

방전전하량 해석법으로 XLPE 보이드 결함 진단

김탁용 · 김균식 · 홍진웅

광운대학교 전기공학과

1. 서 론

최근 전력수요의 증대에 따른 전력케이블이나 전력기기 등의 초고압화·대용량화가 요구되고 또한 변전소의 입지선정등과 같은 다양한 문제로 변성기기는 compact화로 급속하게 진행되고 있다. 따라서 전기절연체에 가혹한 전기적stress로, 전기절연열화 및 절연파괴에 의한 사고위험성이 점점 증가되고 있다¹⁾. 또한 고도정보화 사회로 인해 이전에는 경시되었던 순간정전이 무시할 수 없는 중요한 문제로 대두되고 있다. 이와 같은 사회적 요구로 인해 전기절연열화 및 절연파괴에 대한 관심이 높아지고 있으며, 이러한 문제점으로 대두되는 많은 경제적 손실을 억제하기 위하여 전력기기 등의 수명예측을 사전에 진단함으로써 안정된 전력공급이 요구되어지고 있는 실정이다^{2,3)}.

전기절연재료의 절연열화 및 절연파괴현상으로는 수많은 요인에 의해서 발생되면, 그 발생형태도 매우 다양한 형태로 나타나고 있다. 그 중에서 인가된 고전압으로 절연체 내부에서 누설전류가 발생 (부분방전)하며, 발생한 부분방전에 의해 트리라고 불리는 미세한 탄화로가 형성되는 현상을 트리잉 현상이라고 하며, 이 현상은 절연체 수명을 좌우하는 매우 중요한 성분이기도 하다⁴⁾. 이러한 누설전류는 절연체 내부에 결함이 존재하면 그 진행속도가 급격하게 증가하여 절연재료의 수명을 단축시켜 예기치 못하는 사고유발이 발생할 수 있다.

현재 내부결함에 의한 진단검사를 위해 절연체 내부에 인공 보이드를 삽입하여 절연파괴 및 방전전하량을 검출하여 뉴럴 네트워크를 이용한 수명예측을 시도하고 있다. 그러나 뉴럴 네트워크의 경우 비슷한 경향에 대한 판정이 매우 모호한 단점으로 신뢰성 확보에 매우 어려운 점이 있다. 또한 부분방전은 동일한 실험 조건에서도 매우 불규칙적으로 발생하므로 진단에 상당히 곤란한 점이 많이 있다. 그로인해 불규칙한 통계처리로 이용되는 확률분포로 와이블 분포, 정규분포, 지수분포, 감마분포 등 여러가지가 분포함수를 이용한 수명평가방법으로 이용되고 있으며, 그 중 고전압 기기의 열화통계 및 고장 진단을 위해서는 와이블 분포가 많이 사용되고 있다⁵⁾.

본 논문에서는 Crosslink polyethylene (XLPE) 절연층 내부에 인공 보이드가 존재 시 인가전압에 따른 방전전하량을 와이블 함수로 해석하여 내부 보이드 유무에 따른 패턴변화 조사 결과를 소개한다.

2. 시료 및 실험방법

시료는 전기적 특성이 우수한 초고압절연케이블의 XLPE층을 0.8[mm]로 슬라이싱한 후 100×100 [mm] 크기로 절단한 시편을 전극사이에 2층으로 삽입하였다. 전극은 평판 대 평판 전극을 이용하였으며, 연면방전을 억제하기 위해 전극주변은 에폭시로 몰딩하였다. 내부보이드는 직경 2[mmΦ]인 원통구조로 가공하였으며, 상부에 위치하도록 하였다. 그림 1은 전극의 형상 및 시편의 구조를 나타내고 있다.

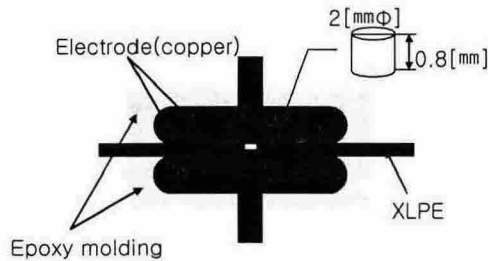


Fig. 1. Shape of electrode and void

전하량은 AVO. co.에서 제작된 부분방전 측정 장치를 사용하였고, 인가전압은 교류 전압(60[Hz])을 초기방전발생전압부터 step법으로 0.5[kV] 승압시켰다. 방전검출감도는 Calibration을 50[pC](slope=8.333)으로 세팅하였으므로 방전전량이 533.3 [pC]이상인 방전이 발생하면 방전전하량을 검출할 수 없으므로 실험을 중지하였다. 또한, 데이터는 전압인가 후 10 [sec] (600 [cycle])동안 발생하는 전하량을 누적한 값으로 하였다. 동일 실험을 10회 이상 실시하였으며, 그 중 최대 및 최소값을 제외한 나머지 데이터를 이용하여 형상파라미터를 구했다. 표 1은 인가전압 및 시편 종류를 나타내고 있다.

Table 1. Type of specimens

specimen		voltage [kV]	type
N series	N1	6	N series : XLPE layer-XLPE layer
	N2	8	
	N3	10	
A series	A1	4	A series : air layer-XLPE layer
	A2	5	
	A3	6	
	A4	7	

3. 결과 및 고찰

3.1 $\phi-q-n$ 분포

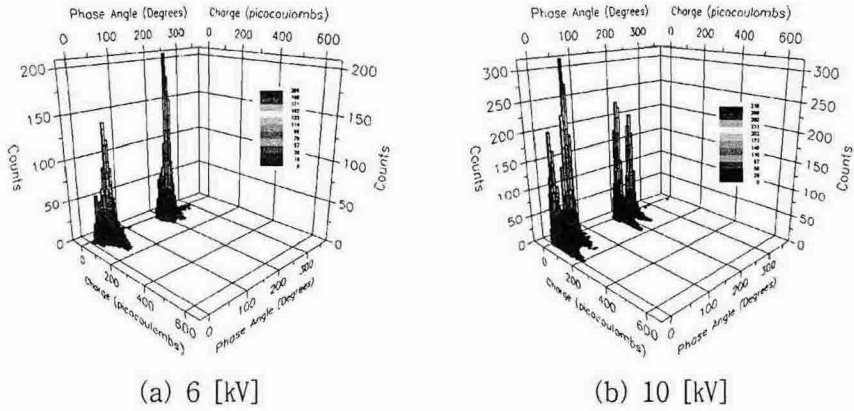


Fig. 2. Distribution of $\phi-q-n$ at no void according to voltage variation

그림 2는 보이드가 없는 시료의 $\phi-q-n$ 분포를 나타낸 것이다. (a)는 초기 PD가 발생하는 전압으로 방전은 정극성은 0~70도 영역에서 방전이 발생하고, 50도 영역에서 가장 많은 방전이 발생하였다. 또한 동일영역에서 150 [pC]의 최대 방전전하량도 나타났다. 부극성의 경우 180~250도 영역에서 주로 방전이 발생하였으며, 약 225도 영역에서 가장 많은 209회의 방전이 발생하였다. 전압을 10 [kV]로 승압하면, 방전은 정극성에서 0~85도 영역으로 증가하였으며, 위상이 5도와 50도에서 210 및 180의 방전이 발생함을 확인하였다. 부극성에서는 180~260도 영역에서 방전이 주로 발생하였으나, 190도와 225도 영역에서 방전빈도 190 및 150이 발생함을 확인하였다. 전압의 증가로 위상에 따른 방전발생영역이 두 그룹으로 늘어남을 확인할 수 있었다.

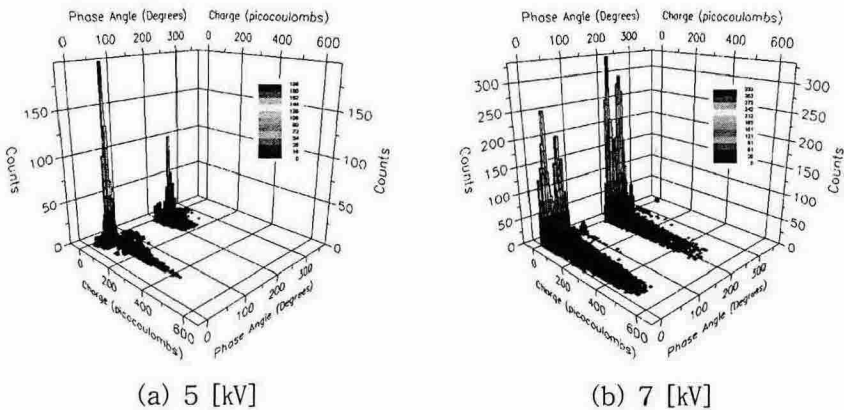


Fig. 3. Distribution of $\phi-q-n$ at air void according to voltage variation

그림 3은 보이드가 있는 시료의 $\phi-q-n$ 분포를 나타낸 것이다. (a)는 5 [kV] 전압을 인가한 경우로 정극성 영역은 5~115도 위상에서, 부극성은 180~300도 위상영역으로 매우 넓은 위상에서 방전이 발생함을 확인하였으며, 방전전하량도 정극성의 경우 400 [pC]이상의 전하량을 나타내었으며, 방전 빈도는 50도 위상에서 최대인 198 방전이 발생하였다. 부극성의 경우 최대방전전하량이 200 [pC], 최대 방전빈도가 200 이하로 보이드 시료에서 초기 방전발생 특성은 정극성에 비해 낮은 값을 나타냄을 알 수 있었다. 그러나 전압의 증가시 정극성의 경우 0~115도 영역으로 방전발생은 거의 비슷한 영역에서 나타났지만, 방전전하량은 500 [pC]이상의 값을 가지는 방전이 다수 발생하였으며, 발생빈도도 위상이 15도에서 약 250, 50도에서 약 180의 방전이 발생함을 확인하였다. 또한 부극성의 경우 180~300도 영역으로 정극성과 동일하게 방전발생영역은 낮은 전압(5 [kV])과 거의 비슷한 영역에서 발생하였지만 방전전하량은 최대 500 [pC]이상의 값을 나타내었다. 또한 발생빈도가 190도 위상에서 333, 225도 영역에서 약 280 방전이 발생함을 확인 있었다. 즉 보이드 시료는 전압의 상승에 따라 방전발생영역의 변화의 거의 없었으나, 방전전하량이 급속히 증가하고, 방전 발생빈도수의 증가를 확인하였다. 또한, 전압의 증가에 따라 방전이 다수 발생하는 영역이 더 늘어남을 확인할 수 있었다. 그러나 이러한 $\phi-q-n$ 분포의 경우 수치값이 매우 다양하게 나타남으로 진단에 적용하기에는 매우 어려운 점이 많이 있었다. 이를 정량적인 수치로 해석하기 위해 방전 발생빈도에 대한 와이블 해석을 통해 정량적인 패턴을 작성해 보았다.

3.2. 와이블 분포

검출된 10개의 데이터를 검토하기 위하여 2-parameter 와이블 함수를 이용하여, 전압변화에 따른 누적파괴확률($F(n)$)은

$$F(n) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{n}{n_s}\right)^m\right] \quad (1)$$

단, n_s : 척도파라미터(누적파괴 확률이 63.2[%]에 해당하는 평균적인 파괴빈도에 대응하는 값)

m : 형상파라미터(누적파괴확률분포의 분포형상을 결정하는 파라미터로서 m 이 커짐에 따라 흐트러짐이 작은 분포를 의미한다.)

이다. 식 (1)을 변형하면

$$\ln \ln \left[\frac{1}{1 - F(n)} \right] = m \ln \left[\frac{n}{n_s} \right] \quad (2)$$

를 얻을 수 있으며, 이를 간단히 표현하면

$$y = m x \quad (3)$$

단, $y = \ln \ln \left[\frac{1}{1 - F(n)} \right]$, $x = \ln \left[\frac{n}{n_s} \right]$

로 나타낼 수 있다. 즉 식 (3)에서 직선의 기울기가 형상파라미터(m)를 나타내고 있다.

Table 2. Average discharge and scale parameter of specimens

parameter		Voltage [kV]	Positive Discharge [pC]	Negative Discharge [pC]	Total Discharge [pC]
average	No	6	92,993	77,091	170,084
	Void	10	223,272	202,900	426,172
	Air	5	205,636	101,587	307,223
	Void	7	949,762	619,778	1569,540
scale parameter	No	6	122,257	94,861	213,941
	Void	10	262,761	238,825	501,065
	Air	5	232,354	118,087	338,432
	Void	7	1032,719	640,079	1667,460

표 2는 전체 시료에 대한 방전전하량을 극성별 및 전체량에 대한 평균값과 척도파라미터(파괴확률 62.3[%])를 나타내고 있다. 표에서 보게 되면 보이드에 상관없이 전압의 증가에 따라 방전전하량이 증가함을 확인하였다. 이것은 전압의 증가에 따른 전기적 stress의 증가에 따라 절연체 내부의 누설전류량이 증가하기 때문이라고 생각되어진다. 또한 초기 방전발생 전압이 보이드가 존재할 경우 초기에 발생함에 반해 무보이드의 경우 방전발생전압이 보이드 시료의 트립전압값에 육박하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 현상은 누설전류 발생 전압의 내부보이드가 존재하는 경우 전계의 집중을 유발하여 전압이 낮아지기 때문이라고 생각되어진다.

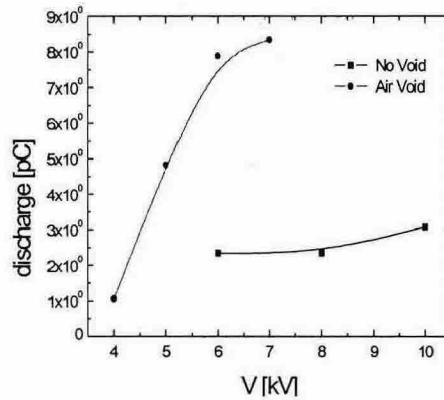


Fig. 4. Shape parameter according to voltage variation

그림 4는 전압변화에 따른 형상파라미터를 나타낸 것으로 무보이드 시료의 경우 전압의 증가에 따라 변화의 폭이 거의 없으며, 그 수치도 2-3의 값을 나타냄을 확인하였다. 일반적으로 와이블 분포에서 형상파라미터 값에 따라 X의 확률밀도함수(probability density function)의 모양이 변하기 때문에 매우 중요한 파라미터로서, $m=2$ 인 경우를 랄리 분포(Ralyleigh distribution)라고 한다. 즉 랄리 분포값을 기준으로 m 이 작아지면 지수분포함수를, m 이 커지면 정규분포함수를 나타낸다. 무보이드시료의 경우 전압의 증가에 따라 2의 값에서 미소한 변화를 나타내므로 방전전하량은 지수분포를 형성하고 있음을 알 수 있다. 그러므로 무보이드 시료의 경우 전압의 증가에 따른 방전전하량 분포는 지수분포함수를 나타내며, 그 변화폭은 거의 없음을 확인하였다. 그러나 보이드 시료의 경우 초기 방전발생전압에서는 그 수치가 매우 낮은 1의 값을 나타내다가 전압의 증가에 따라 급격한 증가로 트립전압에서는 7이상의 값을 나타내고 있음을 확인하였다. 이를 통해 보이드 시료의 경우 방전전하량 분포는 군집형태로 나타남을 증명하는 것이다. 이러한 현상은 보이드 시료의 경우 보이드에 전계의 집중을 통해 방전형태가 일정한 패턴을 유지하고 있음을 의미하기도 한다.

4. 결 론

방전전하량 해석법을 이용한 절연체 XLPE 내부 보이드 결함 진단 실험결과 인가전압의 증가에 따라 $\phi-q-n$ 분포는 주방전발생영역이 두 개의 영역을 형성하였으며, 내부에 보이드가 있는 경우 방전발생전압이 낮아졌으며, 전압변화에 방전전하량의 급속한 변화를 확인할 수 있었다. 또한 형상파라미터의 경우 무보이드 시료의 경우 지수적인 분포를 나타냈으며, 보이드시료의 경우 정규분포를 나타내었다.

그리고 보이드 시료에서는 방전발생 형태가 전압의 증가에 따라 초기에는 지수적 분포를 나타내다가 급속하게 정규분포형태로 변화하는 것을 확인하였다.

참고문헌

1. L.A. Dissado, J.C. Fothergill "Electrical Degradation and breakdown in polymers" Peter Peregrinus Ltd. pp.117-198, 1992.
2. 今井國治 外 3人 "ワイブ分布を用いたトリ-發生特性とそれに及ぼす諸要因 T.IEE Japan, Vol.120-A, No.5, pp.645-650, 2000 .
3. 今井國治, " 模擬トリ- 徑と 模擬トリ- 伸展するトリ- 伸展との關係", 靜電氣學會誌: No. 26, Vol. 2, pp.84-90, 2002.
4. 大澤善次郎, " 高分子の劣化と安定化", 武蔵野クリエイト, pp.89-91, 1992.
5. 北川, " 信賴性工學入門", コロナ社, pp.67-75, 1997.