

SF₆ 가스 중 직류 고전압 하에서 부분방전 특성

김민수¹, 김선재¹, 정기우¹, 조향은¹, 길경석^{1,a}

¹ 한국해양대학교 전기전자공학과

Characteristics of Partial Discharge Under HVDC in SF₆ Gas

Min-Su Kim¹, Sun-Jae Kim¹, Gi-Woo Jeong¹, Hyang-Eun Jo¹, and Gyung-Suk Kil^{1,a}

¹ Division of Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime and Ocean University,
Busan 606-791, Korea

(Received March 17, 2014; Accepted March 24, 2014)

Abstract: This paper dealt with the measurement and analysis of partial discharge (PD) under high voltage direct current (HVDC) in SF₆ gas. Electrode systems such as a protrusion on conductor (POC), a protrusion on enclosure (POE), a crack on epoxy plate and a free particle (FP) were fabricated to simulate the insulation defects. The analysis system was designed with a Time-Frequency (T-F) map algorithm programed based on LabVIEW. This can arrange the acquired PD pulses into frequency and time domain. A HVDC power source is composed of a transformer (220 V/50 kV), a diode (100 kV) and a capacitor (50 kV, 0.5 μF). The gap between the electrodes is 3 mm, and the SF₆ gas was set at 5 bar. PD pulses were detected by a 50 Ω non-inductive resistor. In the analysis, PD pulses were distributed below 0.5 MHz and 20 ns ~ 35 ns for the POC, 0.7 MHz ~ 1.7 MHz, below 0.6 MHz and 10 ns ~ 40 ns and 60 ns ~ 125 ns for the POE, below 0.1 MHz and 135 ns ~ 215 ns for the crack, and below 1.6 MHz and 250 ns for the FP.

Keywords: Partial discharge (PD), High voltage direct current (HVDC), SF₆ gas, T-F map, Electrode systems

1. 서론

급증하는 전력수요에 대응하고 전력수송비 절감, 전력공급의 신뢰도 향상 등을 위하여 전력계통의 초고압·대용량화가 개발되고 있다. 최근 태양열, 풍력 등 신재생 에너지의 활용과 스마트 그리드에 대한 관심이 증대되면서 직류 고전압 (HVDC) 송전에 대한

연구가 활발히 진행되고 있다. 장거리 송전 시 HVDC 방식은 전력손실이 적고 교류에 비해 절연이 용이하며, 주파수가 다른 국가와 계통연계가 가능하여 점차 그 수요가 증가하는 추세이다 [1-4].

현재 미국과 유럽 등 선진국에서 신재생 에너지의 도입과 국가 간 계통연계를 위해 HVDC의 적용을 추진 중에 있으며, SIEMENS, ABB 및 ALSTOM과 같은 제조사를 중심으로 기술개발이 활발히 진행되고 있다. 국내에서도 제주-해남 간 HVDC 송전이 진행 중이며, 동북아 전력계통 연계 등의 중장기 계획이 수립되고 있다 [5].

외국의 경우 송전뿐만 아니라 HVDC에서 사용되는

a. Corresponding author; kilgs@kmou.ac.kr

전력설비의 진단기술에 관한 연구도 활발하게 진행되고 있지만, 국내에서는 이제 관심을 갖기 시작했다. 전력설비 진단에 부분방전측정법이 주류를 이루고 있으며, 교류에서는 정현파 위상과의 상관관계를 이용하는 PRPD (phase resolved partial discharge) 분석법이 적용되고 있다. 그러나 직류에서는 위상이 없으므로 PRPD 분석법의 적용이 불가능하므로 이에 대한 새로운 연구가 필요하다 [6,7].

본 논문에서는 HVDC에 사용되는 전력설비 진단기술 개발을 목적으로 SF₆ 가스 중 절연 결함을 모의하고, 검출된 부분방전 펄스를 시간 영역과 주파수 영역으로 분석하여 결함별 특징을 도출하였다.

2. 실험 방법

2.1 전극계

전력설비의 절연결함은 제조과정에서 이물질의 혼입, 전기적·기계적 스트레스 및 기타 환경적 요인에 의해 발생되며, 결함의 종류에 따라 부분방전의 발생 패턴이 다르게 분석된다 [8,9]. 전력설비에서 발생 가능한 결함을 모의하기 위하여 도체 돌출 (protrusion on conductor, POC), 외함 돌출 (protrusion on enclosure, POE), 크랙 (crack), 자유입자 (free particle, FP) 형태의 전극계를 그림 1과 같이 제작하였다.

전극계는 지름 125 mm, 높이 86 mm인 원기둥의 밀폐형 구조이며, SF₆ 가스를 최대 6 bar까지 봉입할 수 있다. 코로나를 방지하기 위하여 직류 고전압이 인가되는 접속부 상부에 직경 30 mm의 구개를 설치하였다.

(a)와 (b)는 전력설비 내부의 도체 및 외함 돌출 결함을 모의한 것으로 전극계 내부에 사용된 침 전극은 곡률 반경이 10 μm이며, 평판전극은 지름 80 mm, 두께 10 mm로 가장자리를 둥글게 제작하여 전계 집중을 방지하였다. (c)는 절연물에서 발생한 크랙을 모의한 것으로 평판전극은 도체 돌출과 외함 돌출에 사용된 전극과 동일하며, 고체절연물은 직경 70 mm, 두께 5 mm의 에폭시를 사용하였다. (d)는 자유입자로 인한 결함을 모의한 것으로 입자의 직경은 1 mm로서 구 형태의 알루미늄을 사용하였으며, 하부전극을 오목하게 하여 입자의 자유운동이 용이하도록 설계하였다.

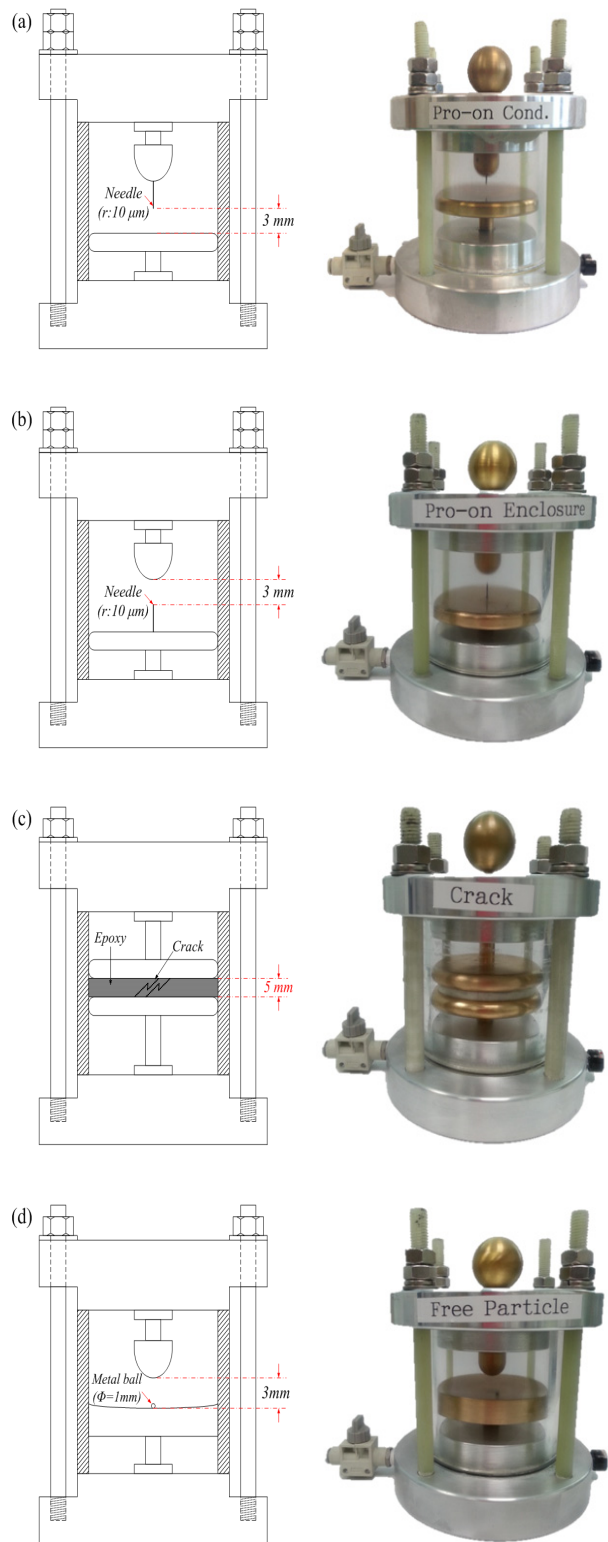


Fig. 1. Electrode systems. (a) POC, (b) POE, (c) crack, and (d) FP.

2.2 분석 시스템

직류는 교류와는 다르게 위상이 없기 때문에 PRPD 분석법을 적용하는 것이 불가능하다. 그러나 T-F map을 사용하면 부분방전 펄스를 시간 영역과 주파수 영역으로 분포시켜 결합의 특징을 분석할 수 있다 [10-12]. 부분방전 펄스의 신호처리로 식 (1)과 같이 정규화 과정을 수행하였다 [13].

$$\tilde{s}(t) = s(t) / \left(\sqrt{\int_0^T s(t)^2 dt} \right) \quad \because s(t) \in [0, T] \quad (1)$$

식 (2)와 식 (3)의 표준편차 수식을 이용하여 측정된 신호를 이차함수로 나타내었으며, σ_T 와 σ_F 는 시간과 주파수 영역에서 신호의 표준편차이다.

$$\sigma_T = \sqrt{\int_0^T (t-t_0)^2 \tilde{s}(t)^2 dt} \quad (2)$$

$$\sigma_F = \sqrt{\int_0^\infty f^2 |\tilde{s}(f)|^2 df} \quad (3)$$

$\tilde{s}(f)$ 는 $\tilde{s}(t)$ 의 푸리에 변환으로 t_0 는 정규화된 신호의 무게 중심이며 식 (4)와 같이 표현된다.

$$t_0 = \int_0^T t \tilde{s}(t)^2 dt \quad (4)$$

상기 식을 이용하여 부분방전 펄스의 시간 및 주파수에 대한 특징을 보존하고 T-F map으로 분석하였다.

시스템은 RTOS (real time operating system)가 탑재된 고속 데이터 수집 장치와 LabVIEW로 설계한 T-F map 분석 프로그램으로 구성되며 그림 2와 같다. (a)는 front panel이며, (b)는 프로그램의 구성을 나타낸 것으로 6개 영역에서 신호 분석이 수행된다. (1)에서 입력포트를 지정하고, (2)에서 신호를 분석하기 위해 시스템을 설정한다. 데이터를 실시간으로 연속 처리하는 방식은 메모리의 소모가 많으므로 (3)에서 분석이 완료될 때까지 데이터 수집 장치의 내부 메모리에 데이터를 저장하도록 하였으며, 측정 시간을 줄이기 위하여 Fetch number of record 방식을 적용하였다. (4)에서는 저주파 성분을 제거하고 부분방전 신호만 처리하도록 하였으며, 저역 차단 주파수가 1 kHz인 디지털 고역 통과필터를 사용하였다. (5)에서는 메모리에

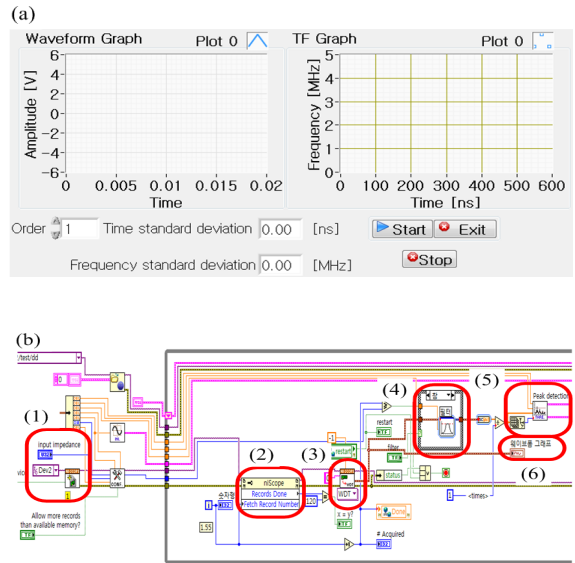


Fig. 2. Analysis program of PD pulses. (a) front panel and (b) block diagram.

저장된 데이터를 시간 영역에 맞추어 재배열한 후, 부분방전 펄스의 크기 및 발생 횟수를 측정하고, (6)에서 부분방전 신호를 T-F map으로 분석하였다.

2.3 실험계 구성

실험계는 그림 3과 같이 고압 변압기 (220 V/50 kV)와 다이오드 및 캐패시터를 사용하여 HVDC 전원을 구성하였다. 외부 노이즈의 영향을 최소화하기 위하여 차폐함 [1,020 mm(L) × 720 mm(W) × 760 mm(H)] 내부에 전극계를 설치하였으며, SF₆ 가스를 5 bar로 봉입하였다. 10,000:1의 분압기를 사용하여 인가전압을 측정하고, 50 Ω의 무유도 저항으로 전극계에서 발생하는 부분방전 펄스를 검출하였다.

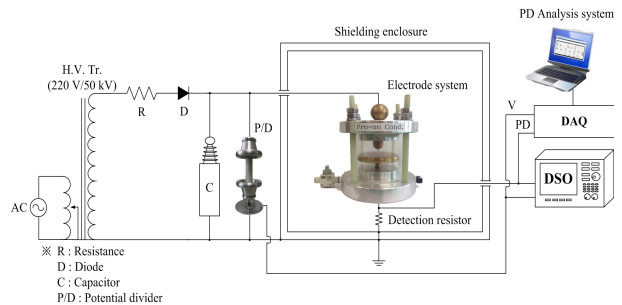


Fig. 3. Configuration of the experimental set-up.

3. 결과 및 고찰

도체 돌출에서 측정된 부분방전 펄스와 T-F 분석 결과를 그림 4에 나타내었다. 30 kV에서 펄스의 크기는 최대 52 pC, 발생 횟수는 2,410회가 측정되었다. T-F map 분석에서 부분방전은 주파수 성분 0.5 MHz 이하, 펄스폭은 20 ns ~ 35 ns 사이에 분포하였다.

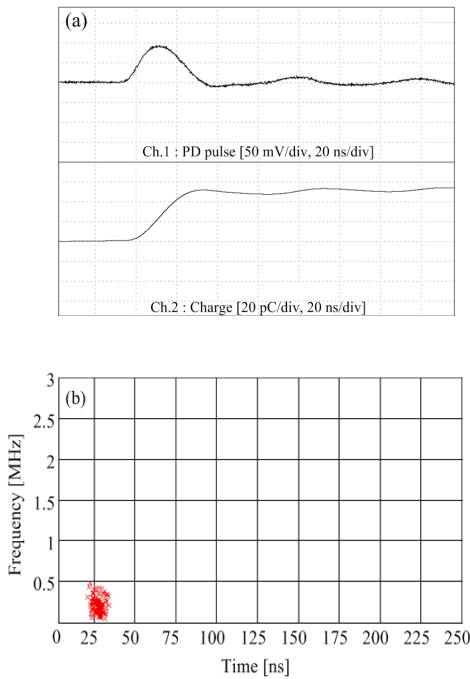


Fig. 4. PD pulses in POC (30 kV). (a) waveform and (b) T-F distribution.

외함 돌출의 분석 결과는 그림 5와 같으며, 30 kV에서 펄스의 크기와 발생 횟수는 최대 72 pC과 400회가 측정되었다. 펄스의 주파수 성분은 0.7 MHz ~ 1.7 MHz와 0.6 MHz 이하이며, 펄스폭은 10 ns ~ 40 ns와 60 ns ~ 125 ns에 각각 분포하였다.

크랙에서는 26 kV에서 부분방전 펄스가 검출되었으며, 그림 6에 나타난 것과 같이 펄스의 크기는 최대 150 pC, 발생 횟수는 196회이었다. T-F 분석 결과, 주파수 성분은 0.1 MHz 이하, 펄스폭은 135 ns ~ 215 ns 사이에 분포하였다. 주파수 성분이 낮게 나타난 이유는 절연물의 정전용량으로 인해 부분방전 펄스의 진동감쇄 때문인 것으로 판단된다.

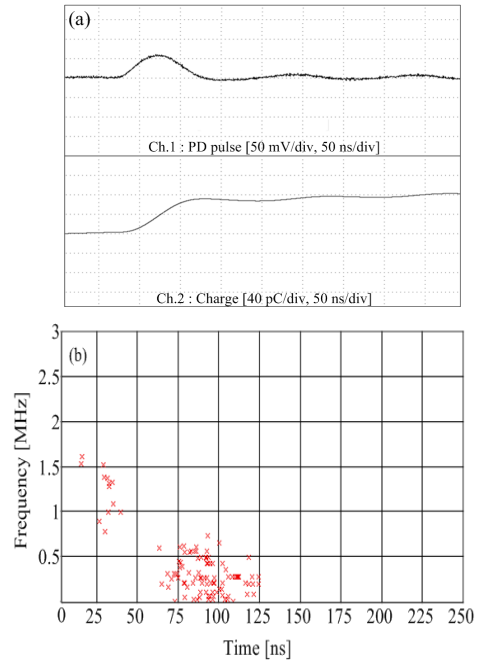


Fig. 5. PD pulses in POE (30 kV). (a) waveform and (b) T-F distribution.

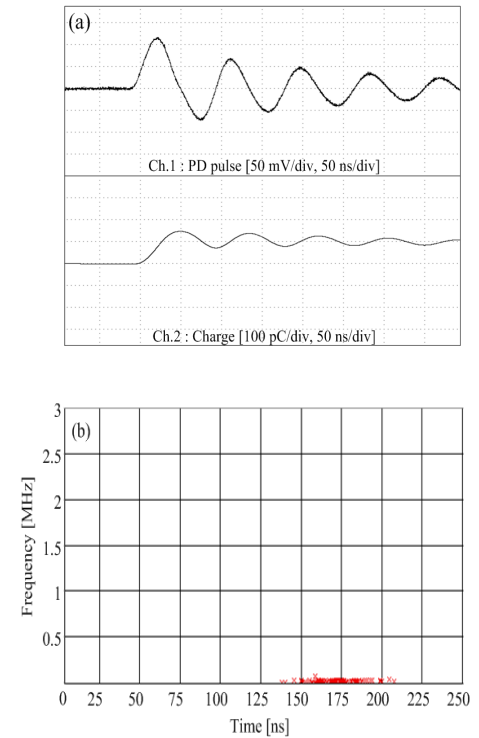


Fig. 6. PD pulses in crack (26 kV). (a) waveform and (b) T-F distribution.

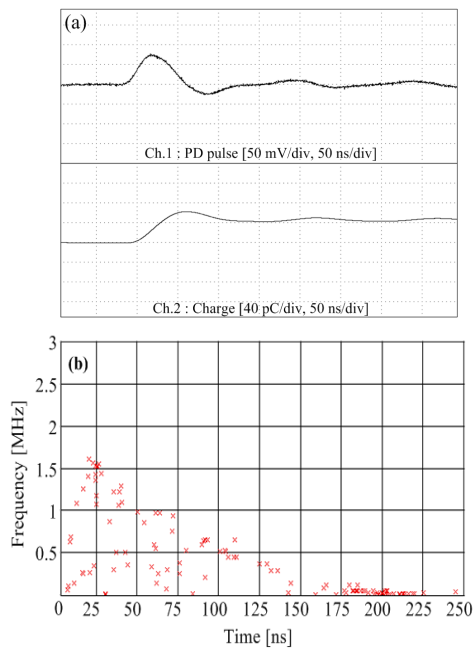


Fig. 7. PD pulses in FP (22 kV). (a) waveform and (b) T-F distribution.

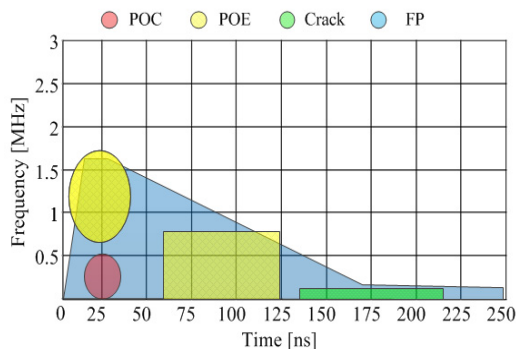


Fig. 8. T-F distributions depending on electrode systems.

자유입자의 측정 결과를 그림 7에 나타내었다. 22 kV에서 부분방전이 발생하였으며, 크기는 최대 62 pC, 발생 횟수는 199회로 측정되었다. T-F 분석 결과, 펄스의 주파수 성분은 1.6 MHz 이하, 펄스폭은 250 ns 이하에 분포하였다.

결함별 분석 결과를 그림 8에 나타내었다. 도체 돌출, 외함 돌출 및 크랙에서 발생하는 부분방전 펄스의 주파수 특성과 펄스폭은 서로 겹치지 않는 영역에서 클러스터가 형성되었으나 자유입자는 3가지 형태의 결함계를 모두 포함하는 영역에 분포하였다.

4. 결론

본 논문에서는 절연결함을 모의하기 위하여 4가지 형태의 전극계를 제작하였으며, 부분방전 펄스를 분석하기 위하여 T-F map 알고리즘을 설계하였다.

전극계에 SF₆ 가스를 5 bar로 봉입한 후, 직류 고전압을 인가하여 부분방전을 발생시켰으며, 전극계에 따른 부분방전 펄스를 시간 영역과 주파수 영역으로 분석하였다.

도체 돌출 전극에서 부분방전 펄스의 주파수 성분은 0.5 MHz 이하, 펄스폭은 20 ns ~ 35 ns 사이에 분포하였으며, 외함 돌출 전극의 주파수 성분은 0.7 MHz ~ 1.7 MHz 및 0.6 MHz 이하, 펄스폭은 10 ns ~ 40 ns와 60 ns ~ 125 ns에 각각 분포하였다. 크랙과 자유입자 전극계의 주파수 성분은 0.1 MHz 이하와 1.6 MHz 이하, 펄스폭은 135 ns ~ 215 ns와 250 ns 이하에서 분포하였다.

상기 결과로부터 전극계에 따른 T-F map의 클러스터가 각각 다르게 분석되므로 HVDC에서 사용되는 전력설비의 결함별 진단이 가능할 것으로 판단된다.

REFERENCES

- [1] H. Q. Niu, A. Cavallini, and G. C. Montanari, *Proc. IEEE Int. Symp. on Electrical Insulation*, 373 (2008).
- [2] R. Sarathi and G. Koperundevi, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **15**, 1724 (2008).
- [3] U. Schicher, M. Kuschel, and J. Gorablenkow, *Proc. Int. Symp. on High Voltage Engineering*, 136 (2013).
- [4] S. Meijer, P. D. Agoris, J. J. Smit, M. D. Judd, and L. Yang, *Proc. Int. Symp. on Electrical Insulation*, 416 (2006).
- [5] M. H. Yun and K. S. Kim, *Proc. the KIEE (World of Electricity) (KIEE, Seoul, Korea, 2014)* p. 52.
- [6] R. Sarathi, A. V. Giridhar, and K. Sethupathi, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **18**, 707 (2011).
- [7] J. J. Park, S. Y. Lee, and D. C. Mun, *J. KIEEME*, **19**, 942 (2006).
- [8] A. J. Reid, M. D. Judd, R. A. Fouracre, B. G. Stewart, and D. M. Hepburn, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **18**, 444 (2011).
- [9] G. S. Kil, I. K. Kim, D. W. Park, S. Y. Choi, and C. Y. Park, *Current Appl. Phys.*, **9**, 296 (2009).
- [10] A. Contin, G. C. Montanari, and A. Cavallini, *IEEE*

- Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **7**, 30 (2000).
- [11] A. Cavallini, G. C. Montanari, F. Puletti, and A. Contin, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **12**, 203 (2005).
- [12] A. Contin, A. Cavallini, G. C. Montanari, G. Pasini, and F. Puletti, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **9**, 335 (2002).
- [13] H. K. Cha, J. Y. Lee, D. W. Park, and G. S. Kil, *J. KIEEME*, **25**, 229 (2012).