



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

MOV의 온라인 열화진단에 있어
전원 3고조파 전압과 주위 온도의 영향에 관한 연구

A Study on the Influence of the Third Harmonic Voltage and Ambient
Temperature on Online Deterioration Diagnosis of Metal Oxide varistor



指導教授 吉 暻 碩

2020年 8月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

姜 兌 昊

本 論文을 姜兌昊의 工學碩士 學位論文으로 認准함

委員長：工學博士 張 樂 元 ㊟

委 員：工學博士 吉 暻 碩 ㊟

委 員：工學博士 金 潤 植 ㊟

2020年 7月

韓國海洋大學校 大學院

목 차

목 차	i
그림 및 표 목차	iii
Abstract	v
1. 서 론	1
2. 이 론	3
2.1 서지의 발생	3
2.2 금속 산화물 바리스터(MOV)	5
2.3 열화 진단 기술	9
3. 실험 및 방법	16
3.1 가속 열화	16
3.2 주위 온도의 영향	17
3.3 전원 고조파의 영향	18
4. 결과 및 분석	24
4.1 가속 열화 실험	24
4.2 주위 온도의 영향	27
4.3 전원 고조파의 영향	33

5. 결 론 36

참 고 문 헌 38



그림 및 표 목차

< 그림 목차 >

그림 1.1 서지로 인한 PCB의 손상	1
그림 2.1 서지의 종류	3
그림 2.2 보호레벨 구분	5
그림 2.3 바리스터의 동작원리	6
그림 2.4 바리스터의 구조	6
그림 2.5 MOV의 $V-I$ 특성	7
그림 2.6 바리스터의 등가회로	9
그림 2.7 열화원인과 열화현상	10
그림 2.8 누설전류의 벡터도	11
그림 2.9 기준전압의 변화	11
그림 2.10 자기소거법	12
그림 2.11 동기정류법	13
그림 2.12 제 3조파 성분 측정법	14
그림 3.1 서지 발생장치	17
그림 3.2 항온기의 사진	18
그림 3.3 제 3조파 전압의 영향	19
그림 3.4 전기적 파라미터 측정계	21
그림 3.5 측정 프로그램 구성	22
그림 4.1 전기적 파라미터 변화	25
그림 4.2 주위 온도변화에 따른 기준전압 변화	27
그림 4.3 주위 온도변화에 따른 전체 누설전류 변화	29
그림 4.4 주위 온도변화에 따른 제 3조파 성분 변화	31
그림 4.5 전원 고조파에 따른 누설전류 변화 (신품)	34
그림 4.6 전원 고조파에 따른 누설전류 변화 (열화품)	35

< 표 목차 >

표 3.1	바리스터의 전기적 파라미터	17
표 3.2	시료별 바리스터의 모델 값	20
표 3.3	바리스터의 사양	23
표 4.1	흡수에너지에 따른 전기적 파라미터 변화	26
표 4.2	기준전압의 변화	28
표 4.3	전체 누설전류의 변화	30
표 4.4	제 3조파 성분의 변화	32



A Study on the Influence of Third harmonics and Ambient temperature on online Deterioration Diagnosis of Metal Oxide Varistor

by Tae-Ho Kang

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

Abstract

Metal oxide varistors installed in power system to protect devices from transient voltage are degraded by repetitive protective operation and environmental factors. The third harmonic component of the total leakage current is applied to evaluate performance of the varistor for the online measurement. However, when the harmonic component is included in the AC power source that the varistor is connected, leakage current unrelated to deterioration increases or decreases, and the electrical characteristics change according to the ambient temperature of the varistor. Therefore, the influence of the installation environment such as ambient temperature and harmonic component of power source should be considered to improve the accuracy of the diagnosis of deterioration of the varistor.

In this paper, the influence of electrical parameters were studied in accordance with the third harmonic component of the power source and ambient temperature. As a result, the third harmonic component of the total leakage current was changed from -19.4% to 6.62% for new varistor and -40.67% to 42.43% for deteriorated varistor, based on the ambient temperature of the varistors at 25°C. The third harmonic component of the total leakage current increased by 100% for every 1% increase in the third harmonic voltage of the AC mains, regardless of the phase. Therefore the third harmonic component of the total leakage current used for on-line diagnosis should be compensated based on the third harmonic voltage and ambient temperature to accurately diagnose the condition.

KEY WORDS: Metal oxide varistor (MOV), Deterioration diagnosis, Leakage current, Ambient temperature, Third harmonic voltage

MOV의 온라인 열화진단에 있어 전원 3고조파 전압과 주위 온도의 영향에 관한 연구

강 태 호

대한민국, 부산
한국해양대학교 대학원
전기전자공학부

초 록

과도과전압으로부터 기기를 보호하기 위해 설치되는 금속 산화물 바리스터는 제조상 결함이나 반복적인 보호동작으로 열화가 진전된다. 온라인 상태에서 바리스터의 건전성을 평가하기 위해 전체 누설전류의 제 3조파 성분을 적용하고 있다. 그러나 바리스터가 연결되어 있는 AC 전원에 고조파 성분이 포함되면 바리스터의 열화와 무관한 누설전류의 증가 또는 감소가 나타나며, 바리스터의 주위온도에 따라서 전기적 특성이 변화하게 된다. 그러므로 바리스터의 열화 진단의 정확도 향상을 위해서 주위온도와 전원 전압의 고조파성분과 같은 설치 환경의 영향을 고려해야 한다.

본 논문에서는 주위 온도와 전원 전압의 제 3조파 성분의 변화에 따른 바리스터의 전기적 파라미터의 영향에 관한 연구를 수행하였다. 바리스터의 주위 온도가 25℃를 기준으로 전체 누설전류의 제 3조파 성분은 신품의 경우 -19.4% ~ 6.62%, 열화품은 -40.67% ~ 42.43% 까지 변화하였다. 전체 누설전류의 제 3조파 성분은 전원 3고조파 전압의 중첩 위상과 관계없이 3고조파 전압이 1% 증가에 따라 100% 증가하였다. 따라서 온라인 열화 진단에 사용되는 전체 누설전류의 제 3조파 성분은

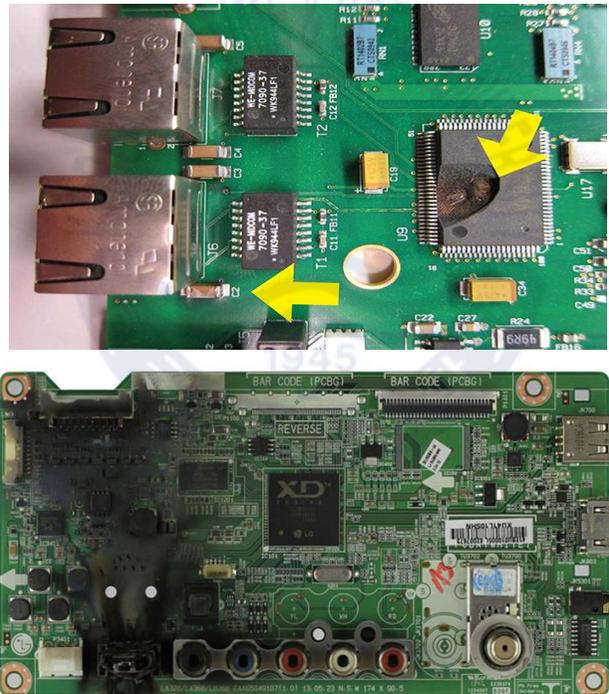
제 3조파 전압과 주위 온도의 영향을 고려하고 값을 보정해준다면 바리스터의 상태 진단의 정확도를 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

중요어 : 금속 산화물 바리스터 (MOV), 열화 진단, 누설 전류, 주위 온도, 3 고조파 전압



제 1 장 서 론

각종 산업분야에 사용되고 있는 전기전자기기에 내장된 반도체 소자는 크기가 작고 소비전력이 적은 장점이 있지만 온도에 의한 특성의 변화가 크고 전기적 스트레스에 약한 단점이 있다. 특히 서지(Surge)의 침입 시, 반도체 소자는 절연이 취약하여 부품의 손상이나 폭발 등의 사고가 일어난다. 그림 1.1은 서지로 인한 PCB의 손상을 보여주고 있다.



(출처)

상 : Joe Randolph, Designing ethernet cable ports to withstand lightning surges, (in compliance)

하 : Indiana Lang, Protect your gear from dirty power, (Home theater and high fidelity)

그림 1.1 서지로 인한 PCB의 손상

Fig. 1.1 PCBs damaged by surge

이를 해결하기 위해 서지로부터 반도체 소자를 보호하는 서지보호기 (SPD: Surge protective device)를 피보호기와 직·병렬로 연결하여 기기의 손상을 예방하고 피해를 최소화 시킬 수 있다^[1]. 서지보호기는 보호동작의 특성에 따라 가스 튜브(Gas discharge tube), 아발란치 다이오드(Avalanche diode) 및 금속 산화물 바리스터(Metal oxide varistor)로 분류할 수 있으며, 이 중 금속 산화물 바리스터는 과도과전압에 대해 우수한 비선형 저항특성과 큰 에너지 흡수능력으로 광범위하게 사용된다^{[2]-[5]}. 그러나 금속 산화물 바리스터는 제조 시 결함, 사용환경에서 기계적, 열적 스트레스 및 서지에 대한 반복적인 동작으로 열화가 진전되며, 열화된 바리스터는 정상운전전압에서도 누설전류의 증가로 열폭주(Thermal runaway)에 도달하여 단락 상태가 된다^{[6]-[9]}. 이러한 사고를 예방하여 기기 및 회로의 안정성 확보를 위해 바리스터의 열화평가에 관한 많은 연구가 선행되어 왔다^{[10]-[12]}. 그러나 바리스터가 설치된 장소의 온도 및 전원에 포함된 고조파 성분의 영향에 관한 연구는 미비한 실정이다. 바리스터의 상태진단에 사용하는 전기적 파라미터의 값이 주위 온도와 전원 고조파의 영향으로 값이 변화한다면 상태 진단의 오차는 증가하게 된다.

본 논문에서는 바리스터의 온라인 열화진단의 오차 발생의 원인 중 주위 온도와 전원 3고조파가 누설전류의 크기에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 바리스터의 신폴과 가속 열화 실험으로 열화된 바리스터를 대상으로 15°C~35°C로 주위온도를 변화시키며 전기적 특성의 변화를 분석하였다. 또한 MOV가 설치된 환경에서의 전원 3고조파의 전압의 크기 및 위상에 따른 누설전류의 변화를 분석하기 위해 바리스터의 비선형 저항계수, 정전용량 및 누설저항을 모델링하여 시뮬레이션을 수행하였다.

제 2 장 이 론

2.1 서지의 발생

서지(Surge)란 Line 또는 회로를 따라서 전달되며, 급속히 증가하고 서서히 감소하는 특성을 지닌 전기적 전류, 전압의 과도파형을 의미한다^[13]. 특히, 전원전압에서 과도과전압 형태인 서지는 각종 전기전자기기의 고장 및 전력계통사고 등을 초래한다.

서지는 그림 2.1과 같이 분류되며 발생 원인은 크게 뇌 방전에 의해 발생하는 뇌 서지, 개폐기의 조작에 의해 발생하는 개폐서지로 구분된다. 또한 EMP(Electro magnetic pulse), ESD(Electro static discharge)와 같이 급격한 전·자계의 변화에 의해 발생하기도 한다^[14].

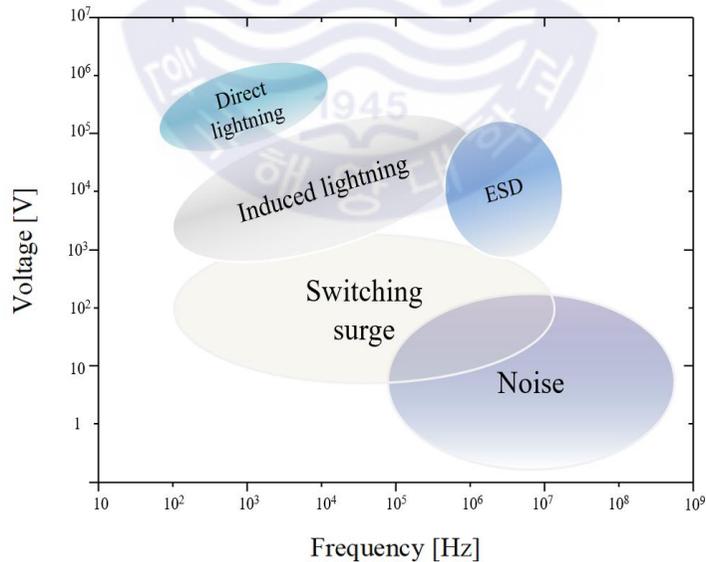


그림 2.1 서지의 종류

Fig 2.1 Types of surge

뇌 서지는 뇌운으로부터 전력선 및 구조물에 직접 뇌격하는 직격뢰(Direct lightning)와 낙뢰가 발생한 지점의 매설된 도체를 통하여 유도되는 유도뢰(Induced lightning)로 구분한다^[15]. 직격뢰는 수십 kV의 전압과 수백 kA 이상의 전류로 큰 파괴력을 가지며 물리적 손상 및 화재를 일으킨다. 유도뢰는 접지 전위를 급격히 상승시켜 방송, 통신 장비 및 기타 전자기기 등의 파손 및 장애를 초래한다. 개폐서지(Switching surge)는 개폐기의 단락 및 개방, 고장전류 차단 또는 차단기의 동작으로 발생하는 서지이다. 뇌 서지보다 지속시간은 수 ms로 길고, 크기는 작지만 지속적으로 발생하면 전기전자기기 및 선로에 사고가 발생한다.

그림 2.2는 국제 규격 IEC 61643-1에서 저전압 전원계통에서 보호레벨을 나타내며, 방전용량의 크기와 서지발생 횟수에 따른 보호레벨을 기준으로 보호레벨의 장소 및 서지 시험파형을 구분한다^{[16],[17]}. Type 1은 옥외를 포함하는 범위로써 가공선 및 인입구에 해당된다. 서지보호장치의 성능평가를 위하여 직격뢰의 시험파형인 10/350 μ s의 임펄스를 이용한다. Type 2는 옥내의 짧은 분기회로 및 주간선의 위치에 해당되며 8/20 μ s의 시험파형에 해당된다. Type 3는 과도과전압 방지를 위하여 Type 2의 보호장치와 협조한다. 옥내의 분기회로 및 인출구의 위치에 해당되며 1.2/50 μ s와 8/20 μ s의 조합파형으로 서지보호장치를 평가한다. 외부로부터 침입하는 서지는 크기가 감소되며 전선의 길이 당 R, L, C의 특성 및 회로의 분기로 인한 원인으로 판단할 수 있다. 본 실험에서 바리스터에 서지 주입 시, 8/20 μ s 시험 파형을 사용하는 이유는 금속 산화물 바리스터가 설치되는 장소가 Type 2이기 때문이다.

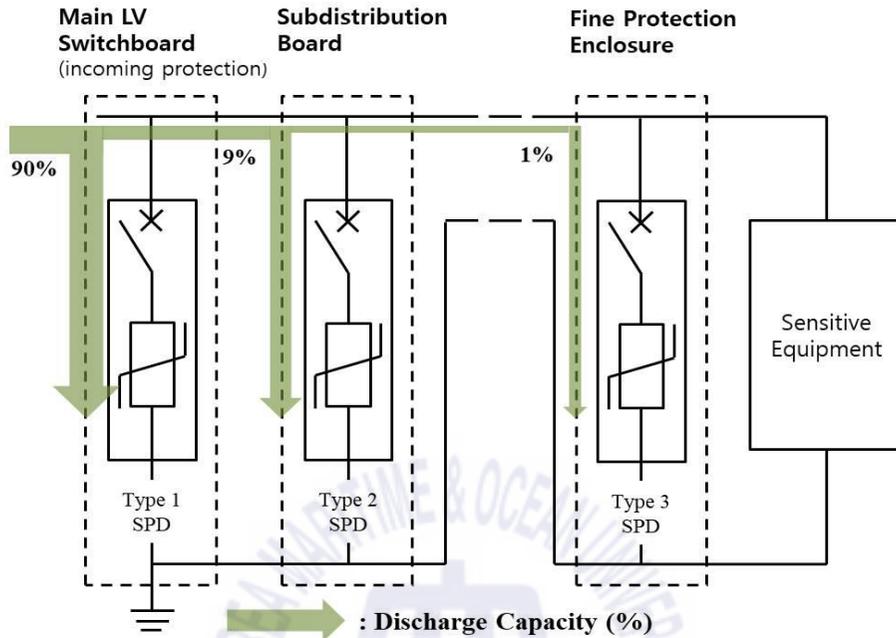


그림 2.2 보호레벨 구분

Fig. 2.2 Protection distributed levels

2.2 금속 산화물 바리스터 (MOV)

금속 산화물 바리스터는 인가전압의 크기에 따라 저항값이 변하는 비선형 저항특성이 우수한 서지보호소자이다. 그림 2.3과 같이 바리스터는 부하 측과 병렬로 설치되며, 정상상태일 때는 바리스터의 임피던스는 무한대로 부하 측에 정상적인 전원이 공급되지만 서지의 침입으로 바리스터의 동작개시전압 이상으로 증가하게 되면 바리스터의 임피던스가 감소하며 도전로를 형성하여 수 n_s 이내로 부하 측의 절연내력 이하로 억제시킨다^[18]. 바리스터에 사용되는 금속 산화물에는 대표적으로 산화아연(ZnO)이 있으며, 산화아연으로 구성된 바리스터의 미세구조는 그림 2.4와 같이 결정입자(ZnO grain)와 입계층(Intergranular layer)의 직·병렬 구조로 이

루어져 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^[19].

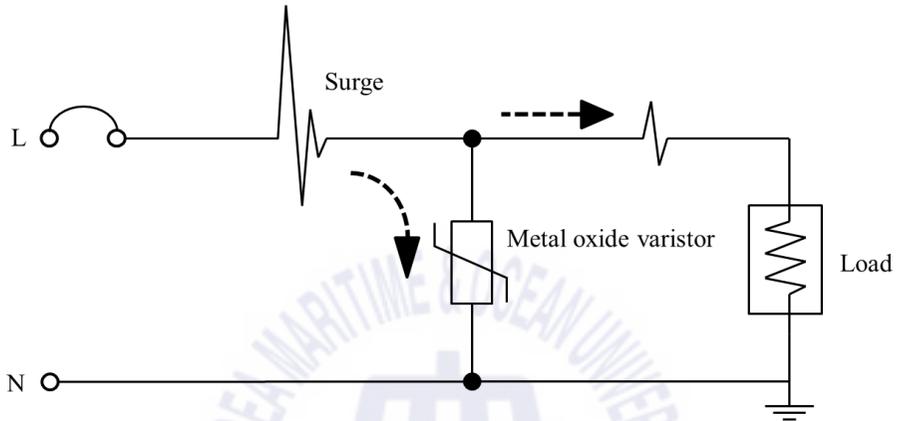


그림 2.3 바리스터의 동작원리
Fig. 2.3 Operation principle of varistors

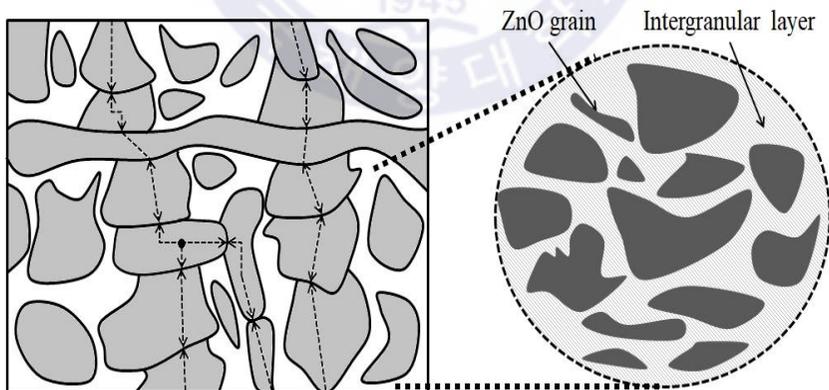


그림 2.4 바리스터의 구조
Fig. 2.4 Structure of a varistor

바리스터의 제한전압(V_b)은 식 2.1과 같이 입계의 직렬연결 개수(n)와 입계의 제한전압(v_b)으로 계산할 수 있다.

$$V_b = nv_b \quad (2.1)$$

단일 입계의 제한전압은 3 ~ 4 V이며, 직렬로 연결된 입계의 개수가 많을수록 큰 전압에서 항복이 발생한다. 바리스터의 에너지 내량은 입계의 면적에 의하여 결정되며, 면적은 입계의 병렬연결 개수에 비례한다^[20].

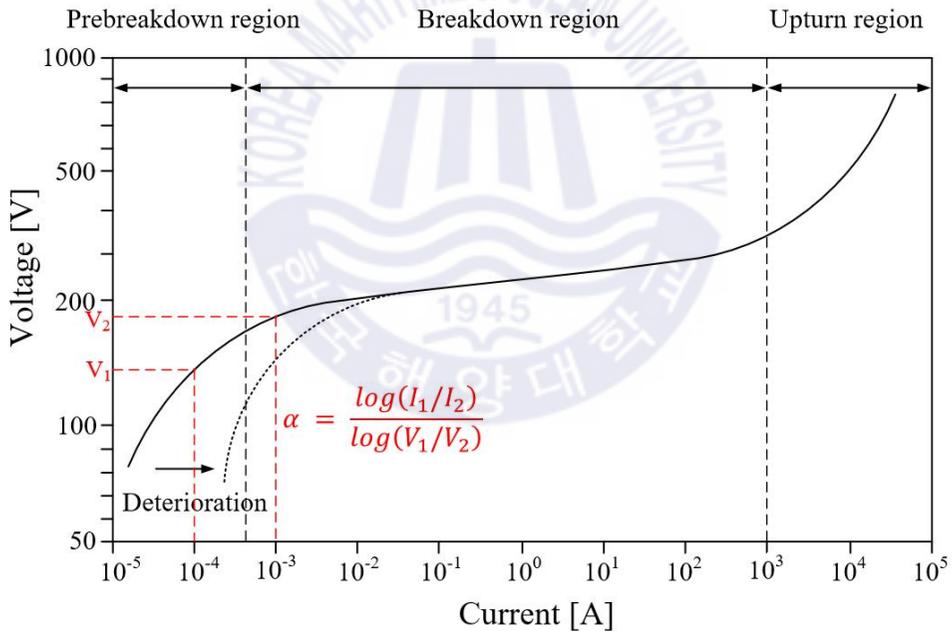


그림 2.5 MOV의 $V-I$ 특성

Fig. 2.5 $V-I$ characteristic of MOVs

그림 2.5는 바리스터의 $V-I$ 특성을 나타내었다. 전류영역을 크게 3가지 영역으로 분류하였으며 각 영역의 특성은 다음과 같다.

저전류 영역(Prebreakdown region)은 바리스터에 정상운전전압이 인가되는 구간이다. 저전류 영역에서 바리스터는 누설 컨덕턴스의 역할을 수행하게 되며 누설전류는 0.1 mA 이하로 흐른다^[18]. 그러나 누설전류는 바리스터 열화 시 값이 증가하게 된다.

중전류 영역(Breakdown region)에서 바리스터는 동작개시전압 이상에서는 작은 전압변동에도 누설전류의 변화가 일어나는 비선형 저항특성이 나타나는 부분이다. 여기서 누설전류의 증가율은 식 2.2와 같이 나타낼 수 있다.

$$I = kV^\alpha \quad (2.2)$$

여기서, 바리스터의 비선형 저항특성을 결정하는 비선형계수(α)는 임의의 두 점으로부터 식 2.3과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \frac{\log(I_1/I_2)}{\log(V_1/V_2)} \quad (2.3)$$

일반저항의 계수는 1이며, ZnO 소자의 계수는 25 ~ 100의 값을 갖는다. 비선형계수의 크기가 클수록 우수한 비선형 저항특성을 가진다.

대전류 영역(Upturn region)에서 바리스터의 동작특성은 ZnO입자(ZnO grain)의 고유저항에 의존하며 전류밀도와 전계강도의 상관관계는 비례적이다^[19].

그림 2.6에서 바리스터의 등가회로를 나타내었다^[21]. 바리스터에 전압(V_s)을 인가하였을 때 전체 누설전류(I_T)가 흐르고 입계층의 정전용량(C_g)과 전위장벽의 비선형 저항(R_{gb})에는 각각 용량분 누설전류(I_C)와 저항분

누설전류(I_R)가 흐르게 된다.

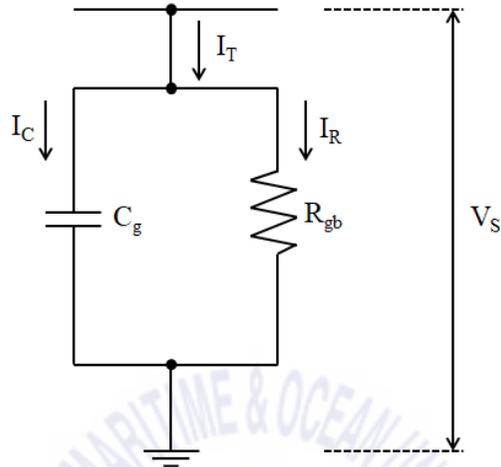


그림 2.6 바리스터의 등가회로
Fig. 2.6 Equivalent circuit of varistors

2.3 열화 진단 기술

바리스터의 열화 원인과 현상은 그림 2.7과 같다. 열화 원인은 제조 시 결함, 바리스터의 반복적인 동작, 기계적, 열적 스트레스, 온도 및 습도 등이 있으며 열화가 진전되면 전위장벽의 변형으로 누설전류, 기준전압 등 전기적 특성이 변화한다^{[22],[23]}. 열화 진전 시, 저항분 누설전류의 증가는 전체 누설전류의 증가로 이어지며 바리스터의 기준전압은 감소하게 된다. 누설전류의 증가는 산화아연 소자를 열적 불안정상태에 이르게 하며 이는 열폭주 및 단락 사고는 인명피해로 이어질 수 있다^[19]. 이와 같은 사고를 사전에 예방하기 위해서 전기적 특성의 변화를 이용한 바리스터 상태 진단 기술이 사용된다.



그림 2.7 열화원인과 열화현상

Fig. 2.7 Deterioration causes and phenomena

오프라인 상태에서 바리스터의 열화를 판단하기 위해 누설전류와 기준 전압을 측정하는 방법이 있다.

그림 2.8과 같이 전체 누설전류(I_T)는 용량분 누설전류(I_C)와 저항분 누설전류(I_R)의 벡터 합으로 산출할 수 있다. 용량분 누설전류는 열화 정도와 관계없이 일정한 값을 유지하지만 저항분 누설전류는 열화 진전에 따라 증가한다. 이는 바리스터의 미세 구조 변형으로 입계층의 저항이 감소하기 때문이다^[24]. 용량분 누설전류와 비교하여 저항분 누설전류 값은 매우 작으므로 전체 누설전류는 미소하게 증가한다. 열화 진전에 따라 값이 크게 증가하는 저항분 누설전류를 측정하는 방법은 대역 통과 필터, 차동 증폭기 등 부가적인 장치가 필요하다^[18].

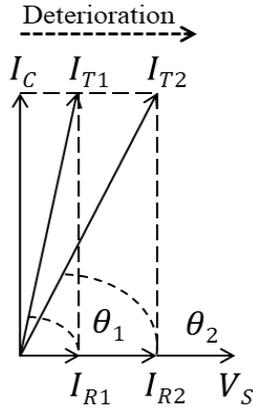


그림 2.8 누설전류의 벡터도

Fig. 2.8 Vector diagram of leakage current

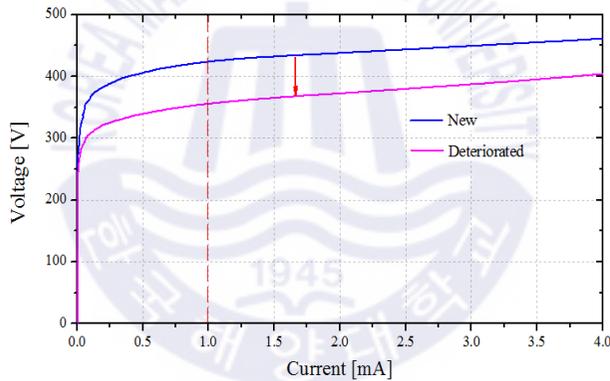


그림 2.9 기준전압의 변화

Fig. 2.9 Changes of reference voltage

기준전압은 저항분 누설전류 $1mA$ 흐를 때, 바리스터 양단에 흐르는 전압을 의미한다. 열화 진전 시 그림 2.9와 같이 감소하게 되는 경향이 있다. 초기 기준전압 측정값에서 10% 이상 변화 시 열화로 판단하며 정확한 열화진단이 가능하지만 온라인 상태에서 측정이 불가능하다.

바리스터의 온라인 측정 방법에는 누설전류를 이용한 자기소거법, 동

기정류법, 제 3조파 성분 분석법이 있다^{[25],[26]}.

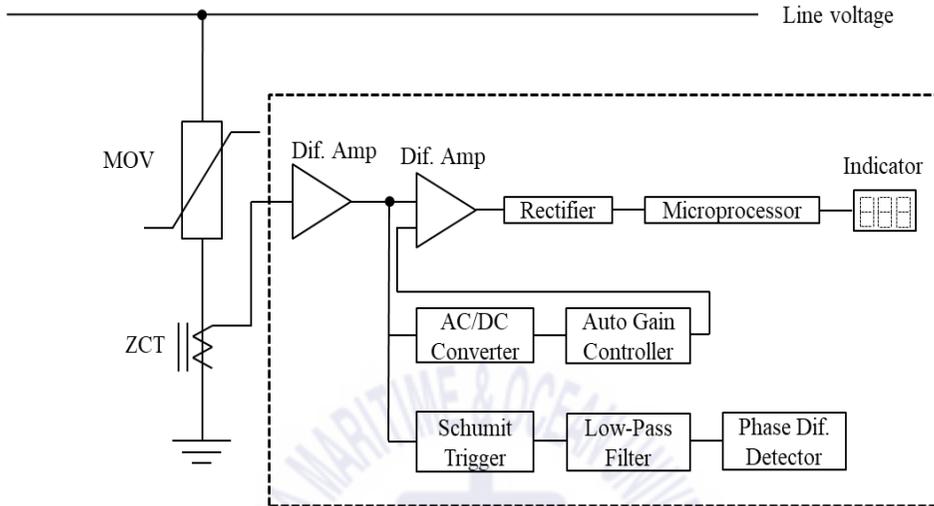


그림 2.10 자기소거법

Fig. 2.10 Self-cancel method

자기소거법은 전체 누설전류에서 용량분 누설전류와 크기가 같은 소거파를 만들어 전체 누설전류에서 저항분 누설전류만을 검출하는 방법이다^[24]. 영상변류기(Zero-phase current transformer, ZCT)에 의하여 미소한 전체 누설전류를 검출하고, 그 신호를 임의의 크기의 신호로 증폭하게 된다. 증폭된 신호에서 소거파를 만들기 위하여 신호의 영점을 검출할 수 있는 전자회로인 슈미트 트리거 회로(Schmitt trigger circuit)를 이용한다. 영점에서 반전된 구형파 신호를 발생시키고, 생성된 신호는 60 Hz 성분을 검출할 수 있는 저역통과필터(Low-pass filter)를 통과하여 소거파의 기본 신호를 만든다. 그림 2.10은 자기소거법에 의한 측정 원리를 나타내며 계기용변압기(PT) 등의 보조신호가 필요하지 않고, 검출 센서로서 변류기를 사용하기 때문에 계통으로부터 안정성을 확보하며 내서지성이 우수하다는

장점이 있다. 그러나 이 신호는 저항분 누설전류에 의한 위상차를 가진 신호이기 때문에 전체 누설전류로부터 위상차를 보정하는 별도의 회로가 필요하며 전체 누설전류에 포함된 고조파의 크기가 크거나 선로에 연결된 각종 기기들에 의하여 위상 지연이 발생하면 저항분 누설전류를 검출하지 못하는 단점이 있다.

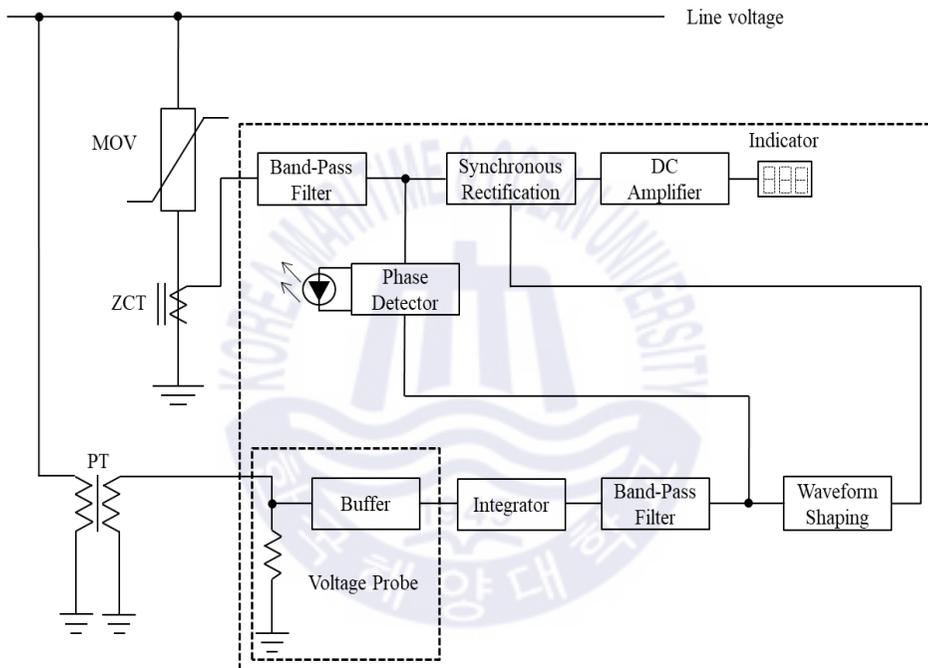


그림 2.11 동기정류법

Fig. 2.11 Synchronous rectification method

동기정류법은 바리스터에 흐르는 전체 누설전류를 검출하며 대역통과 필터를 통해 60Hz의 기본파 성분을 추출한 후, 이를 계기용변압기에서 얻은 전압신호로 동기정류하여 직류로 변환 및 증폭시켜 저항분 누설전류를 검출하는 방법이다. 그림 2.11은 동기정류법의 원리를 나타내며, 이 방법은 계통의 고조파 영향을 거의 받지 않으며 측정오차가 작다는 장점이 있

다. 그러나 계기용 변압기를 이용하여 전압신호를 검출할 수 있는 곳에서만 사용할 수 있으며 전류신호는 바리스터와 접지선 사이에 연결된 저항을 이용하여 검출하고 전압신호도 계기용 변압기 2차측으로 부터 직접 검출해야 하기 때문에 절연에 유의해야한다.

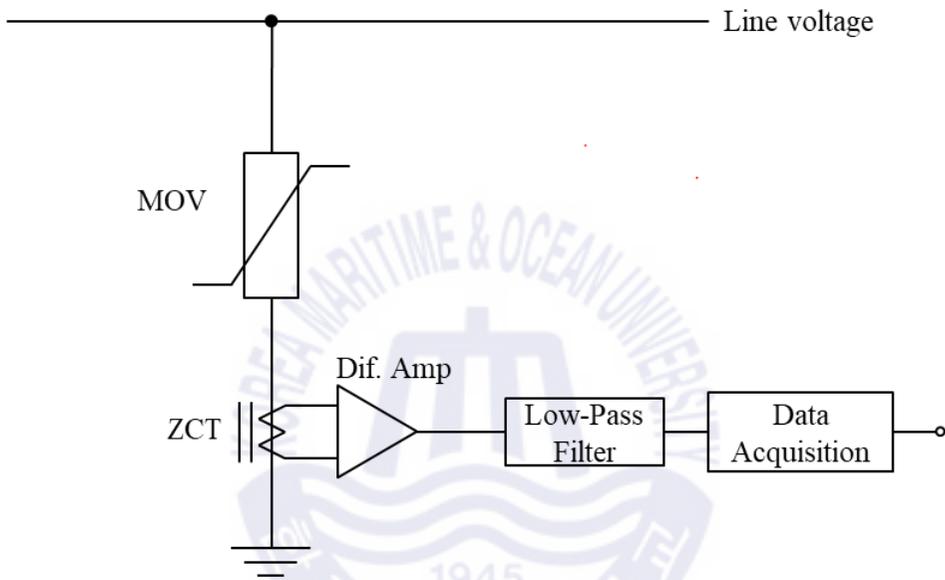


그림 2.12 제 3조파 성분 측정법

Fig. 2.12 Measurement of the third harmonic leakage current

바리스터의 누설전류는 접지선을 통하여 대지로 흐르기 때문에 바리스터가 연결된 접지선에 관통형 변류기를 설치하여 전체 누설전류를 검출하고, 전체 누설전류 중 대역통과필터를 이용하여 제 3조파 성분을 검출하는 방법이다. 그림 2.12는 제 3조파 성분 측정을 나타낸다. 저항분 누설전류는 전원전압과 동상이며, 전체 누설전류의 제 3조파 성분이 저항분 누설전류와 동일한 추세를 보이므로 전체 누설전류의 제 3조파 성분의 크기를 분석하여 열화를 진단한다^{[21],[27]}. 제 3조파 성분 측정 방법은 바리스터

의 정상운전상태에서도 누설전류 측정이 가능하며, 취급이 간단하고 상시 진단이 가능한 장점이 있다.



제 3 장 실험 및 방법

바리스터의 전기적 파라미터 초기값 및 주위온도 변화에 따른 파라미터 변화, 전원고조파의 크기 및 위상에 따른 파라미터 변화를 측정하였다. 모든 시료의 측정이 끝난 후, 서지 발생장치를 사용하여 바리스터에 표준 뇌서지 전류 $8/20\mu s$ 를 인가하였다. 바리스터의 기준전압이 초기값 대비 15% 변화할 때까지 가속 열화시켰으며, 열화된 바리스터를 대상으로 같은 방법으로 전기적 파라미터를 측정하였다.

3.1 가속 열화

흡수에너지에 따른 바리스터의 전기적 파라미터 측정을 위해 서지발생장치를 통한 시료의 가속 열화 실험을 진행하였다. 서지 발생장치는 그림 3.1과 같으며 IEC 61000-4-5와 IEC 61643-11에 의거한 표준 뇌서지 전류 $8/20\mu s$ 를 AC 전원이 인가된 상태에서 최대 15kA를 연속적으로 인가할 수 있는 서지발생장치를 사용하였다^[28]. 바리스터에 인가되는 에너지(W)는 식 3.1과 같으며 제한전압(v)과 인가전류(i)의 시간에 대한 적분함수를 적용하여 산출할 수 있다. 서지를 주입한 바리스터는 1시간동안 자연 냉각시킨 뒤 전기적 파라미터를 측정하였다.

$$W = \int vi dt [J] \quad (3.1)$$



그림 3.1 서지 발생장치

Fig. 3.1 Surge generator

3.2 주위 온도의 영향

표 3.1은 바리스터 신품의 주위온도가 25°C일 때 각 시료별 전기적 파라미터를 나타낸다. 바리스터 신품을 그림 3.2의 항온기 사용하여 6시간 동안 15°C ~ 35°C 까지 주위 온도를 변화시켜 전기적 파라미터를 측정하였으며, 가속 열화 시험을 통해 열화된 바리스터를 같은 방법으로 주위 온도를 변화시켜 전기적 파라미터를 측정하였다.

표 3.1 바리스터의 전기적 파라미터
Table 3.1 Electrical parameters of varistors

(at 25°C)

Model.	A	B	C	D	E	F
V_{Ref} [V]	688	676	789	666	745	789
I_T [μA]	558	569	539	829	756	721
I_{3rd} [μA]	7.68	5.94	3.93	7.75	4.74	4.78
I_R [μA]	0.48	0.34	0.29	0.36	0.19	0.18

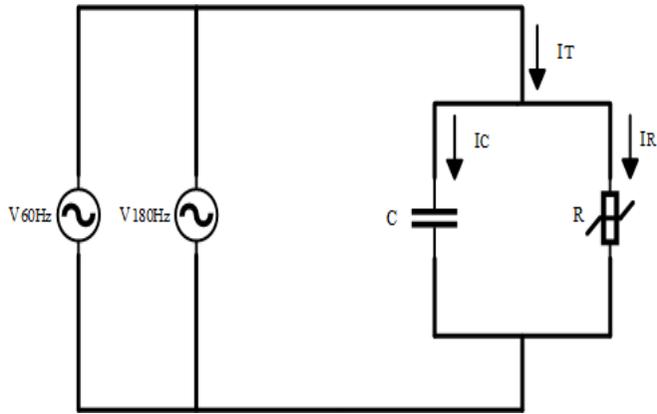


그림 3.2 향온기의 사진

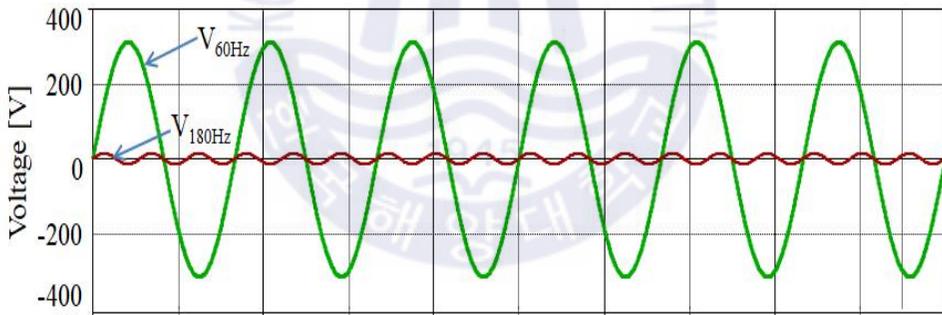
Fig. 3.2 Photograph of pyrostat

3.3 전원 고조파의 영향

전원고조파의 크기 및 위상에 따른 전체 누설전류, 저항분 누설전류와 전체 누설전류의 제 3고조파 성분을 분석하기 위하여 비선형 저항계수, 정전용량 및 누설저항을 측정하고 등가 모델링하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 등가회로는 그림 3.3의 (a)와 같으며 바리스터 신품과 열화품을 등가 모델링하여 60Hz 전원 전압에 180Hz의 제 3조파 전압을 중첩시켰을 때 그림 3.3의 (b)와 같이 중첩된다. IEEE Std.519에 의거하여 최대 저압 전원계통에 허용되는 고조파 함유율인 5%까지 증가시켰으며 위상은 0° 와 180° 로 중첩시켰다. 표 3.3은 각 시료별 바리스터의 등가 모델링 값을 나타낸다.



(a) 시뮬레이션 등가 회로



(b) 인가전압의 파형

그림 3.3 제 3조파 전압의 영향

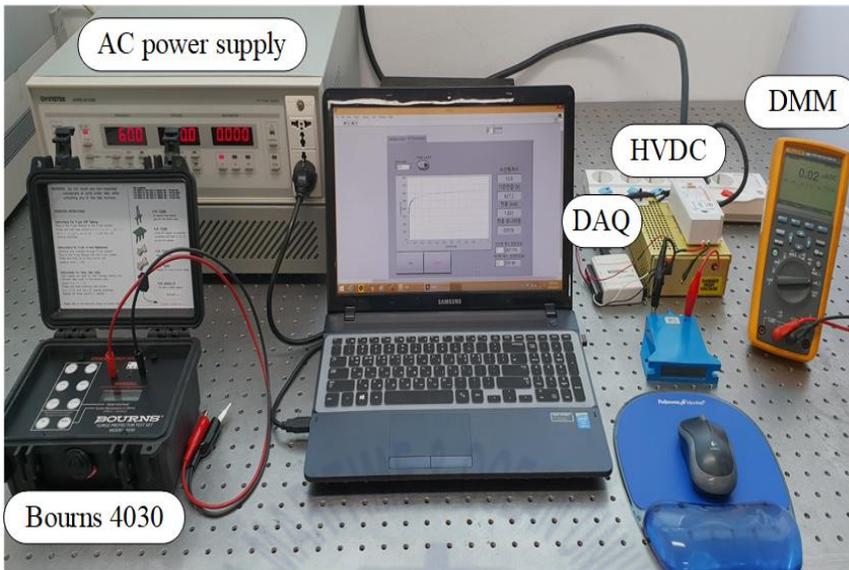
Fig. 3.3 Influence of the third harmonic voltage

표 3.2 시료별 바리스터의 모델 값
 Table 3.2 Model value of sample varistors

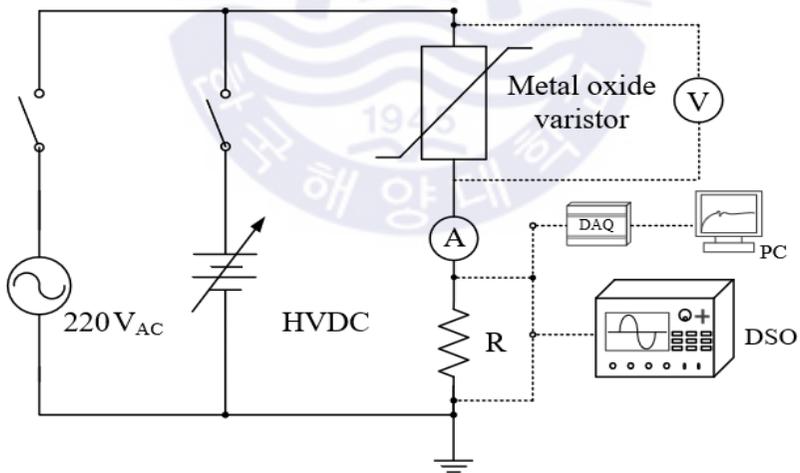
Model.	A	B	C	D	E	F
Cap (at 60Hz) [pF]	4,800	4,700	4,600	6,600	6,400	6,200
R (new) [MΩ]	648	52.4	1,072	864	1,637	1,728
R (degraded) [MΩ]	52.1	13.9	48.4	24.7	30.8	61.2

그림 3.4는 전기적 파라미터 측정계를 나타낸다. 측정계를 이용하여 기준전압(V_{Ref}), 전체 누설전류(I_T), 저항분 누설전류(I_R) 및 전체 누설전류의 제 3조파 성분(I_{3rd})을 측정하였다.

본 실험에서는 기준전압이 15% 변화하는 시점을 열화로 판정하였으며 직류전원공급이 가능한 ‘Bourns 4030’을 바리스터 양단에 설치하여 기준전압을 측정하였다. 저항분 누설전류는 HVDC를 바리스터에 인가 후, 그림 3.5의 LabVIEW 프로그램을 이용하여 측정하였으며, 저항분 누설전류는 DMM(Digital multimeter)에 표시된다. 전체 누설전류와 전체 누설전류의 제 3조파 성분은 AC 220V를 바리스터에 인가시킨 후, DAQ 및 LabVIEW 프로그램을 이용한 알고리즘을 이용하여 측정하였다. 외부 노이즈가 제거된 고조파 성분을 측정하기 위해 LabVIEW 프로그램에 저역통과필터(LPF)와 고속 푸리에 변환(FFT)을 적용하였다.



(a) 사진



(b) 회로

그림 3.4 전기적 파라미터 측정계

Fig. 3.4 Measurement system of electrical parameters

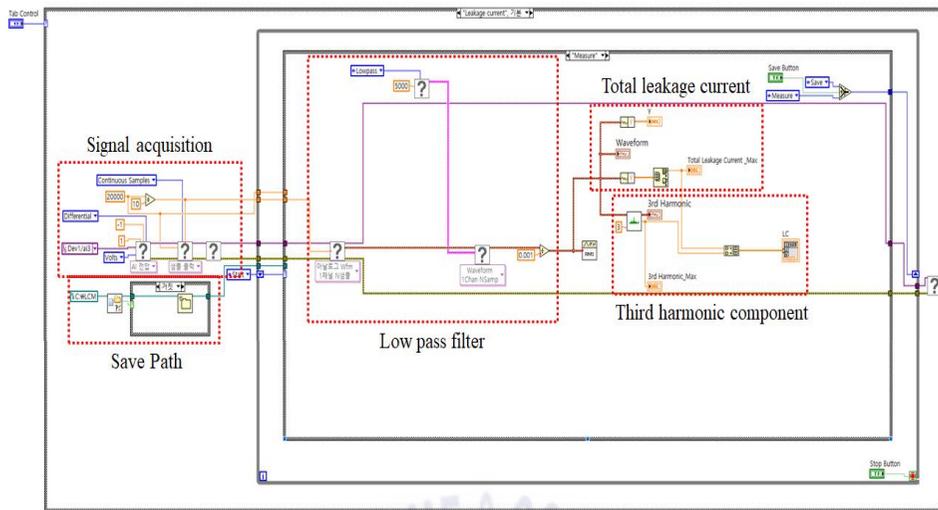


그림 3.5 측정 프로그램의 구성

Fig. 3.5 Configuration of the measurement program

온라인 열화진단에 사용되는 전체 누설전류와 전체 누설전류의 제 3조파성분을 데이터 수집 장치(DAQ, 48Ks/s)를 사용하여 상시 확인이 가능한 시스템을 구축하였다.

실험에 사용된 바리스터는 표 3.3과 같으며 L社 바리스터 3종과 E社 바리스터 3종으로 실험하였다. 시료 6개 모두 70kA급 바리스터지만 제조사 별로 전기적 특성이 상이하며, 제조사에서 제공한 전기적 특성을 기준으로 실험을 진행하였다.

표 3.3 바리스터의 사양

Table 3.3 Specifications of varistors

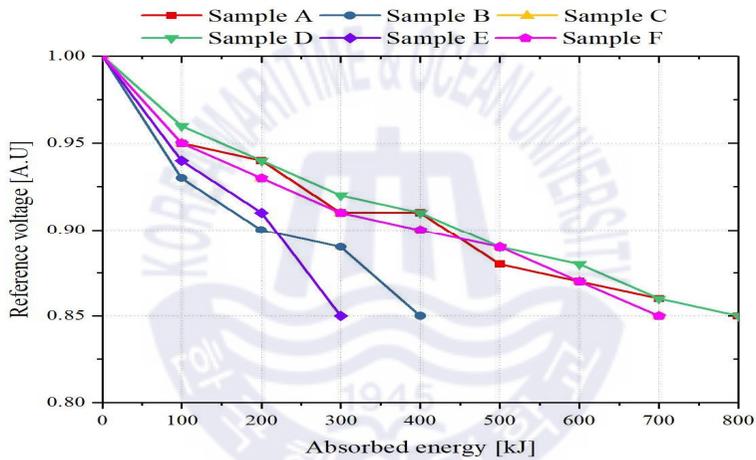
제조사	E社			L社		
Model.	A	B	C	D	E	F
V_{RMS} [V]	420	440	460	420	480	510
V_{DC} [V]	560	585	615	560	640	675
V_{Ref} [V]	680	715	750	680	750	820
I_{Peak} [kA]	70	70	70	70	70	70
$V_{Clamping}$ [V]	1,120 @500A	1,180 @500A	1,240 @500A	1,060 @200A	1,160 @200A	1,300 @200A
C_{typ} [pF]	4,300	4,100	3,900	6,000	5,500	5,000



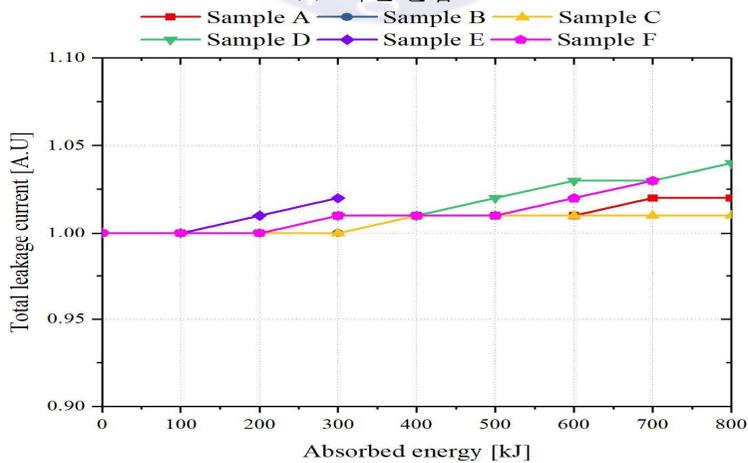
제 4 장 결과 및 분석

4.1. 가속 열화 실험

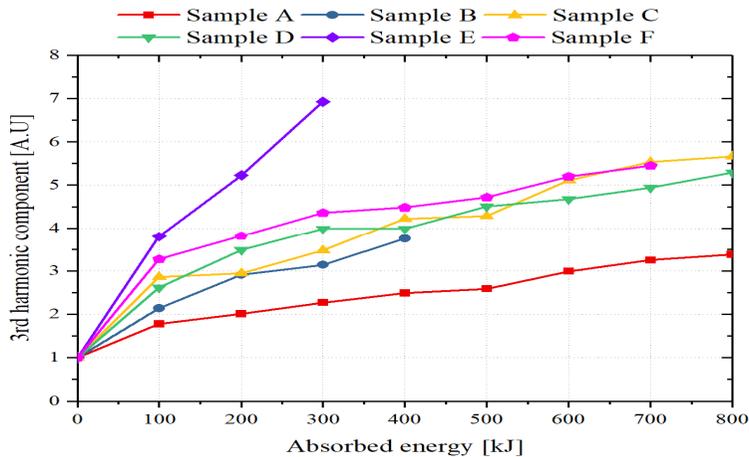
가속 열화 실험은 바리스터의 기준전압이 신품에서 15% 변화할 때까지 진행하였다. 기준전압을 기준으로 누설전류의 변화를 측정하였으며 흡수에너지에 따른 전기적 특성의 변화는 그림 4.1 및 표 4.1에서 나타내었다.



(a) 기준전압



(b) 전체 누설전류



(c) 제 3조파 성분

그림 4.1 전기적 파라미터 변화

Fig. 4.1 Changes of electrical parameter

기준전압은 열화 진전 시 감소하는 추세를 보이며, 열화에 중요한 지표이나 온라인 진단이 불가능 하다. 저항분 누설전류는 열화 진전 시 큰 폭으로 증가하지만 검출이 어렵고 절댓값이 작아 정확도가 낮아 온라인 열화진단에 사용하지 않는다. 그러므로 열화 진전에 따라 뚜렷하게 증가 하며, 온라인 열화진단에도 사용할 수 있는 파라미터가 필요하다. 전체 누설전류는 열화 진전 시, 미소하게 증가하지만, 전체 누설전류의 제 3조 파 성분은 열화 진전에 따라 뚜렷하게 증가한다. 전체 누설전류의 제 3조 파 성분은 오프라인 상태에서만 측정이 가능한 저항분 누설전류를 대체할 수 있으며, 측정이 간편한 장점이 있다. 따라서, 기준전압이 초기값에 비 해 10% 이상 감소 시 열화로 판단하는 오프라인 측정법에 대응하는 전체 누설전류의 제 3조파 성분은 실험을 사용된 시료의 경우 약 300% ~ 500% 이상 증가 후 빠른 변화를 나타내는 시점을 열화로 판단할 수 있다.

표 4.1 흡수에너지에 따른 전기적 파라미터의 변화

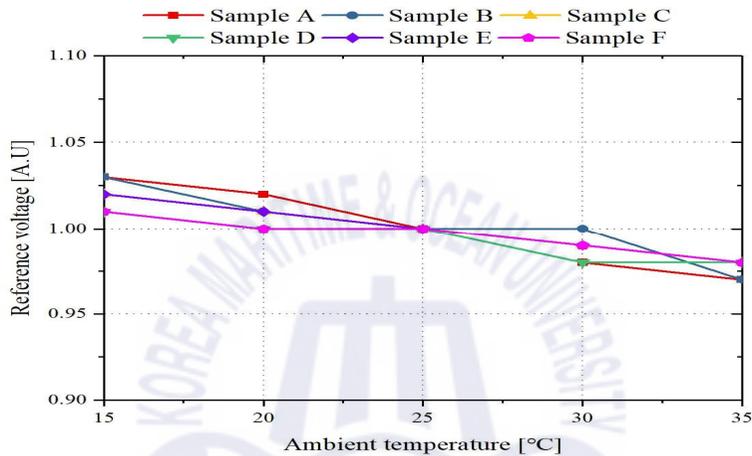
Table 4.1 Changes of electrical parameters by absorbed energy

Absorbed energy [kJ]		0	100	200	300	400	500	600	700	800
A	V _{Ref}	688	657	648	626	623	603	596	592	584
	I _T	558	557	560	562	563	565	566	568	570
	I _{3rd}	7.68	13.64	15.46	17.42	19.13	19.92	22.99	24.95	25.95
B	V _{Ref}	676	632	611	599	573	열화			
	I _T	569	569	570	570	572				
	I _{3rd}	5.94	12.72	17.30	18.68	22.29				
C	V _{Ref}	789	749	733	719	708	703	688	670	671
	I _T	539	539	538	539	542	542	546	546	547
	I _{3rd}	3.93	11.25	11.6	13.67	16.6	16.8	20.08	21.78	22.25
D	V _{Ref}	666	641	629	612	607	590	589	574	566
	I _T	829	831	831	833	834	841	850	857	862
	I _{3rd}	7.75	20.34	27.05	30.9	30.94	34.93	36.25	38.29	40.96
E	V _{Ref}	745	703	679	636	열화				
	I _T	756	759	764	767					
	I _{3rd}	4.74	18.02	24.79	32.84					
F	V _{Ref}	789	749	733	719	708	703	688	670	열화
	I _T	721	724	723	725	726	729	733	739	
	I _{3rd}	4.78	15.63	18.29	20.85	21.42	22.56	24.85	26.09	

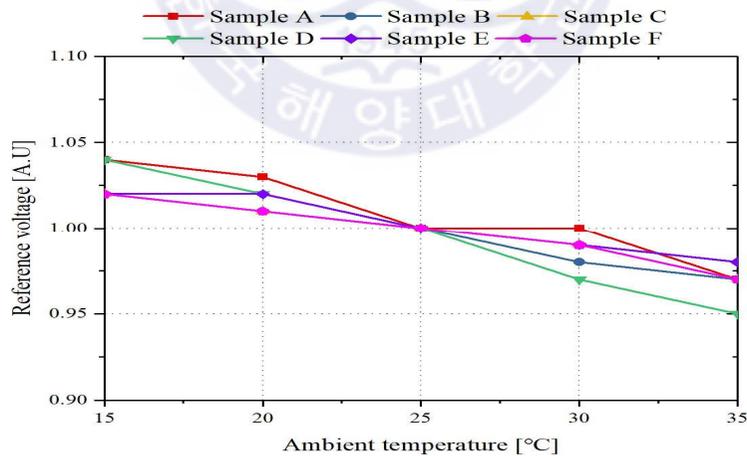
4.2. 주위 온도의 영향

온라인 열화 진단 시 바리스터의 전기적 파라미터에 영향을 줄 수 있는 주위 온도 변화에 따른 전기적 파라미터 변화를 분석하였다.

4.2.1 기준전압



(a) 신품



(b) 열화품

그림 4.2 주위 온도변화에 따른 기준전압 변화

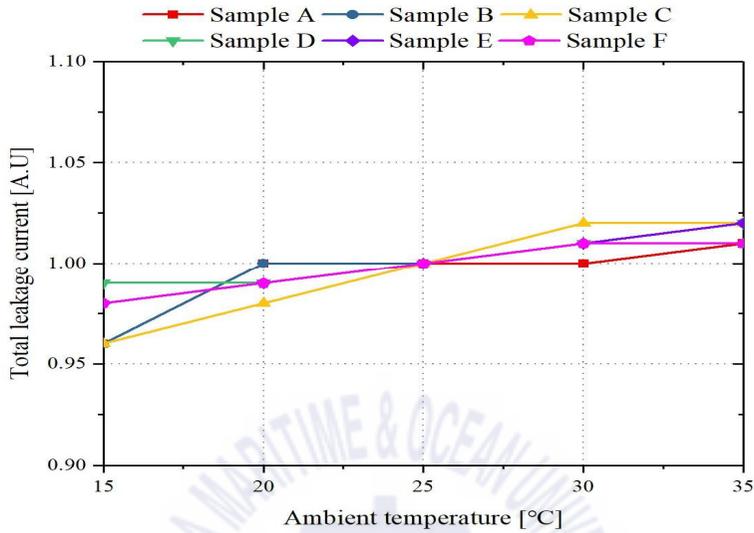
Fig. 4.2 Change of reference voltage depending on ambient temperature

표 4.2 기준전압의 변화
Table 4.2 Changes of reference voltage

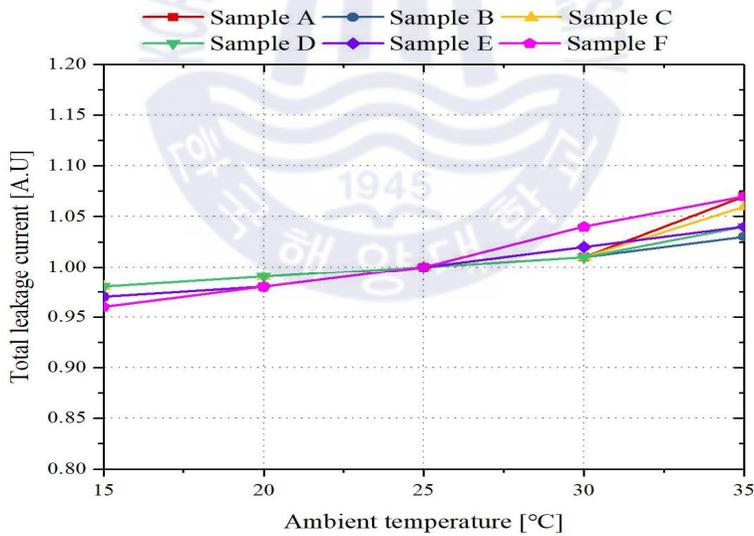
Model.		Reference voltage [V]				
		Ambient Temperature [°C]				
		15	20	25	30	35
A	new	712	703	688	672	666
	degraded	610	601	584	582	565
B	new	694	681	676	676	654
	degraded	586	580	573	559	555
C	new	801	794	789	782	776
	degraded	687	680	671	663	653
D	new	674	669	666	656	653
	degraded	590	577	566	549	537
E	new	763	750	745	740	733
	degraded	650	647	636	632	626
F	new	796	792	789	783	776
	degraded	684	678	670	661	653

그림 4.2 및 표 4.2는 주위 온도변화에 따른 기준전압의 변화를 나타낸다. 신품의 경우, 25°C를 기준으로 최소 -3.25%, 최대 3.49%로 값이 변화하였으며 열화품의 경우, 최소 -5.12%, 최대 4.45%로 값이 변화하였다. 오프라인 상태에서 바리스터의 열화 진단이 가능한 기준전압이 주위 온도의 변화에 따라 값이 증가 또는 감소함을 알 수 있다. 현재 기준전압이 10% 이상 변화 시 열화로 판단하지만 주위온도에 따라 열화 판단의 오류가 생길 수 있음을 알 수 있다.

4.2.2 전체 누설전류



(a) 신품



(b) 열화품

그림 4.3 주위 온도변화에 따른 전체 누설전류 변화

Fig. 4.3 Changes of total leakage current depending on ambient temperature

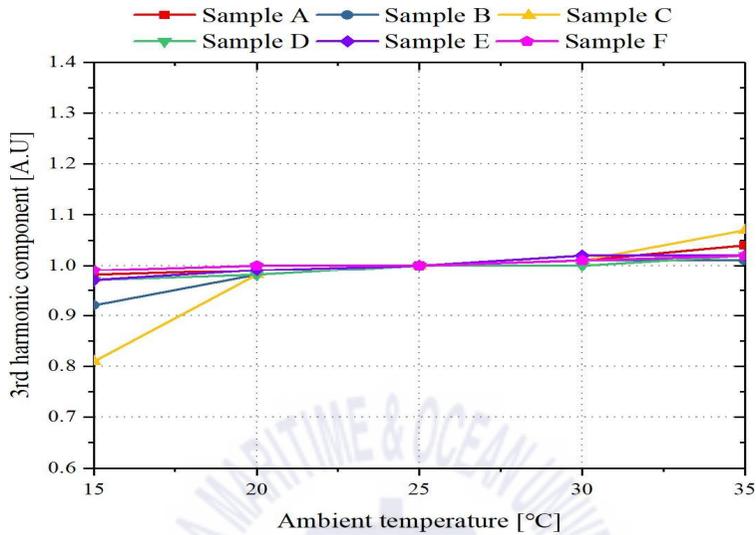
표 4.3 전체 누설전류의 변화

Table 4.3 Changes of total leakage current

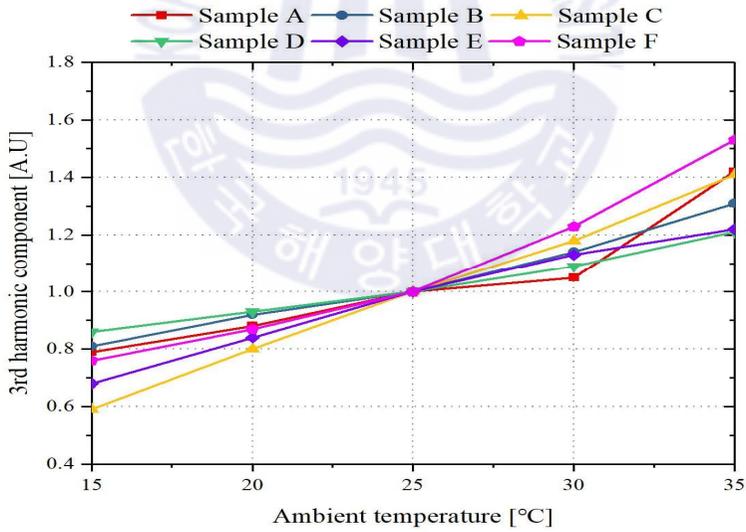
Model.		Total leakage current [μA]				
		Ambient Temperature [$^{\circ}C$]				
		15	20	25	30	35
A	new	534	558	558	559	564
	degraded	551	556	570	578	584
B	new	547	567	569	575	581
	degraded	556	562	572	578	592
C	new	516	530	539	549	550
	degraded	537	542	547	553	579
D	new	820	822	829	837	842
	degraded	847	853	862	871	893
E	new	741	745	756	761	769
	degraded	742	755	767	780	799
F	new	710	715	721	726	726
	degraded	711	725	739	766	789

그림 4.3 및 표 4.3은 주위 온도 변화에 따른 전체 누설전류의 변화를 나타낸다. 신품의 경우, 25 $^{\circ}C$ 를 기준으로 최소 -4.30%, 최대 2.11% 변화하였으며 열화품의 경우, 최소 -3.79%, 최대 7.37% 변화하였다. 온라인 열화 진단에서 전체 누설전류를 사용했었지만 전체 누설전류의 제 3조파 성분과 비교하면 변화율이 크지 않아 사용하지 않는다. 신품보다 열화품에서 큰 변화를 보이며 바리스터 주위 온도 변화 시 전체 누설전류는 미소하게 증가하는 경향을 보인다.

4.2.3 제 3조파 성분



(a) 신품



(b) 열화품

그림 4.4 주위 온도변화에 따른 제 3조파 성분 변화

Fig 4.4 Changes of the third harmonic component depending on ambient temperature

표 4.4 제 3조파 성분의 변화

Table 4.4 Changes of third harmonic component

Model.		Third harmonic component [μA]				
		Ambient Temperature [$^{\circ}C$]				
		15	20	25	30	35
A	new	7.56	7.62	7.68	7.76	8
	degraded	20.39	22.82	25.95	27.12	36.96
B	new	5.46	5.83	5.94	5.97	6.02
	degraded	17.96	20.42	22.29	25.35	29.11
C	new	3.17	3.86	3.93	3.96	4.19
	degraded	13.2	17.9	22.25	26.3	31.33
D	new	7.54	7.61	7.75	7.78	7.9
	degraded	35.22	38.01	40.96	44.71	49.52
E	new	4.59	4.7	4.74	4.82	4.83
	degraded	22.22	27.45	32.84	37.05	40.1
F	new	4.75	4.76	4.78	4.83	4.88
	degraded	19.95	22.63	26.09	32	39.99

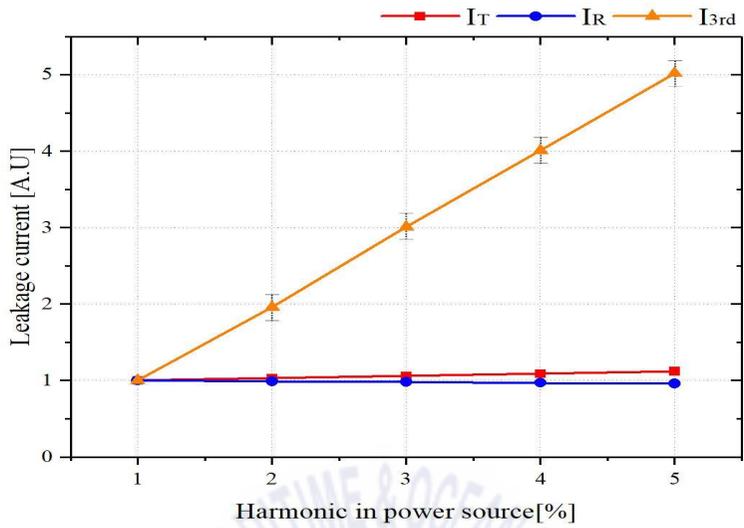
그림 4.4 및 표 4.4는 주위 온도의 변화에 따른 전체 누설전류의 제 3조파 성분의 변화를 나타낸다. 신품의 경우, 25 $^{\circ}C$ 를 기준으로 최소 -19.34%, 최대 6.62% 변화하였으며 열화품의 경우, 최소 -40.67%, 최대 42.43% 변화하였다. 바리스터의 온라인 열화 진단의 주요한 특성인 전체 누설전류의 제 3조파 성분은 단순히 3조파 성분의 증가로 열화를 진단하였으나 주위 온도의 영향을 보정해준다면 진단의 정확성이 향상될 것으로 기대된다.

4.3. 전원 고조파의 영향

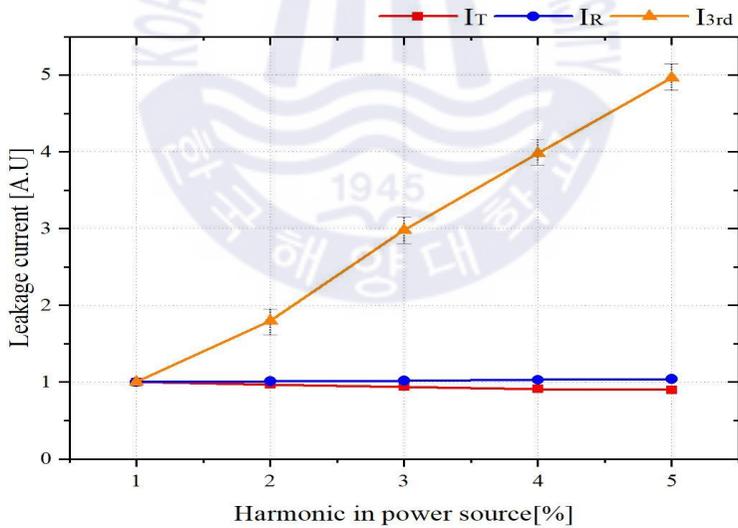
전원 고조파의 크기 및 위상에 따른 전기적 파라미터의 변화를 분석하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. IEEE Std.519에 명시된 최대 허용 고조파는 5%를 초과하지 않아야 한다.

전체 누설전류는 전원 고조파를 위상 0° 에 중첩 시, 미소하게 증가하고 180° 에 중첩 시, 미소한 감소를 보였다. 저항분 누설전류는 전체 누설전류와는 반대로 전원 고조파를 위상 0° 에 중첩 시, 미소하게 감소하고 180° 에 중첩 시, 미소한 증가를 보였다. 전체 누설전류와 저항분 누설전류 신폴과 열화품에서 모두 동일한 경향을 나타낸다.

온라인 열화진단에 사용되는 전체 누설전류의 제 3조파 성분은 전원 고조파의 중첩 위상과 관계없이 전원 고조파가 1%씩 증가함에 따라 약 100% 씩 크게 증가하였다. 이는 전원 고조파가 열화진단 시 오차를 가져올 수 있음을 의미하며 바리스터의 운용환경에서 전원품질의 관측과 분석이 필요함을 알 수 있다. 따라서 전체 누설전류의 제 3조파 성분에 근거한 온라인 열화진단에서 전원 고조파 함유율에 따른 제 3조파 누설전류의 변동을 고려해야한다. 운용환경에서의 전원품질 저하는 고조파 성분의 증가로 바리스터의 가속 열화를 초래하며 이는 각종 사고로 연결될 수 있으므로 장기적으로 관측과 분석해야 함을 알 수 있다.



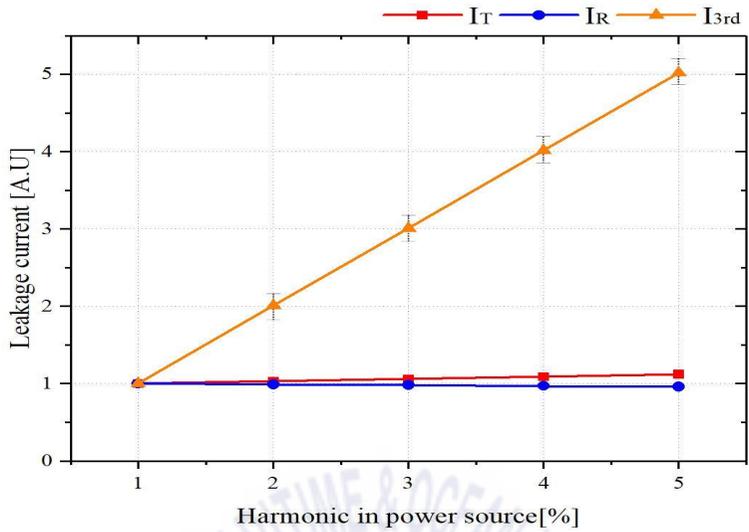
(a) 0°



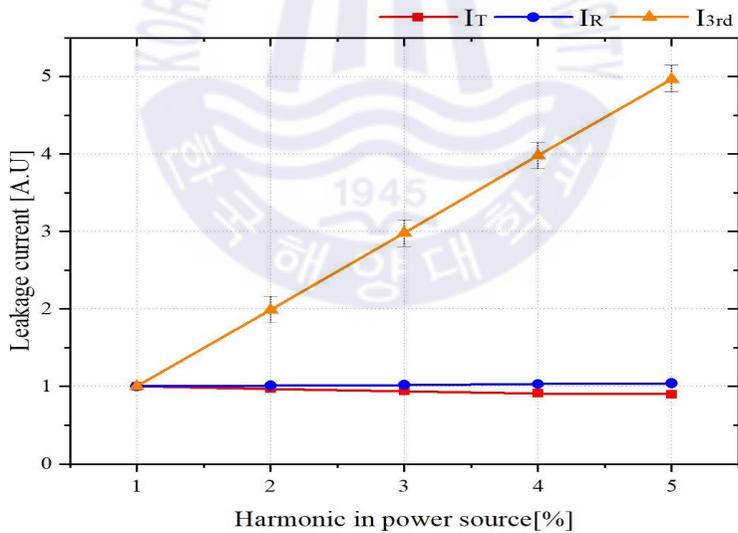
(b) 180°

그림 4.5 전원 고조파에 따른 누설전류 변화 (신품)

Fig 4.5 Changes of the leakage current by power mains harmonic (new varistors)



(a) 0°



(b) 180°

그림 4.6 전원 고조파에 따른 누설전류 변화 (열화품)

Fig 4.6 Changes of the leakage current by power mains harmonic (degraded varistors)

제 5 장 결 론

본 논문에서는 바리스터가 설치된 장소의 주위 온도와 운용 환경에서 전원 고조파의 영향에 관한 연구를 수행하였다. 바리스터의 신품과 가속 열화 실험으로 열화된 바리스터를 대상으로 15°C ~ 35°C로 주위온도를 변화시키며 전기적 특성을 측정하였으며 전원 3고조파의 전압의 크기 및 위상에 따른 누설전류의 변화를 분석하기 위해 바리스터의 비선형 저항계수, 정전용량 및 누설저항을 모델링하여 시뮬레이션을 수행하였다.

기준전압은 주위온도 25°C를 기준으로 신품의 경우 -3.25% ~ 3.49%, 열화품은 -5.12% ~ 4.45% 까지 변화하였다. 기준전압은 초기값 대비 10% 이상 변화 시 열화로 판단하지만 주위 온도에 따라 값이 변화하게 되면 오프라인 상태에서 열화 진단 시 오차가 발생할 수 있다. 전체 누설전류의 경우 신품은 -4.3% ~ 2.11%, 열화품은 -3.79% ~ 7.37% 변화하였다. 전체 누설전류의 제 3조파 성분의 경우 신품은 -19.34% ~ 6.62%, 열화품은 -40.67% ~ 42.43% 변화하였다. 본 실험을 통해 온라인 열화진단에 사용되는 3조파 성분이 주위 온도의 영향으로 열화 진단의 정확성을 저하시킨다는 점을 알 수 있다. 실험에서 사용된 열화품은 초기값 대비 기준전압의 변화를 15%로 설정하였으며 열화의 기준이 변경되면 전기적 파라미터의 측정 범위가 변경된다.

60Hz 기본파 전압에 180Hz 전원 3고조파 전압을 1% ~ 5% 증가하였을 때, 전체 누설전류와 저항분 누설전류는 전원 고조파의 중첩 위상에 따라 미소한 증가 또는 감소를 보였으며 이는 신품과 열화품에서 동일한 경향을 나타내었다. 전체 누설전류의 제 3조파 성분은 전원 고조파의 중첩 위상과 관계없이 전원 고조파가 1% 증가함에 따라 100% 증가하였다.

바리스터가 설치된 장소의 주위 온도가 변화하고 운용환경에서 전원품질이 저하될 수 있기 때문에 단순히 3조파 누설전류의 증가로 열화를 진

단하는 기존 연구와 달리 주위 온도와 전원 고조파의 영향을 고려해준다면 진단의 정확성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.



참 고 문 헌

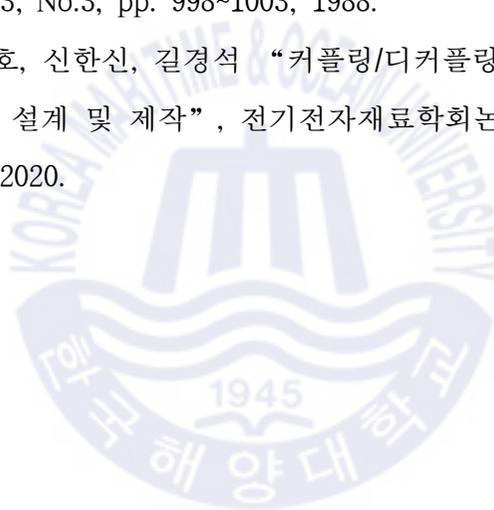
- [1] H. Satoh, “Study on increasing the surge capability of a lightning surge protection, semiconductor device” , IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol.35, No.2, pp.311-315, 1993.
- [2] International Electrotechnical Commission Protection Against Lightning - Part 1 : General Principle, IEC 62305-1, 2010.
- [3] International Electrotechnical Commission Protection Against Lightning - Part 4 : Electrical and Electronic Systems Within Structure, IEC 62305-4, 2010.
- [4] International Electrotechnical Commission Low-Voltage Surge Protection Devices - Part 11 : Surge Protective Devices Connected to Low-Voltage Power Distribution Systems - Requirements and Test Methods, IEC 61643-11, 2010.
- [5] International Electrotechnical Commission Low-Voltage Surge Protection Devices - Part 1 : Surge Protective Devices Connected to Low-Voltage Power Distribution Systems - Requirements and Test, IEC 61643-11, 2010.
- [6] C. A. Christodoulou, M. V. Avgerinos, L. Ekonomou, I. F. Gonos, I.A. Stathopoulos “Measurement of the resistive leakage current in surge arresters under artificial rain test and impulse voltage subjection” , The Institution of Engineering and Technology(IET) science Measurement & Technology, Vol.3, No.3, pp.256-262, 2009.
- [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] 길경석, 한주섭, 주문노, “누설전류측정에 의한 피뢰기 열화진단에 있어 전원고조파의 영향” , 대한전기학회 논문지, Vol.52(C), No.1, pp. 42-46.
- [9] International Electrical Committee Components for Low-voltage Surge Protective Devices - Part 331 : Performance Requirements and Test Methods for Metal Oxide Varistors, IEC 61643-331, 2017.
- [10] G. M. Wang, S. J. Kim, S. J. Park, G. S. kil, H. K. Ji, “Optimal Design of a Follow Current Disconnecter for DC Arresters in Traction Vehicles” , Transaction on Electrical and Electronic Materials, Vol.17, No.5, pp. 289-292, 2016
- [11] W. H. Kim, S. C. Hwang, G. M. Wang, C. H. Ahn, G.S. Kil. “Electrical Characteristic Changes of ZnO Varistors by Energy Absorption” , Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, Vol.30, No.12, pp. 817-821, 2017
- [12] 왕국명, 김우현, 강태호, 길경석, “Comprehensive Study on Accelerated Degradation of Metal Oxide Varistors” , 한국철도학회논문집, Vol.21, No.7, pp. 641-648, 2018.
- [13] LS Industrial System Co. Ltd. “서지보호기(SPD) 기술자료집” , pp. 22, 2015.
- [14] 이시이 마사루, “알기 쉬운 뇌대책의 기본 및 기술” 한국오토와전기 주식회사, pp6-41, 2013.
- [15] Fernando H. Silveira, Alberto De Conti, Silverio 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.
- [16] IEC 61643-1, Low-voltage surge protective devices-Part 1: Surge protective devices connected to low-voltage power distribution systems-Requirements and test, 2nd Edition, 2005.
- [17] KS C IEC 62305-4, 피뢰시스템 - 제 4 부 : 구조물 내부의 전기전자 시스템, 2012.
- [18] 박경수, “서지보호기의 열화와 온라인 진단장치에 관한 연구” , 석사 학위논문, 한국해양대학교대학원, 2016.
- [19] 강성만, “산화아연 피뢰기의 과도특성 및 열화진단에 관한 연구” , 박사 학위논문, 인하대학교대학원, 2004.
- [20] 황성철, “서지전류에 의한 ZnO 바리스터의 열화에 관한 연구” , 석사 학위논문, 한국해양대학교대학원, 2018.
- [21] 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.
- [22] Julio C. Montenegro, Jorge L. Ramirez, “Degradation of Zinc Oxide Varistors” , Proceeding of the 1995 First IEEE International Caracas Conference, pp. 352-354, 1995.
- [23] Alain Vicaud, “AC Voltage Ageing of Zinc Oxide Ceramics” , IEEE Transactions on Power Systems, Vol.1 , No.2, pp. 49-58, 1985.
- [24] 한주섭, “전력용 피뢰기의 열화진단기술 개발에 관한 연구” , 박사 학위논문, 한국해양대학교대학원, 2002.
- [25] V.S. Brito, G.R.S. Lira, E.G. Costa, “Methodology for Decomposition

International Symposium on High Voltage Engineering” pp. 2156-2161, 2013.

- [26] Xianglian Yan, Yuanfang Wen, Xiaoyu Yi, “Study on the Resistive Leakage current Characteristic of MOV Surge Arresters” , IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002 : Asia Pacific, pp. 683-687, 2002.
- [27] S. Shirakawa et al. , “Maintenance of surge arrester by a portable arrester leakage current detector” , IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.3, No.3, pp. 998-1003, 1988.
- [28] 김남훈, 강태호, 신한신, 길경석 “커플링/디커플링 네트워크 내장 서지발생장치의 설계 및 제작” , 전기전자재료학회논문지, Vol.33, No.2, pp. 130-134, 2020.



연구논문 발표실적

◎ 국내전문학술지

- [1] 왕국명, 김우현, 강태호, 길경석, “Comprehensive Study on Accelerated Degradation of Metal Oxide Varistors”, 한국철도학회논문집, 제21권, 제7호, pp.641-648, 2018.08.
- [2] 김우현, 왕국명, 강태호, 길경석, 김성욱, “부분방전 검출을 위한 TEV 센서의 최적화 설계”, 한국철도학회논문집, 제22권, 제2호, pp.140-149, 2019.02.
- [3] 김남훈, 강태호, 신한신, 길경석, “커플링/디커플링 네트워크 내장 서지발생장치의 설계 및 제작”, 전기전자재료학회논문지, 제33권, 제2호, pp.130-134, 2020.03.
- [4] 강태호, 김남훈, 김성욱, 왕국명, 길경석, 김성욱, “Influence of Third Harmonic Voltage and Ambient Temperature on Online Deterioration Diagnosis of Metal Oxide Varistors”, 한국철도학회논문집, 제23권, 제3호, pp.236-242, 2020.03.
- [5] 김남훈, 강태호, 안동현, 김태수, 길경석, “Development of a visualized underwater rescue-rope system”, 한국마린엔지니어링학회지, 제44권, 제3호, pp.236-240, 2020.06.

◎ 국내학술회의 논문집

- [1] 강태호, 오재현, 장낙원, 김홍승, “유연기판에 성장된 MZO 나노막대의 버퍼층에 따른 전기적 특성”, 2018 한국전기전자재료학회 하계학술대회, p.57, 2018.06.20-22. 대명 텔피노리조트.
- [2] 염아람, 강태호, 장낙원, 김홍승, “InZnO 버퍼층을 이용한 MgZnO/ZnO 이중

- 구조 박막의 성장 연구” 2018 한국전기전자재료학회 하계학술대회, p.66, 2018.06.20~22. 대명 텔피노리조트.
- [3] 김우현, 왕국명, 강태호, 길경석, “프레넬 렌즈를 이용한 LED 랜턴”, 2018 한국전기전자재료학회 추계학술대회, p.45, 2018.11.20~22. 부여 롯데 리조트.
- [4] 왕국명, 김우현, 강태호, 길경석, “온라인 진단을 위한 MOV의 전기적 특성 분석”, 2018 한국전기전자재료학회 추계학술대회, p.46, 2018.11.20~22. 부여 롯데리조트.
- [5] 왕국명, 김우현, 강태호, 길경석, “전자계 측정 센서를 이용한 낙뢰경보기의 개발”, 2018 한국전기전자재료학회 추계학술대회, p.50, 2018.11.20~22. 부여 롯데리조트.
- [6] 김남훈, 강태호, 길경석, “광파이버를 이용한 철도 플랫폼 안전라인”, 한국철도학회 2019년 추계학술대회, pp.110, 2019.11.14-11.15. 휘닉스 제주
- [7] 강태호, 안동현, 김동언, 길경석, “열화조건에 따른 MOV의 전기적 특성 분석”, 2020년 온라인 춘계학술대회, pp.78, 2020.07.07 -07.08.
- [8] 강태호, 김남훈, 노인영, 길경석, “열선에서의 아크검출 기술 및 장치”, 2020년 온라인 춘계학술대회, pp.89, 2020.07.07.-07.08.
- [9] 신한신, 김성욱, 강태호, 길경석, “돌출결합에서 SF₆ 및 g³ 가스의 부분방전(PD) 특성”, pp.90, 2020.07.07-07.08.