

다양한 결함으로부터 발생하는 절연열화를 검출하기 위한 새로운 접근기법으로써의 카오스 분석

CHAOTIC ANALYSIS OF PARTIAL DISCHARGE (CAPD) AS A NOVEL APPROACH TO INVESTIGATE INSULATION DEGRADATION CAUSED BY THE VARIOUS DEFECTS

김성홍*, 박재준**, 임윤석***, 윤정훈***, 구자윤***
Sunghong Kim*, Jaejun Park**, Yunsok Lim***, Jeunghoon Yun***, Jayoon Koo***

Abstract

In connection with the monitoring of insulation degradation of large power apparatus in order to predict their unexpected 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 distinguish 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 view points from conventional PRPDA. In order to make a model for the possible defects causing sudden failures in service, several types of specimen were prepared. And partial discharge signals, originated from those samples, were measured and analysed by means of PRPDA and CAPD respectively. Throughout this paper, it seems that the correlation between the consecutive PD pulses depending on the nature of PD could be investigated by CAPD. Therefore, it could be considered that the nature of PD source can be distinguished more distinctively when the PRPDA is combined with CAPD.

Key Words : CAPD, PRPDA, Large Power Apparatus, Partial Discharge, Statistical treatment

1. 서 론

부분방전 측정을 통한 분석은 대전력기기의 절연열화를 진단하기 위한 중요한 방법으로 여겨져 왔다[1-2]. 이러한 이유로, 통계적 데이터 처리에 기초를 둔 규격화된 알고리즘을 사용하는 위상분해 PD 분석(PRPDA)은 PD의 패턴분석을 위한 기본적인 도구로 사용되어왔다[3]. 하지만 이 방법은 전력기 안에서의 PD의 발생원인을 명확히 구별하는 데에는 미흡하다[4]. 이러한 관점에서, 전통적인 접근방법과는 별도로 카오스분석(CAPD)에 기초를 둔 새로운 접근 방법이 제안되었다[5]. PRPDA에서의 PD펄스들은 인가전압의 신호주기들을 일정한 수의 위상구간으로 나누어서 중첩시켰다. 그러므로 방전의 크기, 위상, 그리고 펄스 수에 관한 정보를 패턴분석에 사용되는 알고리즘의 파라미터로써 고려할 수밖에 없다. 이러한 방법으로는 연속적인 펄스들 사이의 상호관계를 알아낼 수 없다. CAPD에서는 두 개의 파

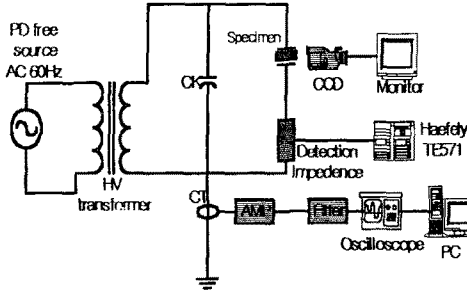
라미터가 주로 사용된다. 하나는, 연속적인 PD펄스(P_i)들 사이의 상호관계이고 다른 하나는, PD가 발생했을 때의 인가 전압의 차(V_i)이다. P_i 와 V_i 는 카오스분석에 기초적인 파라미터로 사용되며, 연속적인 펄스들의 상관관계는 이를 바탕으로 규명될 수 있다.

2. 실험장치 구성 및 시편

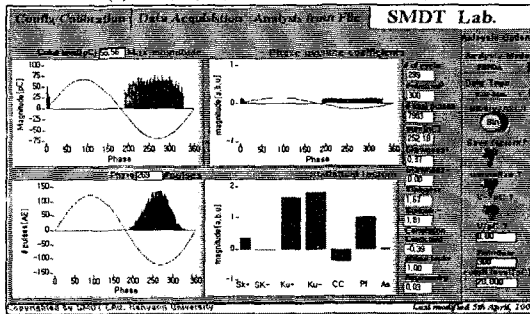
현장에서의 예기치 못한 사고의 원인으로 여겨지는 발생 가능한 결함을 모델링 하기 위해서, 여러 형태의 시편을 준비하였다. 준비된 시편에서 발생하는 PD신호들을 각각 PRPDA와 CAPD를 사용하여 측정하고 분석하였다. 그림 1(a)에는 PD측정시스템의 전체적인 구성을 나타내었으며 (b)에는 PRPDA와 CAPD의 분석프로그램을 보였다. 그림 2에는 결점의 형태에 따른 세 종류의 시편결함형태를 보였으며, (a)에는 공기 중에서의 코로나 실험을 위한 침결함을 나타내고 있고, (b)에는 전기적인 트리 실험을 위한 절연 XLPE 전력케이블 시편에 침을 꽂은 형태이고, (c)에는 보이드 실험을 위해 에폭시수지 안에 보이드 결함을 삽입한 형태이다. 그림 2의 (a)에서 침의 곡률 반경은 10 μ m이고 침 끝과 접지전극 사이의 거리는 3cm이다. (b)에서는 침의 곡률반경은 10 μ m이고 침 끝과 접지전극사이의 거리는 3mm가 된

* 순천청암대학 전기설비과
E-mail : polymers@scjc.ac.kr
** 중부대학교 정보공학부
E-mail : jjpark@joongbu.ac.kr
*** 한양대학교 전기공학과
E-mail : jhyoon@ihanyang.ac.kr

다. (c)에서의 에폭시 절연체 안의 보이드의 지름은 1mm로 고정시켰으며, 보이드는 에폭시로 절연된 금속전극 사이에 위치시켰다.



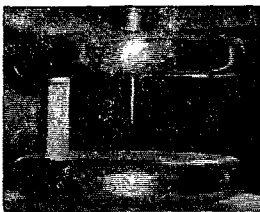
(a) 실험장치 BLOCK 다이어그램



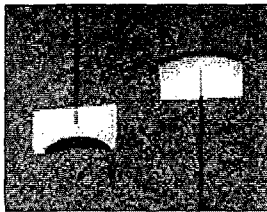
(b) 분석과 측정을 위한 소프트웨어

그림 1 PRPDA와 CAPD의 측정시스템과 소프트웨어

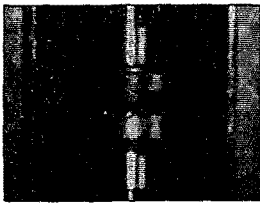
인가전압을 결함으로부터 PD를 개시시키기 위해, 매 2분마다 1kV씩 계단식으로 증가시켰다. PD가 개시된 후로는 PD개시전압의 120%의 전압을 유지시키며 실험을 진행하였다.



(a) 공기중 침 결합

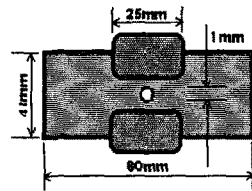


(b) XLPE의 침 결합



(c) 에폭시절연체에서의 침 결합

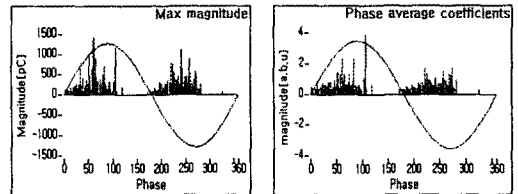
그림 2 절연물질 안에 있는 결합들의 모델링



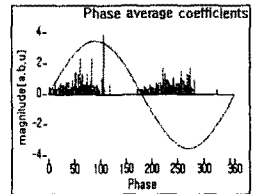
3. 실험 결과

3.1 PRPDA의 분석결과

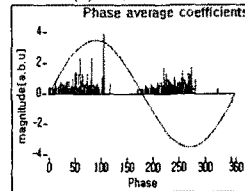
PRPDA로 분석한 결과의 한 예로써, XLPE 전력케이블 절연체 안에 삽입한 침에서 발생된 PD를 기존에 사용되던 파라미터들(ϕ -q-n)로의 분석과 그들의 양적 특징과의 관계를 그림 3에 요약하였다. 이러한 PRPDA 분석 패턴은 여러 문헌들을 통해 이미 알려진바 있으며 본 실험을 통하여서도 유사한 패턴을 얻을 수 있었다[1-3]. 본 논문에서는, 인가전압의 300개의 연속적인 주기(60Hz, 5초)동안 측정된 부분방전펄스들을 각 주기 내에서 300개의 위상구간으로 중첩시켰다. PRPDA결과를 이용하여, 통계적인 파라미터들과 인가전압을 위상구간으로 나눈 것과 관련된 PD펄스들의 분포패턴으로부터 결합 종류의 구분이 가능함이 밝혀진바 있다[3]. 그러나 이러한 방법은 펄스들이 유한하게 고정된 인가전압의 위상구간 내에서 중첩되어지므로, 연속적인 펄스들 사이의 관계에 대한 정보를 얻을 수 없음을 여러 문헌들을 통하여 밝혀진 바 있으며, PRPDA의 본질적인 알고리즘으로부터도 명백하다.



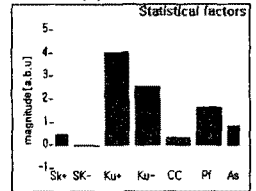
(a) 최대 크기



(b) 펄스 수



(c) 평균 크기



(d) 통계적 파라미터

그림 3 전형적인 PD펄스들의 분포패턴과 XLPE 케이블에서의 침 결합 대한 통계적 파라미터

3.2 CAPD를 통한 분석결과

CAPD 분석은 연속적인 PD펄스와 이때의 인가전압(V_i)을 주관심 대상으로 한다. 방전 발생 시 펄스들은 인가전압의 300개의 연속적인 주기(60Hz, 5초) 동안 측정하였다. 특별히 P_i 와 V_i 의 카오스적 특징들은 2차원 끌개와 위상 공간 안에서의 푸앙카레 단면을 구성함으로써 시각적으로 검토하였다[5]. 2차원 끌개와 푸앙카레 단면으로 매립(embedding)하기 전에, PD가 발생하였을 때의 인가전압 v_{ip} 는 각 데이터를 다른 측정환경에서 얻어진 다른 데이터와 비교하기 위해 식(1)에 따라 0과 1사이의 값으로 표준화한다. 그러므로 인가 전압의 차 값인 V_i 는 -2와 2사

이에서 얻어질 수 있다

$$v_{vp}^* = \frac{(v_{vp} - \overline{v_{vp}})}{(v(t)_{\max} - v_{vp})} \quad (I)$$

v_{vp}^* : PD가 발생하였을 때의 규준화된 인가전압

v_{vp} : PD가 발생하였을 때의 인가전압

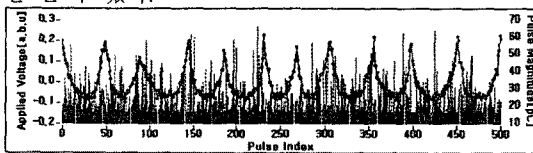
$\overline{v_{vp}}$: v_{vp} 의 평균값 v_{vp}

$v(t)_{\max}$: 최대 인가전압

이후, 1차원 시계열 데이터 V_i 는 더욱 큰 차원의 위상공간 안에서 경계구역에 수렴하는 서브셋의 존재, 즉 기이한 끌개를 찾기 위해서 위상 공간 재구성성을 통해 매립할 수 있다[6-7]. 매립되어진 위상 공간 안의 푸앵카레 단면은 매립된 위상 공간 안의 X, Y, Z축에서 X축의 $x=0$ 을 지나는 Y, Z 평면의 점으로 표현된다. 다음절에서 결합에 따른 V_i 의 고유한 특성에 대해 검토하기로 한다.

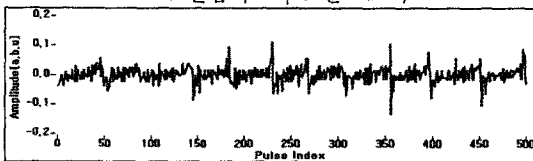
3.2.1 공기 중에서의 침 결합

그림 4는 인가전압에 따른 PD펄스들의 전형적인 CAPD 패턴으로, 위상 공간 안에서의 침 결합으로부터 발생하는 신호의 특성을 보기 위한 2차원 끌개와 푸앵카레 단면을 나타내고 있다. 이 결과는 그림 1(a)에 보인 데이터로부터 산출되었다. 그림 1(a)에서 볼 수 있듯이, 대부분의 PD펄스는 인가전압의 음의 반주기 안에서 나타나고 있다. v_{vp}^* 와 V_i 의 값이 ± 0.3 까지 도달하지 못한 것을 그림 4(a)와 (b)에서 볼 수 있는 것처럼, 이런 특징은 PD가 v_{vp}^* 와 전압차의 값 V_i 를 발생 할 때 규준화된 인가전압의 크기로 분석할 수 있다. 이것은 펄스들 대부분이 인가전압의 부극성 반주기 안에서와 V_i 의 한정된 변화 내에서 발생한다는 것을 의미한다. 그림 4(c)는 V_i 의 쌍이 위상공간의 원점 가까이에 집중되어 있다. 게다가 그림 4(d)로부터 푸앵카레 단면 안에서는 V_i 의 쌍의 주된 부분이 0을 지나는 점에서 움직이고 있음을 알 수 있다.

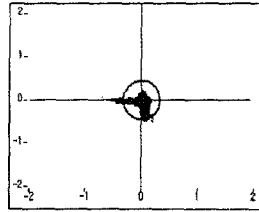


(a) 펄스와 인가전압과의 관계

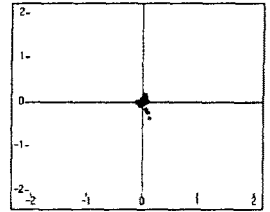
→ : 전압차 | : 펄스크기



(b) PD 발생시 인가 전압의 차



(c) 2차원 끌개



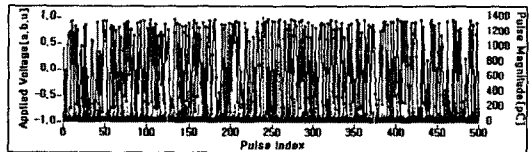
(d) 푸앵카레 단면

그림 4 공기 중에서의 침 결합에 대한 위상 공간 안에서의 2차원 끌개와 푸앵카레 단면과 PD 펄스의 전형적인 CAPD 패턴

3.2.2 XLPE케이블 샘플 안에서의 침 결합

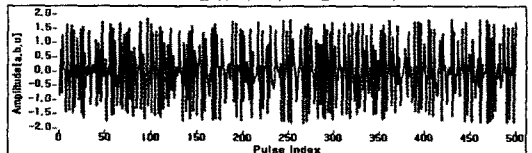
그림 5는 XLPE 케이블 샘플 안에서의 침 결합인 경우의 CAPD 결과들을 보여주고 있다. 이런 결과들은 그림 3(a)에서 보여주는 데이터로부터 산출되었다. 그림 3(a)의 대부분의 펄스들은 위상구간 $0^\circ - 90^\circ$ 와 $180^\circ - 270^\circ$ 안에서 나타나지만 펄스들 사이의 관계는 명백히 추론할 수 없다. 대조적으로, 펄스들 사이의 관계를 그림 5(a)와 (b)에서 보인 것같이 CAPD의 결과로는 나타내어질 수 있다. 특히, 그림 5(b)에서와 같이 PD 발생 시 규준화된 인가 전압에서의 대부분의 v_{vp}^* 는 ± 1.5 까지 도달하게 된다. 이것은 펄스가 인가전압 $v(t)$ 의 어떤 위치에서 발생한다면, 대부분의 연속적인 펄스는 $v(t)$ 의 반주기 이후에 발생되고 있음을 의미한다.

더욱이, 2차원 끌개는 연속적인 펄스들의 더욱 유용한 정보를 갖고 있다. 그림 5(c)를 보면, 펄스들은 인가전압 $v(t)$ 에 관련하여, 그들의 형태에 위상성을 가지고 있다. V_i 의 쌍들 거의 대부분이 위상 공간 안의 표시된 원의 주위에 위치하고 있다. 또한, 푸앵카레 단면 안에서 $v(t)$ 의 쌍들은 전 위상 공간에 분산되어 나타난다. 그러나 이 형태는 그림 5(c)의 2차원 끌개와 매우 유사하다. 이 또한 다른 결합의 특성과 구별되는 특징이라 여겨진다.

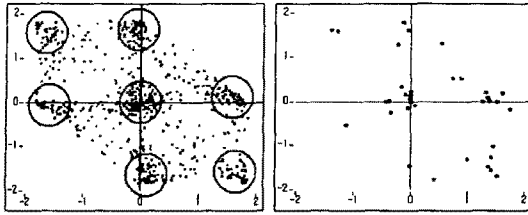


(a) 펄스와 인가전압과의 관계

→ : 전압차 | : 펄스크기



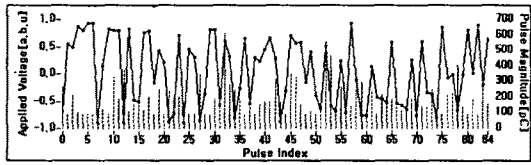
(b) PD 발생시 인가 전압의 차



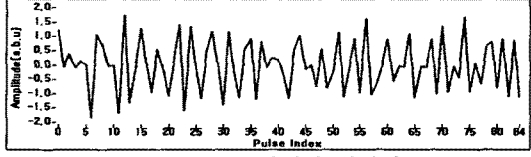
(c) 2차원 끌개 (d) 푸앵카레 단면
 그림 5 XLPE 케이블에서의 침 결합에 대한 위상공간 안에서의 2차원 끌개와 푸앵카레 단면과 PD펄스의 전형적인 CAPD패턴

3.3.1. 예폭시 절연체에서의 보이드

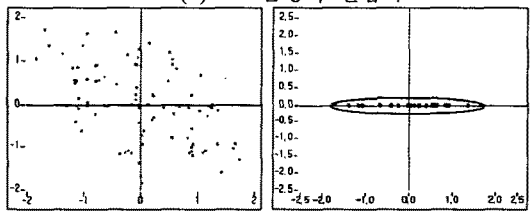
이 절에서는 예폭시 절연체 안에서의 전형적인 CAPD패턴을 나타내고 있다. 펄스들의 수는 코로나 또는 XLPE 케이블 샘플의 경우보다 적게 나타나고 있지만, 몇 가지 규칙성이 그림 6에서 보여지고 있다. 특히 그림 6(d)의 푸앵카레 단면에서, V₁의 쌍은 위상공간 안의 횡축을 따라 일렬로 나타난다. 이런 특징은 코로나와 XLPE 케이블 샘플 안의 결합과 명백히 구별될 수 있다.



(a) 펄스와 인가전압과의 관계
 ← : 전압차 | : 펄스크기



(b) PD 발생시 전압차



(c) 2차원 끌개 (d) 푸앵카레 단면
 그림 6 예폭시 절연체에서의 침 결합에 대한 위상공간 안에서의 2차원 끌개와 푸앵카레 단면과 PD펄스의 전형적인 CAPD패턴

4. 결 론

본 논문에서는 연속적인 PD펄스를 CAPD기법을 통해 연구함으로써, PD펄스들간의 상관관계를 규명함은 물론, PD발생의 원인이 되는 결합의 종류를 판

별할 수 있음을 확인하였다. 따라서, CAPD와 PRPDA 기법을 함께 사용함으로써 좀 더 명확하게 PD 발생 원인을 찾아낼 수 있으리라 여겨진다. 실험결과로부터 다음 몇 가지 결론을 내릴 수 있다.

- ① PRPDA의 결과를 이용하여, 다른 결점들의 발생을 인가전압의 위상구간과 관련되어진 PD 펄스들의 분포 패턴으로 구별할 수 있다. 하지만 연속적인 펄스들 사이의 상호관계는 제안된 CAPD방법으로 명확한 분석이 가능하리라 여겨진다.
- ② 2차원 끌개와 푸앵카레 단면의 결과로부터, 위상공간 안의 연속적인 펄스들의 상호관계를 전력기기 안에서의 PD발생의 근원을 구별할 수 있는 방법으로 사용할 수 있다고 사료된다.
- ③ 마지막으로, 전력기기로부터 발생하는 PD현상은 단지 그 불규칙한 특성만을 보이는 것이 아니라, 그 불규칙성 뒤에는 규칙성을 내포하는 하나의 카오스 시스템임이 명백하다.

향후 카오스적인 해석방법을 통한 더욱 심도 있는 PD 진행과정에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

This research was supported by Research Center for Electronic Materials and Components(EM&C), HanYang Univ., Korea.

참고 문헌

[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.
 [6]K. Alligood, T. Sauer and J. Yorke, *CHAOS - An introduction to dynamical systems*, Springer, 1996
 [7]D. Kaplan and L. Glass, *Understanding Nonlinear Dynamics*, Springer, 1995