



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

서지전류에 의한 ZnO 바리스터의
열화에 관한 연구

A Study on the Deterioration of ZnO Varistors
by the Application of a Surge Current



指導教授 吉 暻 碩

2018年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

黃 性 哲

本 論文을 黃性哲의 工學碩士 學位論文으로 認准함

委員長：工學博士 金 潤 植 ⑩

委 員：工學博士 吉 暻 碩 ⑩

委 員：工學博士 張 樂 元 ⑩



2017年 12月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

黃 性 哲

목 차

목 차	i
그림 및 표 목차	ii
Abstract	iv
제 1 장 서 론	1
제 2 장 이 론	3
2.1 서지의 발생	3
2.2 서지 대책	9
제 3 장 실험 및 방법	18
3.1 가속 열화	18
3.2 측정 시스템	21
제 4 장 결과 및 분석	25
제 5 장 결 론	39
참 고 문 헌	41

그림 및 표 목차

< 그림 목차 >

그림 1.1	서지 전압에 의한 소자의 소손	1
그림 2.1	낙뢰에 의한 피해의 종류	4
그림 2.2	전원 전압에서의 교란	5
그림 2.3	표준 뇌 임펄스 파형	7
그림 2.4	형식과 보호레벨	8
그림 2.5	바리스터에 의한 서지역제	11
그림 2.6	V-I 특성	11
그림 2.7	바리스터의 구조	13
그림 2.8	바리스터의 등가회로	14
그림 2.9	누설전류의 벡터도	15
그림 2.10	누설전류의 파형	16
그림 2.11	저항분 누설전류의 검출회로	16
그림 2.12	제 3조파 성분의 검출회로	17
그림 3.1	바리스터의 사진	18
그림 3.2	가속열화 실험계	20
그림 3.3	전원전압에 중첩된 서지 파형	20
그림 3.4	파라미터 측정계	21
그림 3.5	측정 알고리즘	22
그림 3.6	누설전류 파형의 예	24
그림 4.1	인가전류와 제한전압	26
그림 4.2	기준전압의 변화	28
그림 4.3	누설전류의 변화	31
그림 4.4	제 3조파 성분의 변화	35
그림 4.5	왜형률의 변화	37

< 표 목차 >

표 2.1	서지의 발생원인	3
표 2.2	형식과 보호레벨	9
표 2.3	서지보호소자의 특성	10
표 3.1	바리스터의 사양	19
표 4.1	흡수 에너지의 산출	27
표 4.2	바리스터 A의 기준전압 변화	29
표 4.3	바리스터 B의 기준전압 변화	29
표 4.4	바리스터 A의 전체 누설전류 변화	32
표 4.5	바리스터 A의 저항분 누설전류 변화	32
표 4.6	바리스터 B의 전체 누설전류 변화	33
표 4.7	바리스터 B의 저항분 누설전류 변화	33
표 4.8	바리스터 A의 제 3조파 성분 변화	36
표 4.9	바리스터 B의 제 3조파 성분 변화	36
표 4.10	바리스터 A의 왜형률 변화	38
표 4.11	바리스터 B의 왜형률 변화	38

A Study on the Deterioration of ZnO Varistors by the Application of a Surge Current

by *Seong-Cheol Hwang*

Department of Electrical & Electronics Engineering
The Graduate School of Korea Maritime and Ocean University
Busan, Republic of Korea



Abstract

With the increasing use of low insulation level semiconductors, electrical and electronics devices have become more vulnerable to surge voltage and current. Recently, the zinc oxide(ZnO) varistor is widely used to protect devices from surge. However, it deteriorates gradually by repetitive protection operation and results in the short-circuit and ground faults. Therefore, the performance evaluation of the varistors is required. The criterion for varistor deterioration is only a change of more than 10% in the reference voltage, which is impossible to be measured during operation.

In this thesis, an accelerated aging experiment was carried out by applying the $8/20\mu\text{s}$ surge current to varistors and the correlation

between the absorption energy and electrical characteristics was analyzed. The electrical parameters corresponding to the 10% change in the reference voltage were the total leakage current, the resistive leakage current, the third harmonic component of the total leakage current, and the total harmonic distortion, all of which can be observed in the deterioration state during operation. From the results, the degradation progress was depended on the energy absorption amount per unit volume rather than the magnitude of the surge current.

Among the parameters, the total leakage current increased about 50%, but the resistive leakage current and harmonic component increased from 100% to 500%. In particular, since the third harmonic component had a large measured value compared to the resistive leakage current, it was possible to minimize the measurement error. In addition, it had the same trend as the increase in the resistive leakage current by the deterioration progress.

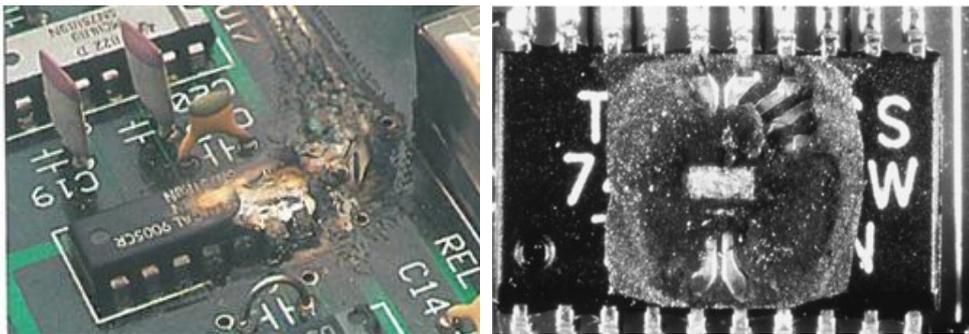
초 록

반도체 소자의 낮은 절연레벨 및 집적도의 증가로 저전력 전기전자기기의 서지내성이 취약해지고 있다. 서지의 침입 시 ZnO 바리스터는 주요 보호소자이지만 반복 보호동작으로 인하여 열화가 진전되며, 최종적으로 단락 및 지락을 발생시킨다. 그러므로 바리스터의 건전성 평가가 요구되고 있다. 바리스터 열화에 대한 기준은 기준전압 10% 이상의 변화이지만 이는 운전중 측정이 불가능하다.

본 논문에서는 $8/20\mu\text{s}$ 서지전류로 바리스터의 가속열화 실험을 수행하였으며, 서지에 대한 흡수 에너지와 전기적 특성의 상관관계를 분석하였다. 기준전압의 10% 변화에 대응하는 전기적 파라미터는 운전중 열화상태 관측이 가능한 전체 누설전류, 저항분 누설전류, 전체 누설전류의 제 3조파 성분 및 왜형률이다. 실험 결과로부터 열화진전은 서지전류의 크기보다 단위체적당 에너지 흡수량에 의존하였다. 누설전류의 성분 중 전체 누설전류는 50% 내외로 증가하였지만, 저항분 누설전류 및 고조파 성분은 100%에서 500% 이내까지 증가하였다. 특히, 제 3조파 성분은 저항분 누설전류 대비 절댓값이 크므로 측정오차의 최소화가 가능하며, 열화진전에 따른 저항분 누설전류의 증가 경향과 동일하였다.

제 1 장 서 론

최근 급속한 산업의 발달은 반도체를 이용한 기기의 전자화를 이루어내었다. 반도체 소자는 전기전자기기의 주요기능을 수행하는 핵심 부품으로써 대부분의 회로에 집적되어 있다. 그러나 저전압-소전류로 구동되는 반도체 소자는 절연레벨이 낮으므로 서지의 침입 시 절연에 취약한 단점이 있다. 기기의 사고를 최소화시키기 위하여 회로에는 서지보호기를 설치한다. 서지보호기는 피보호기와 직병렬로 연결하여 서지로부터 회로를 보호하는 역할을 수행한다^[1]. 서지보호기의 종류는 산화아연 바리스터(Zinc oxide varistor), 아발란치 다이오드(Avalanche diodes) 및 가스튜브(Gas discharge tubes)로 구분할 수 있다^[2]. 이 중 바리스터는 과도과전압에 대한 빠른 응답과 큰 에너지 흡수능력으로 전원회로에 설치되어 보호역할을 수행한다.^{[3]~[5]} 그러나 서지의 침입 시 반복 보호동작으로 인하여 바리스터의 수명은 짧아진다^[6]. 그림 1.1에서 열화된 바리스터의 보호동작 실패로 인한 반도체 소자의 소손을 보여주고 있다.



(출처) 좌 : Furse, Electronic systems protection handbook

우 : Peter Hasse, Overvoltage protection of low voltage systems, 2nd Edition

그림 1.1 서지 전압에 의한 소자의 소손

Fig. 1.1 Damage of electronic element by surge voltage

열화된 바리스터는 누설전류가 증가하므로 정상운전전압에서 회로 내 열폭주(Thermal runaway)로 이어질 수 있으며, 전기화재로 파급될 수 있다^[7].

산업 현장에서 설치된 바리스터에 서지의 침입 시 그 크기는 다양하므로 열화진전에 따른 에너지 흡수량 분석을 이용한 상태진단이 필요하다. 제조사에서는 바리스터의 기준전압이 10% 변화 시 열화로 판정하고 있다. 그러나 기준전압의 측정은 On-line 상태에서는 불가능하고, Off-line 상태에서 바리스터를 회로와 분리하여 측정해야 한다. 그러므로 기준전압 10% 변화에 대응하는 전기적 파라미터의 분석 및 선정이 요구되고 있다.

본 논문에서는 ZnO 바리스터의 열화분석과 건전성 평가 기준을 제시하였다. 가속열화 실험에서 바리스터에 인가되는 에너지를 산출하였고 단위 체적당 흡수되는 에너지로 바리스터의 열화진전을 분석하였다. 기준전압 10% 감소에 대응하는 파라미터는 전체 누설전류, 저항분 누설전류, 전체 누설전류의 제 3조파 성분 및 왜형률을 분석 및 선정하였다. 상기의 결과를 바탕으로 운전중 바리스터의 건전성 평가를 위한 기준을 제시하였다.

제 2 장 이 론

2.1 서지의 발생

서지(Surge)는 전력선, 신호 및 통신선로 계통에 발생하는 단시간 고에너지의 임펄스 형태이다. 특히, 전원전압에서 과도과전압의 형태인 서지는 전력계통 및 전력설비의 파손과 인체 감전까지 발생시킨다. 표 2.1과 같이 서지의 발생원인은 4가지로 나뉜다. 뇌방전 현상으로 발생하는 낙뢰(Lightning), 계통의 차단 및 접속에 의한 개폐서지(Switching surge), 마찰에 의한 정전기(Electro-static discharge) 및 전자파 장애의 일종인 EMP(Electro-magnetic pulse)가 있다^[8].

표 2.1 서지의 발생원인
Table 2.1 Cause of surge

종 류	발생원인
낙뢰 (Lightning)	전자사태(Electron avalanche)로 인한 대기 중의 절연파괴와 리더(Leader)를 통해 대지로 뇌격하는 형태
개폐서지 (Switching surge)	유도성 부하의 스위칭 시 패러데이 법칙으로 전압유도를 야기하여 발생하는 형태
정전기 (Electro-static discharge)	마찰전기효과(Tribo-electric effect)에 의해 전하가 발생하는 형태
EMP (Electro-magnetic pulse)	대기 중 상층권의 감마선에 의해 전자기 임펄스를 발생되며, 대지 방향으로 이동하는 임펄스 형태

낙뢰로 인한 서지는 전력계통 및 전력설비에 침입 시 그 에너지량이 크므로 큰 피해를 발생시킨다. 낙뢰는 직격뢰(Direct lightning) 및 유도뢰(Induced lightning)로 구분한다^[9]. 직격뢰는 뇌운으로부터 전력선 및 구조물에 직접 뇌격한다. 발생빈도는 작지만 수십 kV의 전압과 수백 kA 이상의 전류로 큰 파괴력을 갖는다. 유도뢰는 낙뢰가 발생한 지점의 매설된 도체를 통하여 유도되며, 접지 전위를 급격히 상승시켜 기기에 장애를 준다. 그림 2.1에서 낙뢰의 발생으로 인한 직·간접적인 피해를 나타내었다^[10].

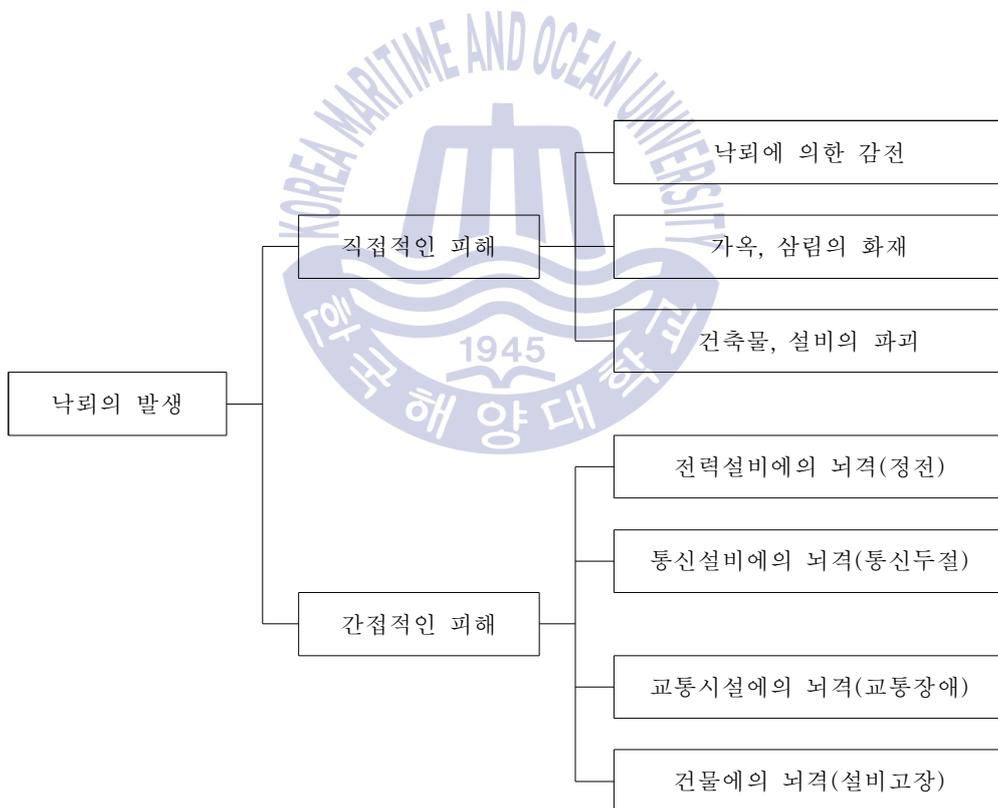


그림 2.1 낙뢰에 의한 피해의 종류
Fig. 2.1 Types of damage caused by lightning

직·간접적인 피해로 인체의 감전, 삼림의 화재 및 설비의 파괴가 있으며 전력선, 통신선 및 건물의 인입설비로 뇌격하여 서지를 발생시킨다. 서지의 침입 시, 반도체 소자가 집적된 전기전자기기의 회로가 손상이 될 수 있다. 특히, 가정에서는 서지로 인한 피해로 TV가 높은 비중을 차지한다. 그 이유는, 다른 기기에 비하여 장시간동안 전원이 공급되므로 서지의 침입에 대한 회로 소손 확률이 크기 때문이다.

전기전자기기의 장애를 일으킬 수 있는 전압변동에 대하여 운용의 신뢰성 확보와 서지에 대한 방호대책이 필요하다. 전력계통에서 전압 과형은 이상적인 정현파가 아니며 일시적인 전압변동으로 인한 교란이 발생한다. IEC와 IEEE에서는 전원전압에서의 교란을 그림 2.2와 같이 정의하고 있다^[11]. 서지의 형태인 과도과전압(Transient overvoltage)은 정상운전전압에서 단시간동안 그 최댓값이 큰 과형이다. 지속시간은 수 μs 에서 수 ms 사이이며, 전압의 크기는 수 십 V에서 수 십 kV이다.

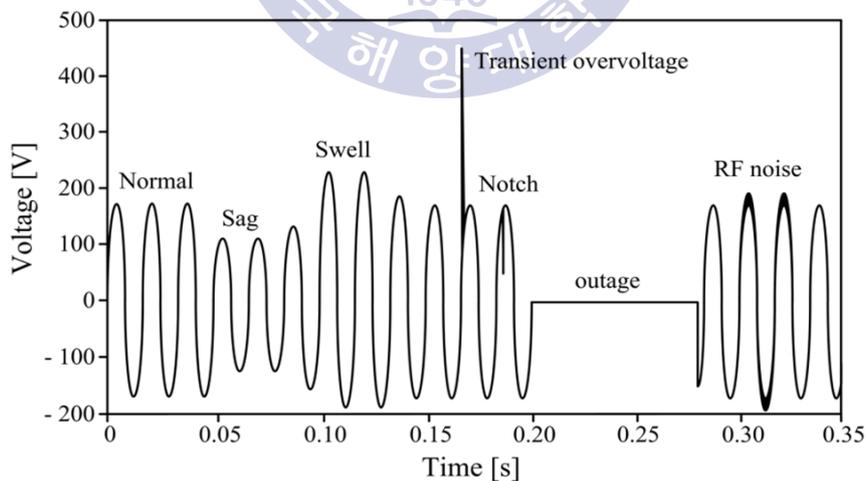
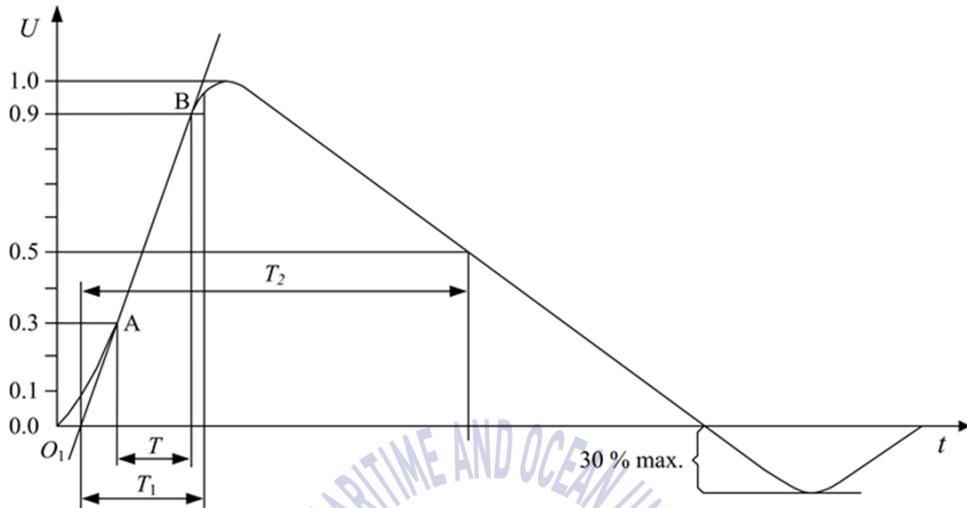


그림 2.2 전원 전압에서의 교란

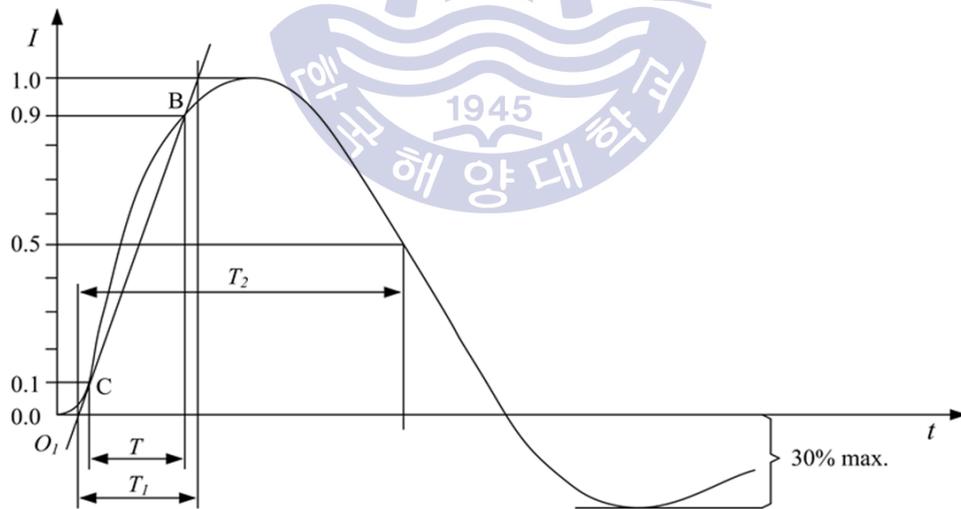
Fig. 2.2 Disturbances on nominal mains voltage

전압상승(Swell) 및 전압저하(Sag)는 일시적으로 전압의 크기가 증가 및 감소되는 형태이다. 전원전압의 반주기 이상으로 발생하며 각 현상의 전압의 크기는 공칭 실효전압의 1.08배 이상 및 하한 0.87배 이하로 변동한다. 정전(Outage)은 일시적 또는 장시간동안 지속되어 전력공급을 중단되는 상태이다. 순간적인 전압저하(Notch)는 전압의 크기가 정상운전전압 파형의 반주기 보다 짧은 시간동안 감소된 상태이다. 정전과는 다르게 순간적으로 발생하며 전압의 크기는 0 V 이상이다. RF 노이즈(Radio frequency noise)는 고주파 신호의 방해로 인하여 정상운전전압에서의 잡음 형태이다.

국제 규격 IEC 60060-1 및 IEC 61000-4-5에서는 전기전자기기의 서지 시험파형과 여러 가지 시험을 규정하고 있다. 서지의 특성은 지수함수에 따라 상승 및 하강하는 과도장 및 과미장의 시간으로 결정된다. 과도장은 전압 또는 전류의 발생부터 최댓값까지 도달하는 시간이며, 과미장은 최댓값의 50% 지점까지 감소하는 시간이다. 과도장 및 과미장의 특성에 따라 파형을 구분하며 진동성 파형과 비진동성 파형으로 나뉜다. $0.5 \mu\text{s}/100 \text{ kHz}$ 의 감쇄 진동주파수로 나타내는 진동성 파형은 Ring wave라고 하며, 급격히 상승하는 과도장과 감쇄 진동하는 과미장을 갖는다. 비진동성 파형은 기기에 유입되는 대표적인 서지파형이며, 표준 뇌 임펄스 파형으로 지칭한다. 절연내력 시험 시 그림 2.3 (a)와 같이 전압파형, 전류내량 시험 시 그림 2.3 (b)와 같이 전류파형을 적용한다. 각 파형의 특성상 급준하는 지점으로 과도장을 결정한다. 전압파형은 30% ~ 90%의 시간에 1.67배, 전류파형은 10% ~ 90%의 시간에 1.25배를 곱하여 과도장을 산출한다. 과도장은 각각 $1.2 \mu\text{s}$ 및 $8 \mu\text{s}$ 이며, 과미장은 최댓값의 50% 지점인 $50 \mu\text{s}$ 및 $20 \mu\text{s}$ 로 결정된다^[12].



(a) 1.2/50 μ s 전압파형

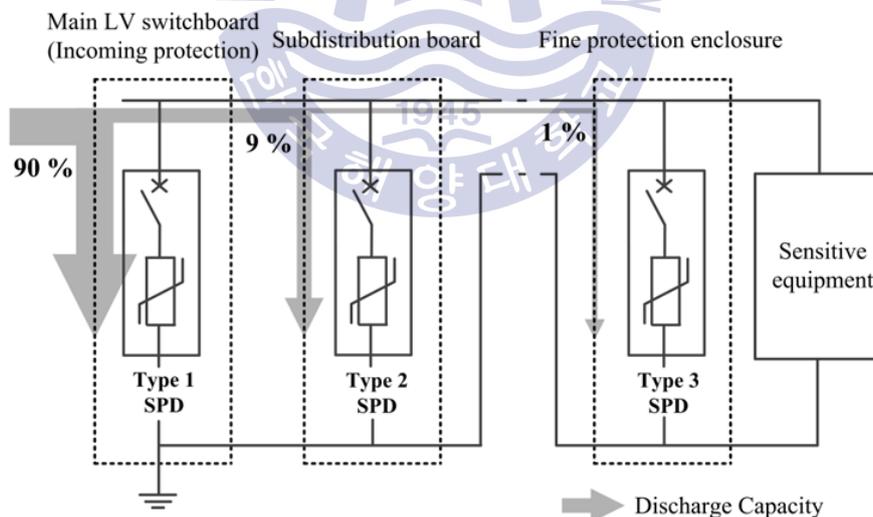


(b) 8/20 μ s 전류파형

그림 2.3 표준 뇌 임펄스 파형

Fig. 2.3 Waveforms of standard lightning impulse

전력계통에 서지가 침입하였을 때 인입구에는 90%에 해당되는 에너지가 흡수되며, 그 후단부에서는 각각 9%, 1%에 해당되는 에너지가 흡수된다. 국제 규격 IEC 61643-11에서는 그림 2.4 및 표 2.2와 같이 보호레벨을 Type 1, 2, 3로 구분하고 있다^{[13]~[15]}. Type 1은 옥외를 포함하는 범위로 써 가공선 및 인입구에 해당된다. 서지보호장치의 성능평가를 위하여 직격뢰의 시험과형인 10/350 μ s의 임펄스를 이용한다. Type 2는 옥내의 짧은 분기회로 및 주간선의 위치에 해당되며 8/20 μ s의 시험과형에 해당된다. Type 3는 과도과전압 방지를 위하여 Type 2의 보호장치와 협조한다. 옥내의 긴 분기회로 및 인출구의 위치에 해당되며 1.2/50 μ s와 8/20 μ s의 조합과형으로 서지보호장치를 평가한다. 외부로부터 침입하는 서지는 크기가 감소되며, 이는 전선길이 당 R, L, C의 특성 및 회로의 분기로 인한 원인으로 판단할 수 있다^[16].



(출처) Schneider Electric - Electrical installation guide 2016

그림 2.4 형식과 보호레벨
Fig. 2.4 Types and protection levels

표 2.2 형식과 보호레벨

Table 2.2 Types and protection levels

구 분	시험파형	장 소	특 징
Type 1	10/350 μ s	가공선 및 인입구 (옥외)	직격뢰 및 역류 보호
Type 2	8/20 μ s	짧은 분기회로 및 주간선 (옥내)	과전압 방지
Type 3	1.2/50 μ s + 8/20 μ s	긴 분기회로 및 인출구 (옥내)	Type2의 협조장치

2.2 서지 대책

서지보호장치(Surge protective device, SPD)는 서지로부터 피보호기기를 보호하기 위하여 회로에 설치한다. 서지보호소자는 보호동작 특성에 따라 표 2.3과 같이 종류를 구분할 수 있다. 전압 상승을 억제하는 클램프형(Clamp type)의 소자인 산화아연 바리스터 및 아발란치 다이오드가 있으며, 전류의 흐름을 접지측으로 우회시키는 크로바형(Crowbar type)의 소자인 가스튜브가 있다^[17]. 이 중 바리스터는 비선형 저항특성이 우수할 뿐만 아니라, 서지에 대한 0.5 ns 이하의 응답속도와 큰 에너지 흡수량을 갖는다. 이러한 이유로 바리스터는 전원 회로보호의 주요 소자로써 산업 현장에서 대부분 적용되고 있다^[18]. 가스튜브 및 아발란치 다이오드는 주로 저전력인 신호통신회로에서 사용된다. 소자의 소손 시 회로는 개방상태이므로 소자는 단순히 보호동작을 수행할 수 없다. 그러나 바리스터의 소손 시 전원회로는 단락상태가 되므로 최종적으로 단락 및 지락이 발생하기 때문에 열화진전에 대한 관측이 필수이다.

표 2.3 서지보호소자의 특성

Table 2.3 Characteristics of surge protection components

종 류	설치 위치	동작 방식	특 성
산화아연 바리스터 (Zinc oxide varistor)	전원회로	클램프형 (Clamp type)	- 응답속도 : 0.5 ns 이하 - 표류 정전용량 : 1 ~ 10 nF - 큰 에너지 흡수량 - 비선형 저항특성 우수
아발란치 다이오드 (Avalanche diode)	신호통신회로		- 응답속도 : 0.1 ns 이하 - 표류 정전용량 : 1 ~ 3 nF - 제한전압 : 200 V 이하
가스 튜브 (Gas discharge tube)		크로바형 (Crowbar type)	- 응답속도 : 1 ~ 2 μ s - 표류 정전용량 : 2 nF 이하 - 속류(Follow current) 발생

그림 2.5에서 회로에 병렬로 연결된 바리스터에 의한 서지역제 방식을 나타내었다. 정상상태일 때 바리스터의 임피던스는 무한대이며, 절연체로 작용하므로 부하에 정상적인 전원을 공급한다. 그러나 서지의 침입 시 바리스터의 임피던스는 매우 낮아지므로 도전로가 형성된다. 보호동작을 수행하는 바리스터는 에너지 내량만큼의 서지를 흡수한다^{[19],[20]}. 비선형 저항특성이란 서지발생 시 저항이 급격하게 감소하는 특성이다. 바리스터에 서지가 침입할 때 흐르는 전류는 급격하게 증가하며, 이때의 단자전압은 미소하게 증가한다. 그림 2.6에서 바리스터의 I-V 특성을 나타내었으며, 전류의 크기에 따라 동작영역을 3가지로 분류하였다.

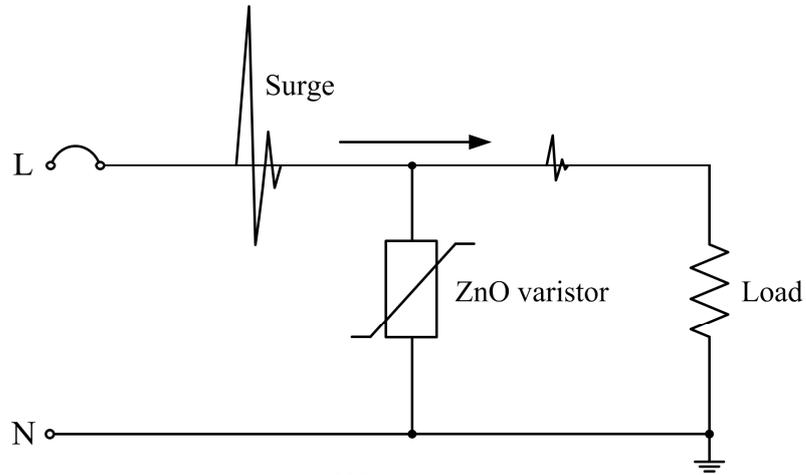


그림 2.5 바리스터에 의한 서지억제
 Fig. 2.5 Surge suppression by a varistor

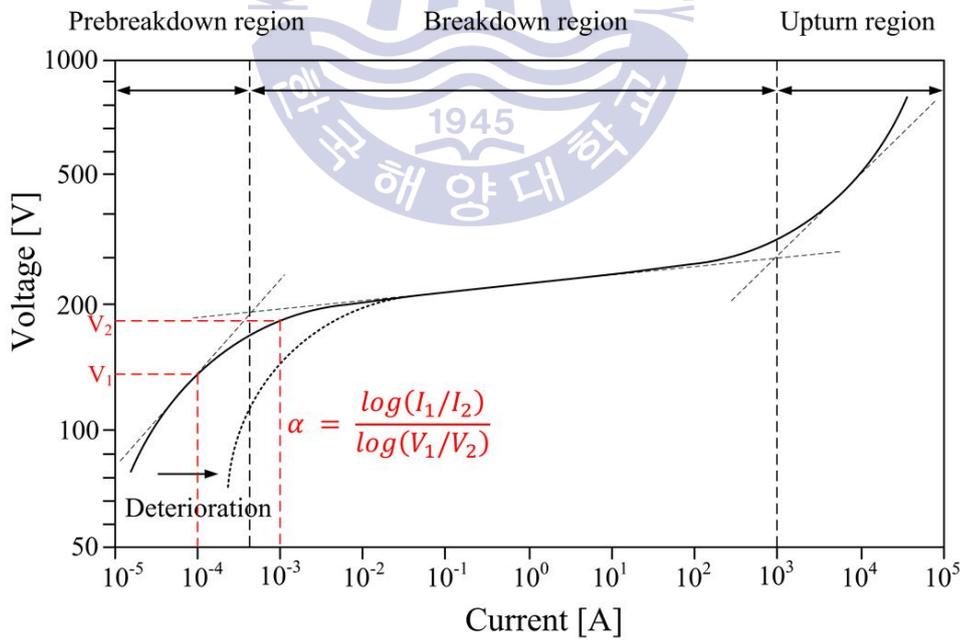


그림 2.6 V-I 특성
 Fig. 2.6 V-I characteristics

저전류 영역(Prebreakdown region)에서 바리스터는 단순 커패시터 역할을 수행한다. 이때 정상운전전압이 가해지는 구간이며, 흐르는 누설전류는 $100\mu\text{A}$ 내외이다. 정상운전전압이 가해지는 구간이다. 그러나 바리스터가 열화될 때 정상운전전압에서 누설전류의 값은 증가한다.

중전류 영역(Breakdown region)에서 바리스터는 보호동작을 수행한다. 단자전압에 비해 누설전류의 증가율이 매우 큰 구간으로써 식 2.1과 같이 나타낼 수 있다.

$$I = kV^\alpha \quad (2.1)$$

바리스터의 비선형 저항특성을 결정하는 비선형 계수(α)는 식 2.2와 같이 나타낸다.

$$\alpha = \frac{\log(I_1/I_2)}{\log(V_1/V_2)} \quad (2.2)$$

비선형 계수의 값은 $V_1(I_1 = 0.1 \text{ mA})$ 과 $V_2(I_2 = 1 \text{ mA})$ 의 두 지점을 이용하여 산출할 수 있다. 일반저항의 계수는 1이며, ZnO 소자의 계수는 25 ~ 100의 값을 갖는다. 비선형 계수의 크기가 클수록 비선형 저항특성은 우수하다.

비선형 구간을 지나 단순 저항으로 동작하는 대전류 영역(Upturn region)에서는 바리스터에 수 kA 이상의 전류가 흐르며, 전류에 따른 전압이 비례적으로 증가한다. 식 2.3과 같이 전류의 증가율(J)은 비선형 계수에 의하여 결정된다.

$$J = a \cdot E[\mu\text{A}/\text{cm}^2] \quad (2.3)$$

그림 2.7과 같이 바리스터는 미세한 결정입자(ZnO grain)와 입계층(Intergranular layer)의 다중접속으로 구성되어 있다. 결정입자의 크기는 $5 \sim 10 \mu\text{m}$, 저항률은 $1 \sim 10 \Omega \cdot \text{cm}$ 이므로 우수한 전기전도도가 특징이며, 입계층은 $10^{10} \sim 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ 의 매우 높은 저항특성을 갖는다^[22]. 서지가 침입할 때 결정입자 사이의 입계층에 이중 전위장벽이 낮아지므로 바리스터는 보호동작을 수행한다.

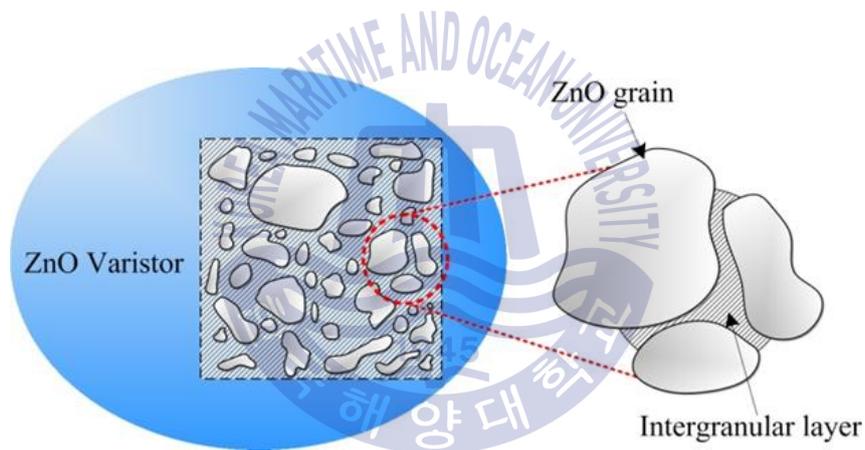


그림 2.7 바리스터의 구조
Fig. 2.7 Structure of varistor

식 2.4와 같이 바리스터의 항복전압(V_b)은 입계의 직렬연결 개수(n)와 입계의 항복전압(v_b)으로 산출할 수 있다.

$$V_b = n v_b \quad (2.4)$$

단일 입계의 항복전압은 3 ~ 4 V이며, 직렬연결 개수가 많을수록 큰 전압에서 항복이 발생한다. 바리스터의 에너지 내량은 입계의 면적에 의하여 결정되며, 면적은 입계의 병렬연결 개수에 비례한다. 즉, ZnO 입자의 배열 및 크기는 항복전압 및 에너지 내량을 결정짓는 중요한 요소이다.

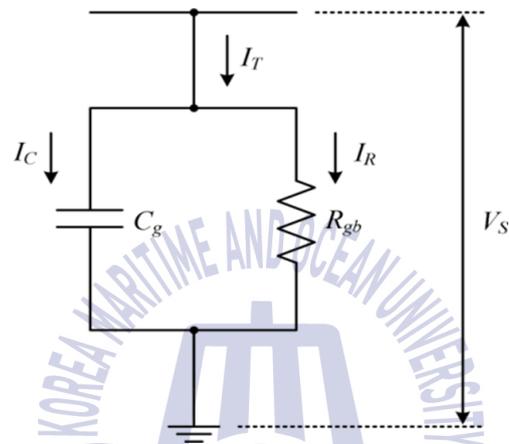


그림 2.8 바리스터의 등가회로
Fig. 2.8 Equivalent circuit of varistor

그림 2.8에서 바리스터의 등가회로를 나타내었다^[23]. 바리스터 양단에 전압(V_S)을 인가하였을 때 전체 누설전류(I_T)가 흐른다. 이때 입계층의 정전용량(C_g) 및 입계층 전위장벽의 비선형 저항(R_{gb})에는 각각 용량분 누설전류(I_C) 및 저항분 누설전류(I_R)가 흐른다. 식 2.5와 같이 입계층의 정전용량은 진공의 유전율(ϵ_0), 입계층의 비유전율, 전극의 면적(A) 및 입계층의 두께(d)로 산출할 수 있다.

$$C_g = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad [\mu\text{F}] \quad (2.5)$$

바리스터의 누설전류는 정상운전전압에서 ZnO 소자의 구조적인 특성으로 인하여 발생한다. 식 2.6 및 그림 2.9와 같이 전체 누설전류(I_T)는 용량분 누설전류(I_C)와 저항분 누설전류(I_R)의 벡터 합으로 산출할 수 있다.

$$I_T = \sqrt{I_R^2 + I_C^2} \quad (2.6)$$

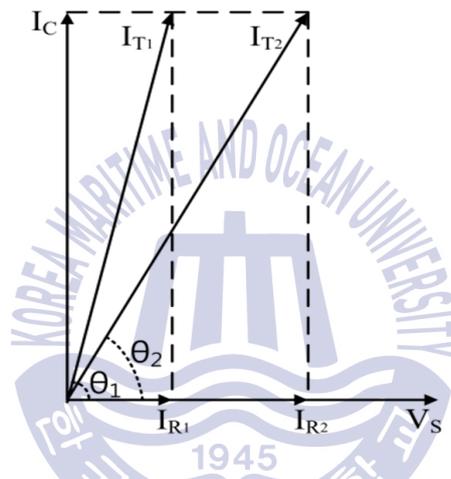


그림 2.9 누설전류의 벡터도
Fig. 2.9 Vector diagram of leakage current

용량분 누설전류는 열화진전에 관계없이 일정하다. 반면에 열화진전에 따라 입계층의 저항 값은 감소하므로 저항분 누설전류는 증가한다. 저항분 누설전류는 전체 누설전류와 비교할 때 크기가 매우 작고 열화진전에 따라 점차 증가한다. 상기의 이유로 벡터합인 전체 누설전류의 크기는 미소하게 증가한다^[24].

그림 2.10에서 바리스터 양단의 인가전압 및 각 누설전류의 파형을 나타내었다. 바리스터의 열화진전 시 저항분 누설전류가 증가하며 동시에 전체 누설전류의 파형을 왜곡시킨다^[25].

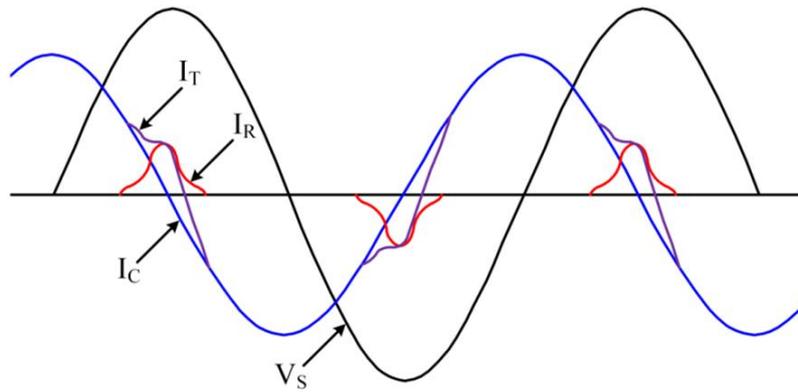


그림 2.10 누설전류 성분의 파형
 Fig. 2.10 Waveforms of leakage current components

그림 2.11에서 저항분 누설전류를 검출할 수 있는 계략도 및 검출 원리를 나타내었다. 저항 R_2 에서 검출되는 전체 누설전류 중 용량분 누설전류는 가변저항 R_1 에서 검출한 용량분 누설전류로 보상할 수 있다. 최종적으로 순수한 저항분 누설전류만을 검출할 수 있다.

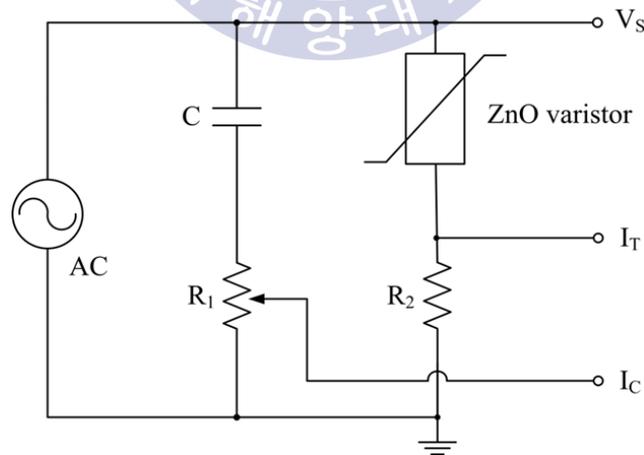


그림 2.11 저항분 누설전류의 검출회로
 Fig. 2.11 Detection circuit of resistive leakage current

누설전류의 On-line 측정법으로 자기소거법, 동기정류법 및 제 3조파 분석법이 있다^[26]. 자기소거법과 동기정류법은 전체 누설전류 및 파형의 위상을 이용하여 검출한다. 그러나 회로가 복잡하고 신뢰도가 떨어지므로 활용도가 낮다. 반면에 제 3조파 검출법은 저항분 누설전류의 경향을 나타내는 전체 누설전류의 제 3조파 성분을 이용하므로 측정이 용이하다. 바리스터의 열화가 진전될 때 제 3조파 성분은 절댓값 및 변화율이 크므로 측정오차의 최소화가 가능하며, 그림 2.12와 같이 운전중 영상 변류기, 증폭기 및 필터를 이용하여 효과적으로 신호를 취득 및 분석할 수 있다 [27],[28].

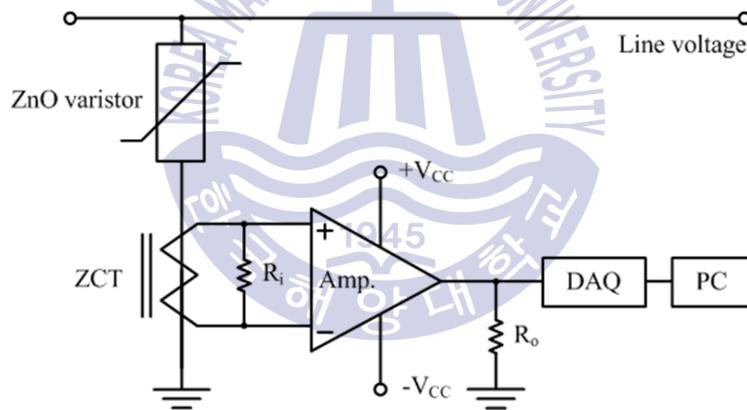


그림 2.12 제 3조파 성분의 검출회로

Fig. 2.12 Detection circuit of the third harmonic component

제 3 장 실험 및 방법

서지의 침입 시 ZnO 바리스터는 열화가 진전되며, 열화진단을 수행하기 위하여 서지의 크기 및 횟수가 아닌 에너지 흡수량을 도출해야 한다. $8/20\mu\text{s}$ 서지전류 인가 시 바리스터의 가속열화 및 단위체적당 흡수 에너지를 도출하기 위하여 실험계를 구성하였다. 이후 흡수 에너지와 기준전압의 상관관계 분석 및 기준전압 변화에 대응하는 측정 파라미터의 선정을 위한 측정계와 알고리즘을 구성하였다.

3.1 가속 열화

가속열화 실험을 수행하기 위하여 2종의 바리스터를 각 2개씩 이용하였다. 그림 3.1 및 표 3.1과 같이 바리스터의 사양은 상이하며, 동종의 바리스터는 제조사에서 정한 전기적 특성을 기준으로 한다.



(a) Varistor A



(b) Varistor B

그림 3.1 바리스터의 사진

Fig. 3.1 Photographs of varistors

표 3.1 바리스터의 사양
 Table 3.1 Specifications of varistors

항 목	사 양	
	바리스터 A	바리스터 B
Max. continuous operating voltage [V]	AC : 250 DC : 320	AC : 385 DC : 505
Peak current [kA] (8/20 μ s)	6.5	70
Energy [J]	130	1,200
Reference voltage [V]	390	620
Clamping voltage [V] (8/20 μ s)	650 (@ 100 A)	1,025 (@ 500 A)

바리스터의 가속열화 및 단위체적당 흡수 에너지를 도출하기 위하여 그림 3.2와 같이 실험계를 구성하였다. 8/20 μ s 서지발생장치(2.1 kA_{max}, 40 kA_{max})를 이용하여 바리스터에 서지를 인가하였다. 고주파변류기(50 kA_{max}, 0.01 V/A) 및 고전압프로브(20 kV_{DC}, 75 MHz, 1,000 : 1)로 바리스터에 인가되는 서지파형 및 제한전압을 검출하였으며, 오실로스코프(3 MHz, 10 MS/s)를 이용하여 시간에 대한 적분함수로 인가 에너지를 산출하였다.

실제 회로에 설치된 바리스터는 상용주파수 전압이 인가된 상태에서 서지의 영향을 받는다. 그림 3.3과 같이 8/20 μ s 서지전류를 정극성 90° 위상에 임펄스를 중첩시키고 바리스터 A 및 B에는 1.6 kA 및 10.1 kA 전류를 균단위로 주입하여 단계별로 실험을 진행하였다.

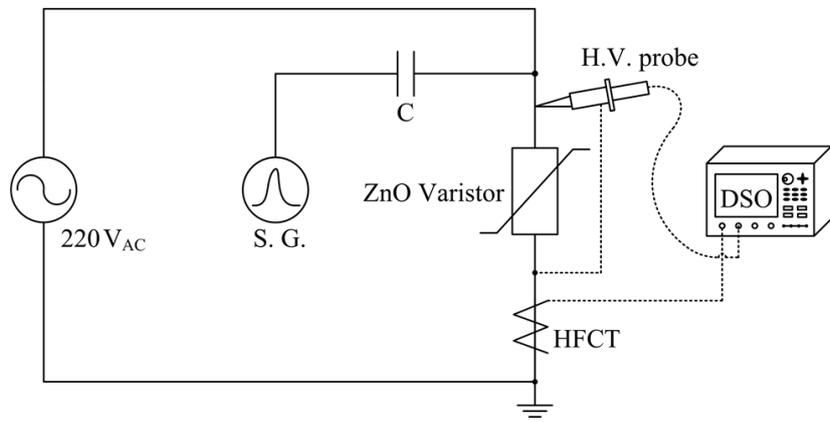
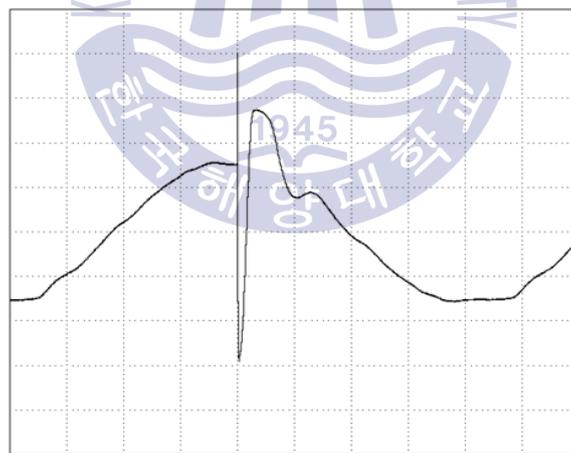


그림 3.2 가속열화 실험계
 Fig. 3.2 Experimental setup of accelerated aging



[200 V/div, 2 ms/div]

그림 3.3 전원전압에 중첩된 서지 파형
 Fig. 3.3 A surge waveform on a service voltage

3.2 측정 시스템

서지를 주입한 ZnO 바리스터를 1시간동안 자연 냉각시킨 뒤 그림 3.4와 같은 파라미터 측정계로 기준전압(V_{Ref}), 전체 누설전류(I_T), 저항분 누설전류(I_R), 제 3조파 성분(I_{3rd}) 및 왜형률(THD)을 측정하였다.

기준전압은 바리스터에 저항분 누설전류 1mA가 흐를 때 양단에 인가되는 전압이다. 바리스터는 초기 기준전압 대비 10% 이상 변화 시 열화로 판정된다. 따라서 바리스터의 열화판정을 위하여 직류 전원공급장치로 전압을 인가하였고 열화진전에 따른 기준전압의 변화를 감시하였다.

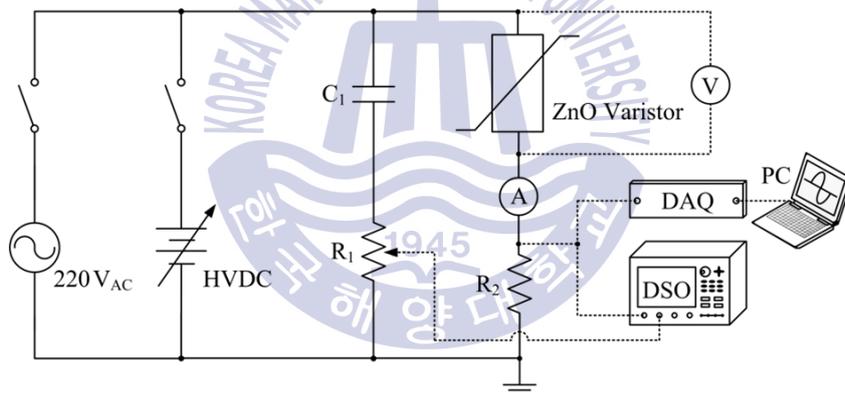


그림 3.4 파라미터 측정계

Fig. 3.4 Measurement system of electrical parameters

바리스터의 열화진전 시 저항분 누설전류가 증가하며, 전체 누설전류 파형의 왜곡으로 고조파 성분이 증가한다. 저항분 누설전류를 검출하기 위하여 검출저항(R_2), 기준 커패시터(C_1) 및 가변저항(R_1)을 이용하였다. 바리스터에 상용주파수 전압 인가 시 검출저항에서 전체 누설전류를 검출

하였고 기준 커패시터 및 가변저항으로 용량분 누설전류를 보상(-)하여 저항분 누설전류를 검출하였다. 고조파 성분을 측정하기 위하여 데이터수집장치(DAQ, 48 kS/s) 및 LabVIEW 프로그램 기반인 측정 알고리즘을 이용하였다. 그림 3.5와 같이 외부 노이즈를 제거한 고조파 성분을 검출하기 위하여 저역 필터(Low pass filter)와 고속푸리에 변환(Fast Fourier transform)을 적용하였다. 왜형률은 고조파 발생의 정도를 나타내는 기준이며, 식 3.2와 같이 고조파 성분을 이용하여 왜형률을 산출할 수 있다^[29]. 그림 3.6에서 바리스터 신품의 검출 파형을 나타내었다.

$$THD = \frac{\sqrt{I_{2nd}^2 + I_{3rd}^2 + \dots + I_n^2}}{I_{1st}} \times 100 [\%] \quad (3.2)$$

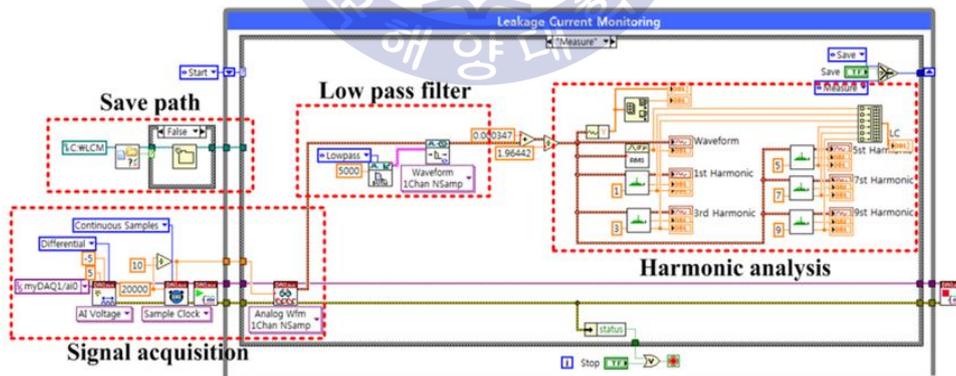
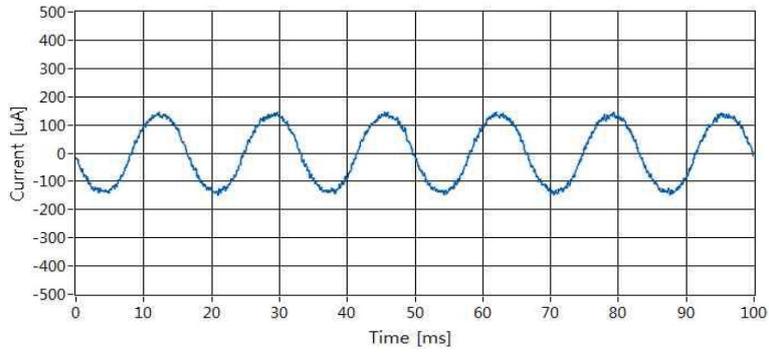
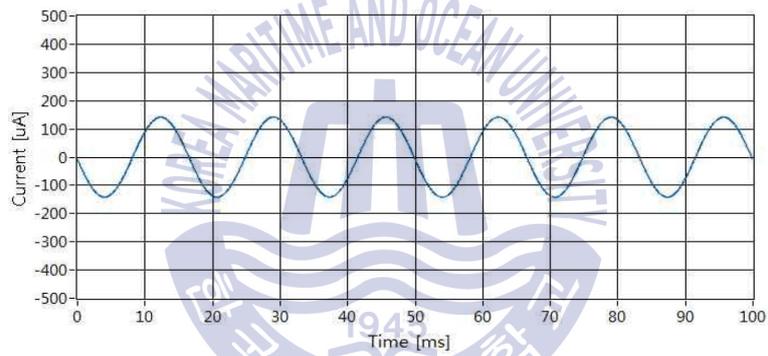


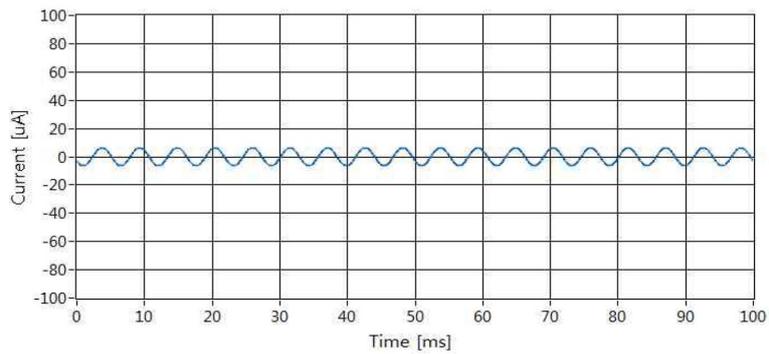
그림 3.5 측정 알고리즘
Fig. 3.5 Measurement algorithm



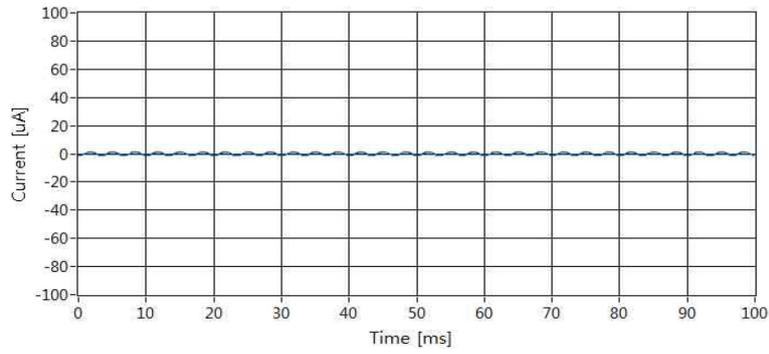
(a) 전체 누설전류



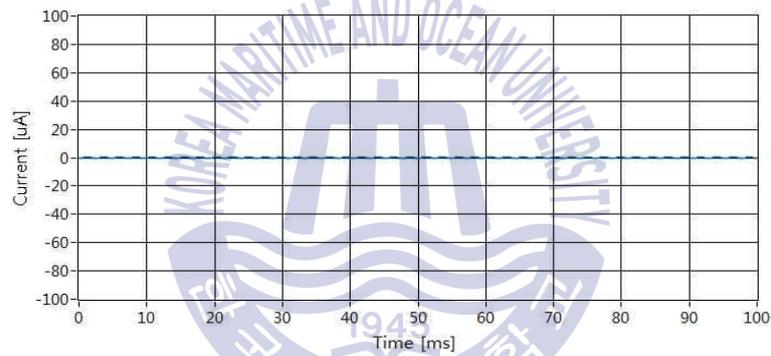
(b) 기본파 성분



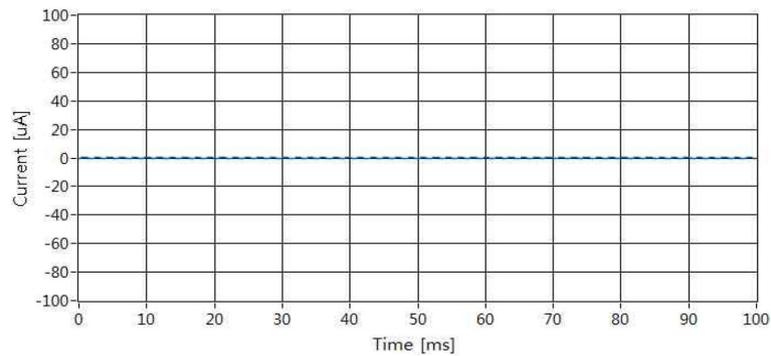
(c) 제 3조파 성분



(d) 제 5조파 성분



(e) 제 7조파 성분



(f) 제 9조파 성분

그림 3.6 누설전류 파형의 예

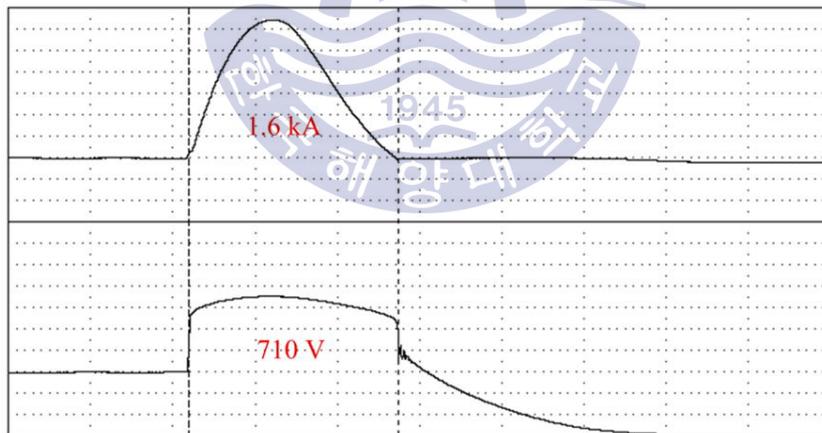
Fig. 3.6 Typical waveforms of leakage current components

제 4 장 결과 및 분석

가. 흡수 에너지

ZnO 바리스터 A 및 B의 인가 에너지(W)는 식 4.1과 같이 제한전압(v)과 인가전류(i)의 시간에 대한 적분함수를 적용하여 산출할 수 있다. 그림 4.1에서 서지 1회 인가 시 전류의 최대값은 각각 1.6 kA 및 10.1 kA, 제한전압은 710 V 및 1,590 V로 측정되었다. 계산결과, 바리스터 A 및 B의 인가 에너지는 각각 16 J 및 200 J이다.

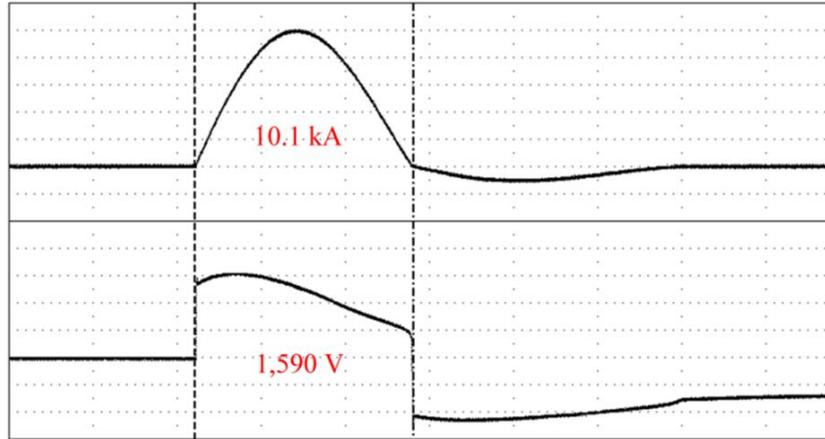
$$W = \int vi dt [J] \quad (4.1)$$



상 : 인가전류 [500 V/div, 10 μ s/div]

하 : 제한전압 [200 V/div, 10 μ s/div]

(a) 바리스터 A



상 : 인가전류 [2 kV/div, 10 μ s/div]

하 : 제한전압 [500 V/div, 10 μ s/div]

(b) 바리스터 B

그림 4.1 인가전류와 제한전압

Fig. 4.1 Surge current and clamping voltage

바리스터에 서지가 1회 인가될 때 단위체적당 흡수되는 에너지의 크기로 열화진전 분석이 가능하다. 식 4.2와 같이 단위체적당 흡수 에너지 (W_U)는 인가 에너지(W)와 바리스터의 체적(V)으로 산출할 수 있다.

$$W_U = \frac{W}{V} [mJ/mm^3] \quad (4.2)$$

단위체적당 흡수 에너지를 산출한 결과, 표 4.1과 같이 바리스터 A는 20.4 mJ/mm³이며, 바리스터 B는 5.1 mJ/mm³이다. 바리스터 B에 인가되는 서지전류의 크기는 바리스터 A 대비 6.3배 크지만 실제 바리스터 A의 단위체적당 흡수 에너지가 4배 크다.

표 4.1 흡수 에너지의 산출

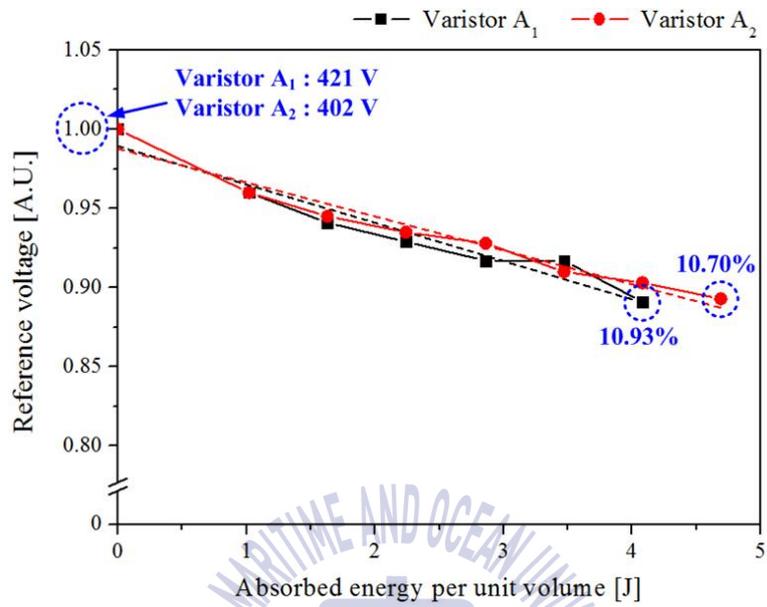
Table 4.1 Calculation of the absorbed energy

항 목	바리스터 A	바리스터 B
인가 에너지 [J]	16	200
전체 체적 [mm ³]	784	39,584
단위체적당 흡수 에너지 [mJ/mm ³]	20.4	5.1

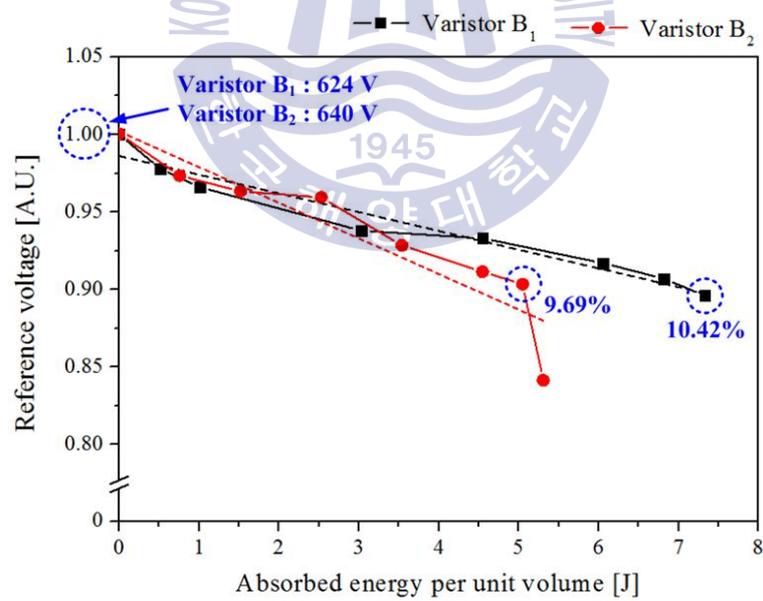
나. 기준전압

바리스터 A 및 B의 흡수 에너지와 기준전압 10% 감소의 상관관계를 분석하였다 그림 4.2, 표 4.2 및 표 4.3에서 서지를 바리스터 A₁ 및 A₂에 각각 200회 및 230회, 바리스터 B₁ 및 B₂에 각각 1,450회 및 1,050회 인가할 때, 기준전압이 10% 이상 감소하였다. 바리스터 B₂는 1,000회 서지 인가 시 기준전압이 9.69%로 감소하였으며, 이후 균단위로 서지를 50회 추가 인가하였을 때 기준전압이 15.94%로 급격히 감소하였다. 따라서 기준전압 10%에 근접한 1,000회에서 열화 시점으로 판정하였다.

바리스터 A 및 B의 서지 1회 인가 시 단위체적당 흡수 에너지(W_U)는 각각 20.4 mJ/mm³ 및 5.1 mJ/mm³이다. 열화 시점까지의 단위체적당 총 흡수 에너지(W_T)를 산출한 결과, 바리스터 A₁ 및 A₂는 각각 4.08 J 및 4.69 J이며, 바리스터 B₁ 및 B₂는 각각 7.33 J 및 5.05 J이다. 상기의 결과로부터 열화진전은 서지전류의 크기가 아닌 단위체적당 에너지 흡수량에 의존함을 알 수 있었다. 동종 바리스터는 같은 사양이라도 에너지 흡수량의 편차가 발생하며, 2종 바리스터는 20 ~ 30가지로 구성되는 ZnO 입자의 화합물이 제조사마다 다르므로 에너지 흡수량의 차이가 발생한다.



(a) 바리스터 A



(b) 바리스터 B

그림 4.2 기준전압의 변화

Fig. 4.2 Change of reference voltage

표 4.2 바리스터 A의 기준전압 변화

Table 4.2 Change of reference voltage of Varistor A

바리스터 A ₁				바리스터 A ₂			
횟 수	W_T [J]	측정값 [V]	변화율 [A.U.]	횟 수	W_T [J]	측정값 [V]	변화율 [A.U.]
신품		421	-	신품		402	-
50	1.02	404	0.960	50	1.02	386	0.960
80	1.63	396	0.941	80	1.63	380	0.945
110	2.24	391	0.929	110	2.24	376	0.935
140	2.86	386	0.917	140	2.86	373	0.928
170	3.47	386	0.917	170	3.47	366	0.910
200	4.08	375	0.891	200	4.08	363	0.903
열화				230	4.69	359	0.893

표 4.3 바리스터 B의 기준전압 변화

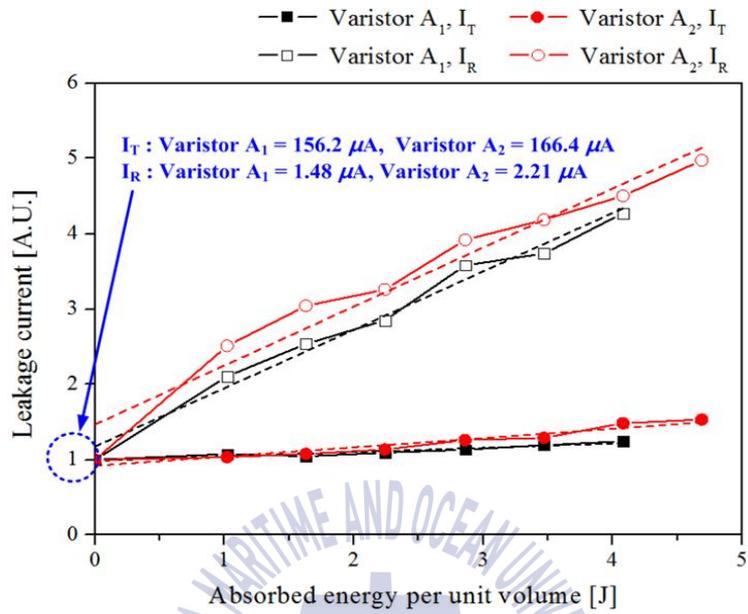
Table 4.3 Change of reference voltage of Varistor B

바리스터 B ₁				바리스터 B ₂			
횟 수	W_T [J]	측정값 [V]	변화율 [A.U.]	횟 수	W_T [J]	측정값 [V]	변화율 [A.U.]
신품		624	-	신품		640	-
100	0.51	610	0.978	150	0.76	623	0.973
200	1.01	603	0.966	300	1.52	616	0.963
600	3.03	585	0.938	500	2.53	614	0.959
900	4.55	582	0.933	700	3.54	594	0.928
1,200	6.06	572	0.917	900	4.55	583	0.911
1,350	6.82	566	0.907	1,000	5.05	578	0.903
1,450	7.33	559	0.896	1,050	5.31	538	0.841

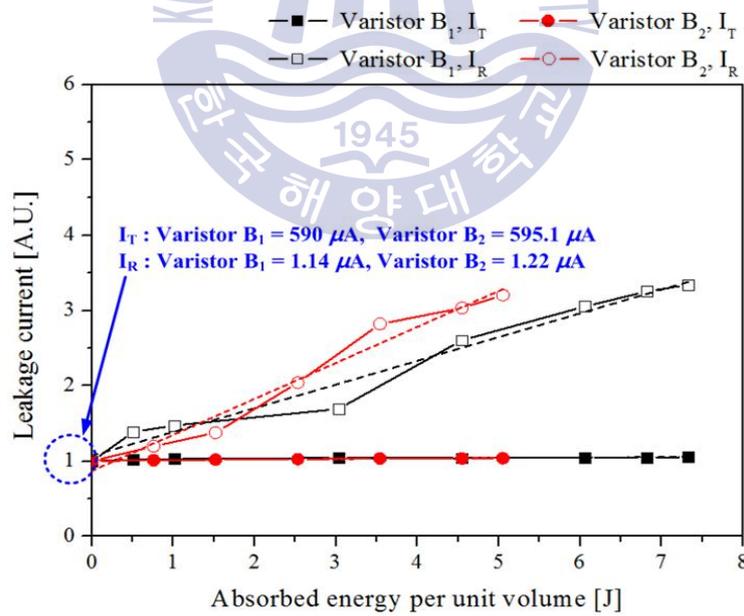
다. 누설전류

바리스터의 열화진전에 따른 전체 누설전류 및 저항분 누설전류의 변화를 분석하였다. 바리스터의 열화 시 각 누설전류 성분의 파형은 왜곡이 발생하므로 절댓값의 변화율을 이용하였다. 그림 4.3 및 표 4.4 ~ 표 4.7에서 바리스터 A 및 B의 기준전압이 10% 감소된 지점까지의 단위체적당 총 흡수 에너지와 누설전류의 관계를 나타내었다. 바리스터 A₁ 및 A₂의 전체 누설전류 변화는 단위체적당 총 흡수 에너지가 4.08 J 및 4.69 J에서 변화율이 1.25배 및 1.53배로 미소하게 증가하였지만, 저항분 누설전류의 변화는 4.26배 및 4.96배로 현저하게 증가하였다. 바리스터 A와 동일한 추이로, 바리스터 B₁ 및 B₂의 전체 누설전류는 7.33 J 및 5.05 J에서 1.06배 및 1.04배 증가하였고, 저항분 누설전류는 3.34배 및 3.21배 증가하였다. 바리스터의 열화진전 시 전체 누설전류는 절댓값이 수 백 μA 정도이므로 검출에 용이하지만 초기값 대비 변화율이 작기 때문에 열화판단이 어렵다. 또한 저항분 누설전류의 변화율은 크므로 열화판단이 가능하지만 절댓값이 수 μA 정도이므로 검출이 어려울 것으로 판단하였다.

상기의 분석으로부터 바리스터의 열화진전 시 기준전압 10%의 변화에 대응한 On-line 측정 파라미터로써 전체 누설전류 및 저항분 누설전류를 적용한다면 측정에 오차가 발생할 것으로 사료된다.



(a) 바리스터 A



(b) 바리스터 B

그림 4.3 누설전류의 변화

Fig. 4.3 Change of leakage current

표 4.4 바리스터 A의 전체 누설전류 변화

Table 4.4 Change of total leakage current of Varistor A

바리스터 A ₁			바리스터 A ₂		
W _T [J]	측정값 [μA]	변화율 [A.U.]	W _T [J]	측정값 [μA]	변화율 [A.U.]
신품	156.2	1	신품	166.4	1
1.02	167.9	1.08	1.02	172.1	1.03
1.63	163.4	1.05	1.63	179.2	1.08
2.24	170.5	1.09	2.24	189.0	1.14
2.86	177.0	1.13	2.86	209.7	1.26
3.47	186.5	1.19	3.47	214.8	1.29
4.08	194.4	1.25	4.08	247.1	1.49
열화			4.69	255.2	1.53

표 4.5 바리스터 A의 저항분 누설전류 변화

Table 4.5 Change of resistive leakage current of Varistor A

바리스터 A ₁			바리스터 A ₂		
W _T [J]	측정값 [μA]	변화율 [A.U.]	W _T [J]	측정값 [μA]	변화율 [A.U.]
신품	1.48	1	신품	2.21	1
1.02	3.11	2.10	1.02	5.54	2.51
1.63	3.75	2.53	1.63	6.71	3.04
2.24	4.21	2.85	2.24	7.19	3.25
2.86	5.29	3.57	2.86	8.64	3.91
3.47	5.52	3.73	3.47	9.23	4.18
4.08	6.31	4.26	4.08	9.93	4.49
열화			4.69	10.97	4.96

표 4.6 바리스터 B의 전체 누설전류 변화

Table 4.6 Change of total leakage current of Varistor B

바리스터 B ₁			바리스터 B ₂		
W_T [J]	측정값 [μ A]	변화율 [A.U.]	W_T [J]	측정값 [μ A]	변화율 [A.U.]
신품	590.0	1	신품	595.1	1
0.51	600.7	1.02	0.76	602.5	1.01
1.01	607.1	1.03	1.52	606.2	1.02
3.03	616.9	1.05	2.53	610.9	1.03
4.55	613.4	1.04	3.54	615.3	1.03
6.06	617.6	1.05	4.55	617.1	1.04
6.82	619.1	1.05	5.05	617.9	1.04
7.33	622.3	1.06	열화		

표 4.7 바리스터 B의 저항분 누설전류 변화

Table 4.7 Change of resistive leakage current of Varistor B

바리스터 B ₁			바리스터 B ₂		
W_T [J]	측정값 [μ A]	변화율 [A.U.]	W_T [J]	측정값 [μ A]	변화율 [A.U.]
신품	1.14	1	신품	1.22	1
0.51	1.58	1.39	0.76	1.46	1.20
1.01	1.68	1.47	1.52	1.68	1.38
3.03	1.93	1.69	2.53	2.49	2.04
4.55	2.97	2.61	3.54	3.44	2.82
6.06	3.48	3.05	4.55	3.70	3.03
6.82	3.71	3.25	5.05	3.91	3.21
7.33	3.81	3.34	열화		

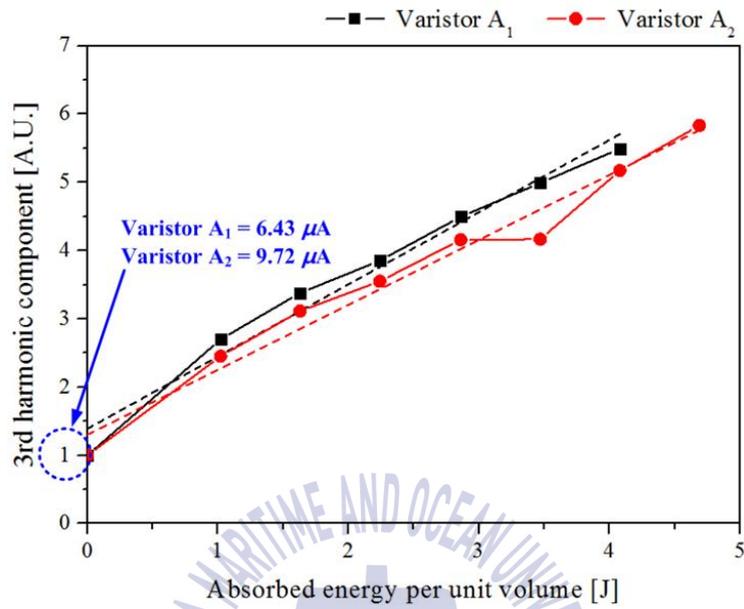
라. 고조파 성분

저항분 누설전류의 변화에 의존하는 고조파 성분을 이용하여 바리스터의 열화진전을 분석하였다. 바리스터의 열화 시 저항분 성분과는 달리 고조파 성분은 측정 파형의 왜곡이 없기 때문에 실효값과 최댓값의 변화율은 동일하다. 고조파 성분 중 제 3조파 성분의 크기가 가장 뚜렷하므로 측정 및 분석이 용이하다는 이점을 갖는다. 그러므로 그림 4.4, 표 4.8 및 표 4.9에서 제 3조파 성분의 최댓값을 이용하여 변화를 분석하였다. 바리스터 A₁ 및 A₂는 단위체적당 총 흡수 에너지가 4.08 J 및 4.69 J에서 변화율이 5.49배 및 5.83배 증가하였고, 바리스터 B₁ 및 B₂는 7.33 J 및 5.05 J에서 2.08배 및 2.37배 증가하였다.

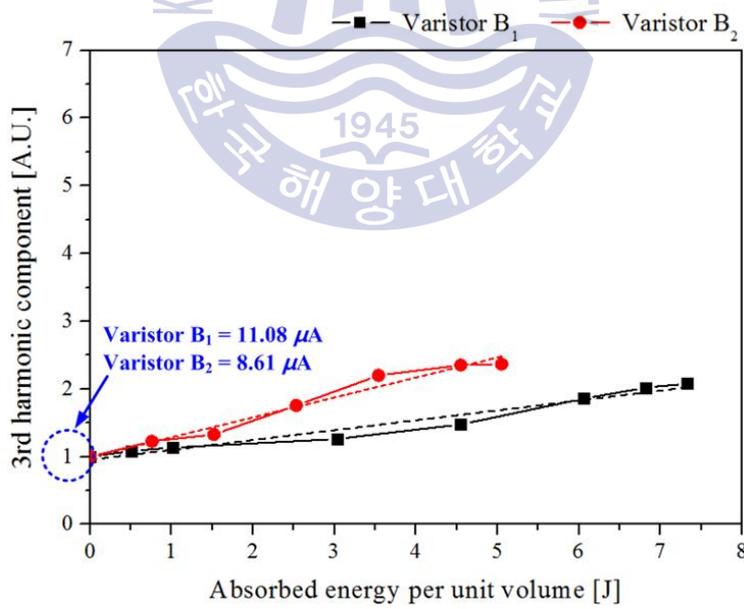
제 3조파 성분은 저항분 누설전류와 동일한 추세로 변화할 뿐만 아니라 바리스터의 열화 시 절댓값은 수 십 μA 까지 증가함으로써 저항분 누설전류 대비 검출이 용이할 것으로 판단하였다. 산업현장에서 적용 시 관통형 변류기, 증폭기 및 필터를 이용한 간편한 측정 및 오차의 최소화가 가능하다.

고조파 발생의 정도를 나타내는 왜형률을 이용하여 그림 4.5, 표 4.10 및 표 4.11에서 변화를 분석하였다. 초기값 대비 바리스터 A₁ 및 A₂는 4.27배 및 4.1배 증가하였고 바리스터 B₁ 및 B₂는 각각 1.96배 및 2.23배 증가하였다.

왜형률은 초기값 대비 측정값 및 변화율이 적절하였다. 그러나 제 3조파 성분과 비교할 때 왜형률을 이용한 바리스터의 열화진단은 전 고조파 성분을 적용한 주파수 분석이 필요하므로 취급이 복잡하다는 단점을 갖는다.



(a) 바리스터 A



(b) 바리스터 B

그림 4.4 제 3조파 성분의 변화

Fig. 4.4 Change of the third harmonic component

표 4.8 바리스터 A의 제 3조파 성분 변화

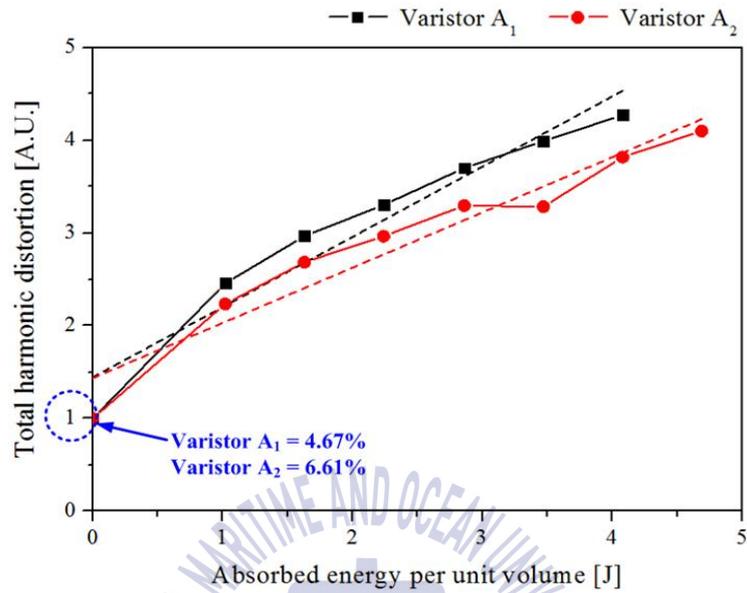
Table 4.8 Change of the third harmonic component of Varistor A

바리스터 A ₁			바리스터 A ₂		
W_T [J]	측정값 [μ A]	변화율 [A.U.]	W_T [J]	측정값 [μ A]	변화율 [A.U.]
신품	6.43	1	신품	9.72	1
1.02	17.37	2.70	1.02	23.83	2.45
1.63	21.73	3.38	1.63	30.26	3.11
2.24	24.76	3.85	2.24	34.51	3.55
2.86	28.91	4.50	2.86	40.42	4.16
3.47	32.09	4.99	3.47	40.50	4.17
4.08	35.32	5.49	4.08	50.27	5.17
열화			4.69	56.69	5.83

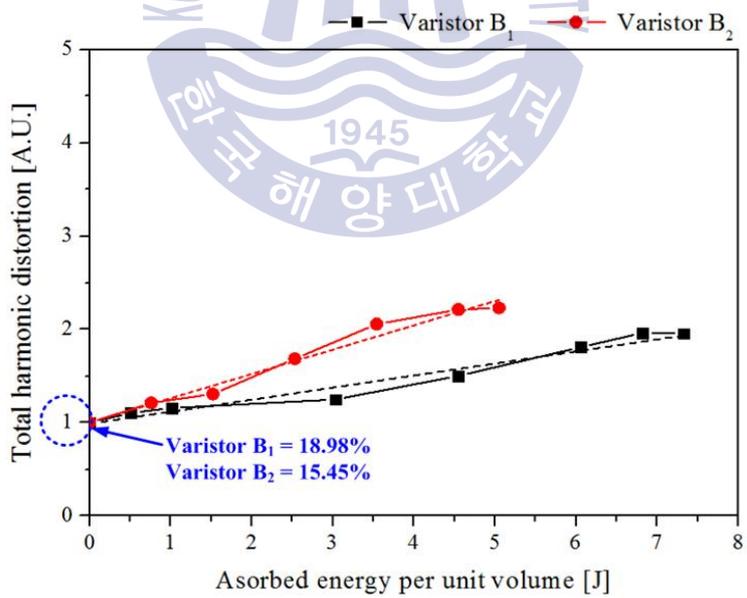
표 4.9 바리스터 B의 제 3조파 성분 변화

Table 4.9 Change of the third harmonic component of Varistor B

바리스터 B ₁			바리스터 B ₂		
W_T [J]	측정값 [μ A]	변화율 [A.U.]	W_T [J]	측정값 [μ A]	변화율 [A.U.]
신품	11.08	1	신품	8.61	1
0.51	12.03	1.09	0.76	10.55	1.23
1.01	12.55	1.13	1.52	11.44	1.33
3.03	13.98	1.26	2.53	15.13	1.76
4.55	16.37	1.48	3.54	18.95	2.20
6.06	20.59	1.86	4.55	20.25	2.35
6.82	22.37	2.02	5.05	20.37	2.37
7.33	23.03	2.08	열화		



(a) 바리스터 A



(b) 바리스터 B

그림 4.5 왜형률의 변화

Fig. 4.5 Change of total harmonic distortion

표 4.10 바리스터 A의 왜형률 변화

Table 4.10 Change of total harmonic distortion of Varistor A

바리스터 A ₁			바리스터 A ₂		
W_T [J]	측정값 [%]	변화율 [A.U.]	W_T [J]	측정값 [%]	변화율 [A.U.]
신품	4.67	1	신품	6.61	1
1.02	11.47	2.46	1.02	14.77	2.23
1.63	13.85	2.97	1.63	17.74	2.68
2.24	15.42	3.30	2.24	19.59	2.96
2.86	17.28	3.70	2.86	21.78	3.30
3.47	18.63	3.99	3.47	21.70	3.28
4.08	19.95	4.27	4.08	25.23	3.82
열화			4.69	27.10	4.10

표 4.11 바리스터 B의 왜형률 변화

Table 4.11 Change of total harmonic distortion of Varistor B

바리스터 B ₁			바리스터 B ₂		
W_T [J]	측정값 [%]	변화율 [A.U.]	W_T [J]	측정값 [%]	변화율 [A.U.]
신품	18.98	1	신품	15.45	1
0.51	20.98	1.11	0.76	18.73	1.21
1.01	21.97	1.16	1.52	20.20	1.31
3.03	23.71	1.25	2.53	26.03	1.69
4.55	28.48	1.50	3.54	31.76	2.06
6.06	34.33	1.81	4.55	34.17	2.21
6.82	37.24	1.96	5.05	34.45	2.23
7.33	37.11	1.96	열화		

제 5 장 결 론

본 논문에서는 ZnO 바리스터의 열화분석 및 건전성 평가 기준을 제시하기 위하여 흡수 에너지 및 전기적 특성을 분석하였으며, 실험 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

가속열화를 위해 2종의 바리스터에 $8/20\mu\text{s}$ 의 서지전류를 1.6 kA(16 J) 및 10.1 kA(200 J)로 인가하였으며, 단위 체적당 흡수 에너지는 20.4 mJ/mm^3 및 5.1 mJ/mm^3 으로 산출되었다. 바리스터 B에 인가되는 서지전류의 최댓값은 크지만, 단위체적당 흡수 에너지는 바리스터 A가 컸다. 기준전압이 10% 감소하는 시점에서 2종 바리스터의 단위체적당 총 흡수 에너지는 4.08 J 및 5.05 J 이상이였으며, 열화진전은 서지전류의 크기보다 단위체적당 에너지 흡수량에 의존한다는 것을 알 수 있었다. 즉, 단위체적당 흡수 에너지가 바리스터의 열화진전에 중요한 변수가 된다.

바리스터의 열화에 따른 특성을 분석하기 위해 에너지 흡수량에 따른 기준전압, 전체 누설전류, 저항분 누설전류, 제 3조파 성분 및 왜형률을 측정 및 비교·분석하였다. 에너지 흡수량에 따라 기준전압은 감소하였고, 누설전류 파라미터는 증가하는 경향을 나타내었다. 기준전압 10% 저하시 전체 누설전류는 저항분 누설전류 및 고조파 성분에 비해 수십 배로 낮은 증가율을 보였다. 바리스터 A 및 B의 저항분 누설전류는 초기값 대비 400% 이내 및 200% 이상으로 증가하였으나 절댓값은 수 μA 정도로 미세하였다. 제 3조파 성분은 초기값 대비 500% 이내 및 100% 이상 증가하였으며, 왜형률은 300% 이상 및 100% 내외의 증가를 나타내었다.

바리스터의 열화진단에서 중요한 지표인 기준전압 10% 변화에 대하여 On-line 측정이 가능한 지표는 누설전류 성분과 고조파 성분이다. 그러나

전체 누설전류는 변화율이 작으며, 저항분 누설전류는 변화율이 크지만 절댓값은 미소하므로 열화진단의 적용에 한계가 있다. 또한 왜형률은 초기값 대비 측정값 및 변화율이 적절하지만, 전원 품질에 영향을 받기 때문에 활용이 어렵다. 하지만 제 3조파 성분은 저항분 누설전류의 변화추세와 거의 동일하고 절댓값이 크며, 비접촉식 검출 회로를 이용한 간편한 측정이 가능하므로 최적의 파라미터로 판단하였다.

본 연구의 결과는 바리스터 제조 시 품질 검사와 산업 현장에 적용된 바리스터의 열화 진단은 물론, 수명예측에 적용될 것으로 기대한다.



참 고 문 헌

- [1] H. Satoh, "Study on increasing the surge capability of a lightning surge protection, semiconductor device", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol.35, No.2, pp.311-315, 1993.
- [2] S. M. Sliva, F. A. Eleuterio, A. de Souza Reis, B. J. C. Filho, "Protection Schemes for a Dynamic Voltage Restorer", Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting, Vol.4, pp.2239-2243, 2004.
- [3] Tapan K. Gupta, "Application of Zinc Oxide Varistors", Journal of the American Ceramic Society, Vol.73, No.7, pp.1817-1840, 1990.
- [4] 남춘우, 박종아, 김명준, 류정선, "Zn-Pr-Co-Cr-Dy 산화물계 바리스터 세라믹스의 전기적 안정성", 한국세라믹학회지, 제40권, 제11호, pp.1067-1072, 2003.
- [5] S. James, N. Kularatna, A. Steyn-Ross, R. Künnemeyer, "Estimation of transient surge energy transferred with associated time delays for individual components of surge protector circuits", IET Power Electronics, Vol.8, No.5, pp.685-692, 2015.
- [6] K. Eda, "Zinc oxide varistors", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.5, No.6, pp.28-30, 1989.
- [7] T. H. Jeoung, Y. S. Kim, S. P. Nam, S. H. Lee, J. W. Kang, J. C. Kim, S. G. Lee, "Development of Thermal Runaway Preventing ZnO Varistor for Surge Protective Device", Journal of Nanoscience and Nanotechnology, Vol.14, No.12, pp.8957-8960, 2014.

- [8] C. Gomes, V. Cooray, “Electromagnetic Transients in Radio/Microwave Bands and Surge Protection Devices”, Progress In Electromagnetics Research, Vol.108, pp.101-130, 2010.
- [9] Fernando H. Silveira, Alberto De Conti, Silvério Visacro, “Lightning Overvoltage Due to First Strokes Considering a Realistic Current Representation”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol.52, No.4, pp.929-935, 2010.
- [10] 이시이 마사루, “알기 쉬운 뇌대책의 기본 및 기술”, 한국오토와전기 주식회사, pp.30-41, 2013.
- [11] Ronald B. Standler, “Protection of Electronic Circuits from Overvoltages”, Dover Publications, INC., pp.34-54, 2002.
- [12] IEC 60060-1, High-voltage test techniques-Part 1:General definitions and test requirements, 3rd Edition, 2010.
- [13] IEC 61643-1, Low-voltage surge protective devices-Part 1:Surge protective devices connected to low-voltage power distribution systems-Requirements and tests, 2nd Edition, 2005.
- [14] Schneider Electric, “Electrical installation guide 2016”, pp.J13-J22, 2016.
- [15] KS C IEC 62305-4, 피뢰시스템-제4부:구조물 내부의 전기전자시스템, 2012.
- [16] 박서준, “XLPE 지중케이블에서 부분방전의 측정과 분석”, 석사학위 논문, 한국해양대학교대학원, 2017.
- [17] 박경수, “서지보호기의 열화와 온라인 진단장치에 관한 연구”, 석사학위논문, 한국해양대학교대학원, 2016.
- [18] H. Ahmad, A. Haddad, H. Griffiths, S. Robson, T. Nishimura, N.

Tsukamoto, “Electrical characterisation of ZnO microvaristor materials and compounds”, Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2015 IEEE Conference on, pp.688-692, 2015.

[19] Jesper Magnusson, Robert Saers, Lars Liljestr nd, G ran Engdahl, “Separation of the Energy Absorption and Overvoltage Protection in Solid-State Breakers by the Use of Parallel Varistors”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.29, No.6, pp.2715-2722, 2013.

[20] Maximilian Nikolaus Tuczec, Volker Hinrichsen, “Recent Experimental Findings on the Single and Multi-Impulse Energy Handling Capability of Metal-Oxide Varistors for Use in High-Voltage Surge Arresters”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.29, No.5, pp.2197-2205, 2014.

[21] 조영진, “가스절연변전소 피뢰설비의 열화진단기술 및 전문가시스템 개발”, 박사학위논문, 한국해양대학교대학원, 2008.

[22] 강성만, “산화아연 피뢰기의 과도특성 및 열화진단에 관한 연구”, 박사학위논문, 인하대학교대학원, 2004.

[23] J. Lundquist, L. Stenstrom, A. Schei, B. Hansen, “New method for measurement of the resistive leakage currents of metal-oxide surge arresters in service”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.5, No.4, pp.1811-1822, 1990.

[24] M. Khodsuz, M. Mirzaie, S. Seyyedbarzegar, “Metal oxide surge arrester condition monitoring based on analysis of leakage current components”, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol.66, pp.188-193, 2015.

[25] 길경석, 한주섭, 주문노, “누설전류측정에 의한 피뢰기 열화진단에 있

어 전원고조파의 영향”, 대한전기학회 논문지, 제52권, 제1호, pp.42-46, 2003.

[26] V.S. Brito, G.R.S. Lira, E.G. Costa, “Methodology for Decomposition of the Leakage Current in Metal Oxide Surge Arresters”, 18th International Symposium on High Voltage Engineering, pp.2156-2161, 2013.

[27] 길경석, 류길수, 송재용, 김일권, 박대원, 최수연, “애자/피뢰기 모니터링을 위한 유비쿼터스 센서 개발”, 한국철도학회 논문집, 제10권, 제2호, pp.117-123, 2007.

[28] I. A. Metwally, M. Eladawy, E. A. Feilat, “Online condition monitoring of surge arresters based on third-harmonic analysis of leakage current”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.24, No.4, pp.2274-2281, 2017.

[29] P. Bokoro, I. Jandrell, “The impact of harmonics on the V-I characteristic of ZnO varistors”, 2016 IEEE International Conference on Dielectrics, pp.658-661, 2016.