

사이리스터 소자의 수명에측을 위한 열화진단기술

The Aging Diagnostic Technology for Predicting Lifetime of Thyristor Devices

김병철^{1,a}, 김형우², 서길수²
(Byung-Cheul Kim^{1,a}, Hyoung Woo Kim², and Kil-Soo Seo²)

Abstract

The accelerated aging test equipment which is possible to apply voltage and temperature at the same time, is fabricated to predict lifetime of high capacity thyristor in short time. The variations of the forward/reverse breakdown voltage and the leakage current are investigated as an aging diagnostic tool. Lifetimes of the devices which are predicted from the reverse breakdown voltage with an accelerated aging time, have shown 3-15 years.

Key Words : Thyristor, Accelerated aging test equipment, Voltage, Temperature, Device lifetime

1. 서론

전력의 안정적 공급, 직류송전기술의 축적, 그리고 종합정보통신망(ISDN)용 회선의 확보를 목적으로 해남-제주 사이에 건설된 HVDC 변환설비는 설비시설마다 1,104개의 Free floating type 사이리스터 소자를 사용하고 있다. 소자의 정격전압과 전류는 각각 6 kV와 4.5 kA이며, 운용전압과 사이리스터 소자의 접합부 온도는 각각 1 kV와 77 °C이다. HVDC 변환설비는 경년변화에 따른 열화로 1998년 1개, 2000년 1개, 2001년 1개, 2002년 2개의 소자에서 노후고장이 발생하였으며, 해가 거듭될수록 가속될 것으로 전망된다. 따라서 HVDC 변환설비의 안정적 운용, 유지보수 기술의 확립, 그리고 고장대책을 세우기 위하여 전력변환소자의 수명진단기술이 필요하다. 전력변환소자 중에서 전력계통에 접속되어 사용되는 대용량 사이리스터의 수명을 짧은 시간에 예측하기 위하여 가속열화실험에 의해 소자의 특성 변화를 조사하였다. 열화인자로서는 온도, 습도, 진동, 응력 등의 환경스트레스와

전압, 전류 등의 전기적 스트레스가 있다[1,2]. 본 연구에서는 소자의 수명에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려진 전압과 온도를 가속열화인자로 사용하였으며, 두 가지 스트레스를 동시에 인가할 수 있도록 시험 장치를 제작하였다. 또한 열화진단도구로서 순방향/역방향 차단전압과 누설전류의 변화를 조사하였으며, 가속열화시간에 따른 역방향 항복전압의 감소로부터 소자의 실제 사용시간을 예측하였다.

2. 실험내용

2.1 소자구조

그림 1에 사이리스터의 소자구조를 나타내었다. 애노드 전극이 캐소드에 대해 음으로 바이어스 될 때 접합 J_1 과 J_3 는 역방향 바이어스 되며, J_2 는 순방향 바이어스 된다. 접합 J_3 는 n^+p 의 높은 불순물 농도로 인해 낮은 항복전압을 가지므로 대부분의 역방향 차단전압은 J_1 에 나타난다. 낮게 도핑된 n^- 영역은 공핍층의 대부분을 이루며, 역방향 차단전압이 큰 사이리스터는 낮은 도핑 준위와 함께 긴 n^- 영역을 가진다. 한편, 애노드 전극이 캐소드에 대해서 양으로 바이어스 되었을 때에는 접합 J_1 과 J_3 는 순방향 바이어스 되며, J_2 는 역방향 바이어스 된다. n^- 영역은 공핍층의 대부분을 차지하

1. 진주산업대학교 전자공학과
(경남 진주시 칠암동 150)
2. 한국전기연구원 전력반도체연구그룹
a. Corresponding Author : bckim@jinju.ac.kr
접수일자 : 2006. 9. 8
1차 심사 : 2006. 12. 26
심사완료 : 2007. 2. 23

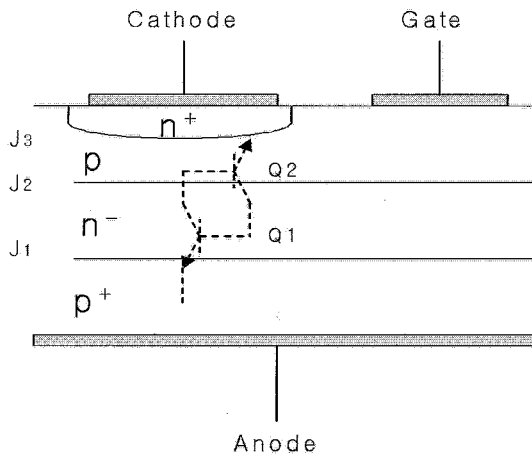


그림 1. 사이리스터의 소자구조.
Fig. 1. Device structure of Thyristor.

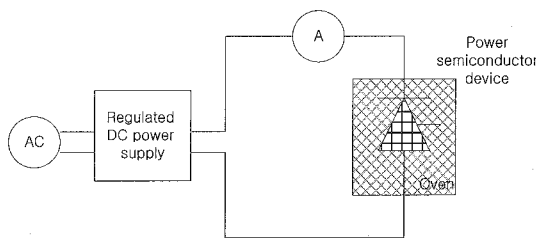


그림 2. 가속열화 시험장치의 구성도.
Fig. 2. Set-up of the accelerated aging test equipment.

게 되므로 순방향 차단전압 능력은 역방향 지지전압 능력과 같아야 하지만 실제로는 도핑농도의 차이로 인해 순방향 차단전압보다 역방향 차단전압이 더 높게 나타난다[3,4].

2.2 가속열화 시험장치 및 가속열화실험

사이리스터의 가속열화실험을 위해 직접 제작한 가속열화 시험장치의 구성도를 그림 2에 나타내었으며, 스트레스 인자로서 전압과 온도를 동시에 인가하였다.

가속열화 시험장치에서 Oven내의 온도 편차가 ± 0.425 °C 정도로 나타났기 때문에, 가속열화실험에서 이러한 온도편차에 따른 영향을 최소화하기 위해 시험용 사이리스터의 위치에 따른 온도를 개별적으로 측정하여 가장 작은 온도 차이를 나타내는 곳에서 가속열화실험을 실시하였다. 위치에 따른 온도 편차는 ± 0.15 °C이다.

표 1. 전압 및 온도에 따른 가속률.

Table 1. An accelerating rate with the voltage and temperature.

시험전압 (V)	기준전압 (V ₀)	전압 가속률 (K1)	사용온도 (T ₀)	시험온도 (T)	온도 가속률 (K2)
1 kV (66.666 %)	600 V (40%)	2.383	50 °C (323 K)	90 °C (363 K)	23.80
	450 V (30%)	3.886		100 °C (373 K)	47.27
	300 V (20%)	7.743		110 °C (383 K)	90.60
				120 °C (393 K)	167.97

가속열화실험에 사용된 사이리스터 소자는 정격 V_{DRM}=V_{RRM}=1.5 kV, I_{DRM}=I_{RRM}=20 mA의 특성을 가지는 PCT(Phase control thyristor)를 사용하였으며, 순방향 차단전압 1.85 kV, 역방향 차단전압 2.2 kV이상의 초기특성을 갖는 소자를 사용하여 실험을 수행하였다. 온도 가속장비의 내부온도는 100 °C, 인가전압은 1 kV로 고정하여 지속적인 스트레스를 인가하였다. 실험 결과는 7일에서 12일을 주기로 측정하였으며, 장치내부의 온도가 일정하게 유지되는지를 알아보기 위해 Thermo coupler를 이용하여 지속적으로 온도 측정을 하였다. 전압 및 온도 가속률의 정의는 Eyring 모형을 따랐다. 가속열화실험에 사용된 식을 아래에 나타내었고, 기준전압과 시험온도에 대한 가속률을 표 1에 나타내었다[5].

$$\text{전압 가속률} = K1 = \left(\frac{V}{V_0}\right)^n : V : \text{시험전압,}$$

$$V_0 : \text{기준전압, } n : 1.7 \text{ at } 60 \text{ Hz}$$

$$\text{온도 가속률} =$$

$$K2 = \exp\left[\left(\frac{E_a}{k}\right) \cdot \left(\frac{1}{T} - \left(\frac{1}{T_0}\right)\right)\right]$$

$$E_a : \text{Energy gap}(0.8eV \text{ at } 60 \text{ Hz}),$$

$$k = 8.616 \cdot 10^{-5} (eV/K)$$

$$T : \text{시험온도, } T_0 : \text{기준온도}$$

전압 가속률에서 기준전압은 정격의 40 %인 600 V로 결정하였으며, 온도 가속률에서 기준온도는 50 °C로 하여 각각에 대해서 가속률을 구하였다. 이렇게 한 경우 전압 및 온도에 따른 종합 가속률은 112.64이다.

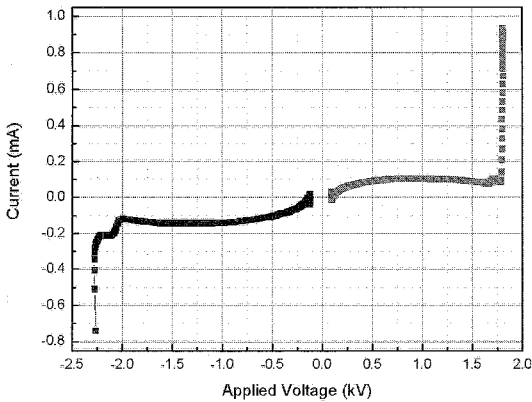


그림 3. 사이리스터의 초기항복전압특성.
 Fig. 3. The initial breakdown voltage characteristics of Thyristor.

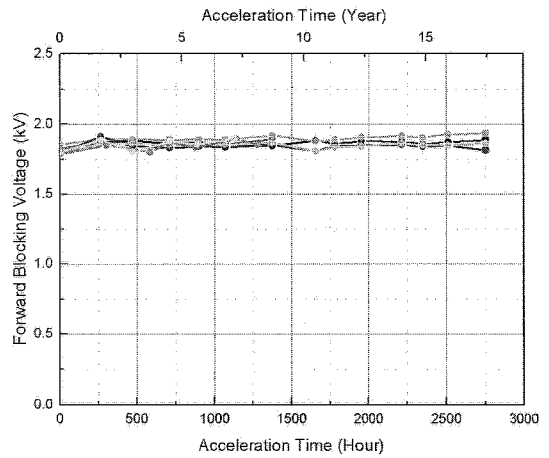
3. 결과 및 고찰

그림 3은 사이리스터의 순방향/역방향 항복전압 및 누설전류특성을 나타낸 것으로 가속열화 시험이 진행되기 전 소자의 초기 특성을 나타낸 것이다.

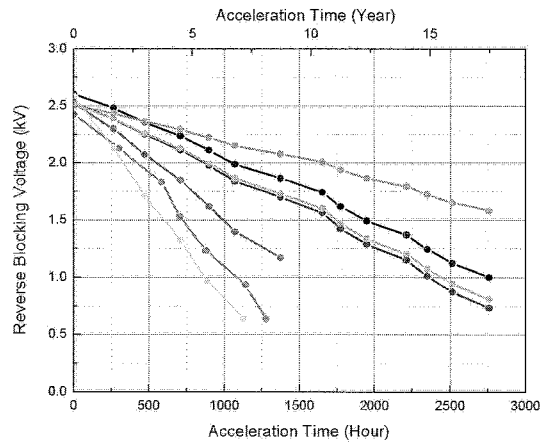
가속열화시험에 사용한 소자는 순방향 항복전압이 1.85 kV 이상이고, 역방향 항복전압 특성이 2.25 kV 이상인 소자를 사용하였으며, 누설전류 특성은 순방향 및 역방향에서 0.1 mA 이하의 소자만을 사용하였다. 같은 정격을 가지는 소자라 할지라도 항복전압 및 누설전류특성에서 약간의 차이가 나타났는데, 이것은 각각의 개별소자에 사용된 웨이퍼의 도핑 농도차이와 제조 공정상에서 발생한 결함정도의 차이가 원인인 것으로 생각할 수 있다. 그리고 순방향 차단전압보다 역방향 차단전압이 높은 것은 사이리스터 소자의 구조에 따른 것으로 순방향 차단 상태에서는 하나의 접합에만 차단전압이 인가되지만, 역방향 차단 상태에서는 두 개의 접합에 차단전압이 인가되기 때문이다.

그림 4에 사이리스터의 가속열화시험에 따른 순방향 및 역방향의 항복전압 특성을 나타내었다.

가속열화에 따른 순방향 항복전압은 변화 없이 거의 동일한 측정값을 나타내고 있지만, 역방향 항복전압 특성은 가속열화 시간에 따라 감소함을 알 수 있다. 역방향 차단전압 특성이 정격전압인 1.5 kV 이하로 감소하기 시작하는 시점은 시험용 사이리스터에 따라 다르게 나타나고 있는데, 앞서 계산한 종합가속률을 적용하여 소자의 추정 사용시간을 예측해 본 결과 대략 3~15년 정도로 큰 편차



(a) 순방향 특성



(b) 역방향 특성

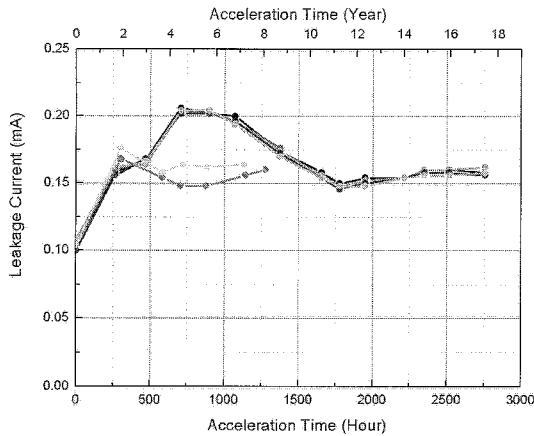
그림 4. 가속열화시간에 따른 사이리스터의 항복전압 특성.

Fig. 4. Breakdown voltage characteristics of Thyristor with accelerated aging time.

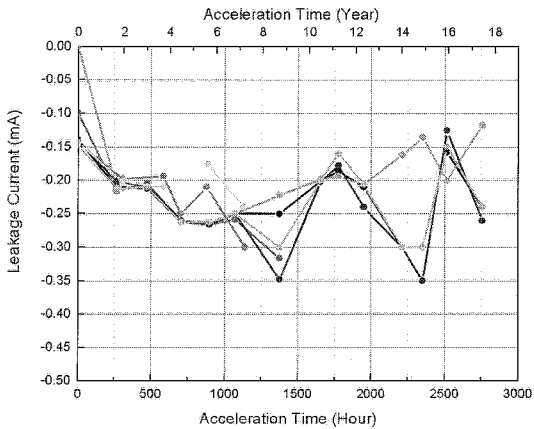
를 나타내었다. 이것은 사용된 시험용 사이리스터에 따라 제조 공정상에서 형성되는 결함의 위치나 크기 등이 다르기 때문으로 생각할 수 있다.

그림 5는 가속열화시간에 따른 사이리스터의 순방향 및 역방향 누설전류 특성변화를 나타낸 것이다.

그림에서 보는바와 같이 가속열화시간에 따른 순방향 및 역방향 누설전류는 측정시의 오차를 감안하더라도 초기 측정값보다 1.5~2배가량 증가한 것으로 나타나고 있는데, 이것은 소자가 가속열화되면서 소자의 제작과정에서 베벨링 부분에서의 결함들이 점차 증가함으로써 누설전류가 함께 증가하는 것으로 생각할 수 있다.



(a) 순방향 특성



(b) 역방향 특성

그림 5. 가속열화시간에 따른 사이리스터의 누설 전류 특성.

Fig. 5. Leakage current characteristics of Thyristor with accelerated aging time.

100 °C의 온도에서 1 kV의 전압을 지속적으로 인가하여 가속열화 시험을 수행한 결과 가속열화 시간이 증가함에 따라 사이리스터에 흐르게 되는 누설 전류량이 증가하는 것을 알 수 있었다. 이것은 소자마다 차이는 있으나 일정한 시간 이상 가속열화가 이루어져 소자가 충분한 스트레스를 받게 되는 경우 소자 내에 존재하는 결함에 의한 것으로 보여 진다. 사이리스터와 같이 베벨링 기법을 이용하여 Edge termination 부분을 처리하는 경우 물리적인 방법으로 웨이퍼의 표면을 갈아내는 베벨링 기법의 특성상 표면에 결함이 발생하게 되는데, 이러한 결함 부분이나 소자의 취약부위들에 가속열화가 진행되면서 스트레스가 누적되게 되면

부분적인 녹음 현상 또는 전계집중 현상 등에 의해 누설전류가 증가하게 된다[6]. 일반적으로 베벨링 처리 과정에서 웨이퍼의 표면에 형성된 결함은 에너지 상태가 불안정하기 때문에 차단상태에서 결함부위로 전계가 집중하게 되며 이 부분에서의 온도 상승에 따라 결함 부위가 부분적으로 녹는 현상이 발생하게 되는데 이후 온도가 일정 수준에 이르게 되면 결함부위에 과도한 전계집중과 온도 상승에 의해 유발된 열폭주 현상에 의해 급격하게 증가된 전류에 의해 소자의 파괴가 일어나게 된다. 이 때 폭주에 의해 증가된 전류의 대부분이 결함 부위를 통해 흐르게 된다[7-9].

본 연구에서 제시한 열화진단기법 이외에 Capacitance와 1/f noise 진단에 의한 열화 특성을 조사하였으나, Capacitance는 경향성을 찾을 수 없었으며, 1/f noise는 background noise의 영향으로 제대로 된 측정을 할 수가 없었다.

4. 결론

대용량 사이리스터의 수명을 예측하기 위하여 전압과 온도를 동시에 인가할 수 있는 시험 장치를 제작하여 가속열화실험을 진행하였다. 열화진단 도구로서 순방향/역방향 차단전압과 누설전류의 변화를 조사하였다. 열화특성으로서 가속 시간에 따른 순방향 및 역방향 누설전류는 모두 증가하는 현상을 나타내었다. 그러나 순방향 항복전압은 거의 일정한 반면, 역방향 항복전압은 가속열화시간 초기부터 감소하기 시작하였다. 가속열화시간에 따른 역방향 항복전압의 감소로부터 소자의 사용시간을 예측할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] M. Ohring, "Reliability and Failure of Electronic Materials and Devices", Academic Press, 1998.
- [2] M. Cepek and C. P., Krishnayya, "Thyristor aging", Power System Technology, p. 18, 1998.
- [3] B. J. Baliga, "Power Semiconductor Devices", John Wiley & Sons, 1987.
- [4] B. J. Baliga, "Analysis of insulated gate transistor turn-off characteristics", IEEE Electron Device Lett., EDL-6, p. 74, 1985.

- [5] Endicott, H., Hatch, B., and Sohmer, R., "Application of the eyring model to capacitor aging data", IEEE Trans. Component Part, Vol. 12, p. 34, 1965.
- [6] 김형우, 서길수 외, "대용량 사이리스터의 열화 메카니즘", 대한전기학회 합동추계학술대회논문집, p. 82, 2003.
- [7] 김형우, 서길수, 김기현, 이양재, 최낙권, 김은동, "Thyristor 소자의 열화에 따른 특성저하 분석기법에 관한 연구", 한국전기전자재료학회 2005하계학술대회논문집, p. 99, 2005.
- [8] 김형우, 서길수, 김상철, 강인호, 김남균, 김은동, "Thyristor 소자의 스트레스에 따른 소자 파괴 메커니즘 연구", 한국전기전자재료학회 2005하계학술대회논문집, p. 129, 2005.
- [9] 社団法人 電氣協同研究會 "電力系統用 power electronics 設備の現場と設計・保守基準", 電氣協同研究 第 57卷, 第 2號, 平成 13년 10월.