

Chaos 이론을 이용한 부분방전 신호분석(CAPD) - 결합 종류 판별을 위한 새로운 접근 방법

임윤석*, 구자윤*, 김성홍†, 이진선*, 최계옥*, 윤정훈*, 마지훈*

* 한양대학교 전자전기 제어계측공학과

† 순천청암대학 전기설비과

Chaotic Analysis of Partial Discharge (CAPD) - A novel approach to identify the nature of PD source

Y Lim*, J Koo*, S Kim†, J Lee*, J Choi*, J Yoon*, J Ma*

*SMDT Lab., Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, KOREA
ADDRESS : SMDT Lab., Room 217, Engineering Building 3, Hanyang University,
Sa-1dong, Ansanshi, Kyunggi-do, 425-791, KOREA
e-mail : seog29@ihanyang.ac.kr

† Dept. of Electrical Facilities, Suncheon Chongam College, KOREA
ADDRESS : 224-9, Deckweoldong, Sunchonshi, Chonnam, 540-743, KOREA
e-mail : polymers@scjc.ac.kr

Abstract

In connection with the monitoring of the insulation degradation of large power apparatus in order to predict their expected service failures, a statistical treatment, such as phase resolved partial discharge analysis (PRPDA), has been established for the on-line monitoring system during the past decades. However, this method has shown some inconveniences to identify the nature of the PD source in power apparatus. In this regard, a novel approach based on the chaotic analysis (CAPD) is proposed describing the fundamental ideas, outcomes and different viewpoints from the conventional PRPDA. As a model for the possible defects causing sudden failures in service, three types of specimen are prepared. And partial discharge signals, originated from those samples, are measured and analyzed by means of CAPD. Throughout this work, it seems that the correlation between the consecutive PD pulses, depending on the nature of PD, could be clarified by CAPD. Therefore, it could be considered that the nature of PD source can be identified more distinctively when the CAPD is combined with PRPDA.

1. 서 론

부분방전 측정분석은, 대 전력 기기들의 절연열화를 진단하기 위한 중요한 방법으로서 통계적 데이터 처리에 기초를 둔 규격화된 알고리즘을 이용한 위상분해 PD분석(PRPDA)이 PD패턴분석에 기본적인 도구로 사용되어왔다[1-3]. 그러나 이 방법은 전력기기 안에서의 PD의 발생원인을 명확히 구별하기에는 미흡한 점이 지적되고 있다[4]. 이런 관점에서, 전통적인 접근방법과는 다른 카오스분석(CAPD)에 기초를 둔 새로운 접근 방법이 제안되었다[5]. PRPDA 방법에 의하면 인가전압의 위상구간을 일정한 수로 나누어 각 구간에서 PD펄스가 발생되면 발생된 PD는 모두 중첩이 되어 방전의 크기, 위상, 그리고 펄스 수를 측정 파라미터로 선정하고 이들 파라미터 값들을 구하기 위한 알고리즘이 다양하게 개발되고 있다. 그러나 이런 방법으로는 연속적인 펄스들 사이의 상호관계를 알아낼 수가 없다.

CAPD에 의한 분석방법은 주로 다음과 같은 세 개의 파라미터를 정규화(normalize)하여 사용하며 이후 NDQs (Normalize-Differenced Quantities)라 한다. 세 개의 NDQs는 정규화한 연속적인 PD펄스 크기의 차이(P_i), 서로 다른 두 개의 PD가 발생했을 때의 인가 전압 차이의 정규화 량(V_i) 그리고 정규화된 두 펄스 사이의 발생시간 차이(T_i)이다. P_i , V_i 및 T_i 는 카오스분석에 기초적인 파라미터로 사용되며, 발생되는 PD펄스 사이의 상관관계는 이를 바탕으로 규명될 수 있다.

2. 실험장치 구성 및 데이터 처리

2.1 실험장치 구성 및 시편.

현장에서서의 예기치 못한 사고의 원인으로 여겨지는 대표적인 결함들을 모델링하기 위해, 다양한 형태의 인위적 결함을 모의한 시편을 제작하여 PD 실험을 수행하였고, 검출한 PD 신호를 PRPDA와 CAPD의 방법으로 각각 분석하였다. 그림 1(a)는 PD 측정 시스템의 전체적인 구성이고, 1(b)는 PRPDA와 CAPD의 분석 프로그램이다. 그림 2는 결함의 형태에 따른 세 종류의 시편형태로써, 2(a)는 공기 중에서의 코로나 실험을 위한 침 결함형태(결함 I)이고, 2(b)는 전기트리 진행에 따른 방전양상을 검토하기 위한 XLPE 전력케이블 절연체에 침 결함이 삽입된 형태(결함 II)이며, 2(c)는 에폭시 절연체 안에 형성된 보이드 결함을 만든 형태(결함 III)이다. 그림 2(a)의 침 곡률 반경은 10 μ m이고 침 끝과 접지전극사이의 거리는 3cm이다. 2(b)의 침 곡률 반경은 10 μ m이고 침 끝과 접지전극사이의 거리는 3mm가 된다. 2(c)에서의 에폭시 절연체 안의 보이드 지름은 1mm로 고정시켰고, 보이드는 에폭시로 절연된 금속전극 사이에 위치시켰다. 결함으로부터 부분방전을 발생시키기 위해서는, 매 2분마다 인가 전압을 1kV씩 계단식으로 증가시켰다. 최초 PD 검출 후에 최초 PD 검출 전압의 120%를 유지하여 실험을 진행하였다.

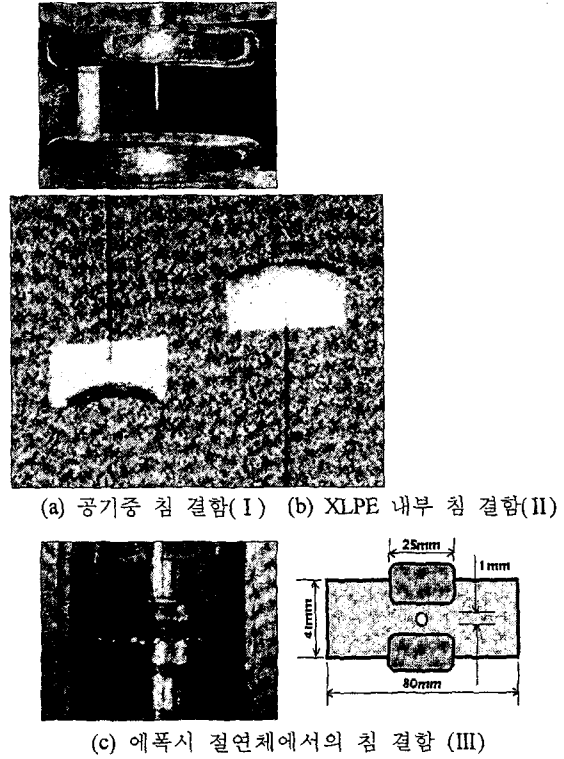
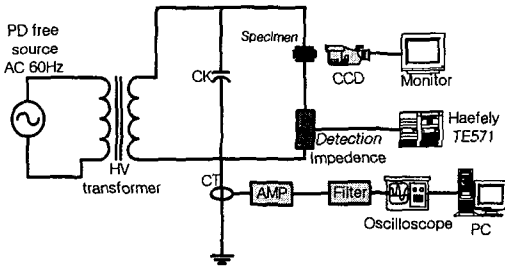
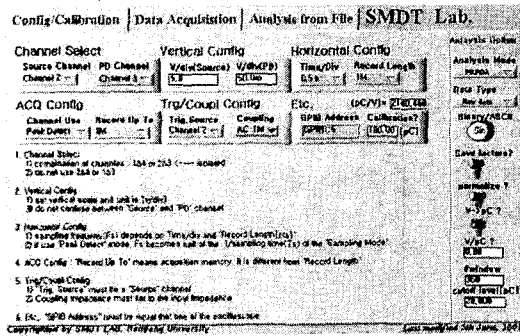


그림 2 절연체 내부 인위적인 결함



(a) 실험장치 BLOCK 다이어그램



(b) 분석과 측정을 위한 소프트웨어

그림 1 PRPDA와 CAPD의 측정시스템과 소프트웨어

2.2 데이터 처리

인위결함으로부터 발생하는 내부 방전량을 외부에서 관찰하기 위하여 접지를 통하여 외부로 유출되는 방전 전류펄스(p_i)를 인가전압(v_{in})의 연속적인 300 주기동안 검출하였으며 연속된 두 펄스간의 시간차(Δ_i)를 계산하였다. 또한 서로 다른 실험 환경 및 시편에 따른 영향을 배제하기 위하여 모든 데이터는 식(1)~(3)에 의해 정규화하였으며 NDQs는 시간적으로 뒤에 발생한 펄스에 관련된 양으로부터 앞에 발생한 펄스에 관련된 양의 정규화된 차분(P_i^* : 펄스 크기의 차, V_i^* : 펄스 발생시 인가전압의 차, T_i^* : 펄스발생의 시간차)으로써 정의된다. 특히, 서로 다른 결함에 따른 세 가지 NDQs의 카오스적 특성을 매립된 2차원 위상공간에서 끌개를 구성하여 검토하였다.

$$V_{ip}^* = \frac{V_{ip}}{V(t)_{max}} \quad (1)$$

$$P_i^* = (p_i - p_{i_{min}}) / (p_{i_{max}} - p_{i_{min}}) \quad (2)$$

$$\Delta_i^* = (\Delta_i - \Delta_{i_{min}}) / (\Delta_{i_{max}} - \Delta_{i_{min}}) \quad (3)$$

여기서, x^* : 정규화 한 값

x_{max} : 최대값

x_{\min} : 최소값
 x_i : 순차적인 값

3. 분석 결과

3.1 NDQs의 2차원 끌개

그림 3에 결합에 따른 V_i 의 2차원 끌개를 보였다. 결합 I의 경우에는 대부분의 V_i 쌍이 매립된 위상공간의 영점 주위에 군집하여있음을 볼 수 있으며, 이러한 특성은 다른 두 개의 결합과는 명확히 구별됨을 볼 수 있다. 그러나, 결합 II와 결합 III의 경우에는 빈도수의 차이 이외에는 그리 큰 차이를 보이지 않고 있다.

그림 4에 보인 P_i 의 2차원 끌개의 결과에는 그 모양만으로는 구별이 어려운 것으로 여겨진다. 그러나, 결합 II의 경우에 있어서는 다른 두 가지 결합에서의 패턴과 달리 매우 조밀하게 모여 있음을 볼 수 있다.

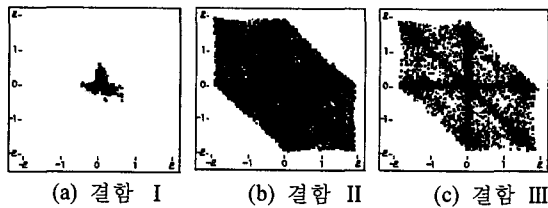


그림 3 V_i 의 2차원 끌개

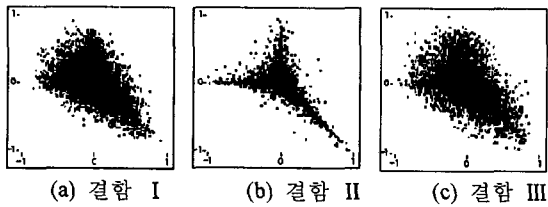
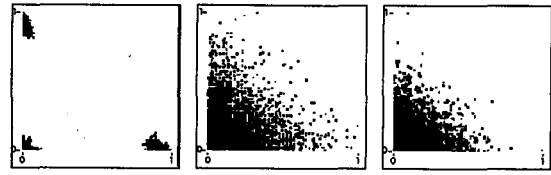


그림 4 P_i 의 2차원 끌개

그림 5에는 서로 다른 결합에 따른 T_i 의 2차원 끌개 결과를 보였다. 결합 I의 경우에 있어서는 대부분의 T_i 쌍이 매립된 위상공간의 세 모서리에만 집중적으로 분포하고 있음을 볼 수 있으며 이러한 특성은 다른 두 개의 결합과는 확연히 구별됨을 볼 수 있다. 결합 II와 결합 III의 경우에는 패턴의 차이점을 확인 할 수 없었다.

따라서, NDQs의 2차원 끌개 결과는 결합의 종류를 판별하는데 적용될 수 있는 가능성이 충분하다고 사료된다.



(a) 결합 I (b) 결합 II (c) 결합 III
 그림 5 T_i 의 2차원 끌개

3.2 NDQs 사이의 상관관계 검토

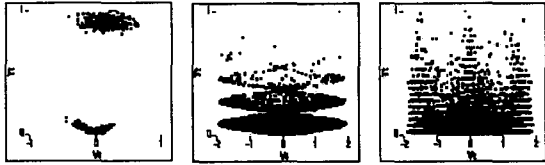
연속적인 PD 펄스 사이의 상관관계에 대한 정보를 얻기 위하여 NDQs 사이의 상관관계를 검토해 보았다. 더욱이, 상관관계로부터 규정지어지는 특성은 향후 적용될 패턴인식 알고리즘에 특징벡터로 유용할 것으로 사료된다. 본 논문에서의 분석결과, 결합의 종류에 따라서 매우 독특한 상관관계 패턴을 보이고 있음이 밝혀졌다. 그림 6에서 그림 9에 보인 결합에 따른 NDQs의 상관관계 그래프에서 서로 다른 상관관계 특성을 볼 수 있다; 결합 I은 그림 6에서 그림 9에 보인 모든 그래프에서 다른 결합들과 명확히 구분되는 상관관계 형태를 보이고 있으며 이들 그래프는 각각의 정규화된 양들이 서로 일정한 규칙을 갖고 있음을 보이고 있다. 특히, 결합 II와 결합 III 또한 그림 6에서 그림 8의 그래프에서 보인 바와 같이 그 형태를 매우 달리 하고 있으며 방전 펄스들간의 상관관계가 서로 상이함을 알 수 있다. 따라서, NDQs사이의 상관관계는 서로 다른 결합의 종류를 판별하는데 매우 유용한 정보를 제공할 수 있다고 여겨진다. 특히, 이들 정보는 향후 진단 알고리즘에 유용한 패턴을 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

그림 6에서, P_i 와 V_i 의 상관관계로부터 PD 펄스의 크기와 그 때의 인가전압의 크기가 계산될 수 있음은 매우 유용한 정보를 제공한다. 더욱이 $T_i - V_i$ 및 $T_i - P_i$ 상관관계로부터 PD 발생의 시간 정보를 얻을 수 있다. 전자의 상관관계로부터는 연속적인 PD 펄스사이의 발생시간 차이와 이들 펄스가 발생한 때의 인가전압 크기를 알아 낼 수 있다. 또한, PD 펄스의 크기와 발생시간의 정보는 그림 8에 보인 바와 같이 $T_i - P_i$ 의 상관관계로부터 얻어질 수 있다.

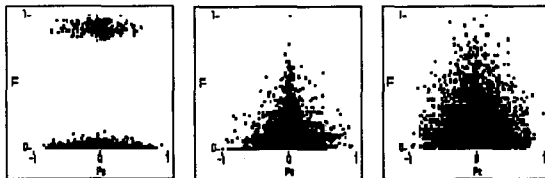
서로 다른 결합에 따른 $V_i - T_i - P_i$ 사이의 상관관계는 그림 9에 보였다. 이러한 상관관계로부터 PD 발생에 따른 세 가지 기본 정보량(방전 크기, 방전시간 및 인가전압)을 한 눈에 볼 수 있으며 그 형태 또한 각 결합 종류에 따라 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다. 따라서, CAPD 분석 방법을 통하여 NDQs 사이의 상관관계를 검토함으로써 결합 종류에 따른 방전 현상을 모델링하고 검증하는데 매우 근본적인 정보량을 제공할 수 있음이 밝혀졌다고 사료된다.



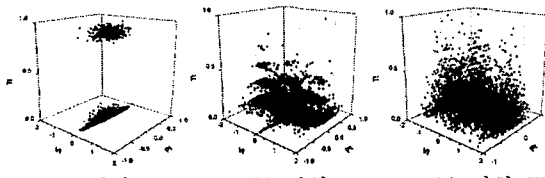
(a) 결함 I (b) 결함 II (c) 결함 III
 그림 6 V_i 와 P_i 의 상관관계



(a) 결함 I (b) 결함 II (c) 결함 III
 그림 7 T_i 와 V_i 의 상관관계



(a) 결함 I (b) 결함 II (c) 결함 III
 그림 8 P_i 와 P_i 의 상관관계



(a) 결함 I (b) 결함 II (c) 결함 III
 그림 9 V_i , P_i 및 T_i 의 상관관계

4. 결 론

본 연구에서는 CAPD 분석 방법을 통하여 연속적으로 발생하는 부분방전 펄스사이의 상관관계는 물론이며 세 가지 NDQs사이의 상관관계를 검증할 수 있음을 보였다. 특히, 이러한 정보량은 전력기기 내부에서 서로 다른 결함에 따라 다르게 발생할 수 있는 부분방전 현상을 모델링하고 검증하는데 매우 근본적인 방안을 제시할 수 있음을 밝혔다. 따라서, CAPD 분석 기법은 고전적으로 사용되어왔던 PRPDA 분석방법을 보완하고 나아가서 더욱 정확한 결함 종류 판별에 매우 유용한 기법이 될 수 있을 것으로 사료된다. 본 논문의 결과로부터 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- (a) 매립된 위상공간에서의 2차원 끌개를 검토한 결과, CAPD에서 사용되는 2차원 끌개는 결함 종류를 판별하는데 사용할 패턴 인식 알고리즘에 충분히 적용이 가능한 것으로 사료된다.
- (b) CAPD로부터 분석되는 정규화된 량(NDQs)으로부터 전력기기 내부에서 발생하는 PD 현상을 결함 종류에 따라 모델링하고 검증하는데 매우 근본적인 정보를 제공할 수 있음이 밝혀졌다.
- (c) 특히, 전력기기 내부에서 발생하는 부분방전 현상은 다분히 불규칙적으로 발생하지만 그 불규칙적인 현상 뒤에는 NDQs 사이의 상관관계로부터 밝혀진 바와 같이 규칙성을 내포하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 전력기기 내부에서 발생하는 부분방전 현상은 단순히 불규칙하며 무작위 적으로 발생하는 물리적 현상이 아니라 불규칙성 뒤에 규칙성을 내포하고 있는 카오스적 현상(chaotic phenomena)임을 밝혔다.

향후의 연구에서는 CAPD 분석기법을 현장에서의 on-line 진단에 적용할 수 있는 방안에 대한 연구가 이루어져야 할 것이며, 부분방전의 물리적인 현상을 카오스적인 현상에서 다시 한번 검토가 이루어져야 할 것으로 여겨진다. 또한, CAPD 분석기법과 관련하여 결함 종류를 판별할 수 있는 정량적인 지시량을 제공할 수 있도록 연구가 진행되어야 할 것이다.

감 사 의 글

본 연구는 기초전력공학 공동연구소 및 한양대학교 전자재료 및 부품연구센터의 지원에 의해 수행된 연구 결과의 일부로 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Edward Gluski, Computer-Aided Recognition of Partial Discharges Using Statistical Tools, Delft University Press, Delft, Netherlands, 1991.
- [2] Okamoto, T., Tanaka T., "Novel Partial Discharge Measurement Computer-aided Measurement Systems", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 21, pp. 1015-1019, 1986
- [3] Andrej KRIVDA, Recognition of Discharges - Discrimination and Classification, Delft University Press, Delft, Netherlands, 1995.
- [4] M. Hoof and R. Patsch, "Pulse Sequence Analysis :

A New Method for Investigating the Physics of PD-induced Ageing", IEE Proc-Sci. Meas. Technol., Vol. 142, No. 1, pp. 95-101, 1995

- [5] J. Y. Koo, Y. S. Lim, W. J. Kang, and Y. M. Chang, "A Possible Application of the PD Detection Technique using electro-optic Pockels Cell with nonlinear characteristic analysis on the PD signals", IEEE-CEIDP 2000, pp.531-534, 2000.