

서지 보호기의 열화 특성과 온라인 진단장치

박경수, 왕국명, 황성철, 김선재, 길경석^a

한국해양대학교 전기전자공학과

Deterioration Characteristics and an On-Line Diagnostic Equipment for Surge Protective Devices

Kyoung-Soo Park, Guoming Wang, Seong-Cheol Hwang, Sun-Jae Kim, and Gyung-Suk Kil^a

Department of Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

(Received July 2, 2016; Revised September 21, 2016; Accepted September 21, 2016)

Abstract: This paper dealt with the deterioration characteristics and an on-line diagnosis equipment for SPDs (surge protective devices). An accelerated aging test was carried out using a 8/20 μ s standard lightning impulse current to analyze the changes of electrical characteristics and to propose the diagnostic parameters and the criterion for deterioration of ZnO varistor which is the core component of SPDs. Based on the experimental results, an on-line diagnosis equipment for SPD was fabricated, which can measure the total leakage current, reference and clamping voltage. The leakage current measurement circuit was designed using a low-noise amplifier and a clamp type ZCT. A linear controller, the leakage current measurement part and a HVDC were used in the measurement of reference voltage. The measurement circuit of clamping voltage consisted of a surge generator and a coupling circuit. In a calibration process, measurement error of the prototype equipment was less than 3%.

Keywords: SPD, Deterioration characteristics, Leakage current, Reference voltage, Clamping voltage

1. 서론

낙뢰 및 서지로부터 전력 계통을 보호하기 위하여 서지 보호기(surge protective device, SPD)를 설치한다. 서지 보호기는 피보호기와 직·병렬로 설치되며 이상 전압을 절연내력 이하로 낮춰주는 역할을 한다. 그 중 보호 성능 및 비선형 저항 특성이 우수한 산화아연형 바리스터(zinc oxide varistor)가 많이 사용된다 [1].

서지 보호기는 반복적인 보호 동작 및 환경적 요인으

로 열화가 진전된다. 누설전류의 증가로 정상 운전 전압에서 열폭주(thermal runaway)에 도달하며 지락 및 화재 등의 2차 사고를 유발한다 [2]. 이를 예방하기 위하여 주기적으로 바리스터의 상태를 진단하는 기술 및 장비가 필요하다 [3-6]. 기존 진단장치는 off-line 상태에서 사용하기 때문에 주기적인 측정이 불가능하다. 또한 단일 파라미터만 측정하기 때문에 정확한 판단이 어렵다. 이를 보완하기 위하여 on-line 진단장치의 개발이 필요하다.

본 논문에서는 서지 보호기용 on-line 상태 진단장치의 설계 및 제작에 관한 연구를 수행하였다. 산화아연형 바리스터의 전기적 특성 변화의 분석, 측정 파라미터 및 건전성 기준을 제시하기 위하여 가속 열화 실험을 수행하였다. 이를 근거로 진단장치를 제작한 후, 실험을 통해 적용성을 평가하였다.

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

2. 실험 방법

가속 열화 실험을 통해 열화 진전에 따른 전기적 특성 변화, 건전성 기준 및 측정 파라미터를 선정하였다. 표준 뇌 충격전류(8/20 μ s, 10 kA)를 군단위로 1 set (20회)씩 인가하고, 30분 동안 자연 냉각하였다. 바리스터의 온도가 18 ~ 20°C가 될 때, 누설전류, 기준 전압 및 제한 전압을 측정하였다. 동일한 사양을 갖는 바리스터 A 및 B로 실험을 반복하였고, 사양은 표 1과 같다 [7,8].

표준 뇌 충격전류를 인가하기 위하여 그림 1(a)와 같은 서지 발생장치를 설계하였다. HVDC(40 kV, 5 mA), 충전용 저항(R_c) 및 캐패시터(C_c), 방전 갭(G) 및 인덕터(L)로 구성되며, 충격전류의 파도장 및 지속 시간은 C_c 와 L로 조절할 수 있다.

서지 발생장치에 의해 발생된 충격전류는 그림 1(b)와 같으며 국제 규격(IEC 61000-4-5)에서 제시한 조건(8/20 μ s, 편차: $\pm 20\%/\pm 20\%$)을 만족하였다 [9].

Table 1. Specification of a ZnO varistor.

Reference voltage(U_{ref})	430 V($\pm 10\%$)
MCOV(U_c)	275 V _{AC} , 350 V _{DC}
Nominal discharge current(I_n)	40 kA(8/20 μ s)

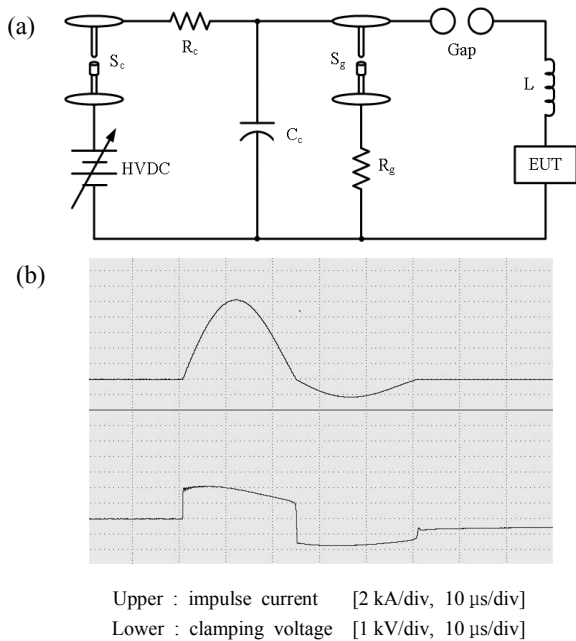


Fig. 1. Surge generator. (a) Configuration and (b) impulse current and clamping voltage waveforms.

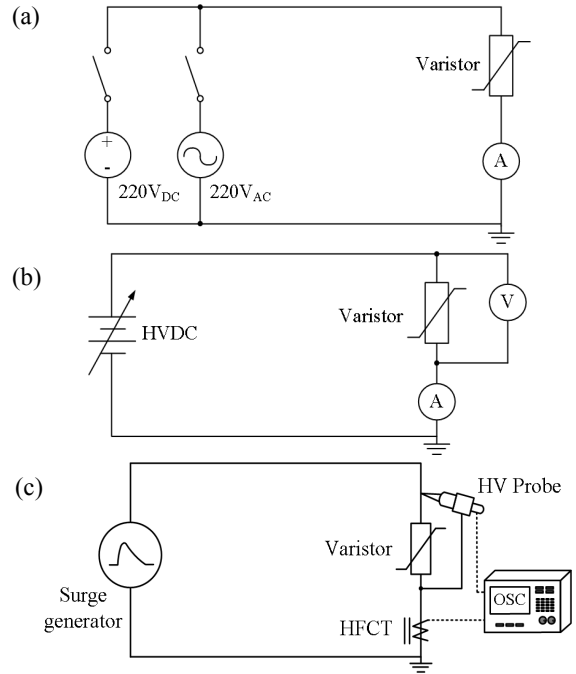


Fig. 2. Measurement circuit. (a) Leakage current, (b) reference voltage, and (c) clamping voltage.

누설전류, 기준 전압 및 제한 전압을 측정하기 위하여 그림 2와 같이 실험계를 구성하였다. 누설전류는 220 V_{DC}, 220 V_{AC}를 인가하고 저항분 및 전체 누설전류를 측정하였다. 기준 전압은 직류 고전압 발생장치로 전압을 증가시켜 1 mA가 흐를 때 바리스터 양단 전압을 측정하였다. 제한 전압은 표준 뇌 충격전류(0.5 kA)를 인가할 경우, 바리스터 양단 전압을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 열화특성 분석

산화아연형 바리스터는 열화진전에 따라 전체 및 저항분 누설전류가 증가하고, 기준 전압과 제한 전압의 감소가 일반적이다. 따라서 본 논문에서도 뇌충격 전류에 의한 가속 열화실험으로부터 이들 지표의 변화를 분석하였다.

그림 3은 뇌충격 전류 인가에 따른 전체 및 저항분 누설전류의 변화를 나타낸 것이다. 열화 초기에 저항분 누설전류는 바리스터 A의 경우 10 set 그리고 바리스터 B의 경우 9 set까지 선형적으로 증가하였다.

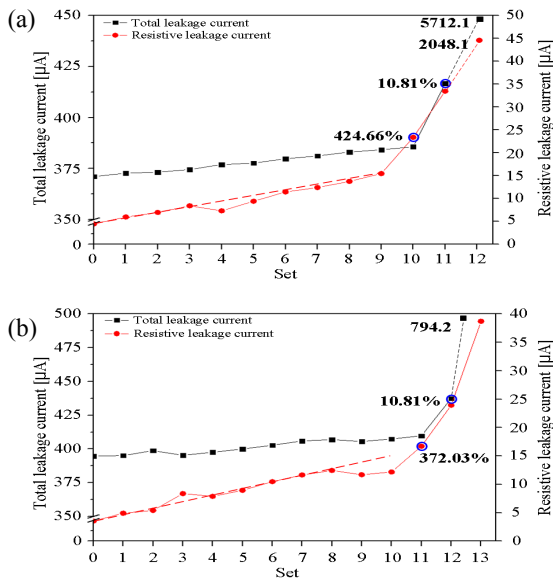


Fig. 3. Change of the leakage current. (a) Varistor A and (b) varistor B.

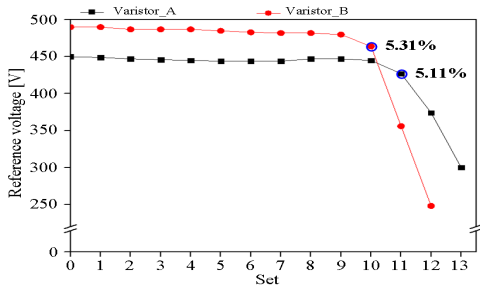


Fig. 4. Change of the reference voltage.

열화가 진전되었을 때, 각각 11 set(16.71 μA), 10 set (23.4 μA)부터 초깃값(A : 3.54 μA, B : 4.46 μA) 대비 약 350% 이상 증가하였다. 누설전류가 급증한 시점부터 열화가 급격히 진전되었고, 소손 직전의 저항분 누설전류(A : 38.71 μA, B : 2,048.1 μA)는 약 10배 이상 증가하였다.

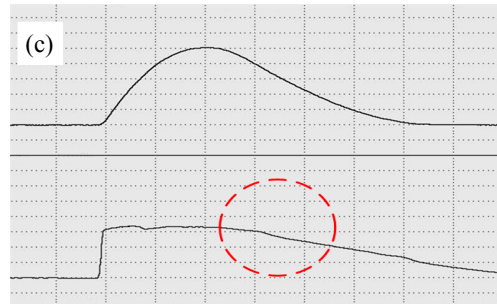
전체 누설전류는 열화 초기, 초깃값(A : 394.7 μA, B : 371.08 μA) 대비 증가율은 약 4% 미만(A : 11 set 409.7 μA, B : 10 set 385.7 μA)으로 변화가 거의 없었다. 이후 열화가 진전되었을 때, 초깃값 대비 10% 이상(A : 12 set 437.4 μA, B : 11 set 416.7 μA) 증가하였다. 완전 열화가 진행되었을 때, 동일한 조건의 뇌충격전류를 인가하여도 열화가 급격히 진전되었다. 또한 바리스터는 보호소자로서 기능을 상실하거나 열폭주로 폭발 위험이 있으므로 교체가 필요하다.



Upper : impulse current [100 V/div, 5 μs/div]
Lower : clamping voltage [100 A/div, 5 μs/div]



Upper : impulse current [100 V/div, 5 μs/div]
Lower : clamping voltage [100 A/div, 5 μs/div]



Upper : impulse current [100 V/div, 5 μs/div]
Lower : clamping voltage [100 A/div, 5 μs/div]

Fig. 5. Clamping voltage. (a) New, (b) deterioration, and (c) failure.

기준 전압은 바리스터의 초기 특성 지표로 저항분 누설전류 1 mA가 흐를 때의 값이며, 뇌충격 전류 인가에 따라 그림 4와 같이 감소하는 경향을 나타내었다. 바리스터 A의 경우, 초깃값(450 V) 대비 감소율은 10 set까지 약 1.11%(445 V)로 변화가 없었다. 11 set부터 열화가 급격히 진행되어 약 5.11%(427 V) 감소하였다. 바리스터 B의 경우, 바리스터 A와 비슷한 경향을 보였다. 초깃값(490 V) 대비 감소율은 9 set까지 약

2.04%(480 V)로 변화가 없었고, 10 set부터 열화가 급격히 진행되어 약 5.31%(464 V) 감소하였다. 규격에 바리스터의 기준 전압이 $\pm 10\%$ 이상 감소하면 수명이 다했다는 내용이 명시되어있다 [1]. 실험 결과, 10% 이상 감소할 때, 저항분 누설전류의 증가로 열화가 가속화되었다. 열화 상태를 판단하기 위하여 규격에서 제시한 기준에 따라 교체 시기의 결정이 가능하다.

제한 전압은 그림 5와 같이 바리스터가 열화됨에 따라 증가하였다. 신품 및 열화된 바리스터의 제한 전압은 각각 699 V, 723 V로 약 3.43% 증가하였다. 변화율이 미소하기 때문에 이를 이용하여 상태 진단 및 수명 예측이 불가능하다. 하지만 열폭주로 소자가 소손될 경우, 그림 5(c)와 같이 제한 전압의 파형이 변형되었다. 이때 보호 동작은 수행되었지만, 누설전류 및 기준 전압은 건전성 기준을 초과하였다. 바리스터 입계층의 변형으로 서지인가 시 불꽃이 발생하였다. 정기적인 측정으로 파형의 형태를 분석함으로써, 고장 직전의 바리스터 상태를 진단할 수 있다.

3.2 진단장치 제작

측정 파라미터는 가속열화 실험을 근거로 선정하였다. 저항분 누설전류는 열화 정도에 따라 정확한 진단이 가능하지만, 증폭기 및 필터 등 부가적인 소자가 필요하다. 그러나 전체 누설전류 측정은 초기 변화율은 작지만, 장치 구성이 간단하며, 측정 방법이 기존 대비 쉽기 때문에 휴대용 진단장치에 적합하다. 제한 전압은 on-line 상태에서 파형의 형태를 통해 바리스터의 상태 파악을 할 수 있다. 기준 전압은 off-line 상태에서 측정하지만 정확한 진단이 가능하다. 누설전류 및 제한 전압 측정으로 건전성 기준 이상으로 측정값이 변하면 기준 전압 측정을 통해 상태 진단 신뢰성을 향상시킬 수 있다.

누설전류를 검출하기 위해 그림 6(a)와 같이 측정회로를 설계하였다. 누설전류의 크기가 미소하고, 고조파로 인한 노이즈가 발생하므로 저잡음 증폭회로를 설계하였다. 고감도 연산증폭기(DC ~ 1 kHz)를 사용하여 최대 60 dB까지 증폭이 가능하다. 또한 운전 중 흐르는 누설전류를 측정하기 위하여 클램프형 영상변류기(0.01 mA ~ 20 A)를 사용하였다.

기준 전압 측정회로는 그림 6(b)와 같이 연산부(DAQ unit), 선형 제어부(micro processing unit, MPU), 직류 고전압 발생부 및 누설전류 측정부로 구성된다. 직류 전압을 증가시켜 저항분 누설전류 1 mA

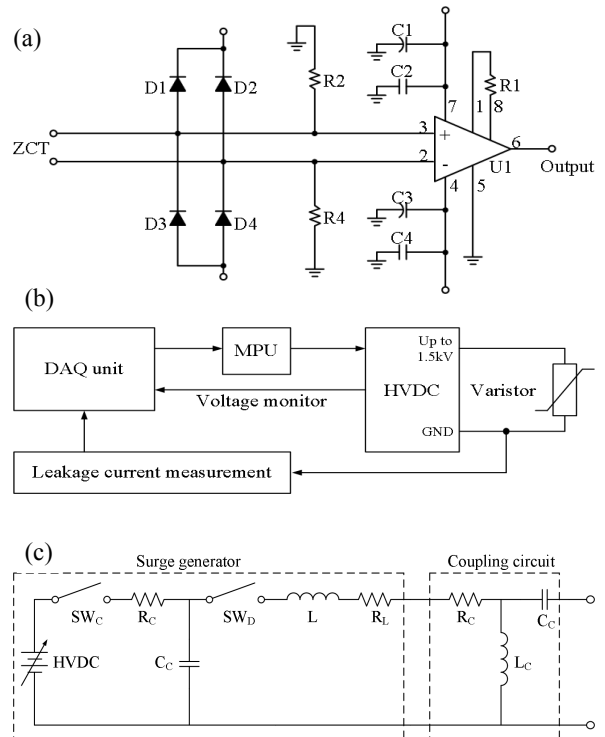


Fig. 6. Measurement circuit. (a) Leakage current, (b) reference voltage, and (c) clamping voltage.

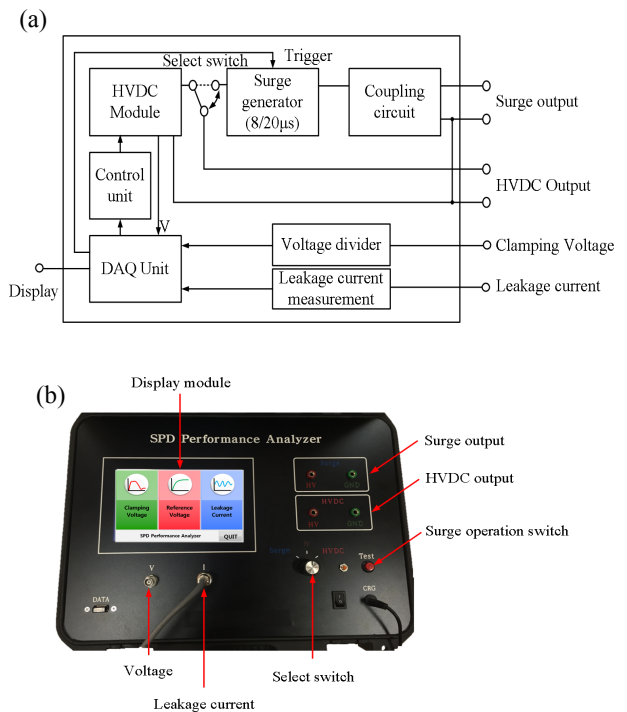


Fig. 7. Prototype. (a) Configuration and (b) photograph.

흐를 때, 바리스터 양단 전압을 측정하도록 설정하였다. 선형제어부는 직류 고전압발생장치의 출력 전압을 조절하는 부분이다. PWM 제어에 따라 아날로그 신호(0 ~ 4 V)를 고전압 발생장치의 전압제어 단자에 인가하여 출력전압(0 ~ 1.5 kV)을 조절하였다.

제한 전압 측정회로는 그림 6(c)처럼 서지발생장치 및 커플링 회로로 구성된다. 서지발생장치는 표준 뇌 충격전류(8/20 μ s, 0.5 kA)가 발생되도록 설계하였다. 커플링 회로는 전원전압이 장비에 인가되어 소손될 위험이 있으므로 고역 통과 필터(high-pass filter)로 구성하였다.

측정회로 및 알고리즘을 적용하여 그림 7과 같이 진단장치를 제작하였다. 진단장치의 front panel은 서지발생부, 직류 고전압 발생부, surge operation switch, touch형 display module, 전압 전류 측정 포트 및 select switch로 구성된다. Select switch로 동작 모드를 설정할 수 있고, display module을 통해 측정 및 제어가 가능하도록 하였다. 전압 및 전류 포트 측정된 데이터는 DAQ(수직분해능 : 8 bit)를 통해 아날로그 - 디지털 정밀 변환을 하여 display module로 전송된다. 그래픽 기반의 프로그램인 LabVIEW로 제어되며, 표준 상태 머신(standard state machine)구조로 측정 모드(대기, 누설전류, 기준 전압, 제한 전압)에 따라 동작하도록 설계하였다.

3.3 적용 실험

진단장치의 성능을 검증하기 위하여 적용 실험을 수행하였다. 신품 및 열화된 바리스터로 독립 실험계와 제작한 진단장치로 누설전류, 기준 전압 및 제한 전압을 비교하였다. 독립 실험계는 가속 열화 실험과 동일한 방법이다.

실험 결과는 표 2와 같다. 독립 실험계와 비교하여 누설전류는 20 ~ 50 μ A, 기준 전압은 -1 ~ -2 V, 제한 전압은 -7 V로 3% 미만의 차이가 발생하였다. 기준 전압은 측정값이 거의 일치했지만, 누설전류 및 제한 전압에서 차이가 발생한 것으로 보아 전원 품질에 의해 발생된 오차율로 판단된다.

Table 2. Results of application test.

		New	Deterioration
Independent measurement	Leakage current [μ A]	437	1,471
	Reference voltage [V]	439	285
	Clamping voltage [V]	590	612
Prototype	Leakage current [μ A]	453.09	1,520
	Reference voltage [V]	438.05	283.54
	Clamping voltage [V]	583.08	606.71

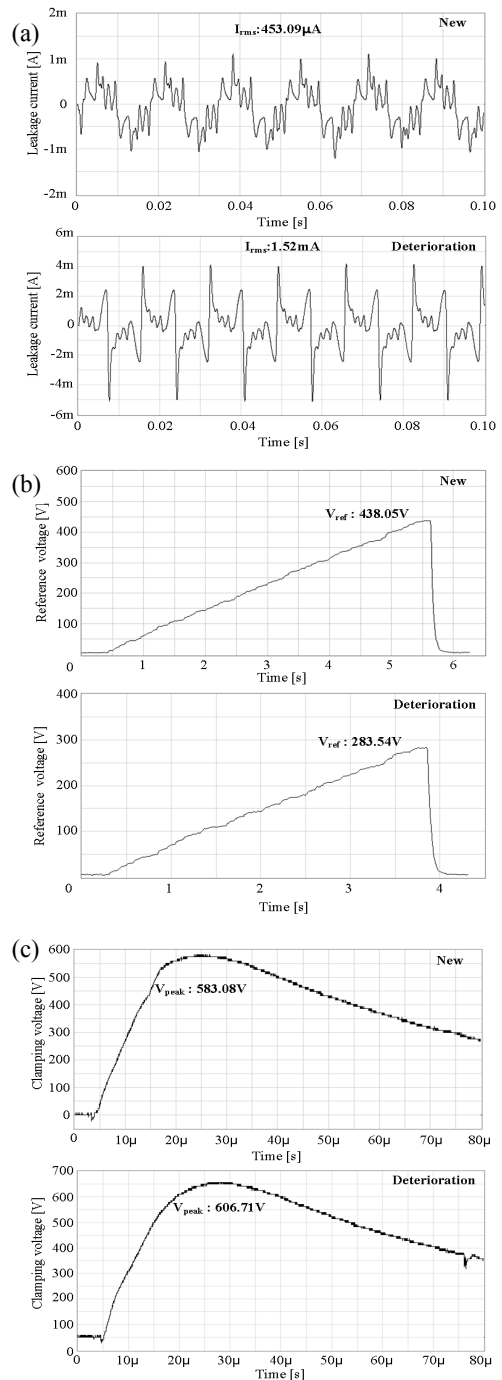


Fig. 8. Measurement results. (a) Leakage current, (b) reference voltage, and (c) clamping voltage.

그림 8은 진단장치로 신품과 열화된 varistor를 측정 한 파형이다. 신품의 경우, 누설전류는 453.09 μ A, 기준전압은 438.05 V, 열화된 경우, 누설전류는 1.52 mA,

기준전압은 283.54 V로 측정되었다. 제한 전압의 파형 왜곡이 발생하지 않기 때문에 서지에 대한 보호 동작은 가능하다. 하지만 누설전류 및 기준전압이 초기값 대비 10% 이상 변화하였다. 향후 열폭주에 의한 사고가 예상된다.

4. 결 론

본 논문에서는 서지보호기의 열화 특성 및 on-line 진단장치에 관하여 기술하였다.

열화 진전에 따라 전체 누설전류는 초기의 증가율은 4% 미만으로 변화가 거의 없었고, 열화가 진전될 때 10% 이상 증가하였다. 기준 전압은 열화 초기 감소율은 2.1% 미만으로 일정한 값을 유지하였고, 열화가 진전될 때 5% 이상 감소하였다. 각각 10% 이상 변화 시, 열화는 지수 함수적으로 급격히 진행되고, 보호 기능을 상실하거나 열폭주로 파괴되므로 교체가 필요하다. 제한 전압은 열화에 따른 변화가 작아서 변화율로 상태 진단은 불가능하다. 하지만 소손 발생 시점에서 왜곡이 발생하기 때문에 파형의 형상으로 진단이 가능하다.

열화진단을 위한 파라미터는 전체 누설전류, 기준 전압 및 제한 전압이며, 이를 측정하기 위한 회로를 설계하였다.

시 제작 진단장치의 성능을 검증하기 위하여 진단장치 및 독립 실험계의 측정값을 비교하였다. 오차율은 약 3% 미만으로 누설전류에서 큰 차이가 발생하고, 이는 전원 품질에 의한 차이로 판단된다. 이들 결과로부터 on-line 상태에서 서지 보호기의 상태 진단에 충분히 활용될 것으로 기대한다.

REFERENCES

- [1] R. B. Standler, *Protection of Electronic Circuits from Overvoltages, 1st ed.* (John Wiley & Sons, New York, 1989) p. 133-138.
- [2] A. Haddad and D. F. Warne, *Advances in High Voltage Engineering, 1st ed.* (The Institution of Engineering and Technology, London, 2004) p. 201-205. [DOI: <http://dx.doi.org/10.1049/PBPO040E>]
- [3] Y. S. Kim, *Trans. Electr. Electron. Mater.*, **16**, 317 (2015). [DOI: <http://dx.doi.org/10.4313/TEEM.2015.16.6.317>]
- [4] S. G. Lee, H. M. Cho, J. D. Lee, and S. M. Park, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **18**, 1111 (2005).
- [5] S. S. Kim, H. G. Cho, T. G. Park, C. H. Park, S. Y. Jung, and B. K. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **15**, 190 (2002).
- [6] G. S. Kil, J. S. Han, J. Y. Song, M. J. Kim, J. B. Kim, and H. G. Cho, *J. Tras. Korean Inst. Electr. Eng.*, **51C**, 152 (2002).
- [7] J. H. Lee, J. S. Han, G. S. Kil, J. W. Kwon, D. Y. Song, and N. S. Choi, *J. Korean Ins. Infor. Commu. Eng.*, **4**, 793 (2000).
- [8] J. S. Han, *M. Eng. Thesis*, p. 35-51, Korea Maritime and Ocean University, Busan (2003).
- [9] G. S. Kil and Y. S. Kim, *J. Korean Soc. Marine Eng.*, **21**, 387 (1997).