

대용량 전동기 구동용 Thyristor 소자의 열화 측정 및 평가

*오 동 환, **이 진 희, **이 성 희, **김 광 일
*포항종합제철, **포항산업과학연구원

Measuring and Evaluating of Aging of Thyristor for High Capacity Motor Driving

*DongHwan Oh, **J.H.Lee, **S.H.Lee, **K.I.Kim

*Pohang Steel & Iron Company, **Research Institute of Industrial Science and Technology

Abstract - 일반적으로, Thyristor와 같은 반도체 소자는 수명이 반영구적이라고 알려져 왔으나, 실제로는 사용 시간이 지남에 따라 열화 과정을 가지는 것으로 보고되고 있다. 이는 소자 제조 공정상의 결함이나 가공 불량, 소자 접합면에 존재하는 물리적 불균질성등이 원인이 되는데 이들 원인으로 인해 반도체 소자내에 취약부위가 존재하게 된다. Thyristor 소자 응용 시스템에 있어서, 운용중 발생하는 전기적 물리적 스트레스는 Thyristor 소자내의 취약부위에 집중되는데, 시간이 지남에 따라 취약부위가 확산되고 열화가 가속되어 갑작스런 소자 파손으로 이어지게 된다. 본 논문에서는 Thyristor 소자의 열화 과정을 이론적인 측면에서 해석하고, 실제 산업현장에서의 Thyristor 열화 발생 사례를 중심으로 대용량 Thyristor의 열화 평가방법에 대하여 고찰한다.

1. 서 론

제철 공정의 압연기나 전기 철도 차량 등에 이용되고 있는 대용량 직류 전동기를 가변속 제어하기 위해서 위상 제어 정류기가 많이 사용되고 있는데, 대부분 전력변환용 소자인 Thyristor가 응용된 것이 대부분이다.

Thyristor와 같은 전력용 반도체 소자는 일반적으로 수명이 반영구적이라고 알려져왔는데, 실제 산업현장에서 사용되고 있는 Thyristor 소자들의 경우 일정 사용 시간이 지나면 전기적 특성 변화가 관측됨으로써 일정주기로 소자의 교체를 필요로 하게 된다. 소자의 교체없이 연속적인 사용이 지속되면 갑작스런 소자 파손이 발생할 수 있으며 설비사고로 이어질 수 있다.

소자의 열화는 Thyristor 소자내의 취약부위로 전기적 물리적 스트레스가 집중되어 취약부위가 확산됨으로써 발생된다. 취약부위는 제조 공정에서의 결함이나 가공 불량으로 인해 존재하게 되는데 아주 양호한 제품의 경우에도 소자 접합면의 불균질성으로 인하여 소자내에 미세 취약부가 반드시 존

재하게 된다.

본 논문에서는 thyristor 소자의 열화 과정을 이론적인 측면에서 해석하고, 실제 산업현장에서의 thyristor 열화 발생 사례를 중심으로 대용량 thyristor의 열화 평가방법에 대하여 고찰한다.

2. 본 론

Thyristor 혹은 SCR(Semiconductor Controlled Rectifier)는 전력용 반도체 소자의 하나이다. 전력용 반도체 소자란 전력 변환 시스템에 있어서 전류나 전압을 제어하기위해 사용되는 반도체 소자를 일컫는 말인데, Thyristor는 이들 중 가장 먼저 개발되었고 현재 대용량 전력변환설비에 가장 많이 사용되고 있는데, 6000V 전압에 견디고 3000A 이상의 전류를 흘릴수 있는 소자까지 개발된 상태에 있다.

2.1 Thyristor 소자의 특성

Thyristor 소자는 그림 1과 같이 4개의 층으로 구성되어 있고 3개의 단자를 가지고 있다.

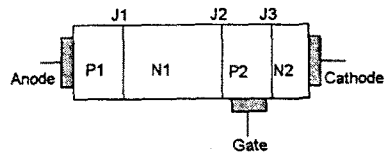


그림 1. Thyristor의 기본 구조

Anode에 Cathode 보다 낮은 전압이 인가될 때 Thyristor는 전류를 흘리기 어려운 상태 즉, 역방향 저지 상태(Reverse Blocking state)를 유지한다. Anode에 Cathode 보다 높은 전압이 인가 될 때에도 전류를 흘리기 어려운 상태 즉, 순방향 저지 상태(Forward Blocking state)를 유지하는데, 이 상태에서 Gate를 통해 전류가 유입되면 전류를 흘릴수 있는 상태 즉, 순방향 도통 상태(On state)로 된다. 일단 한 번 도통이 되면 Gate의 영향을 받지 않

며 전류의 크기는 외부회로에만 의존하게 되며, On 상태에서 Off 상태로의 전환도 외부회로에 의해서 변화된다. 또한 Thyristor 소자는 Holding Current라 불리는 임계치 이하로 도통 전류가 낮아져야 Off 되는 특성을 가진다.

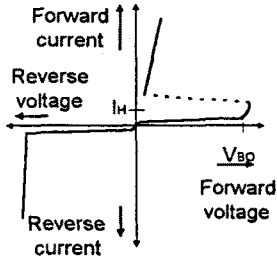


그림 2. Thyristor 소자의 전압-전류 특성 곡선

앞에서 설명한 Thyristor의 전압-전류 특성을 그래프로 나타낸 것이 그림 2이다. 역방향 저지 상태나 순방향 저지 상태는 일정크기의 전압범위내에서 유지되며 정격 이상의 전압이 역방향 또는 순방향으로 가해지는 경우 Avalanche Multiplication효과에 의해 전류가 급격히 증가하게 된다.

2.1.1 Thyristor 소자의 열화

실리콘을 재료로 하여 만들어지는 Thyristor 소자는 수명이 반 영구적인 것으로 알려져 왔으나, 사용중 외부로부터 가해지는 전기적 물리적 스트레스로 인해 열화되는 것으로 밝혀지고 있다.

Thyristor 소자가 열화되어 파손되는 진행상황을 살펴보면, 방열 문제로 인하여 취약부위의 실리콘 또는 전극 재료의 일부가 용융, 확산되고 이로 인해 취약부위로 전계가 집중되므로 스위칭 손실이나 gate에 과전류가 흐르게 된다. 또한 기판 소재인 실리콘 단결정의 변형이 발생하여 전계의 집중이 발생되는데 이것은 실리콘 기판(substrate)에 대한 과도한 스트레스나 기판과 전극과의 열팽창 계수차에 기인한다. 열화가 진행될수록 저지 상태에서의 누설전류량이 증가하게 되어 소자로부터의 열발생률은 증가되는데, 소자 접합부의 온도가 높아질수록 열화진행 속도가 가속화된다. 열화 진행의 마지막 단계에서는 열손실의 급속히 증가되고 발생하는 열은 외부로 완전히 발산되지 못하고 축적이 되므로 결국 접합부의 용단으로 이어져 소자가 완전히 파손되게 된다. 그림 3은 실제 파손된 Thyristor 소자의 용단점을 나타낸 그림이다.

2.1.2 열화에 따른 소자의 특성 변화

Thyristor 소자가 열화되는 과정에서, 취약부위의 확산으로 증가하는 결합부위는 Off 상태에서 등가적으로 나타나는 저항치를 낮추는 결과를 가져와서 저지 상태에서의 누설전류를 전체적으로 증가시키

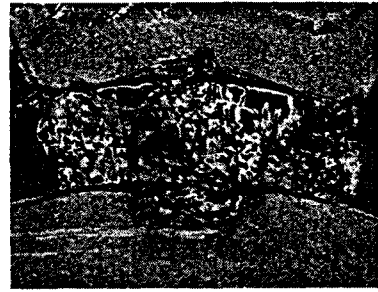


그림 3. 용단현상으로 파손된 Thyristor 소자

는 역할을 하며 항복전압 부근에서의 누설전류를 급격히 증가시키므로 항복전압(V_{BO})의 값이 낮아지게 된다. 특정 주파수의 정현파 전압이 열화된 소자에 인가되는 경우의 I-V 특성을 보면, 역방향 항복 전압이나 순방향 항복 전압의 값이 정상인 경우보다 낮아져있고 저지상태에서의 누설전류 값도 정상치보다 증가되어 있는 것이 확인된다. 어느정도 열화 과정을 거친 소자의 경우, 사용이 지속되면 급격히 항복전압이 낮아져서, 역방향 및 순방향에서 저지능력을 완전히 상실하는 것이 확인된다. 열화된 소자에서 접합부의 온도가 상승하면 누설전류가 더욱 증가하며 항복전압의 크기가 크게 낮아지는 특성을 가지는데, 이때 누설전류의 증가율이나 항복전압의 강하율은 정상인 Thyristor 소자에 비해 월등히 높은 것으로 나타난다. 이러한 열화된 Thyristor 소자에 대한 전압-전류 특성은 용량별, 제조사별로 상이하게 나타난다.

2.2 실험 및 결과

Thyristor 소자의 열화에 따른 전기적 특성 변화는 여러 가지가 있는데, 가장 일반적으로 사용하는 방법은 저지상태에서의 절연상태를 점검하는 것이다. 통상적으로 메가(megohm meter)를 사용하는데 메가는 500V 또는 1000V의 전압을 사용하여 절연저항을 표시한다. 이 방법은 Thyristor 사용 정격내에서의 정상유무 및 테스트 전압(500V 또는 1000V)이내에서의 누설전류의 양을 짐작할 수는 있지만 세부적인 동작특성을 파악하기는 불가능하다. Thyristor 소자의 전기적 특성은 I-V 특성 곡선을 통해 정확히 파악될 수 있으므로 적절한 실험장치를 필요로 한다.

2.2.1 실험 장치 설계 및 구현

Thyristor 소자의 I-V 특성 곡선을 획득하기 위해서는 항복전압 이상의 가변 전압원과 인가 전압에 대한 도통 전류를 측정, 표시할 수 있는 장치가 필요하다. 실험에 사용된 장치의 구성은 그림 4와 같은데, 전력용 thyristor 소자는 정격 전압이 1000V 이상이고, 항복전압은 2000V 근처이므로 가변 전압원은 2500V 이상의 전압 출력을 가지도록

하였다. 또한 소자가 항복을 일으킨 경우 전류가 latch current 이상이 되면 On 상태로 변환되므로 도통 전류를 적당한 크기로 제한 시키도록 전압원을 제작하였다. 표시부는 오실로스코프의 X-Y 표시 기능을 사용하였고, 획득된 파형의 저장을 통해 I-V 특성 변화의 추이를 관찰하였다.

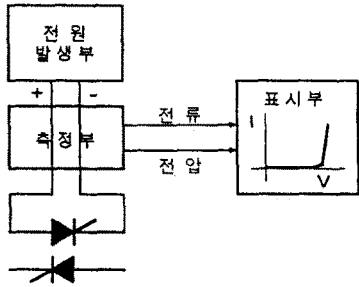


그림 4. I-V 특성 실험 장치의 구성도

2.2.2 열화 가속화 실험

Thyristor 소자의 내부 결함 발생이나 열화 진행은 정격 이상의 전압이나 전류에 의한 것인데, 정상 소자의 열화 과정을 I-V 특성을 통해 알아보기 위해 Thyristor 소자에 서지(Surge) 발생기를 이용한 스트레스 축적 과정을 반복하였다. 항복 전압의 200% 크기의 표준서지(IEC60-1, 1.2/50usec 전압)를 반복하여 인가하면서 I-V 특성이 변화하는 것을 관측하였다. 인가된 서지 전압이 항복 전압의 250% 근처가 되면 소자가 한 순간에 파괴됨을 관측할 수 있었다. 항복 전압의 200% 크기의 서지는 소자가 견딜 수 있는 전압인데, 정격 전압에 비하면 3배 이상 높은 전압이다. 본 실험에서는 100회씩의 서지를 인가한 후 I-V 특성을 관찰하는 방법으로 수행되었는데, 어느 순간까지는 아무런 이상이 없다가 갑작스럽게 I-V 특성이 변하는 것이 관측되었고 급속히 파손되었다. I-V 특성의 변화는 상온이상의 온도에서 뚜렷이 나타났다.

2.2.3 실험 결과

정상인 소자의 경우 I-V 특성 곡선의 모양은 그림 5 및 그림 6과 같다. 그림 5, 6 및 7의 가로축은 전압이고 세로축이 전류로써 각각 DIV당 200V 및 10mA를 나타낸다. 항복 전압까지의 전류는 소자마다 차이는 있지만 대체로 수 mA 이내이고 항복전압 근처에서 급격히 증가되었다. 그림 5의 경우는 저지상태에서의 누설전류의 크기가 작고 그림 6의 경우는 정상인데도 불구하고 비교적 큰 누설 전류를 가지고 있다. 그림 7의 경우는 어느정도 열화 과정을 거친 소자의 I-V 특성을 나타낸 것인데 저지상태에서의 누설전류량이 상당히 크고 전압 크기에 따라 증가하는 추세를 나타내었다. 메가로 절연저항을 측정된 결과 열화된 소자의 경우 정상의 몇

10% 저항값을 가지고 있었다.

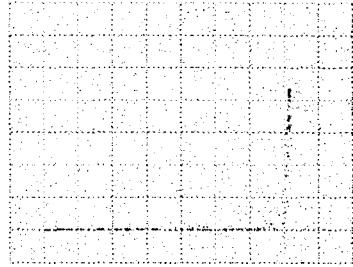


그림 5. 정상 Thyristor의 I-V 특성

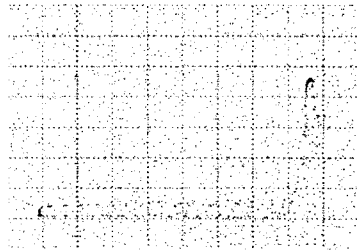


그림 6. 정상 Thyristor의 I-V 특성

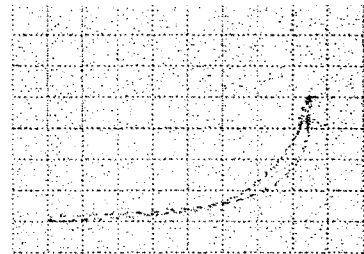


그림 7. 열화된 Thyristor의 I-V 특성

3. 결 론

본 논문에서는 thyristor 소자의 정상여부 및 열화 정도를 판단할 수 있는 방법을 제시하였다. 또한 thyristor 소자에 특정 주파수의 특정 전압을 인가하고 이에 따른 I-V 특성을 획득함으로써 열화 특성을 분석할 수 있는 열화 진단 장치의 구조를 제안하였다. 사용중인 thyristor 소자의 열화 정도는 정상 소자의 초기 상태 특성과 현재의 특성을 비교 분석함으로써 열화 정도의 측정이 가능함을 확인하였다. 또한 열화 가속화 실험을 통한 소자의 특성 변화를 관찰함으로써 제안된 열화 진단 장치의 신뢰성을 확인하였다.

향후 사용환경에 따른 소자의 특성 변화 속도를 정량화한다면 사용중인 thyristor 소자의 정확한 잔

존 수명 예측이 가능하리라 기대된다.

(참 고 문 헌)

- [1] Yoshio Shimoda and Hidetaka Satoh, "Waveform dependence of Surge-handling Capability and Failure Analysis for Semiconductor Lightning Surge Protectors", Japan Journal of Application of Physics, Vol. 34, pp 5993-5997, 1995
- [2] Yoshio Shimoda and Hidetaka Satoh, "Analysis of Switching Operation for two-terminal Bi-directional Thyristor", 電學論C, 8, 116권 3호, p303, 平成 8년
- [3] Herlet. A, "the Maximum blocking Capability of Silicon Thyristor", Solid State Electron, 8, pp 655-671, 1965
- [4] Moll.J.L, Su.J.L and Wang.A.C.M, "Multiplction in collector junctions of silicon npn and pnp transistor", IEEE Tans.Electron. Devices, ED-17, pp420-423, 1970
- [5] Timothy J.Maloney, "Industrial Solid State Electronics", 2nd edition, Prentics Hall, 1986
- [6] General Electric, "SCR Manual including Triacs and other Thyristors", 6th edition, 1979