

전력 케이블에서 발생하는 방전 신호의 분포패턴에 관한 특성 분석

논문
11-11-14

Characteristic Analysis on the Distribution Pattern of Discharge Signals Generated in the Power Cable

소순열*, 홍경진*, 정우성*, 임장섭**, 이 진***, 이준웅****, 김태성*
(Soon-Youl So, Kyung-Jin Hong, Woo-Seong Jung, Jang-Seob Lim, Jin Lee,
Joon-Ung Lee, Tae-Sung Kim)

Abstract

After the 1990's, a computer-aided partial discharge(PD) measurement system was referred in part of aging diagnosis using digital signal processing as the new technology has been studied. The PD patterns and relevant information for pattern recognition are discussed in PD research area, because discharge quantity(q), the number of discharge pulse(n) and the applied voltage phase(φ) was combined with the system information of the aging state.

This paper investigates the discharge phase and quantity, as well as the number of discharge(n) with regard to discharge signals generated in power cable.

Therefore, according to characteristic analysis on the distribution of φ , q and n, it is able to apply in the aging analysis of power cable which visual observation is impossible and distribution change of discharge signals offers much information for risk degree on aging progress of insulation materials.

Key Words(중요 용어) : PD(부분방전), Aging state(열화상태), Aging initiation(열화개시), Breakdown(절연 파괴), Phase(위상), Distribution pattern(분포 패턴)

1. 서 론

전력 케이블의 파괴 초기에 트리 형태의 선행적 파괴현상을 발견함으로써 전기트리의 발생 및 진전에 관한 연구가 활발히 발전되어 왔으며, 전기트리가 형성됨에 따라 발생하는 방전 신호 측정에 관한 연구는 전력용 설비의 절연 상태를 점검하는 중요한 시험으로 자리잡게 되었다.¹⁾²⁾ 또한 인가 전압의

위상에 대한 방전 발생 시간과 방전 전하량의 분포를 기록하는 연구가 발표되었으며, 그로부터 전기트리의 새로운 분석과 해석방법 등이 제안되었다.³⁾ 계측기술의 개발로 전기트리 진전에 대한 화상관측 등의 새로운 연구가 자리잡게 되었고, 방전량의 크기, 극성, 시간적 발생변화 등의 방전 신호를 디지털화하는 방전 측정 연구가 시도되었다.⁴⁾⁵⁾

그러나, 화상관측에 의한 분석에는 화상처리가 가능하도록 시료를 얇게 제조해야하므로 실질적으로 케이블에 적용하기에는 단점을 가지고 있다. 따라서 전기트리에서 형성되는 방전 신호의 다양한 정보를 통하여 실시간 계측, 분석 및 인식하는 방법 등이 제안되고 있다.⁶⁾⁷⁾

본 연구에서는 전력 케이블에서 발생하는 전기트리의 방전 신호에 대한 정보를 방전의 위상, 방전량

* : 전남대학교 전기공학과
(광주 광역시 북구 용봉동 300, Fax:062-530-1749
E-mail : syso@chungkye.mokpo.ac.kr)
** : 목포대학교 해양전자 통신공학부
*** : 목포대학교 전기공학과
**** : 광운대학교 전기공학과
1998년 7월 23일 접수, 1998년 10월 2일 심사완료

크기, 그리고 발생빈도로 프로그램하였고, 이러한 신호를 ϕ -q, q-n의 2D 패턴과 ϕ -q-n의 3D 패턴 정보로 추출하여 열화 개시부터 절연 파괴시까지의 과정을 분석하고 절연체의 위험 영역을 인식하였다.

2. 실험 및 방법

2.1. 시료제작

본 실험의 시료는 한국전력공사에서 사용하고 있는 154[kV]용 전력 케이블이며, 절연과피 진전과정을 관측할 수 있도록 하기 위하여 두께 5[mm]로 절단하여 사용하였다. 시료의 구조는 그림 1과 같다.

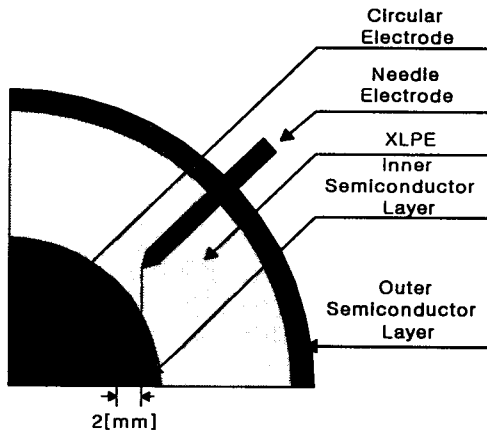


그림 1. 시료의 구조

Fig. 1. The structure of specimen

침전극은 선단 곡률 반경 10 [μ m], 선단각도 30°인 일본 오쿠라 보석정기 주식회사의 제품을 사용하였다. 그림 2는 시료의 제작 과정을 보여주고 있다. 그림 1과 같이 절단된 시료에 침전극을 삽입하기 위해서는 시료를 전기로에서 100[°C]까지 상승시키고 40분간 유지시킨다. 이는 절연물질인 가교 폴리에틸렌을 용융점에 도달하도록 하여 용융이 되면 침전극을 삽입하기 용이하기 때문이다. 원형 전극을 제작하여 시료의 내부 반도체층에 부착하였고, 전극간의 거리가 2±0.2[mm]가 되도록 침전극을 삽입하였다. 이후, 0[°C] 얼음물에서 급냉처리를 하고 수분에 의한 영향을 감소시키기 위해 진공건조기에서 수분을 제거하였다.

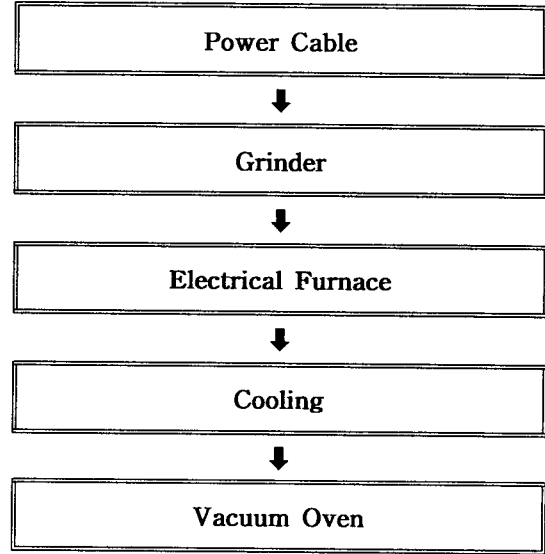


그림 2. 시료 제작과정의 다이어그램

Fig. 2. The diagram of manufacturing specimen

2.2. 실험방법

500 [V/s]의 전압상승속도로 시료의 침-원형 전극에 전압을 인가하여 목적전압까지 상승시킨 후 방전이 형성되면서 절연이 파괴될 때까지 일정하게 유지시킨다. 이 과정에서 형성되는 방전 신호를 부분방전 시험기(일본 Pultec 전자 주식회사 제품)를 통하여 디지털 오실로스코프로 검출하고, 이 신호를 분석하는 프로그램을 행하였다.

연면 방전 및 기중 방전 등을 저감시키기 위해 절연유 중에서 실험하였다. 본 실험에 사용된 시료는 인가전압별 10개, 총 30개를 통계적으로 처리하였다. 전기 트리 성장의 형태는 tree type, bush type, chestnut type의 3가지 유형으로 발생하며, 트리 개시전압은 평균적으로 8~8.5[kV]정도이다. 따라서 트리 개시전압에 비해 낮은 스트레스 영역과 높은 스트레스 영역으로 전압을 선택하여 인가함으로써 트리형상에 대하여 형성되는 방전 신호를 검출하였다.

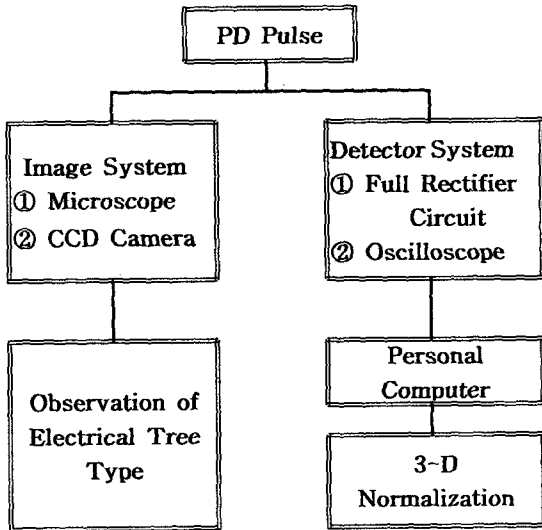


그림 3. 전기 트리 형상 및 방전 신호 검출 과정
Fig. 3. The acquiring process of discharge signal and electrical tree type

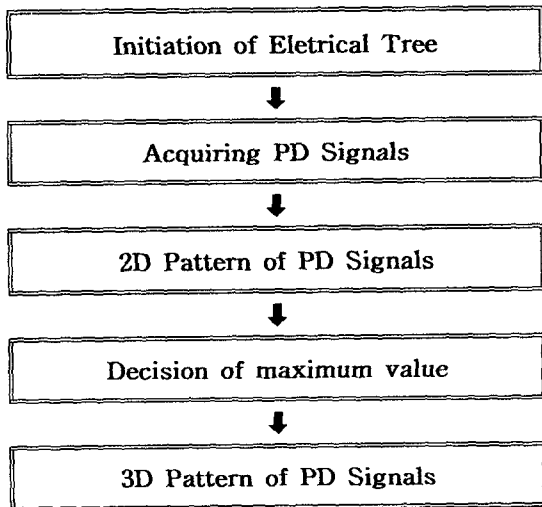


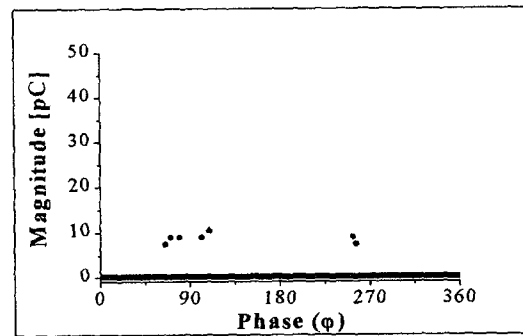
그림 4. 방전신호의 정규화 과정
Fig. 4. The normalizing process of partial discharge signals

3. 실험결과 및 고찰

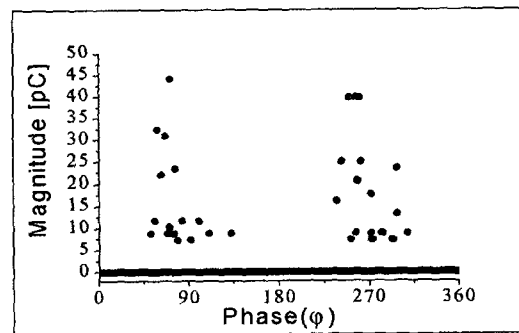
3.1. 방전 신호의 2D 특성

절연체의 전기적 열화 과정 중에 형성되는 방전

신호를 검출하여 방전 전하량에 관한 열화정도의 비교와 더불어 위상과 빈도수의 다양한 패턴으로 인식, 분석하는 것이 중요한 것으로 추정되고 있다.⁸⁾⁹⁾ 따라서, 인가전압의 각 주기(ϕ)에 대한 방전 전하량의 크기(q) 및 방전 발생 빈도수(n), 그리고 방전량의 분포에 대한 발생 빈도수와와의 관계를 명확히 분석함으로써 전력 케이블의 전기적 열화 진전에 관한 정보를 확인할 수 있다. 방전 신호의 2D 형태는 ϕ - q , q - n 의 패턴으로 구성되어지며, 전기 트리 진전과정에 대하여 각 패턴의 변화 및 분포상태의 정보를 확인함으로써 전기적 열화를 분석할 수 있다.



(a)



(b)

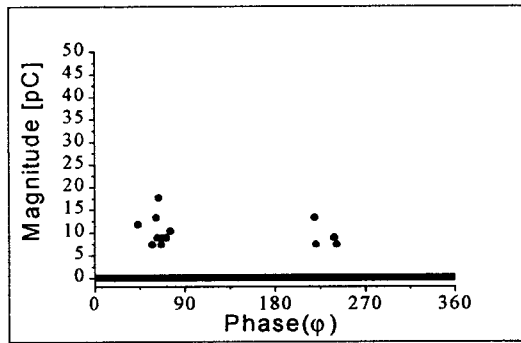
그림 5. 인가전압 7[kV]의 열화진전에 대한 ϕ - q 패턴 (a) 절연 열화개시 (b) 절연 열화 파괴직전

Fig. 5. ϕ - q pattern on aging progress at 7[kV] (a) on aging initiation (b) on aging breakdown

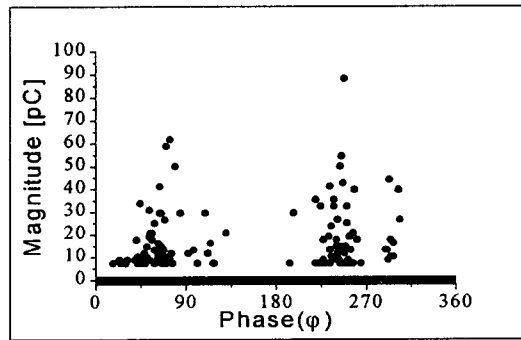
그림 5 (a)의 경우, 절연체의 전기적 열화가 발생된 직후의 인가 전압의 위상에 대한 방전 전하량의 크기 및 분포 형태를 보여주고 있다. 90° 와 270°

영역에서 방전 신호가 형성되고 있으며 10[pC] 정도의 전하량을 갖고 있다. 그림 5 (b)는 절연상태가 파괴되기 직전의 ϕ -n 패턴으로 그림 5 (a)와 비교하면, 방전 전하량도 45[pC] 정도로 크게 증가하였고 위상 영역의 분포 변화도 폭 넓은 위상영역으로 분포하고 있다.

그림 6은 11[kV]를 인가한 경우로서 7[kV]에 비해 방전 전하량의 크기도 열화개시 상태부터 높은 값으로 형성되고 절연 파괴 직전의 위상 분포 패턴도 전 위상영역으로 확산된 형태를 보여주고 있다.



(a)



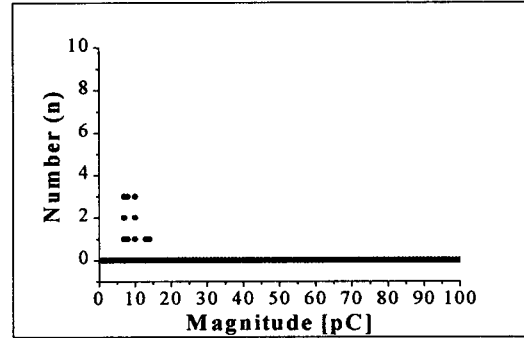
(b)

그림 6. 인가전압 11[kV] 열화과정의 ϕ -q 패턴 (a) 절연 열화개시 (b) 절연 열화 파괴직전

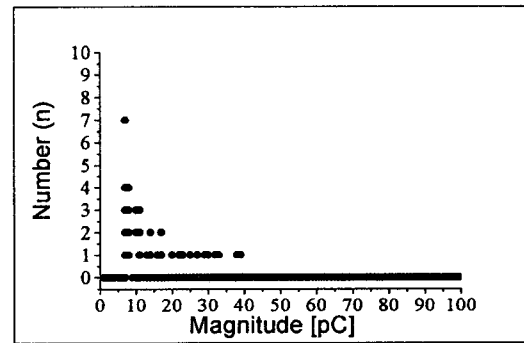
Fig. 6. ϕ -q pattern on aging progress at 11[kV] (a) on aging initiation (b) on aging breakdown

그림 7은 절연 열화 초기와 파괴 직전의 q-n 패턴으로서, 10~20[pC]에서 방전이 집중하고 있음을 보여주고 있다. 열화 초기의 패턴보다는 방전 전하량의 크기도 높은 값으로 형성되고 있지만 전하량

의 크기보다는 밀집하여 형성되는 방전 빈도수가 상당한 영향으로 작용함을 확인할 수 있다.



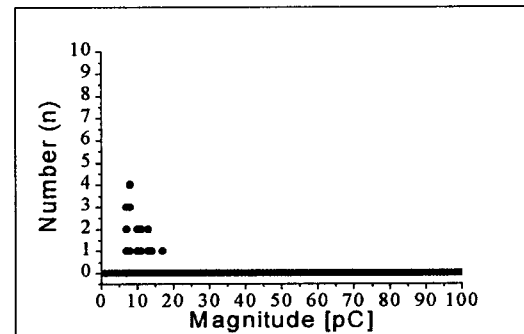
(a)



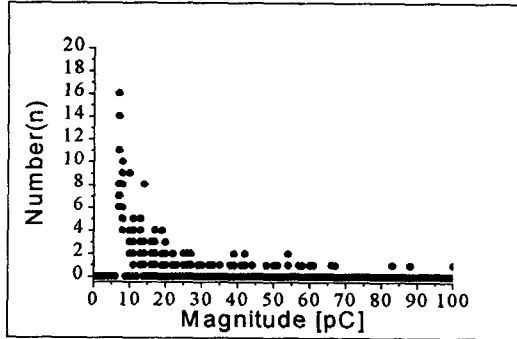
(b)

그림 7. 인가전압 7[kV] 열화과정의 q-n 패턴 (a) 절연 열화 개시 (b) 절연 파괴 직전

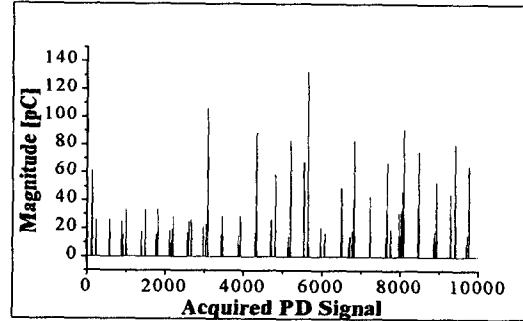
Fig. 7. q-n pattern on aging progress at 7[kV] (a) on aging initiation (b) on aging breakdown



(a)



(b)



(a)

그림 8. 인가전압 11[kV] 열화과정의 q-n 패턴 (a) 절연 열화 개시 (b) 절연 파괴 직전
 Fig. 8. ϕ -q pattern on aging progress at 11[kV] (a) at aging initiation (b) at aging breakdown

이상의 결과로서 열화상태가 개시에서 파괴까지 전전됨에 따라 2D 패턴의 분포 변화가 넓은 위상 영역으로 확산되면서 절연파괴에 이르는 것을 확인할 수 있다.

3.2. 방전 신호의 3D 특성

그림 9는 절연체의 전기적 열화 과정 중에 발생된 방전 신호를 ϕ -q-n으로 정규화하여 표현하는 6×20 행렬의 형태를 나타낸 것이다.

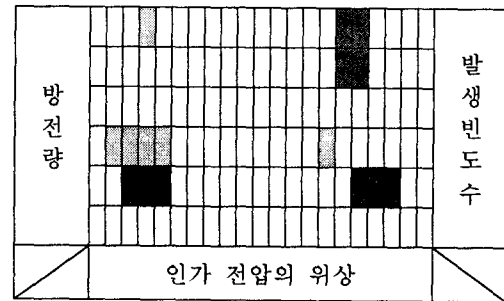
그림 10, 11, 12는 인가전압 7[kV]에서 절연상태가 전기적으로 열화 되면서부터 파괴에 이르기까지의 ϕ -q-n 패턴을 도시한 것이다.

시간이 경과할수록 방전의 ϕ -q-n 패턴은 위상의 분포와 전 영역의 방전 전하량 분포를 확인할 수 있다.

또한, 절연 파괴는 전반적인 위상에 걸쳐 형성되는 방전 빈도수에 상당한 영향을 받고 있음을 확인할 수 있다.

즉, 절연상태가 파괴에 이르게 하는 주된 원인은 높게 형성되는 방전전하량의 크기뿐만 아니라 전 위상에 걸쳐 빈번하게 형성되고 있는 방전 발생빈도수라 할 수 있겠다.

앞서 3.1.절에 표현된 ϕ -q, q-n 패턴에 의해 얻어진 정보보다는 방전 신호를 ϕ -q-n으로 패턴화하여 획득한 열화에 관한 정보를 보다 폭 넓게 이용할 수 있음을 확인하였다.



(b)

그림 9. 검출된 방전 신호를 이용한 ϕ -q-n 패턴의 정규화 과정 (a) 절연열화 과정중에 검출되는 방전 신호 (b) 방전 신호의 ϕ -q-n 패턴

Fig. 9. The normalizing process of ϕ -q-n pattern (a) discharge signals from oscilloscope (b) normalizing pattern of discharge signals

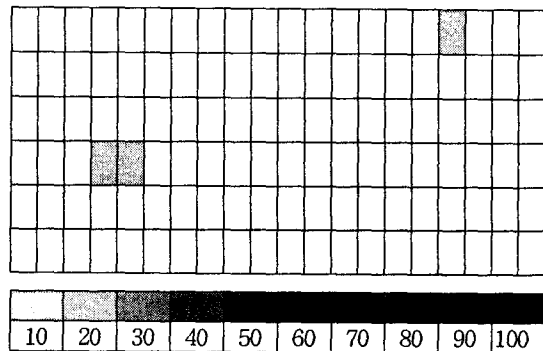


그림 10. 절연 열화 개시의 ϕ -q-n 패턴
 Fig. 10. ϕ -q-n pattern on aging initiation

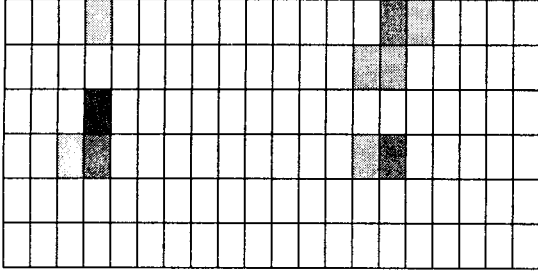


그림 11. 절연 열화 50[%] 상태의 ϕ -q-n 패턴
Fig. 11. ϕ -q-n pattern at 50[%] aging state

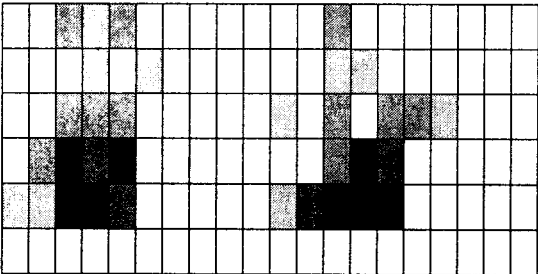


그림 12. 절연 상태의 파괴 직전 ϕ -q-n 패턴
Fig. 12. ϕ -q-n pattern at aging breakdown

3.2. 신경회로망을 이용한 열화 인식

신경회로망의 학습과정은 기본적으로 목적하는 출력을 따라가는 입력패턴의 구조를 반복적으로 변환하고, 적절한 오차의 값까지 감소시키기 위해 가중치 및 바이어스를 교정하는 것이다.¹⁰⁾

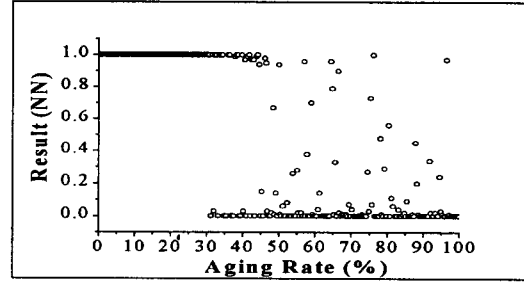
이렇게 교정된 가중치와 바이어스를 적용하여 시간적 열화발생에 대한 3단계 패턴인식을 수행하였고, 이것으로 열화형태에 관한 위험영역의 인식이 가능하였다. 3단계 패턴 인식법은 안정한 영역의 경우, 안정 영역의 신경회로망 결과 값은 '1'을 출력하고 중간 영역과 불안정 영역의 결과 값은 각각 '0'을 출력하는 것이다. 불안정한 경우는 안정 영역 '0', 중간영역 '0', 불안정 영역 '1'을 출력하게 된다.

그림 10과 같이 위상에 대한 분포비가 낮고 방전 빈도수도 적게 형성된 경우, 이를 열화가 개시될 때의 안전한 방전 신호 패턴으로 학습시켰다.

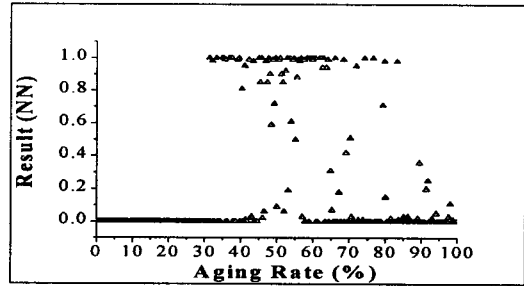
그림 11의 경우는 방전 전하량의 분포도 확산된 형태이고 발생 빈도수도 증가된 패턴이지만 동일한 위상에서 방전이 형성되고 있어, 이를 안정과 불안정의 중간 패턴으로 학습시켰다.

그림 12는 방전 전하량, 발생 빈도수, 위상의 각

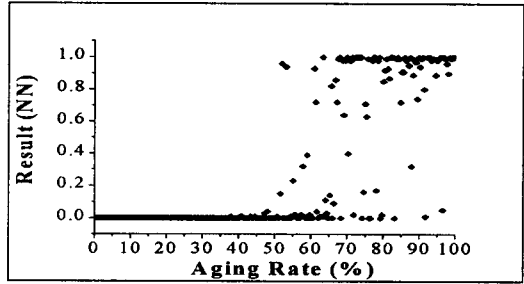
요소에 대한 변화율이 급격한 형태로 이는 파괴되기 직전의 매우 불안정한 패턴으로 학습시켰다.



(a)



(b)



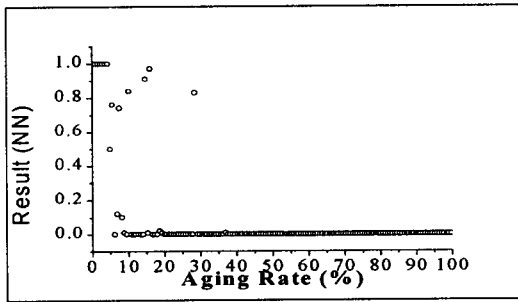
(c)

그림 13. 인가전압 7[kV]에서의 신경회로망 결과
(a) 안정 영역 (b) 안정과 불안정의 중간 영역 (c) 불안정 영역

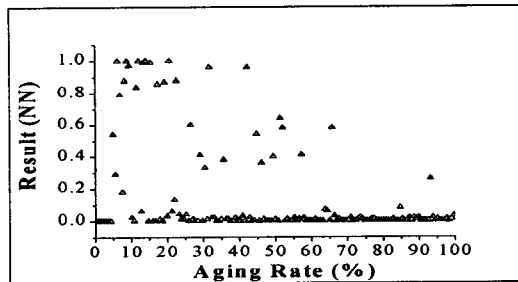
Fig. 13. The neural network result at applied 7[kV] (a) stable zone (b) middle zone between stable and unstable zone (c) unstable zone

그림 13과 14는 학습된 신경회로망에 적용하여 3단계로 열화과정을 인식한 경우이다. 학습된 가중치로 학습되지 않은 패턴을 적용한 결과, 인가 전압

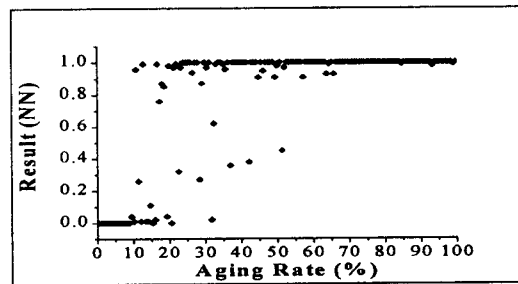
7[kV]인 경우에는 전체 파괴과정 중 30[%]까지 매우 안정한 형태로 인식하고 있으며 70[%]부터는 절연 파괴 직전인 매우 불안정한 형태를 보여주고 있다. 11[kV]의 경우에는 안정영역이 매우 짧고 전기 트리가 발생한 후 얼마 지나지 않아 곧 바로 불안정한 영역으로 확산된 형태이다.



(a)



(b)



(c)

그림 14. 인가전압 11[kV]에서의 신경회로망 결과
(a) 안정 영역 (b) 안정과 불안정의 중간 영역 (c) 불안정 영역

Fig. 14. The neural network result at applied 11[kV] (a) stable zone (b) middle zone between stable and unstable zone (c) unstable zone

이상의 결과에서 신경회로망을 적용함으로써 ϕ -q-n 패턴으로부터 3단계 위험영역의 인식이 매우 우수하였으며, 전기 절연의 단계별 열화상태의 위험도를 확인할 수 있었다.

4. 결 론

전력 케이블의 절연상태가 열화되면서 발생하는 방전 신호를 방전 위상, 방전 전하량, 방전 발생빈도에 관한 정보로 분석한 결과,

1) 절연체의 전기적 열화 진전과정에 따른 방전 신호의 분포 패턴을 분석하여 열화 상태를 인식하는 것이 가능하였다.

2) ϕ -q-n 패턴의 분석 결과로서 전 영역에 걸친 방전 위상의 확산 및 빈도수가 높은 방전량의 분포로 절연상태가 열화 되는 것을 확인할 수 있었다.

3) ϕ -q, q-n의 신호 분석으로부터 전기적 열화의 진행상태에 관한 절연 파괴의 위험성이 매우 높은 위험영역을 인식할 수 있었다.

4) ϕ -q-n 패턴의 분석방법이 ϕ -q, q-n보다 절연체의 파괴 과정을 보다 효과적으로 인식하였다.

감사의 글

본 연구는 전력기술기초 연구비 지원에 의해서 수행됨. (과제관리번호 : 96-중기-05)

참 고 문 헌

1. G. Mole, "The Portable ERA Discharge Detector," CIGRE Report 105, 1954
2. T. Tanaka and T. Okamoto, "A Minicomputer Based Partial Discharge Measurement System," IEEE Int. Symp. on Electrical Insulation, Conf. Record 78-Ch1287-2-EI, pp. 86-89, 1978
3. D.A. Natrass, "Partial Discharge Measurement and Interpretation", IEEE Elec. Insul. mag., vol. 4, No. 3, pp10~23, May-June 1988
4. F. H. Kreuger, Partial Discharge Dection in High-Voltage Equipment. Butterworth Pub., 1989
5. T.Okamoto, "Discrimination of Partial Discharge Patterns Using a Neural Network," IEEE Trans. Electrical Insul., Vol. 1 No. 1, 1992

- 6 H. Suzuki, "Pattern Recognition of Partial Discharge in XLPE Cables Using a Neural Network," IEEE. Trans. on Electrical Insulation, Vol. 27 No. 3, 1992
7. E. Gulski, "Computer-Aided Measurement of Partial Discharge in HV Equipment," IEEE. Trans. on Electrical Insulation, Vol. 28 No. 6, 1993
8. L. Satish, "Artificial Neural Network for Recognition of 3-D Partial Discharge Pattern," IEEE. Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 28 No. 2, 1993
9. H. Kranz, "Diagnosis of Partial Discharge Signals Using Neural Networks and Minimum Distance Classification," IEEE Trans. Electrical Insul., Vol 28 No. 6, 1993
10. 임장섭, "神經回路網과 準프랙탈 次元을 利用한 電氣絶緣의 劣化診斷", 博士學位 論文, 全南大學 校, 1996