

SF₆ 압력에 따른 결함별 부분 방전 펄스의 분포 분석

김선재¹, 조향은¹, 정기우¹, 길경석^{1,a}, 김성욱²

¹ 한국해양대학교 전기전자공학부

² (주)효성중공업 AM System TFT

Analysis on PD Pulse Distribution by Defects Depending on SF₆ Pressure

Sun-Jae Kim¹, Hyang-Eun Jo¹, Gi-Woo Jeong¹, Gyung-Suk Kil^{1,a}, and Sung-Wook Kim²

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

² AM System TFT, HYOSUNG Power & Industrial Systems, Changwon 642-712, Korea

(Received November 19, 2014; Accepted December 20, 2014)

Abstract: Electrode systems: a protrusion on conductor (POC), a protrusion on enclosure (POE), a crack in epoxy plate and a free particle (FP) were fabricated to simulate insulation defects in a gas insulated switchgear (GIS). SF₆ gas was filled in the electrode systems by 3 bar and/or 5 bar, respectively. Partial discharge (PD) pulses were detected through a 50 Ω non-inductive resistor. A calibration test was carried out according to IEC 60270, and the sensitivity was 0.25 pC/mV. PD pulses were distributed in the phase of 50°~135° and over 95% of them existed in the phase of 55°~120° for the POC. PD pulses were distributed in the phase of 230°~310° and over 90% of them existed in phase of 220°~300° for the POE. PD pulses occurred in the phase of 40°~60° and 220°~300° for the crack, and pulse counts were 25% higher in negative polarity than in positive polarity. PD pulses were distributed in every phase unlike to other three electrode systems and the peak magnitude was measured at 118° and 260° for the FP. As described above, PD pulses were observed in positive polarity for the POC, in negative one for the POE, in both one for the crack and the FP. In conclusion, it is expected that the identification rate of defect type can be improved by considering the polarity ratio of PD pulses on the PRPDA method.

Keywords: Electrode system, Insulation defects, Gas insulated switchgear (GIS), Partial discharge (PD), PRPDA, Polarity ratio

1. 서 론

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

Copyright ©2015 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

고전압 전력기기의 열화 또는 고장 징후로 부분 방전 (partial discharge, PD)이 발생하며, 이와 같은 현상을 조기에 검출 및 진단할 필요성이 있다 [1,2]. 특히 고전압 전력설비는 국가 기간산업뿐 아니라, 민수용에서도 매우 중요한 시설이기 때문에 전력기기의 사고는 인명피해, 경제적 손실 및 정보통신망에도 영

향을 주는 국가적으로 중차대한 사안이다. 특히, 대용량 초고압 변압기, 가스절연개폐장치 (GIS), 발전기 등은 단위 설비 당 공급전력이 매우 크기 때문에 고장 시 파급 영향이 광범위하므로, 이들 설비에 대한 진단 기술의 지속적인 연구 개발이 매우 중요하다 [3-5]. 전력설비 진단에는 여러 종류의 기술들이 적용되고 있으며, 그 중 PRPDA (phase resolved partial discharge analysis) 법은 부분 방전의 위상, 크기 및 발생 빈도를 분석한다 [6].

현재 국내의 많은 대학과 기업에서도 연구·개발이 지속적으로 이루어지고 있으며, 다양한 예방 진단 기술들이 제안되고 있다. 그러나 이러한 노력에도 불구하고, 현재 국내 전력설비 진단 및 부분 방전 측정의 외국 제품이 대부분을 차지하고 있는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 가스절연개폐장치에서 발생 가능한 각종 결함을 판별하기 위한 연구로서, SF₆ 가스 압력에 따른 결함별 PD 펄스의 분포를 분석하고, 기존 PRPDA법에 PD 펄스의 극성 비율을 고려하면 결함 인식을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

2. 실험 방법

2.1 전극계

전력 설비의 절연 결함은 제조 과정에서 이물질의 혼입, 전기적·기계적 스트레스 및 기타 환경적 요인에 의해 발생되며, 결함의 종류에 따라 부분 방전의 발생 패턴이 다르게 분석된다. 가스절연개폐장치의 사고는 제작, 운반 및 조립 과정 시 생성된 결함에 의해 발생되며, 대부분 설비 내부에서 나타나기 때문에 육안으로 확인하기 어렵다 [7-9]. 가스절연개폐장치에서 발생될 수 있는 결함을 모의하기 위하여 도체 돌출 (protrusion on conductor, POC), 외함 돌출 (protrusion on enclosure, POE), 크랙 (crack on epoxy plate), 자유 입자 (free particle, FP) 등의 전극계를 그림 1과 같이 제작하였다 [10,11].

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 구경을 설치하였다. (a)와 (b)는 전력설비 내부의 도체 및 외함 돌출 결함을 모의한 것으로 전극계 내부에 사용된 침전극은 곡률 반경 10 μm, 높이 5 mm, 지름 1 mm이며

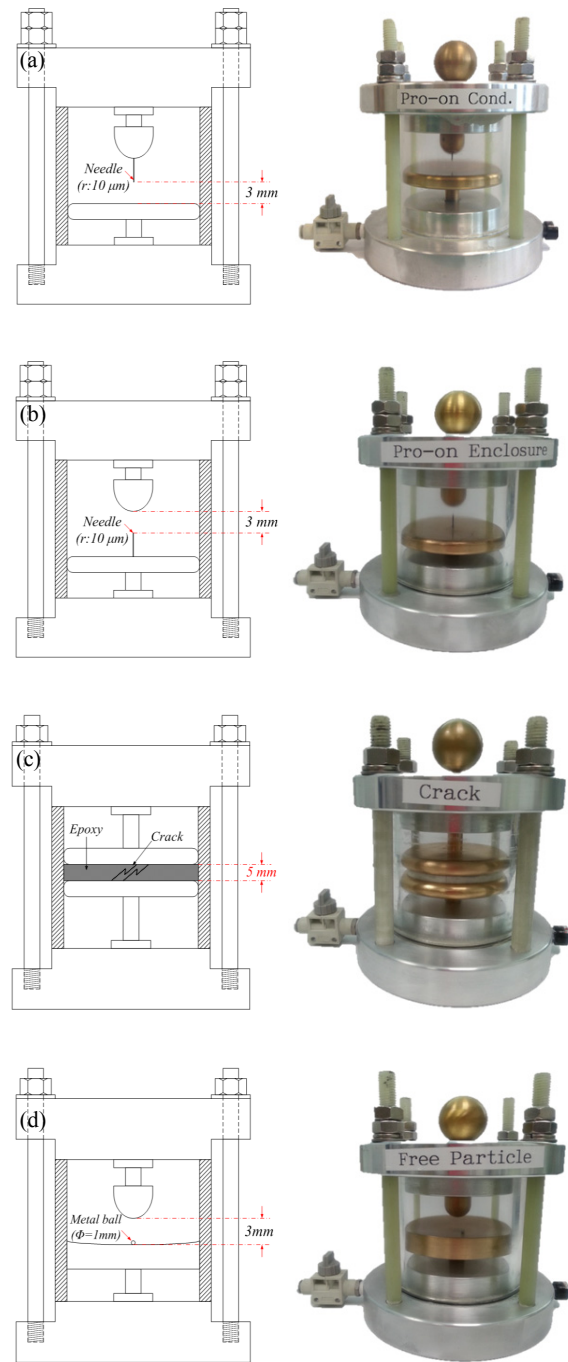


Fig. 1. Electrode systems. (a) POC, (b) POE, (c) crack, and (d) FP.

평판전극은 지름 80 mm, 두께 10 mm로 가장자리를 둥글게 제작하여 전계 집중을 방지하였다. 침과 평판 및 내부 구멍과의 거리는 3 mm이다.

(c)는 가스절연개폐장치의 스페이스에서 발생 가능한 크랙을 모의한 것으로 평판전극은 도체 돌출과 외함 돌출에 사용된 전극과 동일하며, 직경 70 mm, 두께 5 mm의 에폭시 고체절연물을 임의의 형태로 절단하여 접착시킨 구조이다. (d)는 자유입자로 인한 결함을 모의한 것으로 입자의 직경은 1 mm로서 구 형태의 알루미늄을 사용하였으며, 고압측과 저압측의 전극 간격은 3 mm이다. 하부전극을 오목하게 하여 입자의 자유운동이 용이하도록 설계하였다 [12].

2.2 실험계 구성

결함에 따른 부분 방전 펄스를 검출하고 패턴을 분석하기 위하여 그림 2와 같이 차폐함 (shielding enclosure)에서 실험을 수행하였다. 크기는 1,020 mm(L)×720 mm(W)×760 mm(H)이며, 내부에 전극계를 설치하고 고전압을 인가하였다.

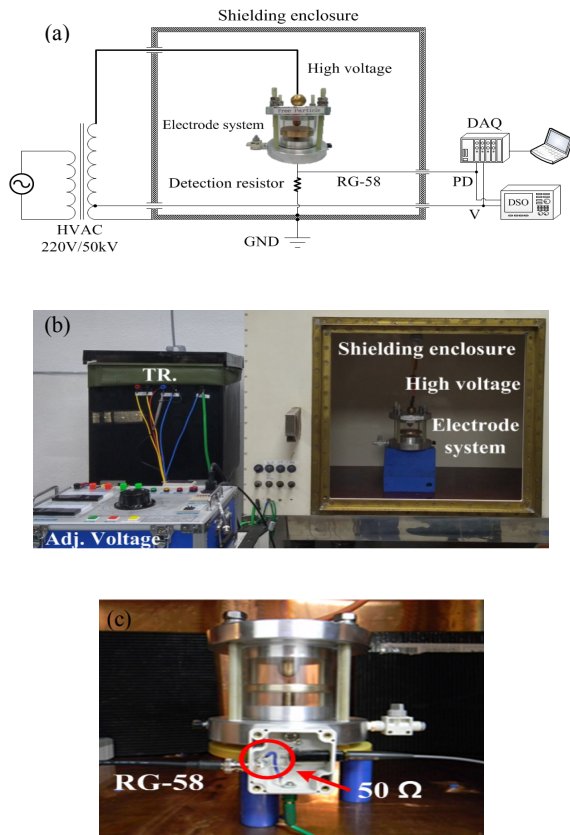


Fig. 2. Experimental set-up. (a) configuration, (b) photograph, and (c) detection resistor.

최대 출력전압 및 출력전류가 각각 50 kV, 30 mA 인 몰드형 고압 변압기를 사용하여 전압을 결함에 인가하였으며, 절연유에 함침(含浸)시켜 접속부에서의 코로나 발생을 방지하였다. 고압 변압기의 2차측에서 인가전압의 위상을 측정하였으며, 그림 2(c)에 나타낸 것과 같이 오차율 1%의 50 Ω 정밀저항을 전극계와 접지선 사이에 설치하여 PD 펄스를 검출하였다.

전극계에 최대 50 kV까지 전압이 인가되므로 고압 케이블과 차폐함 사이에 충분한 절연내력을 확보하기 위하여 에폭시 재질의 절연부를 제작하였다. 또한 직경 30 mm 황동 재질의 금구를 제작하여 고압 케이블과 전극계의 접속부에서 코로나가 발생하지 않도록 하였다. 겉보기 전하량을 측정하기 위하여 IEC 60270에 따라 표준펄스 발생기 (CAL1A, Power Dignostix Systems)로 교정 실험을 수행하였으며, 감도는 0.25 pC/mV이었다. 디지털오실로스코프로 2초 동안 부분 방전 펄스의 위상 분포를 누적한 후, 패턴을 분석하여 PRPDA 프로그램으로 동일하게 실험을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3 bar와 5 bar의 압력에 따른 PD 패턴의 특징을 분석하기 위하여 각각의 전극계에 SF₆ 가스를 밀봉하였다. POC의 압력별 PRPDA 결과를 그림 3에 나타내었다. (a) 3 bar에서는 50°~135° 구간에서 PD 펄스가 분포하였으며, 부극성에서는 거의 발생하지 않았다. PD 펄스는 최대 약 23 mV가 측정되었으며, 전하량은 5.75 pC이다. (b) 5 bar에서는 50°~130° 구간에서 클러스터가 형성되었으며, 3 bar와 동일하게 부극성에서는 발생되지 않았다. 부분 방전 펄스는 최대 약 38 mV가 측정되었으며, 전하량은 9.5 pC이다.

그림 4에 POE의 PD 펄스를 나타내었다. (a) 3 bar에서 최대 14.5 pC에 해당하는 58 mV가 측정되었다. (b) 5 bar에서는 PD 펄스가 최대 7.5 pC으로 분석되었다. 3 bar 정극성에서 PD 펄스가 12번 측정되었지만 POE는 대체적으로 230°~310° 구간의 부극성에서 분포하였다.

Crack은 POC 및 POE와 다르게 그림 5와 같이 정·부극성에서 PD 펄스가 분포하였다. (a) 3 bar에서 40°~60° 및 220°~300° 구간에서 PD 펄스가 형성되었으며, 크기는 6.25 pC이다. (b) 5 bar에서는 40°~60° 및 220°~250° 위상이며, PD 펄스의 크기는 28 mV로서 7 pC이다.

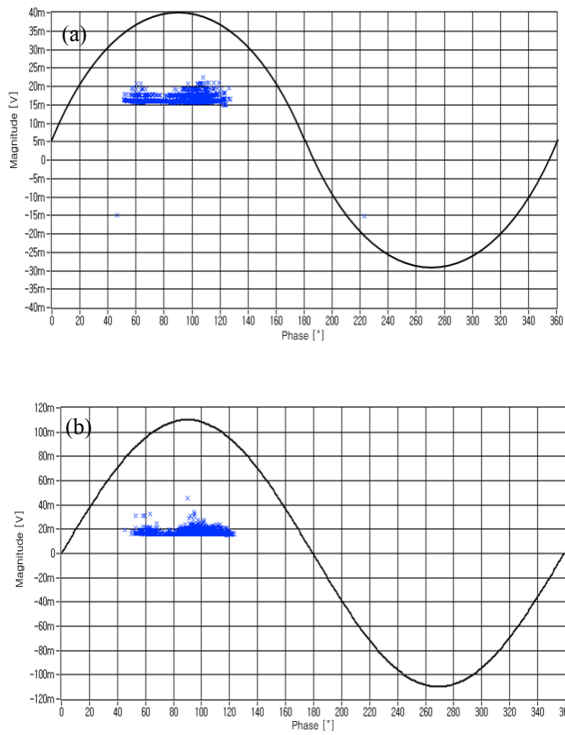


Fig. 3. PD pulse distribution in POC. (a) 3 bar at 8 kV, (b) 5 bar at 13 kV.

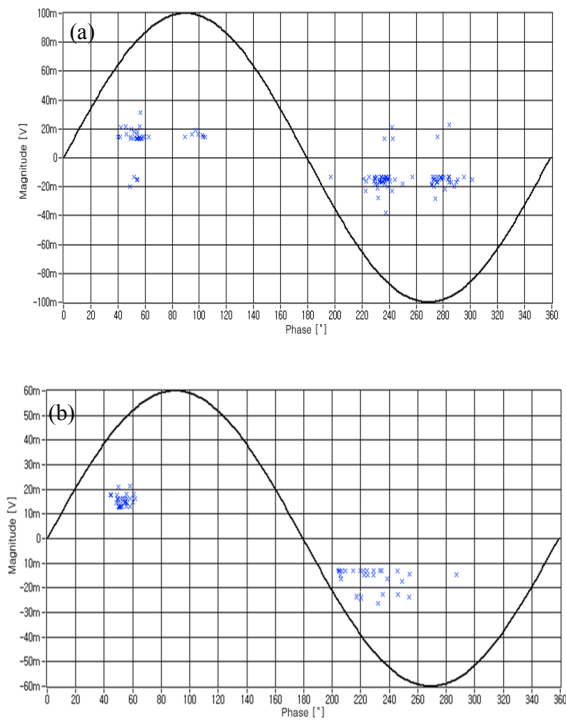


Fig. 5. PD pulse distribution in Crack. (a) 3 bar at 11 kV, (b) 5 bar at 20 kV.

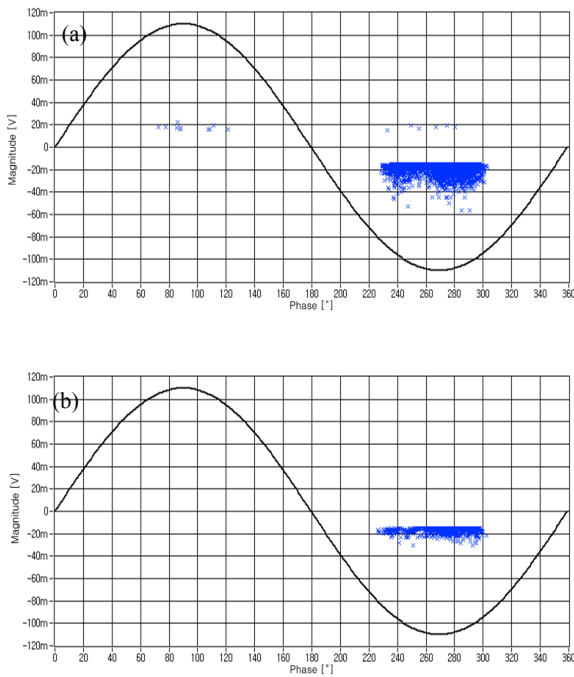


Fig. 4. PD pulse distribution in POE. (a) 3 bar at 9 kV, (b) 5 bar at 17 kV.

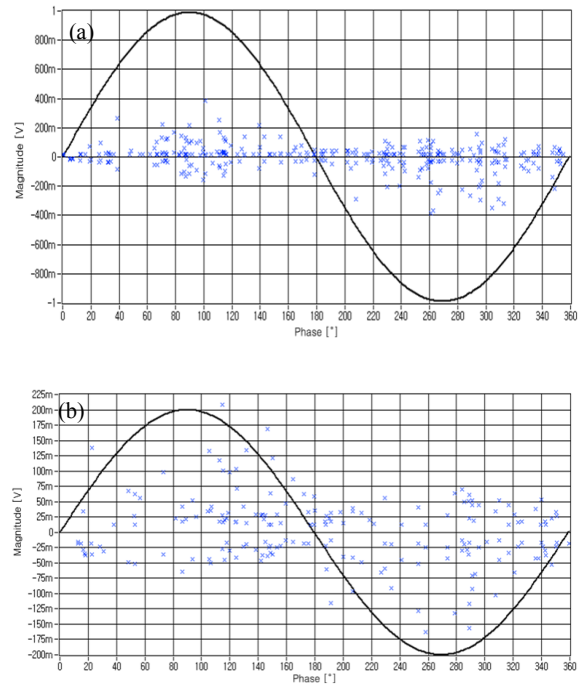


Fig. 6. PD pulse distribution in FP. (a) 3 bar at 11 kV, (b) 5 bar at 18 kV.

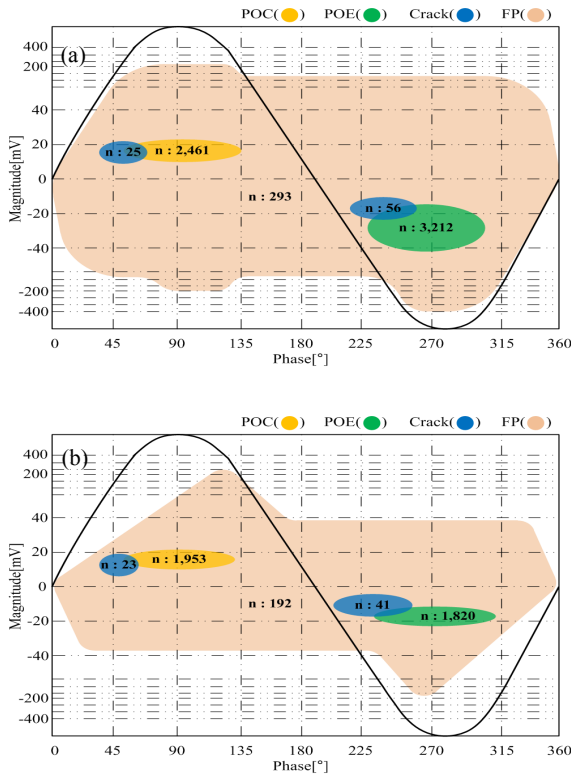


Fig. 7. Clusters of PD pulse depending on SF₆ pressure. (a) 3 bar, (b) 5 bar.

FP는 상기 3가지 전극계와 다르게 0°~360°의 전위 상에서 PD 펄스가 분포하였다. 최대 100 pC의 PD 펄스가 (a) 3 bar에서 측정되었다. (b) 5 bar에서는 최대 210 mV이며, 환산하면 52.5 pC의 전하량을 가진다. 4가지 전극계의 PD 클러스터를 그림 7에 나타내었다. 압력은 높아졌지만 각각의 전극계에 대한 위상분포는 유사하게 형성되었다. POC 및 POE는 침전극의 위치에 따라 정극성과 부극성에서 각각 명확하게 구별되었다. Crack은 정·부극성의 특정 위상에서만 발생하였으나, FP는 전위상에 분포하였다.

Table 1. Polarity rate of PD pulse by defect types.

Polarity rate Defect type	N _P /N _T (%)	N _N /N _T (%)
POC	98.66	1.34
POE	1.70	98.30
Crack	37.74	62.26
FP	49.87	50.13

* N : Number, N_T : Total, N_P : Positive, N_N : Negative

결함별 전체 PD 펄스 수에 대한 정극성과 부극성의 비율을 표 1에 나타내었다. POC와 POE는 정극성과 부극성에서 명확하게 구별되어 발생되며, 각각의 극성에서 PD 펄스의 분포 비율은 98% 이상이다. Crack은 전체펄스 중 부극성에서 62%가 나타나며, 정극성보다 약 25% 높게 발생한다. FP는 정·부극성에서 동일하게 분포하였다.

4. 결론

본 논문에서는 SF₆ 압력에 따른 결함별 PD 펄스의 분포를 분석하기 위하여 4가지 형태의 전극계를 제작하였다. SF₆ 가스를 3 bar와 5 bar로 봉입한 후, 최대 20 kV를 인가하여 PD를 발생시켰으며, POC, POE, crack 및 FP에 대한 PRPDA를 수행하고 PD 펄스의 극성 비율에 대해서도 분석하였다.

부분 방전펄스는 POC에서 50°~135°의 정극성에서, POE에서는 230°~310°의 부극성에서 측정되었다. POC와 POE에서는 정극성과 부극성중 한 극성에서만 형성되었으며, 이는 돌출을 모의한 침전극에서 전계가 집중되어 방전이 발생한 것으로 판단된다. Crack에서는 40°~60° 및 220°~300°의 정·부극성에서 모두 나타났으며, FP에서는 3가지 전극계와는 다르게 전(全) 위상에서 PD 펄스가 형성되었다. POC에서 전체 발생률 중 95% 이상이 55°~120°에서 분포하였다. POE에서는 235°~300°에서 PD 펄스의 발생률이 90% 이상으로 가장 많이 측정되었다. Crack에서는 부극성에서의 발생률이 정극성보다 25% 높았다. FP에서는 정·부극성에서 유사한 빈도로 분포하였고, 방전 전하량의 최댓값은 118° 및 260°에서 나타났다. 또한, SF₆ 압력이 증가함으로써 PD 클러스터의 위상은 다소 차이가 있지만, 극성률에 따른 전극계별 발생범위는 특정 위상에서만 분포하였다. 이와 같이 기존 PRPD 분석에 극성 비율을 고려하면 결함 인식률을 향상시킬 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 대학 ICT연구센터 육성지원사업의 연구 결과(NIPA-2014-H0301-14-1016)와 (주)효성의 대학협력 연구센터 (HULab) 사업으로 수행되었음.

REFERENCES

- [1] M. G. Choi and C. H. Cha, *KIEE*, **62**, 1297 (2013).
- [2] A. J. Reid, M. D. Judd, R. A. Fouracre, B. G. Stewart, and D. M. Hepburn, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **18**, 444 (2011).
- [3] G. S. Kil, I. K. Kim, D. W. Park, S. Y. Choi, and C. Y. Park, *Current Appl. Phys.*, **9**, 296 (2009).
- [4] N. C. Sahoo, M. M. A. Salama, and R. Bartnikas, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **12**, 248 (2005).
- [5] M. S. Naidu and V. Kamaraju, *High Voltage Engineering, 4th ed.* (McGraw-Hill, India, 2009) p. 364.
- [6] F. H. Kreuger, *Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment, the 1st ed.* (Butterworth-Heinemann, United Kingdom, 1989) p. 135.
- [7] A. H. Cookson, O. Farish, and G.M.L. Sommerman, *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, **PAS-91**, 1329 (1972).
- [8] A. Cavallini, G. C. Montanari, F. Puletti, and A. Contin, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **12**, 203 (2005).
- [9] J. S. Pearson, O. Farish, B. F. Hampton, M. D. Judd, D. Templeton, B. M. Pryor, and I. M. Welch, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **2**, 893 (1995).
- [10] N. Achatz, J. Gorablenkow, U. Schichler, B. Hampton, and J. Pearson, *ISEIMM*, **3**, 722 (2005).
- [11] T. Kato, F. Endo, and S. Hironaka, *Trans. IEE of Japan*, **122-B**, 1226 (2002).
- [12] M. S. Kim, S. J. Kim, G. W. Jeong, H. E. Jo, and G. S. Kil, *J. KIEEME*, **27**, 238 (2014).