

**열화된 사이리스터 소자의 임피던스 특성**

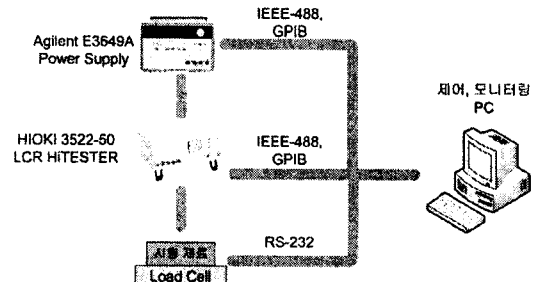
서 길수, 김 형우, 김 기현, 김 남균  
한국전기연구원 전력반도체연구그룹

**A Characteristics on Impedance of Degraded Thyristor with Heat and Voltage Stress**

Kil-Soo Seo, Hyung-Woo Kim, Ki-Hyun Kim, Nam-Kyun Kim  
Korea Electrotechnology Research Institute, Power Semiconductor Research Group

**Abstract** - In this paper, the impedance properties of degraded thyristor with heat and voltage were presented. As degraded thyristor, 8 thyristors with each other different reverse blocking voltage used. Its impedance and resistance properties were measured from frequency 100Hz to 10MHz applied with bias voltage from 0V to 40V. As a result, at low frequency region, that is, at the frequency 100-10kHz, the abrupt increasement of its capacitance was confirmed. And also, at high frequency region, the capacitance peak move toward low frequency in the region of frequency 4 - 6MHz as degradation of thyristor.

함께 비교하였다. 특성의 측정에는 자체 개발한 thyristor C-V 측정 시스템 및 프로그램을 사용하였다. 그림 1은 열화된 사이리스터의 임피던스 측정회로도이다.



〈그림 1〉 사이리스터의 임피던스 측정회로도

**1. 서 론**

일반적으로 반도체 소자는 수명이 거의 반영구적으로 알려져 있으나, 최근 시간이 지남에 따라 열화과정을 갖는 것으로 보고되고 있다.[1-4]

현재 국내에서는 대용량 전력변환소자의 발전으로 HVDC변환시스템, 2기 HVDC와 계통연계, Back-to-Back UPFC 및 SVC변환시스템이 적극적으로 도입되어 왔다. 또한 양수발전소 및 HVDC변환소에서는 운용한지 이미 15년을 넘어서고 있다. 전기적 특성변화와 함께 파손되면 대형 설비사고를 일으킬 수 있기 때문에 소자 제조사에서는 15년 이상된 대용량 반도체 소자에 대해서 교체를 권고하고 있는 실정이다.

사이리스터는 장기간 사용하게 되면 열적 및 전기적 스트레스를 받아 취약부위나 결합부위가 확대되어 파괴에 이르게 된다. 열화에 따라서 사이리스터의 전기적 변수가 변화하게 된다. 통상 현장에서 사용하는 가장 일반적인 방법은 저지 상태에서 절연상태를 점검하는 방법으로 메가를 사용한다. 이미 열화에 따라 누설전류가 증가하는 것으로 보고하고 있다. 누설전류의 증가는 절연내력의 저하를 의미하며 실제 순, 역방향 저지전압이 저하한 사이리스터는 누설전류도 증가한다.

본 논문에서는 인위적으로 열 및 전압으로 가속열화시킨 사이리스터의 임피던스 특성을 측정하였다. 주파수 범위는 100Hz - 10MHz이며, 역방향 차단전압열화에 따른 특성을 파악하기 위해 바이어스전압을 인가하여 정선을 형성시켜 커패시턴스 및 저항이 직렬로 연결된 모델로 두고 임피던스를 측정하였다. 측정된 커패시턴스와 역방향차단전압과의 특성에 대해서 기술하였다.

**2. 본 론**

**2.1 실험장치 및 방법**

시험용 사이리스터의 2차 가속열화 시험에서는 가속열화에 따른 소자의 차단전압 및 누설전류의 측정 이외에 소자의 L, C, R값과 같은 임피던스 값의 변화도 측정을 하였다. 이러한 임피던스 값의 변화도 차단전압이나 누설전류의 변화와 마찬가지로 가속열화에 따라 변화하는 특성을 가지고 있으며, 이 값의 분석을 통해 소자의 열화 정도에 대한 분석이 가능하다. 다만, 2차 가속열화 시험은 짧은 시간동안 이루어진 관계로 소자가 가속열화하여 파괴된 경우에 대한 데이터는 부족한 상태이다. 이 부분은 추후 보장 연구가 이루어진다면 보다 많은 데이터의 확보가 가능할 것으로 보이며, 장시간 가속열화한 경우에 파괴된 소자의 시간별 임피던스 값에 대한 데이터가 확보된다면 앞에서 마찬가지로 이 값을 통한 소자의 신뢰성 분석이나 수명의 평가도 가능하리라고 보여 진다.

2차 가속열화 시험에서는 7개의 소자를 가속열화 하였고 그중 2개는 264시간의 가속열화 이후 고장난 특성을 나타내었다. 본 연구에서는 이들 고장난 2개의 소자 중 하나(㉑)와 3232시간 동안 가속후에도 고장이 일어나지 않은 소자(㉒)의 임피던스 특성을 비교하여, 고장난 소자와 고장이 나지 않은 소자간의 임피던스 특성 차이를 분석하였다. 보다 정확한 비교를 위해 가속열화를 하지 않은 소자들 중에서 특성이 양호한 소자 1개(㉓)와 특성이 불량한 소자 1개(㉔)를

**2.2.1 Capacitance**

논문 [5]의 레이타에서 볼 수 있듯이 264시간 후 고장이 일어난 소자와 초기 특성이 불량했던 소자의 경우 capacitance 값이 초기 특성이 우수한 소자에 비해 다소 높게 나온 것을 알 수 있으며, 장시간 가속열화가 진행된 소자의 경우 capacitance 값이 크게 증가하였음을 알 수 있다.

일반적으로 사이리스터의 capacitance 값은 차단전압을 지탱해주는 n-base 영역과 p-base 영역 접합에서의 접합 capacitance 값에 의존하며, 이 값은 농도와 인가전압에 의해 결정된다.

$$C_j = \frac{\epsilon_s}{W_D} = \sqrt{\frac{\epsilon_s N_D}{2V_A}}$$

여기서  $N_D$ 는 n-base 영역의 농도,  $V_A$ 는 인가전압,  $\epsilon_s$ 는 실리콘의 유전율을 나타낸다. 따라서 접합 capacitance의 값은 인가된 전압에 반비례하고 농도에 비례함을 알 수 있다. 본 연구에서 사용된 사이리스터 소자의 경우 동일한 차단전압을 가지는 소자를 사용했으므로 오차를 감안해도 n-base 영역의 농도는 접합 capacitance의 값에 큰 영향을 주지 않는다. 또한 인가전압에 있어서도 동일한 인가전압을 가하였기 때문에 이론적으로는 접합 capacitance의 값에는 큰 차이가 없어야 한다. 따라서 고장난 소자와 고장나지 않은 소자간의 capacitance 값의 차이는 접합 capacitance가 아닌 다른 요인에 의한 것으로 보인다.

전력용 반도체 소자에서 접합 capacitance 외에 전체 capacitance 값에 영향을 주는 인자에는 반도체 소자 표면의 oxide에 의한 capacitance 성분이 있다. 이 값은 통상 oxide 영역의 두께와 유전율에 의해 결정이 되는데, 사이리스터 소자의 경우에는 oxide가 아닌 passivation 물질에 의한 capacitance가 이에 해당이 된다고 할 수 있다.

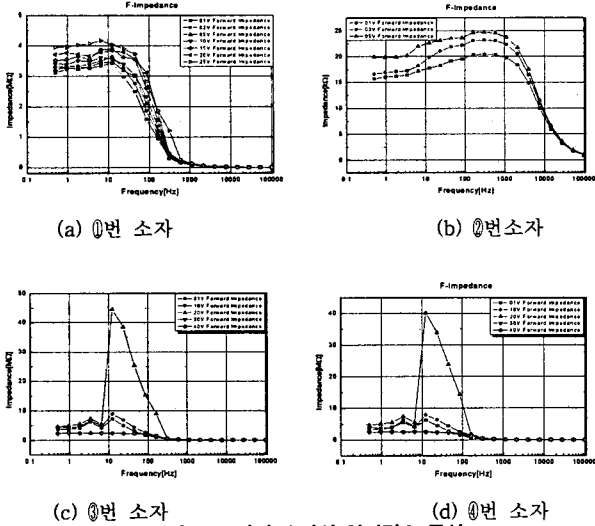
따라서 동일한 농도와 동일한 인가전압 조건하에서도 고장이 일어난 소자와 일어나지 않은 소자, 초기 특성이 양호한 소자와 불량한 소자간의 capacitance 값에 차이가 나는 것은 접합 capacitance가 아닌 반도체 표면의 보호를 위해 사용된 보호막 물질에 의한 capacitance 값에 의한 것이라 보여 진다.

반도체 소자의 표면 보호를 사용된 oxide와 같은 보호막 성분은 본 연구의 초반부에서 언급한 것과 같이 열화가 일어날 경우 내부의 전자들에 의해 전도대(channel)를 형성한다. 보호막 내부에 channel이 형성된다는 것은 달리 말하면 보호막으로 사용된 물질의 두께가 얇아진 것을 의미하며, 보호막의 두께에 반비례하는 보호막 capacitance 성분의 특성상 capacitance 값이 증가하게 된다. 따라서 열화에 의해 고장이 일어난 소자나 초기 특성이 불량한 소자들은 보호막 내부에 channel이 형성되었거나, 초기 보호막 내부에 다수의 전자가 포함됨으로 인해 초기 특성이 양호한 소자에 비해 비교적 높은 capacitance 값을 가지게 된 것으로 보여 진다. 또한 장시간 가속열화가 이루어진 이후에 고장이 일어난 소자의 capacitance 값

이 큰 것도 같은 이유에서라고 보여 진다. 특히 장시간 가속열화가 이루어진 이후에 고장이 일어난 소자의 경우 가속열화가 이루어지는 동안 가속열화의 초기에 고장이 일어난 소자에 비해 많은 양의 전하가 보호막 내부에 포집됨으로 인해 캐패시턴스의 값이 크게 증가한 것으로 보여 진다.

### 2.2.2 Impedance 특성

그림 2에 4가지 소자에 대한 임피던스 특성을 나타내었다. 일반적으로 전류, 전압의 비에 의해 결정되는 저항값과는 달리 임피던스 성분은 주파수적인 특성을 함께 내포하므로 상기에 언급된 capacitance 특성도 임피던스 성분값에 영향을 주게 된다. 통상 임피던스는 주파수 특성을 감안하여 다음과 같이 표시할 수 있다.



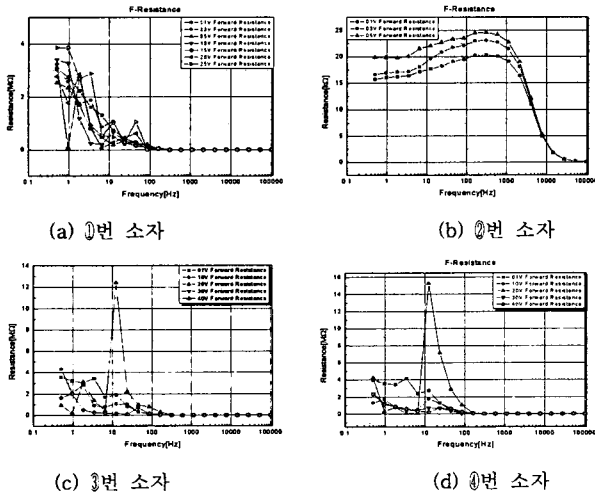
〈그림 2〉 4가지 소자의 임피던스 특성

$$Z = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}$$

여기서 R은 저항값이며, L은 인덕턴스, C는 캐패시턴스 값을 나타낸다. 반도체 소자에 있어서 인덕턴스의 값은 큰 의미가 없기 때문에 본 연구에 있어서 소자의 임피던스 값은 소자의 저항값과 캐패시턴스 값에 영향을 받고 있다고 볼 수 있다.

그림에서 볼 수 있듯이 소자의 임피던스 값은 초기 특성의 불량 여부에는 큰 영향을 받지 않고 있음을 알 수 있다. 이것은 소자의 저항값이나 캐패시턴스 값이 소자의 불량 여부에 큰 영향을 받지 않기 때문이다. 가속열화한 이후 고장난 소자와 고장이 나지 않은 소자의 경우에는 앞에서 언급한 것과 같이 캐패시턴스 값의 차이로 인해 임피던스 값에서도 많은 변화를 보이고 있다. 전체적인 임피던스 값은 고장 여부와 상관없이 가속열화 후 감소하는 경향을 보이고 있으며, 장시간 가속열화로 인해 캐패시턴스 값의 변화가 큰 ②번 소자의 경우 상당히 낮은 값을 나타내고 있다.

### 2.2.3 Resistance 특성



〈그림 3〉 소자의 저항 특성

그림 3은 4가지 소자의 저항값에 변동을 나타낸 것이다. 저항값 변동의 경우에도 임피던스 특성과 마찬가지로 소자의 초기 불량여부에는 영향을 받지 않으며, 가속열화하여 소자의 특성이 변동된 경우에는 많은 영향을 받는다. 장시간 가속열화 한 이후에 고장이 일어난 소자의 경우 channeling 현상에 의해 누설전류의 급격한 증가가 고장의 원인이므로 상당히 낮은 저항값을 나타낸다. 반면에, 가속열화의 초기에 고장이 일어난 소자의 경우에는 channeling에 의한 고장 이라기보다는 소자 패키지 내부의 단락과 같은 결함으로 인해 고장이 일어났기 때문에 장시간 가속열화하여 고장이 일어난 소자에 비해서는 누설전류의 증가가 크지 않고, 따라서 저항값도 비교적 높은 값을 나타낸다.

## 3. 결 론

임피던스값의 변동 측정을 통해 캐패시턴스, 저항값, 임피던스 값의 변동과 가속열화한 소자의 관계에 대해 알아보았다. 2차 가속열화 시험의 경우 가속열화 시간이 짧았기 때문에 장시간 가속열화 하면서 시간에 따른 임피던스 값의 측정이 이루어지지 않아 가속열화가 소자의 임피던스 특성의 변동에 어떤 영향을 주는지에 대한 분석은 이루어지지 않았다. 다만, 소자의 초기 불량 여부와 가속열화의 초기 및 장시간 가속열화한 이후에 고장이 일어난 소자들간의 차이를 분석함으로써 소자의 초기 특성이 고장에 어떠한 영향을 주는지에 대해서만 분석하였다.

앞선 결과에서도 알 수 있듯이 임피던스 값의 변동이나 저항값의 변동은 소자의 초기 불량과 고장과의 연관성 분석에는 많은 도움이 되지 못하였다. 그러나, 캐패시턴스 값의 경우 초기 특성이 불량한 소자일수록 높은 값을 나타내기 때문에 소자의 초기 고장 여부를 판단하는데 도움을 줄 수 있을 것으로 보여 진다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 서길수, 이양재, 김형우 외 3인 “대용량 사이리스터의 전압/열에 의한 가속열화 시스템”, 대한전기학회 2004년 하계학술대회
- [2] 김형우, 서길수, 김상철 외 4인 “대용량 전력반도체 소자의 열화 진단”, 2004년 한국전기전자재료학회
- [3] 이양재, 서길수 외 4인 “가속열화 시험을 통한 전력용 사이리스터 소자의 순/역방향 항복전압 특성변화”, 2004년 한국전기전자재료학회
- [4] 서길수, 김상철 외 4인 “HVDC 전력계통용 대용량 전력반도체 특성평가 장비의 제작”, 2003년 대한전기학회 부산,경남,울산지부 학회
- [5] 서길수, 이양재 외 3인 “가속열화된 사이리스터의 캐패시턴스 특성” 2005년 한국전기전자재료학회