

다양한 절연열화 분석을 위한 카오스 분석방법 적용 연구

윤정훈, 임윤석, 구자윤
한양대학교

A POSSIBLE APPLICATION OF CHAOTIC ANALYSIS FOR THE INVESTIGATE OF THE INSULATION DEGRADATION CAUSED BY THE VARIOUS DEFECTS

Jeunghoon Yun, Yunsok Lim, Jayoon Koo
Hanyang University

Abstract

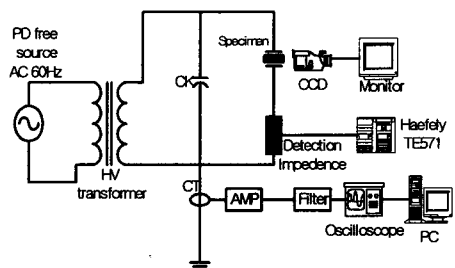
In connection with the monitoring of the insulation degradation of the large power apparatus, a statistical treatment, such as phase resolved partial discharge analysis (PRPDA) has been established for the on-line monitoring system during the past two decades. However, it has shown some inconveniences 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 analyzed by means of PRPDA and CAPD respectively. In 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.

1. 서 론

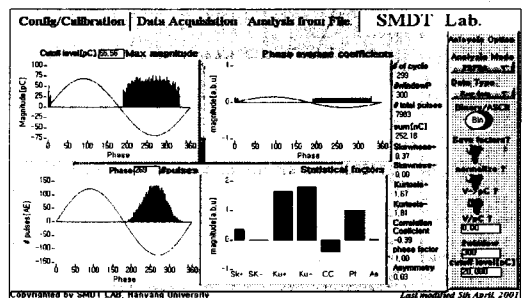
부분방전 측정분석은, 대 전력 기기들의 절연열화를 진단하기 위한 중요한 방법으로서 통계적 데이터 처리에 기초를 둔 규격화된 알고리즘을 이용한 위상분해 PD분석 (PRPDA)이 PD패턴분석에 기본적인 도구로 사용되어왔다[1-3]. 그러나 이 방법은 전력기 안에서의 PD의 발생원인을 명확히 구별하기에는 미흡한 점이 지적되고 있다[4]. 이런 관점에서, 전통적인 접근방법과는 다른 카오스분석(CAPD)에 기초를 둔 새로운 접근 방법이 제안되었다[5]. PRPDA 방법에 의하면 인가전압의 위상구간을 일정한 수로 나누어 각 구간에서 PD펄스가 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 의하면 주로 다음과 같은 두 개의 파라미터가 사용된다; 연속적인 PD펄스(P_i)의 크기, PD가 발생했을 때의 인가 전압의 차(V_i). P_i와 V_i는 카오스분석에 기초적인 파라미터로 사용되며, 발생하는 PD펄스들의 상관관계는 이를 바탕으로 규명될 수 있다.

2. 실험장치구성 및 시편

현장에서의 예기치 못한 사고의 원인으로 여겨지는 대표적인 결함들을 모델링 하기 위해, 다양한 형태의 인위적 결함이 형성된 시편을 제작하여 PD실험을 수행하였고, 검출한 PD신호를 PRPDA와 CAPD의 방법으로 각각 분석하였다. 그림 1(a)는 PD측정시스템의 전체적인 구성이고, 1(b)는 PRPDA와 CAPD의 분석 프로그램이다. 그림 2는 결함의 형태에 따른 세 종류의 시편 형태로써, 2(a)는 공기 중에서의 코로나 실험을 위한 침 결함형태이고, 2(b)는 전기적인 트리 실험을 위한 절연 XLPE 전력케이블 시편에 침이 삽입된 형태이며, 2(c)는 보이드 실험을 위해 에폭시수지 안에 형성된 보이드 결함을 만든 형태이다. 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.



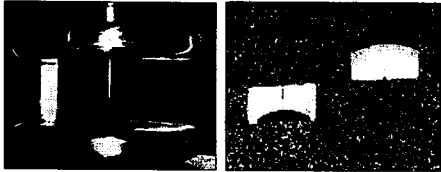
(a) 실험장치 BLOCK 다이어그램



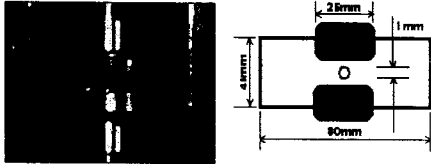
(b) 분석과 측정을 위한 소프트웨어

그림 1 PRPDA와 CAPD의 측정시스템과 소프트웨어

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



(a) 공기중 침 결합 (b) XLPE의 침 결합

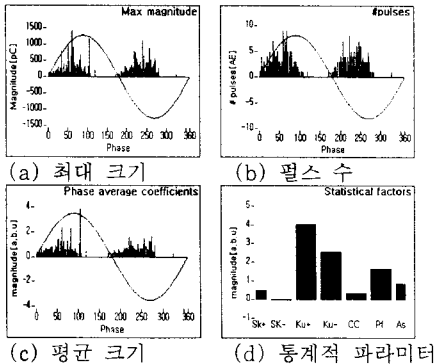


(c) 에폭시 절연체에서의 침 결합
그림 2 절연물질 안에 있는 결합들의 모델링

3. 분석 결과

3.1 PRPDA의 분석결과

PRPDA로 분석한 결과의 한 예로써, XLPE 전력케이블 절연체 안에 삽입한 침에서 발생된 PD를 기존에 사용하던 파라미터들(ϕ -q-n)로 분석한 결과와 인가전압의 위상에서의 관계를 그림 3에 요약하였다. 이러한 PRPDA 분석 패턴은 여러 문헌들을 통해 이미 알려진 바 있으며 본 실험을 통해서도 유사한 패턴을 얻었다 [1-3]. 본 논문의 경우, 부분방전 개시 후 인가전압의 연속된 300주기(60Hz, 5초)동안 검출된 결보기 방전 전하량을 일정한 위상구간(300/주기)에 중첩시켜 분석하였다. PRPDA 결과를 이용하여, 통계적인 파라미터들과 인가전압에 따른 방전의 분포패턴으로부터, 결합형태의 구분이 가능함이 밝혀진 바 있다[3]. 그러나 이러한 방법은 펄스들이 유한하게 고정된 인가전압의 위상구간 내에서 중첩되어지므로, 연속적인 펄스들 사이의 관계에 대한 정보는 얻을 수 없음을 여러 문헌들을 통해 알려진 바가 있고, PRPDA의 본질적인 알고리즘으로부터도 명백하다[5].



(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 연이어 발생되는(consecutive) PD펄스와 이때의 인가전압(V_i)을 주 관심 대상으로 한다. 방전 발생 시 펄스들은 60Hz의 경우 5초 동안 인가전압의 300개의 연속적인 주기를 측정하였다. 특별히 P_i 와 V_i 의 카오스적 특징들은 2차원 끌개와 위상 공간 안에서의 푸앵카레 단면을 구성함으로써 시각적으로 검토하였다[5]. 2차원 끌개와 푸앵카레 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 -1과 1사이의 값으로 표준화(normalize)한다. 그러므로 펄스가 발생되는 인가 전압들의 차이 V_i 는 -2와 2사이에서 얻어질 수 있다.

$$v_{ip}^* = \frac{(v_{ip} - \overline{v_{ip}})}{(v(t)_{\max} - v_{ip})} \quad \dots(1)$$

v_{ip}^* : PD가 발생하였을 때의 표준화된 인가전압

v_{ip} : PD가 발생하였을 때의 인가전압

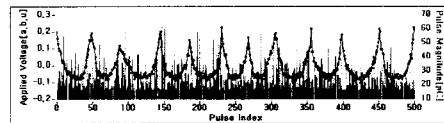
$\overline{v_{ip}}$: v_{ip} 의 평균값

$v(t)_{\max}$: 최대 인가전압

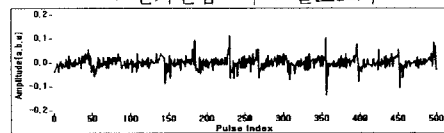
이후, 1차원 시계열 데이터 V_i 는 더욱 큰 차원의 위상 공간 안에서 경계구역에 수렴하는 서브셋의 존재, 즉 기이한 끌개를 찾기 위해서 위상 공간 재구성을 통해 매립할 수 있다[6-7]. 매립되어진 위상 공간 안의 푸앵카레 단면은 매립된 위상 공간 안의 X, Y, Z축에서 X축의 $x=0$ 을 지나는 Y, Z 평면의 점으로 표현된다. 다음절에서 결합에 따른 V_i 의 고유한 특성에 대해 검토하기로 한다.

3.2.1 공기 중에서의 침 결합

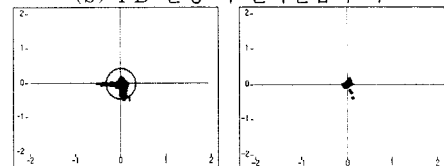
그림 4는 인가전압에 따른 PD펄스들의 전형적인 CAPD 패턴으로, 위상 공간 안에서의 침 결합으로부터 발생하는 신호의 특성을 보기 위한 2차원 끌개와 푸앵카레 단면을 나타내고 있다. 이 결과는 그림 1(b)에 보인 데이터로부터 산출되었다. 그림 1(b)에서 볼 수 있듯이, 대부분의 PD펄스는 인가전압의 음의 반주기 안에서 나타나고 있다. v_{ip}^* 와 V_i 의 값이 ± 0.3 까지 도달하지 못한 것을 그림 4(a)와 4(b)에서 볼 수 있는 것처럼, 이런 특징은 PD가 v_{ip}^* 와 전압차의 값 V_i 를 발생할 때 표준화된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



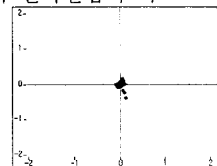
(a) 펄스와 인가전압과의 관계
→ : 인가전압 | : 펄스크기



(b) PD 발생 시 인가전압의 차



(c) 2차원 끌개



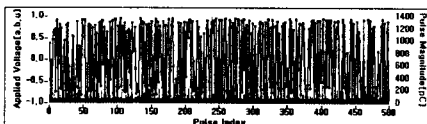
(d) 푸앵카레 단면

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

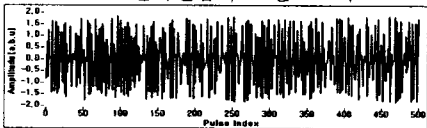
3.2.2 XLPE케이블 샘플 안에서의 침 결합

그림 5는 XLPE 케이블 샘플 안에서의 침 결합인 것

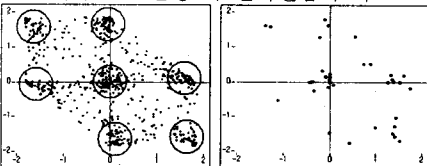
우의 CAPD 결과들을 보여주고 있다. 이런 결과들은 그림 3(a)에서 보여주는 데이터로부터 산출되었다. 그림 3(a)의 대부분의 펄스들은 위상공간 $0^\circ - 90^\circ$ 와 $180^\circ - 270^\circ$ 안에서 나타나지만 펄스들 사이의 관계는 명백히 추론할 수 없다. 대조적으로, 펄스들 사이의 관계를 그림 5(a)와 (b)에서 보인 것과 같이 CAPD의 결과는 나타내어질 수 있다. 특히, 그림 5(b)에서와 같이 PD 발생 시 표준화된 인가 전압에서의 대부분의 v_a 는 ± 1.5 까지 도달하게 된다. 이것은 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 규칙성들을 가지고 있다. V_1 의 쌍들 거의 대부분이 위상 공간 안의 표시된 원의 주위에 위치하고 있다. 또한, 푸앵카레 단면 안에서의 V_1 쌍들은 전 위상공간에 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
— : 인가전압 | : 펄스스키



(b) PD 발생 시 인가전압의 차

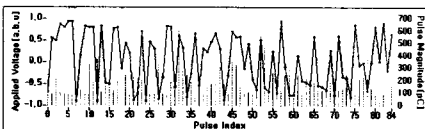


(c) 2차원 끌개 (d) 푸앵카레 단면

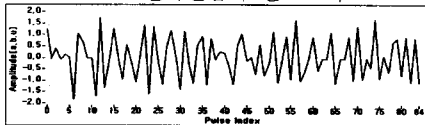
그림 5 XLPE 케이블에서의 침 결합에 대한 위상공간 안에서의 2차원 끌개와 푸앵카레 단면과 PD펄스의 전형적인 CAPD 패턴

3.3.1. 예폭시 절연체에서의 보이드

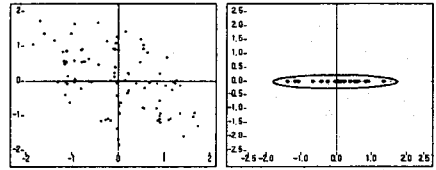
이 절에서는 예폭시 절연체 안에서의 전형적인 CAPD 패턴을 나타내고 있다. 펄스들의 수는 코로나 또는 XLPE 케이블 샘플의 경우보다 적게 나타나고 있지만, 몇 가지 규칙성이 그림 6에서 보여지고 있다. 특히 그림 6(d)의 푸앵카레 단면에서, V_1 의 쌍은 위상공간 안의 횡축을 따라 일렬로 나타난다. 이런 특징은 코로나와 XLPE 케이블 샘플 안의 결합과 명백히 구별될 수 있다.



(a) 펄스와 인가전압과의 관계
— : 인가전압 | : 펄스스키



(b) PD 발생 시 인가전압의 차



(c) 2차원 끌개 (d) 푸앵카레 단면

그림 6 예폭시 절연체에서의 침 결합에 대한 위상공간 안에서의 2차원 끌개와 푸앵카레 단면과 PD펄스의 전형적인 CAPD 패턴

4. 결론

본 논문에서는 연속적인 PD펄스를 CAPD기법을 통해 연구함으로써, PD펄스들간의 상관관계를 규명함은 물론, PD발생의 원인이 되는 결합의 종류를 판별할 수 있음을 확인하였다. 따라서, CAPD와 PRPDA기법을 함께 사용함으로써 좀 더 명확하게 PD 발생원인을 찾아낼 수 있으리라 여겨진다. 실험결과로부터 다음 몇 가지 결론을 내릴 수 있다.

- ⓐ PRPDA의 결과를 이용하여, 다른 결합들의 발생을 인가전압의 위상공간과 관련되어진 PD 펄스들의 분포 패턴으로 구별할 수 있다. 하지만 연속적인 펄스들 사이의 상호관계는 제한한 CAPD 방법으로 명확한 분석이 가능하리라 여겨진다.
- ⓑ 2차원 끌개와 푸앵카레 단면의 결과로부터, 위상공간 안의 연속적인 펄스들의 상호관계를 통해 전력기기 안에서의 PD발생의 근원을 구별할 수 있는 방법으로 사용할 수 있다고 사료된다.
- ⓒ 마지막으로, 전력기기로부터 발생하는 PD현상은 단지 그 불규칙한 특성만을 보이는 것이 아니라, 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

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

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