

카오스이론을 이용한 GIS 내부 절연결함 판별

임윤석*, 이동일*, 구자윤**, 김정태***, 방항권****

*한국전력공사 전력연구원, **한양대학교, ***대진대학교, ****한국전력공사 중앙교육원

Discrimination of insulation defects in a Gas Insulated Switchgear (GIS) by use of a neural network based on a Chaos Analysis of Partial Discharge (CAPD)

Yunseok Lim*, Dongil Lee*, Jayoon Koo**, Jeongtae Kim***, Bang Hang-kwon****

*KEPRI, **Hanyang Univ., ***Daejin Univ., ****KEPCO

Abstract – In this work, experimental investigation has been mainly done. For this purpose, UHF sensor has been designed and fabricated to detect the partial discharges produced from the 10 artificial defects introduced into the real scale 70kV GIS mock-up under the high voltage at the well shielded room. And also, in order to verify the applicability of the proposed method at the site, the proposed CAPD (chaos analysis of partial discharge) is combined with spectral analysis method in order to identify the nature of the above 10 defects. The PD pattern recognition of each defect has been fulfilled by applying self developed artificial neural network soft ware. The result shows that the recognition rate is reached to be 80% by newly proposed method while the traditional PRPD analysis method leads us to obtain 41%. In consequence, it can be pointed out that the proposed method seems likely to be applicable to the real GIS at the site.

1. 서 론

국내 계통운전전압이 점진적으로 상향되고 용량이 대용량화 되어가고 있는 가스절연개폐장치(GIS: gas insulated switchgear)의 절연관련사고 빈도가 증가됨에 따라 신뢰성 있는 GIS 절연진단기술의 상용화가 시급하다. 특히 절연결함원인을 판별해 내는 기술은 GIS 절연진단기술의 핵심기술로서 원천기술 확보가 시급히 요구되고 있다. 이를 위해 부분방전을 측정하여 분석하는 방법이 주로 사용되고 있으며, 현장에 설치되어 운용중인 GIS의 절연상태 진단에 사용되는 부분방전 분석방법은 PRPD(phase resolved partial discharge) 분석방법이 주로 사용되어 왔다[1-5].

이 방법은 부분방전 현상을 단순한 패턴으로 가정하고 있으나, 본 연구에서는 다양한 물리적 파라미터들에 의해 결정되는 결정론적역학계라고 설정하여, 결정론적역학계를 해석하기 위한 방법 중의 하나인 카오스 이론을 적용한 CAPD(chaos analysis of partial discharge) 분석방법을 제안하였다[6-9].

특히 3상 일괄형 GIS 와 같이 현장에서 전원전압의 정확한 위상을 측정할 수 없는 경우에는 기존의 PRPD 분석방법의 적용결과에 대한 신뢰성이 논란의 대상이 되고 있다. 본 논문에서는 이러한 기존 PRPD 분석의 취약점을 보완할 수 있는 더욱 효과적인 부분방전 패턴분석 및 결합판별이 가능한 새로운 분석방법의 개발에 중점을 두었다.

2. 본 론

2.1 CAPD 분석 개념

CAPD 분석방법은 세 개의 기본 파라미터(방전 폴스 크기 P_t , 방전발생시 인가전압의 크기 v_{tp} , 및 연속된 방전 발생 시간 차 Δ_t)를 정규화(normalization)하여 차분(differentiation)한 값을 사용하는데 본 논문에서는 이를 기본파라미터의 정규화 차분된 값을 NDQs (normalize differenced quantities)라 하였다. NDQs는 정규화한 연속적인 PD펄스 크기의 차이(P_t), 서로 다른 두 개의 PD가 발생했을 때의 인가전압 차이의 정규화량(V_t), 그리고 정규화한 두 펄스 사이의 발생시간 차이(T_t)이다. P_t , V_t , 및 T_t 는 카오스분석에 기초적인 파라미터로 사용되며, 발생되는 PD펄스 사이의 상관관계는 이를 바탕으로 규명될 수 있다. CAPD분석에 사용되는 기본 파라미터는 그림 2.1과 같다. 여기서 V_t 는 전원전압의 위상을 파악할 수 없는 경우에는 사용할 수 없으며, 이 경우 T_t 와 P_t 만으로도 분석 가능하다.

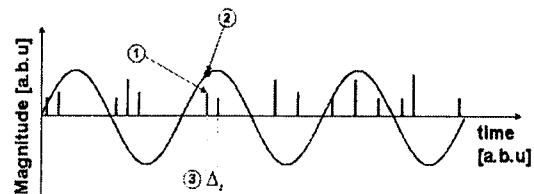


그림 1 CAPD 분석을 위한 기본 파라미터.
Fig. 1 Basic parameters for CAPD analysis.

상기 언급된 기본 파라미터로부터 정규화 및 차분(differentiation)을 시행하고 NDQs를 계산해 내는 과정은 그림 2의 블록다이어그램에 요약되어 있으며 본 논문에서는 각 결합에 따른 부분방전 패턴을 분리해내는 연구를 위해 2차원 끌개를 주로 사용하여 패턴분류 연구를 수행하였다.

식 (1)-(3)은 본 연구를 통해 제안된 식으로서 각각의 기본 파라미터(P_t , v_{tp} , 및 Δ_t)를 이용하여 식에서 보인 범위의 값을 정규화하기 위해 이용되었다. 특히, 인가전압의 크기는 음의 인가전압 크기를 표현하기 위하여 $-1 \leq v_{tp}^* \leq 1$ 값을 취하도록 정규화 하였으며, 펄스 크기와 발생시간의 차이는 0과 1사이의 값을 취하도록 하였다. 이러한 정규화 과정은 서로 다른 환경에서 진

행되는 실험에서도 표준화된 실험결과를 얻기 위해서 반드시 필요한 과정으로서, 이 과정이 생략된다면 서로 다른 환경에서 실험된 결과에 대한 신뢰도가 매우 작아지게 된다.

$$v_{vp}^* = \frac{v_{vp}}{v(t)_{\max}}, \quad (-1 \leq v_{vp}^* \leq 1) \quad (1)$$

$$p_t^* = \frac{p_t - p_{t\min}}{p_{t\max} - p_{t\min}}, \quad (0 \leq p_t^* \leq 1) \quad (2)$$

$$\Delta_t^* = \frac{\Delta_t}{\text{time[sec] of 1 cycle}}, \quad (at 60 Hz, 1 \approx 16.67 \text{ ms}) \quad (3)$$

여기서,
 v_{vp}^* , p_t^* , Δ_t^* : 정규화 된 기본 파라미터

v_{vp} : 방전 발생시 인가전압의 크기

v_{vp} : 방전발생시 인가전압의 크기

Δ_t : 연속된 방전 발생 시간 차

$p_{t\min}$: 측정된 방전 펄스 중 최소 값

$p_{t\max}$: 측정된 방전 펄스 중 최대 값

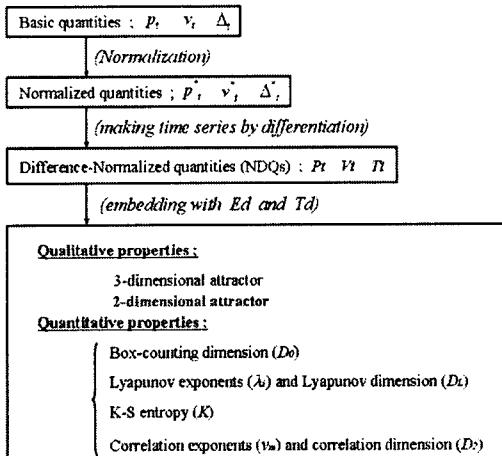


그림 2 CAPD 분석 블록 다이어그램.

Fig. 2 Block diagram of CAPD analysis.

식 (4) ~ (6)은 식 (1) ~ (3)에서 정규화한 양을 가지 고 차분을 시행한 것으로 NDQs 값이 된다. 따라서 이 후의 카오스 이론에 바탕을 둔 해석은 NDQs 양을 이용 하여 위상공간 재구성(phase space reconstruction, embedding)을 통하여 상관관계 분석을 수행하고 상자세 기차원 (box-counting dimension), 리아프노프차원 (Lyapunov dimension), 상관차원(correlation dimension) 등의 비선형지수(nonlinear parameters)를 이용하여 역학 적인 분석을 수행할 수 있다. 단, 본 논문에서는 역학적 인 분석보다는 절연결합에 따른 부분방전 패턴을 효과적 으로 분류할 수 있도록 위상공간 재구성과 이를 이용한 신경망 입력패턴구성에 대해서만 설명한다.

$$V_t = v_{vp}^* - v_{vp}^{*-1}, \quad (-2 \leq V_t \leq 2) \quad (4)$$

$$P_t = p_t^* - p_{t-1}^*, \quad (-1 \leq P_t \leq 1) \quad (5)$$

$$T_t = \Delta_t^* = \frac{\Delta_t}{\text{time[sec] of 1 cycle}}, \quad (at 60 Hz, 1 \approx 16.67 \text{ ms}) \quad (6)$$

여기서,

V_t : 정규화된 방전펄스 발생시 인가전압 차이

P_t : 정규화된 방전펄스 크기의 차이

T_t : 정규화된 두 방전펄스사이의 발생시간 차이

n : 정규화된 파라미터의 순서

2.2 부분방전 실험장치 구성

GIS내부에서 발생되는 부분방전 신호를 검출하기 위한 GIS 부분방전 측정 및 분석시스템을 자체 설계하고 제작하였다. 본 시스템은 측정용 하드웨어 및 하드웨어를 컨트롤하기 위한 소프트웨어 및 분석용 소프트웨어로 구성하였다. 그럼 4.1에는 본 연구를 통하여 구축된 GIS 부분방전 측정 및 분석 시스템의 블록선도를 보였 다.

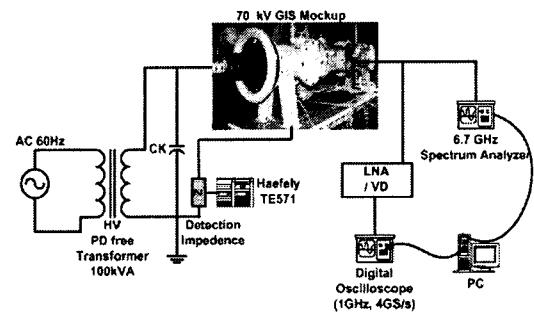


그림 3 GIS 부분방전 측정 및 분석 시스템.

Fig. 3 Detection and analysis system for GIS partial discharge.

그림 3의 70 kV 실규모 GIS는 고압부성, 실험용 첨부 및 2개의 스페이서와 4개의 감시창과 내부도체(busbar)의 직경은 80 mm이며 외함(enclosure)의 직경은 270 mm로 제작되었다. GIS 내부의 SF₆ 가스 압력은 3 kgf/cm² 이 유지되었으며 절연 결합이 없는 상태에서 인가전압 60 kV 일 때 배경잡음은 2 pC 이하임을 확인하였다. 제반 실험을 위한 전압 인가방법은 10분에 1 kV 씩 증가시켜 가면서 최초로 부분방전이 검출되면 전압증가를 중지하고 초고주파 방식 및 IEC60270방식으로 5시간 이상 지속적으로 측정하였다.

초고주파 부분방전을 검출하기 위하여 자체 제작한 초고주파 내장형 센서를 사용하였으며 RG400(50Ω) 이중 차폐 동축 케이블을 사용하여 신호를 전송하였으며, 센서출력을 실시간(real time)으로 pC 단위로 변환 하는 것이 현실적으로 곤란하므로 방전량 비교를 위해 IEC60270 방식으로 측정하는 HAFLEY TE571™ 장비로 동시에 측정하여 참고 데이터로 활용하였다.

부분방전 신호를 A/D 변환하고 시간영역에서 관찰하기 위하여 디지털 오실로스코프(LC574AL, bandwidth 1GHz, 2 GS/sec)를 사용하였으며 주파수 영역에서 부분방전 신호를 관찰하기 위해서는 스펙트럼 분석기(Agilent E7402A, 30Hz ~ 6.7 GHz)를 사용하였다. 오실로스코프와 스펙트럼 분석기를 제어하고 획득된 데이터를 컴퓨터로 전송하기 위해 NI™-GPIB(general purpose interfacing board, 최대 데이터 전송속도: 4 Ms/sec)를 사용하였다. 데이터를 분석하고 저장하는 모든 과정은 자체 구축한 소프트웨어를 사용하였으며 외부잡음의 영향을 최대한 배제하기 위하여 모든 실험은 전자차폐실 내부에서 수행 하였다.

2.3 절연결합

다양한 종류의 절연결합을 부분방전 패턴을 이용하여 분류해 내기 위해서는 실험실 내에서의 기본적인 패턴

분류 작업이 필수적이다. 따라서 절연결합에 따른 전형적인 부분방전 패턴을 획득하기 위하여 GIS내부에서 발생 할 수 있는 5가지의 절연결합을 모의 제작하여 실험에 사용하였다.

CIGRE JWG 33/23.I2에서 권고하는 이물의 조건을 만족하도록 제작된 절연결합은 ①고압도체 및 외함고정 돌출부, ②단일 및 다중 자유 하전입자, ③전기적 부유전극, ④스페이서표면 부착이물, ⑤고압도체 삼중점 및 외함삼중점, ⑥스페이서 내부 절연결합 ⑦스페이서 내부 보이드 등으로서 그림 5에 보였다.

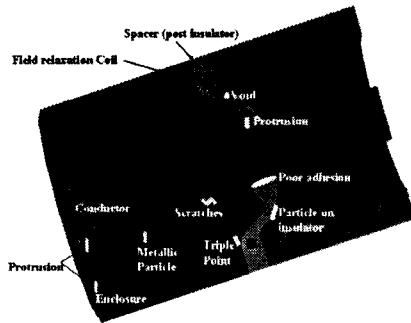


그림 5. 모의 절연결합.
Fig. 5 Artificial defects.

2.4 CAPD분석기법을 이용한 절연결합 판별 결과

CAPD특징벡터를 이용하여 부분방전 발생원을 분류한 결과 평균 약 80% 의 인식 성공률을 보였지만 외함 삼중점(ETP), 스페이서 표면 부착이물(SFP), 단일 자유하전입자(SFMP), GIS 외부코로나(EC) 및 모터 동작 잡음(MN)의 경우에 있어서는 80% 미만의 인식성공률을 보였고 PRPD만을 사용한 경우에 있어서보다 매우 우수한 결과를 보였다.

표 1 CAPD 특징벡터를 이용한 인식 성공률.
Table 1 Recognition rate by use of CAPD feature vector.

절연결합	패턴 수	인식성공률[%]	
		CAPD	PRPD
고압도체 고정 돌출부	100	86	43
고압도체 삼중점에 존재하는 금속 이물	100	89	34
외함고정 돌출부	100	87	42
외함 삼중점에 존재하는 금속이물	100	79	33
부유전극	100	86	35
스페이서 내부 절연이물	100	98	39
스페이서 표면 부착이물	100	67	33
단일 자유 하전입자	100	75	54
다중 자유 하전입자	100	83	65
스페이서 내부 보이드	100	93	38
GIS 외부 코로나	100	64	45
모터 동작 잡음	100	54	33
평균 인식 성공률	80.1	41.2	

3. 결 론

구축된 부분방전 측정 시스템과 제안된 분석방법의 현장 적용 연구를 통하여 얻은 결과의 요약은 다음과 같다.

- (i) 다양한 인위적 결합을 이용한 실험을 통하여 제안된 CAPD와 주파수 분석을 병행시킨 분석방법의 현장적용 가능성을 제시하였으며, 고전적인 PRPD 분석방법을 적용하여 분석결과를 상호 비교하여 CAPD/주파수 분석방법의 신뢰도가 높음이 확인되었다. 특히, 자유하전입자에 의한 부분방전 패턴은 위상특성이

거의 없어서 기존의 PRPD 분석법으로는 패턴 분석이 불가능했으나 CAPD/주파수 분석방법에서는 패턴분석이 가능하였다.

- (ii) 또한 자체 개발한 인공신경망을 이용하여 CAPD/주파수 분석방법과 PRPD 분석방법의 패턴인식 성공률에 대한 비교연구를 수행한 결과 CAPD/주파수 분석방법을 사용하였을 경우 약 80% 의 인식성공률을 보였으며 PRPD 분석방법을 동일한 데이터에 적용하였을 경우 약 41% 의 인식성공률을 보였다.

결론적으로 본 연구를 통하여 제안한 CAPD와 주파수 분석을 결합한 분석방법의 현장 적용이 가능하며, 3상 일괄형 GIS 와 같이 전원전압의 위상을 정확히 측정할 수 없는 경우에는 PRPD 분석방법보다 우수한 분석방법임을 실험실 및 현장적용을 통해 입증하고 신뢰성을 확보한 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Andrej KRIVDA, Recognition of Discharges - Discrimination and Classification (Delft University Press, Delft, Netherlands, 1995).
- [2] Dieter König and Y. N. Rao, Partial Discharges in Electrical Power Apparatus (VDE-Verlag, Berlin, Germany, 1993).
- [3] Erich E. Kunhardt and L. H. Luessen, Electrical Breakdown and Discharges in Gases(Plenum Press, New York, 1981).
- [4] F. H. Kreuger, Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment (Butterworth, New York, 1989).
- [5] M. Hoof and R. Patsch, IEE Proc.-Sci. Meas. Tech. 142, 95 (1995).
- [6] Yunsok Lim, A Proposed Method Identifying the Possible Insulation Defects in a Gas Insulated Switchgear (GIS) based on a Chaos Analysis of Partial Discharge (CAPD), Doctorial Thesis, Hanyang University, Korea, 2005
- [7] J. Koo, J. Yoon, Y. Lim, Y. Chang and C. Kang, "An investigation on the characteristics of self designed external UHF coupler used for the detection of the partial discharges in Gas Insulated Switchgear", Proceedings of 13th ISH, Millpress, Rotterdam, Netherlands, 2003
- [8] J. Koo, J.Yoon, Y.Lim, Y.Chang and C. Kang, "An investigation on the characteristics of self designed external UHF coupler used for the detection of the partial discharges in Gas Insulated Switchgear", 13th ISH 2003, Millpress, Rotterdam
- [9] Y. Lim and J. Koo, "Comparative Analysis of Partial Discharge Patterns from Different Artificial Defects by Means of Conventional Phase-Resolved Partial Discharge Analysis and a Novel Chaotic Analysis of partial discharge", Journal of the Korean Physical Society, Vol. 42, No. 6, pp. 755-764, 2003