

가스절연 구조에서 단일 부분방전펄스 분석에 의한 결함 판별

조향은, 김선재, 정기우, 길경석^a

한국해양대학교 전기전자공학과

Identification of Defect Type by Analysis of a Single PD Pulse in Gas Insulated Structure

Hyang-Eun Jo, Sun-Jae Kim, Gi-Woo Jeong, and Gyung-Suk Kil^a

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

(Received April 7, 2015; Revised April 23, 2015; Accepted April 24, 2015)

Abstract: This paper dealt with a defect identification algorithm which is based on single partial discharge (PD) pulse analysis in gas insulated structure. Four types of electrode systems such as a needle-plane, a plane-needle, a free particle and a crack inside spacer were fabricated to simulate defects in gas insulated switchgear (GIS). We measured single PD pulse by an oscilloscope with a sampling rate of 5 GS/s and a frequency bandwidth of 1 GHz. Data acquisition and signal processing were controlled by a LabVIEW program. Physical shapes of PD pulses were compared with kurtosis, skewness and time-based parameters as rising time, falling time and pulse-width. These parameters were analysed by an algorithm with a back propagation algorithm (BPA). By applying the algorithm, the identification rate was 97% for the needle-plane electrode, 96% for the plane-needle electrode, 91% for the free particle and 93% for the crack inside spacer. The results verified that the algorithm could identify the type of defects in GIS.

Keywords: GIS (gas insulated switchgear), PD (partial discharge), Single PD pulse, Identification algorithm, BPA (back propagation algorithm)

1. 서론

전력설비에서 발생하는 사고 및 인명피해를 예방하기 위하여 전력기기의 건전성 평가 및 분석에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다 [1]. 특히 가스절연개폐장치(gas insulated switchgear, GIS)는 단위 설비당 높은 전력을 공급하기 때문에 사고 예방을 위해 지속적

인 상태진단이 필요하다 [2,3].

GIS에서 사용되는 상태진단 기법으로는 전위 주파수의 위상과 부분방전펄스의 크기 및 발생 횟수를 기반으로 하는 PRPDA (phase resolved partial discharge analysis)와 주파수 분석에 대한 Wavelet 기법 등이 있다 [4,5]. 그러나 이들 방법은 측정에 많은 시간이 소요되고, 결함 원인의 판별에 전문가의 판단이 요구된다 [6].

기존 진단 방법을 개선하기 위하여 본 논문에서는 단일 부분방전펄스의 분석을 통해 단시간에 결함을 판별할 수 있는 지능형 알고리즘에 대하여 제안하였다.

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

2. 실험 방법

부분방전은 GIS의 제조 시 부주의로 인한 불순물 혼입, 운반중의 충격, 변형, 불완전 상태에서의 조립 및 절연열화 등 다양한 원인으로 발생된다. 부분방전펄스는 결함별로 고유한 특성을 가지고 있으며, 이를 분석함으로써 효율적인 진단이 가능하다. 따라서 GIS에서 발생하는 결함을 모의하기 위해 4가지 결함 전극계를 제작하였다. 단일의 부분방전펄스로 특징 파라미터를 분석할 수 있는 프로그램을 설계하였으며, 이를 기반으로 결함의 원인을 추론하였다.

2.1 결함 전극계

그림 1과 같이 침-평판(needle-plane, NTP), 평판-침(plane-needle, PTN), 자유 입자(free particle, FP) 및 스페이서 내부 크랙(crack inside spacer, CIS)의 결함 전극계를 설계 및 제작하였다. NTP는 GIS 내부 도체에 도전성 이물질이 부착되거나, 침단부가 생성된 경우로 곡률반경 5 μm, 길이 10 mm인 침 전극과 지름 80 mm, 두께 20 mm인 평판도체로 제작하였다. 침 전극과 평판전극 사이의 거리는 20 mm로 하였다.

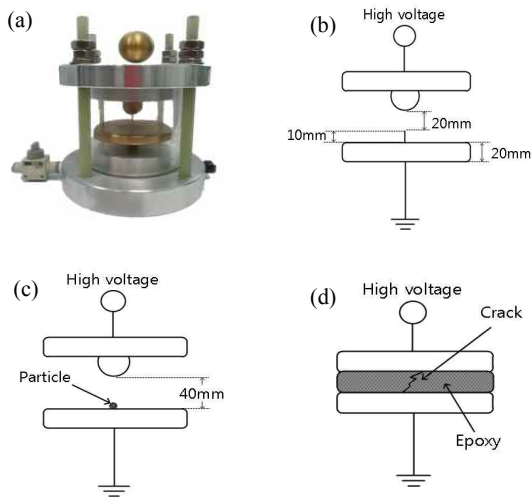


Fig. 1. Electrode systems. (a) needle-plane electrode, (b) plane-needle electrode, (c) free particle, and (d) crack inside spacer.

PTN은 GIS 외함 내측에 발생한 결함으로, 평판 전극 중심에 침전극을 고정하였다. FP는 외함이나 도체

의 일부분이 떨어져 도전성 입자가 떠다니는 것으로, 최대 길이 1 mm의 알루미늄 파티클을 제작하여 실험하였다. 상부전극과 하부전극 사이의 간격은 40 mm로 하고 전압인가 시 파티클이 전극계 내부를 부유하도록 하였다. CIS는 스페이서 에폭시 절연물에 외부 충격이나 전계 집중에 의해 균열이 발생한 것이다. 지름 80 mm, 두께 10 mm인 원형평판 에폭시 절연물을 임의의 충격으로 균열을 발생시키고, 다시 에폭시 본드로 재결합하여 전계가 집중되도록 설계하였다. 또한 전극계 내부에는 SF₆ 가스를 0.5 MPa로 충전하여 실제 GIS와 유사한 절연내력을 갖도록 하였다.

2.2 부분방전 펄스 분석 파라미터

결함의 종류를 판별하기 위하여 단일 펄스 파형을 분석하였다. 극성별로 50회씩 측정된 부분방전 펄스의 평균값을 신경망 알고리즘에 적용하였다.

부분방전펄스는 그림 2와 같이 감쇄 진동하는 형상으로 제 1 진동과 제 2 진동으로 구분하였다. 각 진동에서 상승시간(T_r)은 0%에서 최고치(V_{max})까지, 하강시간(T_f)은 최고치에서 0%까지로 정의하였다. 또한, 상승시간(T_r)과 하강시간(T_f)의 합을 진동폭(T_w)으로 하였다 [7,8].

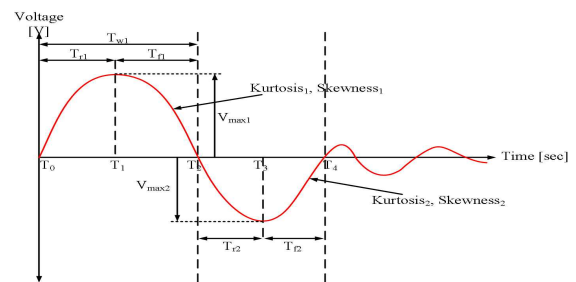


Fig. 2. Analysis parameters of a single PD pulse.

펄스의 시간적 파라미터 이외에 물리적인 형상 분석을 위해, 식 (1)과 식 (2)와 같이 첨도(Kurtosis)와 왜도(Skewness)를 판별 파라미터로 하였다 [9].

$$K = \sum_{i=1}^n \left[\frac{(x_i - \mu)^4}{(n-1) \cdot \sigma^4} \right] - 3 \quad (1)$$

$$S = \sum_{i=1}^n \left[\frac{(x_i - \mu)^3}{(n-1) \cdot \sigma^3} \right] \quad (2)$$

또한, 입력에 따른 목표값을 가진 지도 학습 방법을 사용하기 위해 입력층, 은닉층 및 출력층으로 구성된 역전파 알고리즘을 사용하였다 [10]. 먼저 훈련시키고자 하는 학습 패턴을 입력층에 넣고, 그에 따른 출력값을 도출하여 목표 출력과 비교한 후, 오차값을 계산하고 출력층에서 입력층까지의 신경망을 따라 역으로 전파한다.

$$\delta_{y_i} = (d_i - y_i) \cdot y_i \cdot (1 - y_i) \quad (3)$$

$$\delta_z = z(1-z) \sum_{i=1}^m \delta_z \bar{W} \quad (4)$$

출력층의 오차 신호 및 은닉층에 전파되는 오차 신호는 각각 식 (3)과 (4)로 구할 수 있으며, 이를 이용하여 k 학습 단계에서의 은닉층과 출력층의 연결강도 $\Delta \bar{W}^k$ 와 입력층과 은닉층의 연결강도 $\Delta \bar{V}^k$ 를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta \bar{W}^k &= \alpha \delta_y \bar{Z} \\ \Delta \bar{V}^k &= \alpha \delta_z \bar{X} \end{aligned} \quad (5)$$

오차가 전파되면서 각 뉴런 및 계층 사이의 연결강도를 조절하여 학습된다. 학습하고자 하는 패턴과 목표 출력을 반복 입력하여 제공오차 E가 목표오차 E_{\max} 보다 작아지거나, 반복하고자 하는 횟수를 초과할 경우에 학습을 종료한다. 만약 오차가 최소점에 수렴하지 못하는 경우 학습률 α 를 조정하거나 모멘텀 상수 β 를 이용하여 연결강도를 변화시킬 수 있다 [11].

$$\begin{aligned} \Delta \bar{W}^k &= \alpha \delta_y \bar{Z}^k + \beta \Delta \bar{W}^{k-1} \\ \Delta \bar{V}^k &= \alpha \delta_z \bar{X}^k + \beta \Delta \bar{V}^{k-1} \end{aligned} \quad (6)$$

2.3 측정 및 결함 판별 알고리즘

부분방전펄스의 측정 및 결함 판별은 LabVIEW 기반의 VI (Virtual Instruments)로 설계하였으며, 그림 3과 같이 펄스 측정, 파라미터 분석 및 역전파 알고리즘으로 구성된다.

그림 3의 (1)에서 샘플링속도 5 GS/s, 주파수 대역 1 GHz인 오실로스코프를 이용하여 극성별로 단일 부분방전펄스를 검출하였다. 측정된 신호는 LabVIEW로 전송되고 digital filter를 통해 외부 노이즈를 제거하였다. (2)에서는 펄스별로 분석 파라미터를 도출하고 저장하도록 하였다 [12]. (3)에서는 각 결함에서 추출한

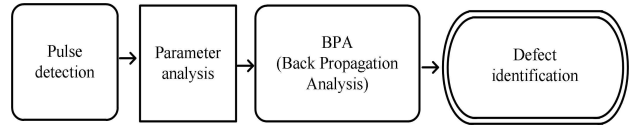


Fig. 3. Measurement and analysis diagram.

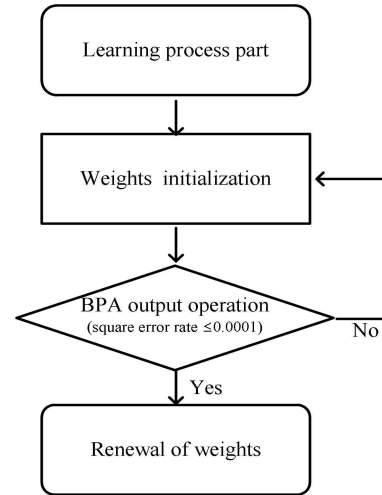


Fig. 4. Block diagram of the back propagation algorithm.

24개의 파라미터 각각의 평균값을 학습 패턴으로 하는 역전파 알고리즘을 설계하였다. 역전파 알고리즘은 그림 4와 같이 구성되며, 학습 과정과 오차율 계산 및 패턴 인식 과정을 일률적으로 처리하기 위해 'State Machine' 구조를 사용하였다. 학습하고자 하는 파라미터와 목표 출력이 저장된 CSV 파일로 가중치와 입력간의 선형 결합과 활성화 함수로 은닉층과 출력층의 값을 도출한다. 이때 결과와 목표치를 비교하여 제공오차를 분석하여 제공오차가 0.00001에 수렴할 때까지 학습을 반복하도록 하고 설정한 세대에 도달할 경우 학습이 완료된 것으로 보고 가중치를 고정한다.

최종적으로 (4)에서는 완성된 알고리즘을 기반으로 결함을 판별한다 [9,13].

2.4 실험계 구성

부분방전펄스의 파형 분석을 통한 결함별 특징을 분석하기 위하여 그림 5와 같이 실험계를 구성하였다. 차폐함 내부에 결함 전극계를 설치함으로써 외부 노이즈의 영향을 최소화하였다. 최대 50 kV_{rms}인 고압물드

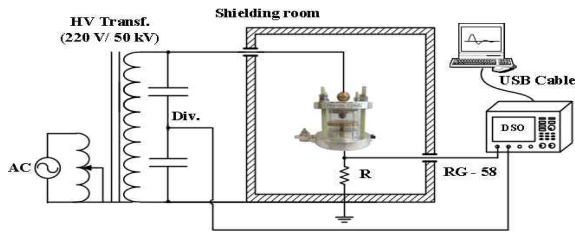


Fig. 5. Configuration of the experimental system.

변압기로 전압을 인가하였으며, 10,000 : 1의 분압기를 이용하여 인가전압을 측정하였다. 그리고 무유도 저항(50 Ω)에서 단일 부분방전펄스를 검출하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 결함별 파라미터 측정 및 분석

앞서 제작한 4가지 전극계로 부분방전 펄스를 측정하였으며, 전극별 파형의 예를 그림 6에서 그림 9까지 나타내었다.

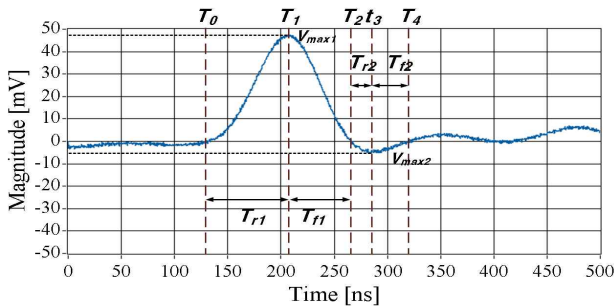


Fig. 6. Typical PD pulse waveform for the NTP.

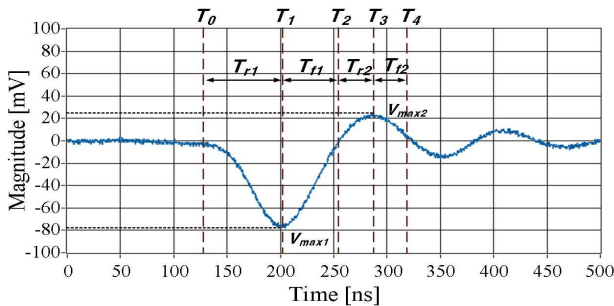


Fig. 7. Typical PD pulse waveform for the PTN.

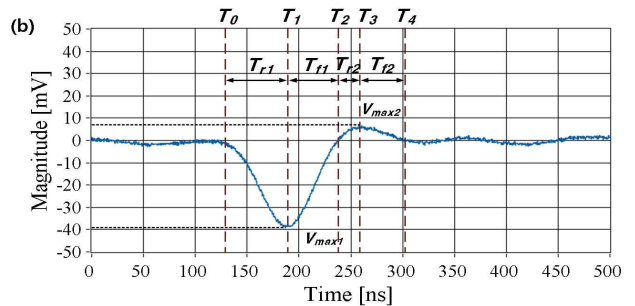
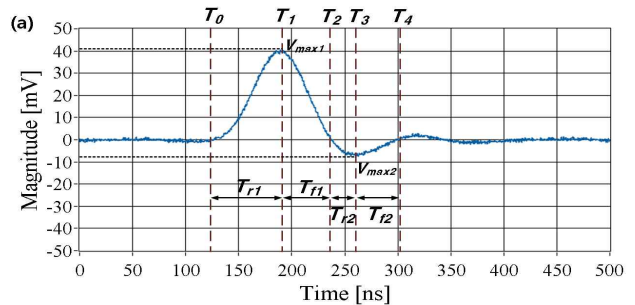


Fig. 8. Typical PD pulse waveform for the FP, (a) positive half and (b) negative half.

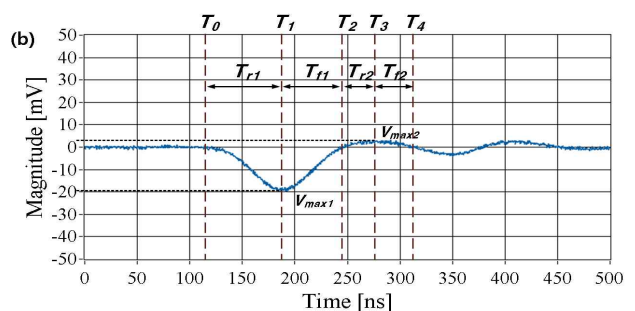
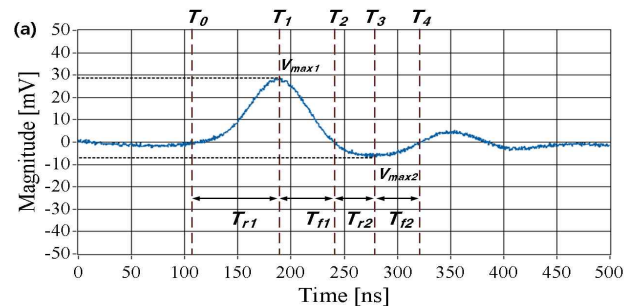


Fig. 9. Typical PD pulse waveform for the CIS, (a) positive half and (b) negative half.

그림 6은 NTP의 부분방전 펄스파형으로 정극성에서만 신호가 검출되었으며, 펄스 형상은 가운데가 솟은 첨용형으로, 좌우 대칭에 가까웠다.

Table 1. Identification parameters for a positive half

Classification	Parameter	NTP	PTN	FP	CIS
First vibration	T_{r1} [ns]	67.5	un-detected	67.1	68.3
	T_{r1} [ns]	59.8		49.6	54.4
	T_{w1} [ns]	127.2		116.7	122.7
	V_{max1} [mV]	38.5		43.1	33.1
	Kurtosis ₁	1.53		1.52	1.53
	Skewness ₁	0.06		0.08	0.05
Second vibration	T_{r2} [ns]	18.7	22.2	36.6	
	T_{r2} [ns]	31.1	47.6	40.4	
	T_{w2} [ns]	50.0	69.8	77.0	
	V_{max2} [mV]	-3.9	-7.4	-7.0	
	Kurtosis ₂	2.18	1.79	2.30	
	Skewness ₂	0.41	0.29	0.65	

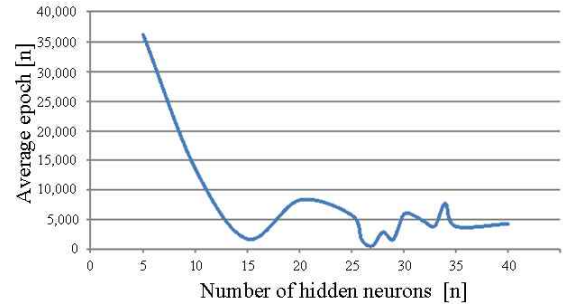


Fig. 10. Epoch changes depending on the hidden neurons.

Table 2. Identification parameters for a negative half.

Classification	Parameter	NTP	PTN	FP	CIS
First vibration	T_{r1} [ns]	un-detected	74.2	65.3	68.9
	T_{r1} [ns]		53.9	50.4	56.9
	T_{w1} [ns]		128.2	115.8	125.8
	V_{max1} [mV]		-89.1	-42.9	-30.0
	Kurtosis ₁		1.51	1.52	1.53
	Skewness ₁		-0.06	-0.07	-0.05
Second vibration	T_{r2} [ns]	29.8	20.9	30.8	
	T_{r2} [ns]	40.4	44.4	38.7	
	T_{w2} [ns]	70.2	65.3	69.5	
	V_{max2} [mV]	27.9	6.7	6.25	
	Kurtosis ₂	1.95	1.85	2.34	
	Skewness ₂	-0.49	-0.33	-0.60	

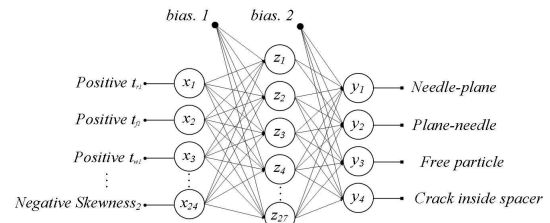


Fig. 11. Schematic diagram of the proposed BPA.

그림 7은 PTN의 파형으로 NPT와 반대로 부극성에서만 신호가 발생하였다.

그림 8과 9는 각각 FP 및 CIS를 나타낸 것으로 두 전극계 모두 양극성에서 부분방전 펄스가 검출되었다.

결함별로 정극성 및 부극성 반주기에서 각각 50회씩 펄스를 측정하여 특징을 추출하였으며, 분석 결과를 표 1과 표 2에 나타내었다.

3.2 알고리즘의 평가

펄스 파형 분석으로부터 선정한 24개의 파라미터를 기반으로 결함 판별을 위한 역전파 알고리즘을 설계하고, 그 특성을 분석하였다. 학습률을 1, 허용오차를 0.01%로 고정하고 은닉층의 뉴런 수를 5개에서 40개로 가변하며 학습 속도를 분석하였으며, 그 결과를 그림 10에 나타내었다. 뉴런 수가 27개일 때 평균 학습에 소요되는 세대 수가 509번으로 가장 작게 나타났다.

역전파 알고리즘의 뉴런 수는 그림 11과 같이 입력층 24개, 은닉층 27개 및 출력층 4개이며, 뉴런의 활성화 여부를 제어하기 위하여 은닉층과 출력층에 바이어스를 각각 1개씩 연결하였다.

제작된 역전파 알고리즘을 이용하여 각 결함별로 20개씩 학습파라미터를 입력하고, 결함 판별 시 해당 출력 뉴런의 목표 출력이 1이 나오도록 하였다. 학습률은 1로 지정하고 허용오차는 0.01%로 높게 지정하여 정확도를 높였다. 그 결과, 학습 완료까지는 1,456세대가 소요되었다.

3.3 결함 인식

학습된 역전파 알고리즘의 판별 능력을 평가하기 위하여 각 결함에서 측정된 부분방전펄스의 파라미터를 입력층에 100회씩 입력하고 출력되는 결과로 판별률을 분석하였으며, 그 결과를 표 3에 나타내었다.

Table 3. Identification rate on defect types.

Classification	Identification	Failed	Identified as an other defect
NTP	97	3	0
PTN	96	4	0
FP	91	3	6
CIS	93	2	5

<Unit : number>

NTP와 PTN에서는 단일 극성에서만 부분방전이 발생하였으며, 평균 96.5% 이상의 판별률을 보였다. FP

와 CIS는 상호 오인식하거나 판별이 불가능한 경우가 각각 평균 5.5% 및 2.5%이었다. 그러나 4종의 결함에 서 평균 94.25%의 인식률로 결함 판별이 가능하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 가스절연구조에서 결함별 단일 부분 방전펄스를 측정하고, 파형 분석을 통한 결함 판별 알고리즘에 관하여 연구하였다.

GIS에서 발생 가능한 부분방전을 모의하기 위하여 NTP, PTN, FP 및 CIS의 4종의 전극계를 제작하였다. 극성별로 단일 부분방전펄스를 50회씩 측정하여 시간적, 물리적 형상에 관련한 24가지 파라미터를 선정하고 결함별 특징을 도출하였다. 이러한 결과를 바탕으로 역전파 알고리즘을 설계하고 결함을 판별하였다.

침-평판과 평판-침 전극계에서 각각 97% 및 96%의 판별률로 결함을 구분할 수 있었다. 자유입자와 스페이서 내부 크랙에서는 91%와 93%의 확률로 결함 판별이 가능하였다. 제작된 알고리즘은 평균 94.25%의 인식률을 가지는 것을 확인하였다. 이와 같이 단일 부분 방전펄스의 분석으로 결함 판별이 가능하며, 기존 PRPDA법의 보완이나 위상이 없는 HVDC 계통의 설비 진단에도 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 중소기업청에서 지원하는 2013년도 중소기업 기술개발 지원사업(No.S2138505) 및 2014년도 중소기업 기술개발 지원사업(S2243009)의 연구 수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

REFERENCES

- [1] H. Guo, F. Lü, and K. F. Ren, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **21**, 1942 (2014).
- [2] F. N. Budiman, Y. Khan, A. A. Al-Arainy, N. H. Malik, and A. Beroual, *Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 2013 Fourth International Conference* (2013). p. 517-521.
- [3] M. Kamei and O. Takai, *IEEE Trans. Power Deliv.*, **26**, 625 (2011).
- [4] S. J. Kim, H. E. Jo, G. W. Jeong, G. S. Kil, and S. W. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **28**, 40 (2015).
- [5] M. S. Kim, S. J. Kim, G. W. Jeong, H. E. Jo, and G. S. Kil, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **27**, 238 (2014).
- [6] W. Ziomek, M. Reformat, and E. Kuffel, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **7**, 161 (2000).
- [7] G. C. Montanari, A. Contin, and A. Cavallin, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **7**, 30 (2000).
- [8] H. G. Kranz, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **12**, 276 (2005).
- [9] C. Nyamupangedengu and I. R. Jandrell, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **15**, 1590 (2008).
- [10] M. G. Danikas, N. Gao, and M. Aroe, *Electrical Engineering*, **85**, 87 (2003).
- [11] E. Gulski and A. Krivda, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **28**, 984 (1993).
- [12] G. Wu, X. Jiang, and H. Xie, *Properties and Applications of Dielectric Materials, 2000. Proceedings of the 6th International Conference*, **1**, 451 (2000).
- [13] H. C. Chen, *Intelligent System Design and Engineering Application (ISDEA), 2012 Second International Conference*, 274 (2012).