들의 생활이 한층 더 다양화 고도화되어, 전기에너지의 사용비율은 해가 거듭될수록 증가되고 있다. 우리나라의 경우 2005년 최대 수요가 5,294 [만 kW]에서 2017년에는 6,874 [만kW]로 연간 4~5% 이상 증가될 전망이다. 그런데 현재 우리나라의 전력은 도심으로부터 멀리 떨어진 곳에서 발전하여 장거리 송전시켜 수요지에서 사용되는 형태로 되어지고 있다. 전기에너지의 공급원인 발전소는 환경문제나 입지제약을 고려하여 해안가 및 산악지대에 위치하고 있으므로 발전되어진 전력을 효율적으로 전송하기 위해서는 고전압으로 송전하는 것이 필요하다. 고압송전은 전력기기의 스트레스를 증가시켰으며, 사고 시 대형 사고를 유발하게 되었다^{[1][2]}.

국외에서 관제탑의 정전사고로 비행기 이착륙이 불가능하고, 은행업무의 마비되는 등의 많은 전기사고사태가 발생하고 있다. 이러한 전력사고는 사용자의 부주의가 원인인 경우도 있지만, 전력설비의 노후화 및 과부하로 인한 전력기기의 절연성 약화로 인한 사고도 다수 존재하고 있다. 그러므로 전력기기의 신뢰성은 안정된 전력공급과 불가분의 관계를 유지하고 있다. 또한 도심지의 전력수요 집중에 따른 사고위험성을 억제하기 위한 고성능의 절연재료의 요구가 증대되고 있다^{[1][3]}. 이에 우수한 절연성능과 반영구적인 절연재료의 개발요구에 발맞춰 고분자 절

연재료의 사용이 급증하고 있다. 고분자 절연재료는 절연 성능 뿐만 아니라 성형성, 경량성 및 내환경성이 매우 우수하며, 다른 물질과의 결합력이 매우 우수하다는 장점을 가지고 있다^[4].

현재 우리나라에서도 최근 초고압용 전력케이블의 절연재료로 가교폴리에틸렌(cross-linked polyethylene:XLPE), 풀드 변압기의 절연재료로 에폭시, 애자로서 실리콘고무 및 EPDM과 같은 고분자 절연재료의 사용이 급증하고 있다. 그러나 모든 물질은 열화를 나타내므로, 전기설비에서 필요한 기능을 유지하면서 장시간의 운전에 지장이 없는 것을 검증하기 것은 매우 중요한 과제이다. 산업체에서는 이를 위해 전기설비기기의 절연내력이나 절연특성에 관한 초기시험을 행하고 있다. 또한 이들 내용, 방법은 규격에 의해서 정해져 있다. 초기시험에서 성능 검사된 전기설비는 장시간 운전에 의해 절연특성의 열화를 발생하며 이러한 현상이 통계적으로 불규칙성이 수반하기 때문에 파괴강도에 관한 데이터의 통계처리가 필요하며, 외이를 분포 등의 확률 분포를 이용하여 이것에 의한 고장확률이나 수명, 여수명 등을 구하고 신뢰도에 관한 해석을 실시할 수 있다^[5].

이에 본 논문에서는 절연기기의 절연성 진단 및 전문가 시스템개발을 위한 기초자료 지원을 위해 부분방전의 패턴을 K-means 알고리즘을 이용하여 $\phi-q$ 및 $\phi-q-n$ 분포의 군집패턴을 해석하였다. 또 방전전하량

및 방전빈도수의 분포에 대한 군집패턴의 조사결과를 소개한다.

2. 실험

2.1 시료

시료는 전기적 특성이 우수한 초고압 절연케이블 절연층 XLPE를 두께800[μm] 크기 100×100 [mm] 로 절단한 시편 2장 전극사이에 삽입하였다. 전극은 평판 대 평판을 이용하였으며, 연면방전을 억제하기 위하여 전극주변을 에폭시로 몰딩 하였다. 내부보이드는 상부시료에 직경 2[mm] 원통구조로 가공하였으며, 그림 1은 전극의 형상 및 시료의 구조를 나타내고 있다.

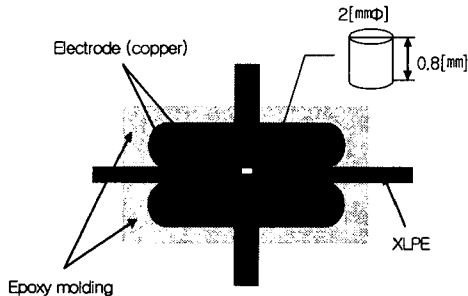


그림 1. 전극형상 및 시료 구조

2.2 실험장치

본 실험은 AVO. co.에서 제작된 부분방전 측정 장치를 사용하였고, 전압은 상용주파수를 step 법으로 인가하고, 방전량의 Calibration은 50[pC](slope=8.333)으로 세팅하였다. 또한, 데이터는 전압인가 후 10 [sec](600 [cycle])동안 발생하는 전하량과 빈도수를 검출하였다. 또한 인가전압에 따른 시료의 연면방전을 억제하기 위하여 전극 및 시료를 실리콘유(1000[cSt]) 속에서 실험하였다. 측정된 데이터의 최대값 및 최소값을 제거한 후, 방전위상-방전전하량(2D) 및 방전위상-방전전하량-방전빈도(3D)의 3개의 파라미터로 구분하여 동일조건에서 측정된 모든 데이터를 위상별로 누적시킨 후 K-means의 cluster 개수는 10개로 규정하여 cluster의 centroid 점의 분포를 조사하였다. 또한 2D와 3D의 centroid의 위상변화를 조사하여 방전전하량과 방전빈도수와의 관계를 조사해 보았다.

그림 2는 실험장치의 구성도를 나타낸 것이다.

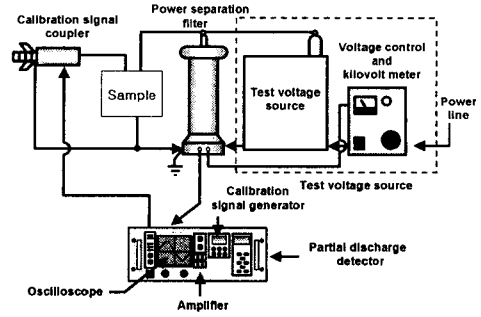


그림 2. 실험장치의 구성도

3. 결과 및 고찰

그림 3은 K-means 통계처리 순서도를 나타낸 것으로, K-means 알고리즘은 현재 군집화를 위한 최상의 알고리즘이라고 말할 정도로 매우 우수한 군집알고리즘이다^[6]. K-means 처리과정은 크게 4단계로 구분되며 다음과 같이 설명할 수 있다.

① Initialization

K 개의 클러스터를 Centroid를 설정

② Clustering

각 object와 centroid와의 거리를 구하여 가장 짧은 거리는 object를 그룹화

③ Centroid update

새로운 cluster centroid를 재계산

④ Iteration

이전의 centroid와 새로운 centroid를 비교하여 벡터 사이의 차이가 없을 때까지 반복

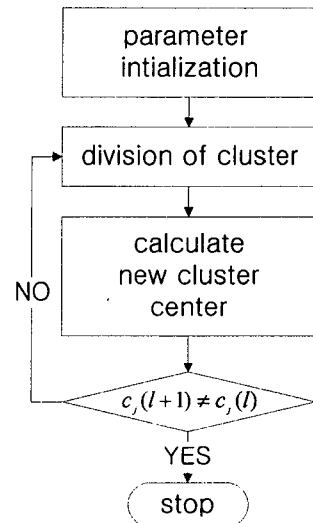


그림 3. K-means 순서도.

본 실험에서는 군집의 개수는 10개로 설정하였으며, 초

기값은 입력데이터 중 서로 위상이 다른 10개의 점을 랜덤하게 설정하여 군집화 시켰다. 또한 데이터는 방전위상과 방전전하량의 분포와 방전위상 - 방전전하량 - 방전위상의 분포로 두 분포의 변화도 조사해 보았다.

3.1 $\phi - q$ 패턴

표 1과 표 2는 무보이드 XLPE 시료에 전압 6[kV]를 인가시 발생하는 부분방전의 $\phi - q$ 분포를 각각의 객체로 설정한 후 객체 간격이 최소로 형성되는 10개의 군집의 중심점과 각 군집에서의 객체수, 변화량 및 객체간 최대 거리를 나타낸 것이다. 표 1에서 정극성영역과 부극성 영역에서 각각 6개와 5개의 군집을 형성하고 있는 것을 확인함으로써 방전분포는 정극성 영역에서의 방전분포가 더 넓게 형성되어져 있음을 확인할 수 있었다.

표 2를 보게 되면 군집 중에서 정극성 영역에서는 cluster[2]와 cluster[3]에서 가장 많은 객체를 포함하고 있으며, 이 중심점은 47°부근으로 33[pC]과 83[pC] 사이의 방전이 많음을 의미하고 있다. 또한 부극성 영역에서는 cluster[6]과 cluster[7]의 객체수가 많았으며, 그 중심점은 215°와 221°의 위상부근에서 방전이 주로 발생함을 확인할 수 있었다. 또한 전체적인 클러스터 위상을 보면 정극성 영역에서는 90°이전에서 방전이 주로 발생하였으며, 부극성 영역에서는 230°이전에서 방전이 주로 나타남을 확인할 수 있었다.

표 1. 무보이드 시료의 $\phi - q$ 분포 (6 [kV])

Classification	ϕ	q
Cluster[0]	31.00216	38.59999
Cluster[1]	47.48032	142.2515
Cluster[2]	47.99479	83.44574
Cluster[3]	62.31164	33.90275
Cluster[4]	93.89423	118.4019
Cluster[5]	103.05	34.55417
Cluster[6]	215.8567	32.52055
Cluster[7]	221.1108	75.61547
Cluster[8]	227.3876	126.9733
Cluster[9]	261.8534	33.1678

표 2. 무보이드 시료의 클러스터 값 (6 [kV])

Classification	Object	Variance	Max Distance
Cluster[0]	174	3.953745	5.858171
Cluster[1]	127	4.830552	8.297594
Cluster[2]	216	4.269955	6.661639
Cluster[3]	219	3.803754	5.168613
Cluster[4]	91	4.869631	7.71824
Cluster[5]	75	3.831131	6.569708
Cluster[6]	267	3.998295	5.909331
Cluster[7]	256	4.270712	6.629221
Cluster[8]	139	4.718616	9.023084
Cluster[9]	203	4.39669	7.976344

그림 4는 XLPE 무보이드 시료에서 인가전압에 따른 cluster의 중심점 변화를 나타낸 것이다. 인가전압이 증가하면서 중심점의 분포가 넓게 분포하다가 점차적으로 끝이 높은 삼각형 구조로 형성됨을 확인할 수 있었다. 이는 인가전압을 상승시켜도 낮은 전하량의 방전은 고정적으로 유지하면서 전자의 주입이 상승하여 점차 높은 전하량을 가지는 방전이 나타나기 때문이라고 생각되어진다.

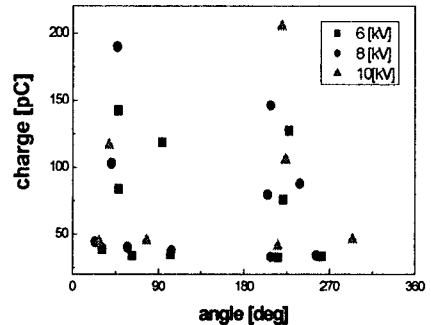


그림 4. 무보이드 시료의 centroid 분포

표 3과 표 4는 공기보이드 XLPE 시료에 전압 6[kV]를 인가시 발생하는 부분방전의 $\phi - q$ 분포를 10개의 군집으로 형성화 한 것이다. 표 3에서 정극성영역과 부극성 영역에서 각각 5개의 군집을 형성하고 있는 것을 확인함으로써 무보이드 시료에 비해 부극성 영역에서의 방전분포가 증가함을 예측할 수 있었다.

표 3. 공기보이드 시료의 $\phi - q$ 분포 (6 [kV])

Classification	ϕ	q
Cluster[0]	34.53029	60.07954
Cluster[1]	48.1295	279.5252
Cluster[2]	49.86814	418.6592
Cluster[3]	50.57556	164.6937
Cluster[4]	88.53064	63.09682
Cluster[5]	210.8601	53.14942
Cluster[6]	216.8791	325.2997
Cluster[7]	218.8668	222.7914
Cluster[8]	222.4027	135.0215
Cluster[9]	267.3832	51.29399

표 4. 공기보이드 시료의 클러스터 값 (6 [kV])

Classification	Object	Variance	Max Distance
Cluster[0]	1139	5.356435	7.971079
Cluster[1]	1251	5.826738	9.419761
Cluster[2]	929	6.364277	10.73684
Cluster[3]	1479	5.801017	9.231713
Cluster[4]	869	5.655406	8.283062
Cluster[5]	981	5.044526	6.912654
Cluster[6]	613	5.937437	13.528871
Cluster[7]	985	5.20888	9.259073
Cluster[8]	1176	5.325302	9.253358
Cluster[9]	733	5.264151	9.943771

표 4는 각 클러스터의 값을 표현한 것으로 모든 클러스터의 객체간 변화량은 5의 값을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 또한 정극성 영역에서 cluster[0], cluster[2]과 cluster[3]에서 많은 객체를 포함하고 있으며, 부극성 영역에서는 cluster[8]에서 가장 많은 객체를 포함하고 있다. 객체수가 많은 군집의 중심점을 조사하면, 정극성 영역에서는 50°이하 위상영역에서 방전이 물려져 있음을 예측할 수 있다. 또한 무보이드 시료에 비해 34°부근의 방전이 증가함을 확인할 수 있다. 이를 통해 인가전압을 승압시키면 방전발생위상이 증가함을 확인할 수 있다.

그림 5는 XLPE 공기보이드 시료에서의 중심점 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 정극성 영역에서 전압변화에 따른 중심점 분포가 비슷하게 형성되었지만, 부극성 영역에서 중심점 분포는 6 [kV]로 승압함에 따라 중심점의 개수가 증가하였으며, 또한 전하량도 큰 점에서 형성되었다. 이를 통해 전압상승으로 공기보이드 내의 전자이동이 증가하여 전자의 주입이 주로 나타나는 부극성에서의 부분 방전이 증가되기 때문이라고 생각되어진다.

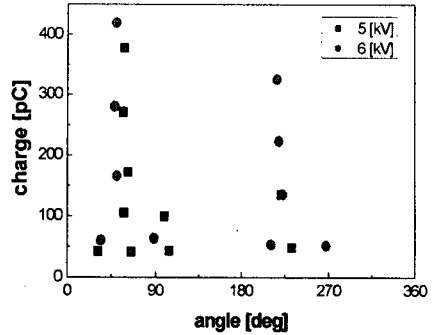


그림 5. 공기보이드 시료에서 centroid의 분포

3.2 $\phi - q - n$ 패턴

표 5와 표 6은 무보이드 XLPE 시료에 전압을 6[kV]인 가할 때, 발생하는 부분방전의 $\phi - q - n$ 방전 패턴에 대한 군집 해석결과를 나타낸 것이다. 표 5에서 cluster[0], cluster[1] 및 cluster[7]에서 많은 객체를 포함하고 있었다. 그리고 $\phi - q$ 패턴에 대한 K-means 해석보다 $\phi - q - n$ 패턴에 대한 해석 시 객체간의 변화폭이 더 커졌으나, 포함된 객체의 수는 큰 차이가 없음을 확인할 수 있었다. 또한 $\phi - q$ 패턴에서는 부극성 영역 215° 위상에서 최대 객체수를 포함한 클러스터가 발생된 반면, $\phi - q - n$ 패턴에서는 부극성 영역은 비슷한 위치인 221°에서 많은 객체를 포함하고 있으나, 정극성 영역에서는 $\phi - q$ 패턴해석에서는 나타나지 않던 42°와 45° 위상에서 많은 객체를 포함하고 있다. 이 지점에서의 방전전하량은 각각 33 [pC]과 78 [pC]이며, 부극성에서는 76 [pC]의 전하량을 가지는 방전이 많이 존재한다.

표 5. 무보이드 시료의 클러스터 분포 (6 [kV])

Classification	ϕ	q	n
Cluster[0]	42.08584	32.93041	35.90763
Cluster[1]	45.41748	78.9682	10.15625
Cluster[2]	64.31707	135.4417	4.043902
Cluster[3]	85.85526	38.77038	4.121053
Cluster[4]	200.9659	27.65041	148.5909
Cluster[5]	213.6838	33.62611	15.58235
Cluster[6]	221.6016	32.55078	60.15625
Cluster[7]	221.9522	76.09257	9.59761
Cluster[8]	227.3234	127.1688	3.666667
Cluster[9]	263.1908	33.55129	5.294737

표 6. 무보이드 시료의 클러스터 값 (6 [kV])

Classification	Object	Variance	Max Distance
Cluster[0]	249	5.487007	11.063059
Cluster[1]	256	4.772542	7.513457
Cluster[2]	205	5.384591	9.023945
Cluster[3]	190	4.853422	7.872072
Cluster[4]	22	6.790464	12.556319
Cluster[5]	170	4.4787	6.280563
Cluster[6]	96	4.783533	6.733376
Cluster[7]	251	4.499247	6.624662
Cluster[8]	138	4.826052	9.014825
Cluster[9]	190	4.525409	7.930926

	Object	Variance	Max Distance
Cluster[0]	1120	6.27053	14.767019
Cluster[1]	1251	5.887389	9.424736
Cluster[2]	1554	5.920948	9.360267
Cluster[3]	931	6.394975	13.834378
Cluster[4]	813	5.689425	8.127376
Cluster[5]	607	6.579195	18.237669
Cluster[6]	762	6.069694	13.07241
Cluster[7]	1296	5.609126	9.293904
Cluster[8]	1151	5.447405	9.22316
Cluster[9]	670	5.389453	9.894459

표 7과 표 8은 공기보이드 XLPE 시료에 전압을 6[kV] 인가할 때, 발생하는 부분방전의 $\phi-q-n$ 방전 패턴에 대한 군집 해석결과를 나타낸 것이다. 표 7에서 보면 군집의 수는 정극성 영역과 부극성 영역에서의 군집개수가 동일하게 형성되어져 있음을 확인할 수 있었다.

표 7. 공기보이드 시료의 클러스터 분포 (6 [kV])

Classification	ϕ	q	n
Cluster[0]	36.26618	55.31029	33.22143
Cluster[1]	48.1295	279.5252	5.079936
Cluster[2]	49.79609	161.9948	5.406049
Cluster[3]	50.21415	418.816	3.245972
Cluster[4]	89.86854	65.38279	4.334563
Cluster[5]	214.6211	35.45987	68.9374
Cluster[6]	217.0571	312.4438	1.816273
Cluster[7]	219.1667	107.7825	9.874228
Cluster[8]	219.5998	202.0481	4.219809
Cluster[9]	268.6987	51.5651	8.531343

표 8에서 10개의 클러스터 중 5개의 클러스터에서 객체수가 1,000개가 넘었으며, cluster[0]과 cluster[2]만 약 600개를 포함하고 있고 나머지는 750개 이상의 많은 객체를 포함하고 있었다. 객체간 변화폭도 모두 7이하의 값을 가지고 있으며, cluster[0]에서 5.389인 최소 변화폭을 나타내고 있었다.

$\phi-q$ 분포와 중심점 위상의 차이는 거의 없이 동일한 위치에서 형성되었으나 객체수는 정극성 영역에서 cluster[2] (49°)와 cluster[3] (50°)의 값이 서로 바뀌어서 형성되었으며, 부극성 영역에서는 cluster[7] (219°)에서 많은 객체수를 포함하였다.

표 8. 공기보이드 시료의 클러스터 값 (6 [kV])

4. 결론

분포통계를 이용한 XLPE의 부분방전 패턴해석 결과 무보이드 시료의 $\phi-q$ 분포에서는 전체적인 클러스터 위상이 정극성 영역에서는 90°이전에서 방전이 주로 발생하였으며, 부극성 영역에서는 230°이전에서 방전이 주로 나타났다. 공기보이드 시료는 인가전압 변화로 중심점 분포가 유사한 위상에서 형성되었지만, 부극성 영역에서 중심점의 개수가 증가하였으며, 또한 전하량도 큰 점에서 형성을 확인하였다.

무보이드 시료의 $\phi-q-n$ 분포에서는 $\phi-q$ 분포보다 객체간의 변화폭이 더 컸으며 포함된 객체의 수는 큰 차이가 없음을 확인할 수 있었다. 정극성 영역에서는 $\phi-q$ 패턴해석에서는 나타나지 않던 42°와 45° 위상에서 많은 객체를 포함하고 있다. 공기보이드 시료는 $\phi-q-n$ 분포의 K-means 해석결과 중심점 위상은 $\phi-q$ 분포와 거의 동일하게 형성되었으며, 정극성 영역인 49°에서 929개에서 1,554개로 객체수는 증가하였으며, 50°위상에서 1,479개에서 931개로 감소하였다. 부극성 영역에서는 219°에서 985개에서 1,296개로 객체수의 증가를 확인하였다.

참고 문헌

- [1] L.A. Dissado, J.C. Fothergill, Electrical Degradation and breakdown in polymers: Peter Peregrinus Ltd. pp.117-198, 1998.
- [2] Kuniharu IMAI, "Statistical Analysis of Tree Propagation from a Simulated Tree Channel with Weibull Distribution and Influence of Temperature on it" T.IEE Japan, Vol.120-A, No.5, pp.645-650, 2000.
- [3] Kuniharu IMAI, "Relationship between Diameter of Simulated Tree Channel and Tree Propagation from Its Tip", J. Inst. Electrostate. Japan, Vol. 26, No. 2, pp.84-90, 2002.

- [4] T.J. Gallaghe. A.J. Pearmain, "HIGH VOLTAGE Measurement, Testing and Design", JOHN WILEY & SONS Ltd., ppl.66-72, 1983.
- [5] 北川賢司, "信頼性工学入門", コロナ社, pp.1-14, 2004.
- [6] Sing, J.K.; Basu, D.K.; Nasipuri, M.; Kundu, M. "Improved k-means algorithm in the design of RBF neural networks", TENCON 2003. Conference on Convergent Technologies for Asia-Pacific Region, Volume 2, pp.841-845, 2003