

HVDC용 사이리스터 소자의 전기적 특성 simulation 연구

김상철, 서길수, 김은동
한국전기연구원, 전력반도체그룹

Electrical characteristics simulation of thyristor devices for HVDC transmission

Kim Sang-Cheol, Seo Kil-Soo, Kim Eun-Dong
Korea Electrotechnology Research Institute, Power Semiconductor Group

Abstract - In northeast Asia, there will be several important HVDC transmission lines to be established in Korea and China for perspective electric network market. 5500V 4-inches High voltage thyristor can be used in the DC transmission and distribution of electric power system. In this application, many thyristors are connected in series for each thyristor valves. Therefore, the required low reverse-recovery charge Q_{RR} and low on-state voltage drop V_{TM} for such thyristor is necessary to this application. In our work, the on-state and off-state voltage performance was simulated by commercial simulation software.

1. 서 론

1947년 트랜지스터의 출현으로 반도체시대가 도래한 후 10년이 지나 미국의 GE사와 RCA사에 의해서 사이리스터는 거의 같은 시기에 개발되어 상용화가 되었다. 1년이 지나 사이리스터는 일본에도 전해져 GE 및 RCA와의 기술제휴를 통하여 새로운 종류의 사이리스터 소자가 개발되기 시작하였다.

이 새로운 소자를 GE에서는 실리콘 정류소자 또는 반도체 정류소자 SCR[®]이라는 이름으로 명하였으며 RCA사에서는 이 소자의 성질이 사이라트론과 비슷하고 2개의 트랜지스터의 복합구조라는 점에서 Thyatron과 Transistor의 두 낱말을 합성하여 사이리스터(Thyristor)로 명하였다. 이와 같은 새로운 소자는 1963년 IEC (International Electrotechnical Commission) 총회에서 사이리스터로 규정되어 현재까지 사용되고 있다. 이러한 새로운 반도체 소자를 개발함으로써, 전력반도체라는 반도체의 한 분야가 열렸으며, 개발 당시에는 10A 정도의 전류처리능력과 수백 V 정도의 전압저지능력을 가지고 있었지만, 현재에는 정격 전류로는 약 6,000A, 정격전압으로는 무려 12kV 급까지 발전되었다. 사이리스터는 다른 전력소자와 비교하여 고전압, 대전류화, 단위 시간당 전류내량 및 전력제어비가 우수한 장점이 있다.

현재 전세계적으로 환경문제 및 지리적인 여건 등으로 인하여 발전소의 신축 및 증설 등에 많은 제한을 받고 있다. 이러한 제약요건을 극복하기 위해서 직류직접송전(HVDC)을 이용하고 있으며, 국내에서도 해남-제주간에 사이리스터 소자를 채용한 HVDC 송전선이 건설되어 제주지역의 전력송전을 담당하고 있다. 이러한 전력계통분야의 안정적인 운전을 위해서는 전력반도체소자를 이용한 양질의 전력변환이 필수적이며 기후변동협약에 따른 온실가스 저감을 위한 에너지절약 및 효율화를 위

해서 사이리스터 등과 같은 대용량 전력반도체 소자의 역할이 강조되고 있는 실정이다.

2. 본 론

2.1 소자 설계

사이리스터 소자는 복잡한 3차원 구조로 되어 있으며, 온도에도 민감한 특성을 나타낸다. 따라서 사이리스터 소자를 최적으로 설계하는 것은 상당히 어렵다. 제반 특성을 결정하는 설계변수가 매우 많고, 이들간의 상호관계도 매우 복잡하다. 사이리스터 특성을 결정하는 주요 설계변수로는 캐소드의 모양, 실효선폭, 주변길이, 캐소드-에미터 단락구조의 모양, 크기, 거리, 패턴 및 게이트 구조, 도핑농도 구조, 캐리어 lifetime 등이다. 따라서 이러한 설계변수들이 사이리스터 소자의 여러 특성에 미치는 영향을 정량적으로 산출하여 최적설계 해야 한다. 그러나 실험적인 방법으로 최적설계 하기에는 변수가 많기 때문에 시간과 비용이 많이 들고, 최적설계가 되었는지도 판별하기가 어렵게 된다. 따라서 본 연구에서는 반도체 소자 시뮬레이터를 이용하여 사이리스터 소자의 특성을 예측하였다.

HVDC용 5.5kV/1kA급 사이리스터 소자의 설계는 일반적인 pnpn 4층 구조의 사이리스터 설계와 동일하다. 그러나 n-base 두께는 소자의 순방향 전압 V_{TM} 과 역회복 전하량 Q_{RR} 에 영향을 미치게 되므로 많은 주의가 요한다.

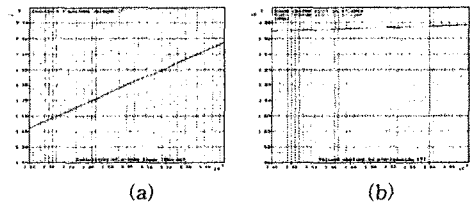


그림 1. 5.5kV급 사이리스터 소자의 해석적 계산 결과 (a) n-base 저항률에 따른 항복전압의 변화 (b) 인가 전압에 따른 pn 접합에서의 공핍층의 변화

그림 1의 (a) 및 (b)에 5.5kV급 사이리스터 소자의 기본 출발물질을 선정하기 위해 해석적인 방법으로 구한 결과를 나타내었다. 그림 1(a)는 실리콘 웨이퍼의 저항에 따른 에벌런치 항복전압의 변화를 나타내었으며 그림 1(b)는 5.5kV가 인가되었을 경우의 pn 접합에서의 공핍층 영역을 나타내었다. 고전압 소자의 경우 사용 Si-웨이퍼의 저항률 분포가 전 범위에서 약 10% 정도의 편차를 가지며 또한 항복전압이 소자의 순방향 및 역방향 반복 최대전압 보다 10% 정도 여유를 두고 설계되

므로 약 20% 정도의 전압 여유를 두고 설계해야 한다. 따라서 본 연구에서는 5.5kV급 소자의 정격을 만족시키기 위해서 6.5kV 정도의 애벌런치 항복전압을 얻기 위한 조건으로 설계되었다. 이때의 웨이퍼의 저항은 300Ωcm 이고 n-base 쪽으로의 공핍영역의 폭이 690 μm 정도가 필요하다.

그림 1의 계산결과를 바탕으로 그림 2와 같은 구조의 simulation 구조를 형성하였으며 그림 3에 수직방향으로의 불순물 농도를 나타내었다. 웨이퍼의 두께는 1000 μm이고 p-base의 두께는 130μm, 그리고 n-cathode의 깊이는 표면으로부터 15μm의 깊이에 형성되었다.

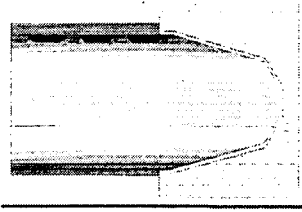


그림 2. 5.5kV급 사이리스터 simulation 구조 (고내압 bevel 구조 $\theta_1 = -1.6^\circ$, $\theta_2 = -16^\circ$)

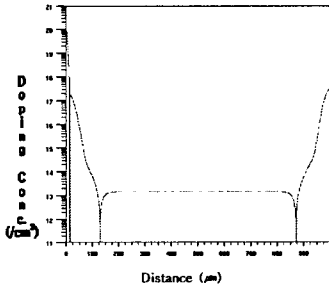


그림 3. 5.5kV급 HVDC 사이리스터 불순물 분포

위의 simulation 구조를 이용하여 ISE-TCAD를 이용하여 항복전압 simulation을 수행하였다. 이때 고내압 edge-termination 구조를 형성하기 위해서 negative bevel을 1.6° 각도로 적용하였으며 해석적인 계산결과에 근접한 6.1kV의 값을 얻을 수 있었다. 이 값은 본 연구에서 목표로 하는 5.5kV를 10% 이상 상회하는 값이다.

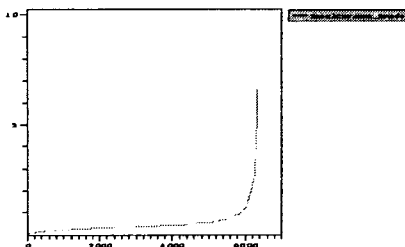


그림 4. ISE-TCAD를 이용한 항복전압 simulation 결과

이러한 결과는 p-base의 깊은접합을 형성하는 알루미늄(Al)의 농도기울기에 많이 영향을 받는다. 고전압이 접합에 인가될 경우 대부분의 전압은 낮게 도핑된

n-base 영역에 걸리게 되나, pn 접합 경계 부분의 p-base 농도 기울기를 완만하게 할 경우 5% 이상의 항복전압 향상효과를 얻을 수 있다.

그림 5에 소자의 온-전압 특성 simulation 결과를 나타내었다. 그림에서 순방향 전류가 3140A에서 소자의 온-상태 전압은 1.6V를 나타내고 있다. 이 값은 5kV급의 일반적인 위상제어용 사이리스터가 1.5V 정도인 것에 비해서는 약간 높은 값이나 고속스위칭 사이리스터가 2V 이상의 V_{TM} 을 나타내고 있으므로 매우 좋은 특성이라 할 수 있다.

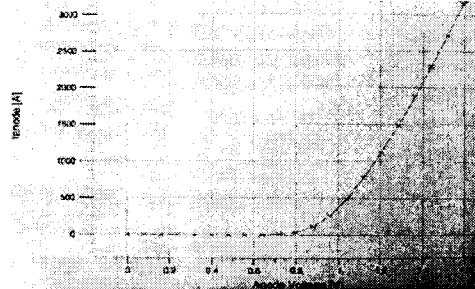


그림 5. 5.5kV급 사이리스터 소자의 온-전압 simulation 결과 ($I_{TM}=3140A$ 에서 $V_{TM}=1.6V$)

2.2 온-상태 전압 V_{TM} 과 역회복전하 Q_{RR} 의 관계

사이리스터 소자에 있어서 온상태전압 V_{TM} 과 역회복전하 Q_{RR} 의 관계는 매우 중요하다. 직류송전에 이용되는 사이리스터 소자는 개별적으로 사용되지 않고 여러개의 사이리스터 소자가 하나의 밸브에 직·병렬로 연결되어 사용되기 때문에 Q_{RR} 의 편차가 적어야 한다. 더욱이 Q_{RR} 이 작은 소자는 회로에서의 캐패시터의 용량을 줄일 수 있으므로 밸브제작시 단가가 줄어든다. 소자에서 역회복전하 Q_{RR} 을 줄이기 위해서는 n-base 내에서의 소수 전송자 수명 τ_p 를 작게해야 한다. 그러나 n-base 내에서의 소수 전송자 수명 τ_p 가 작게되면 소자의 온-상태 전압은 커지게 되고, 소자의 통전손실이 커지게 되어 패키지에서의 열적인 문제를 일으키게 된다. 따라서 소자의 온-상태 전압 V_{TM} 과 역회복전하 Q_{RR} 과의 최적의 상관관계를 고려하여 소자 설계 및 제작을 수행해야 한다.

일반적으로 두 인자사이의 상관관계를 조절하기 위해서는 중금속(Au, Pt 등)을 소자에 확산하거나 전자선 또는 양성자를 조사하는 방법이 많이 사용된다. 중금속 확산법은 특별한 장치가 없이도 가능하나 확산온도가 높고 재현성에 문제가 있어 현재는 많이 사용되지 않고 있다.

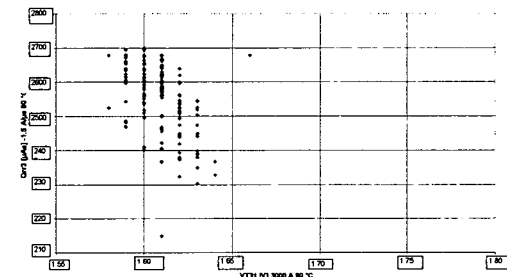


그림 6. 5.5kV급 사이리스터 소자의 전자선 조사후 온-상태 전압 V_{TM} - 역회복전하 Q_{RR} 상관관계

본 연구에서는 조사 에너지가 12MeV이고 도즈량이 $4 \times 10^{12} \text{electrons/cm}^2$ 의 전자선을 조사하여 사이리스터 소자의 $V_{TM}-Q_{RR}$ 특성변화를 살펴보았다. 그림 6에 12MeV의 전자선을 5.5kV급 사이리스터에 조사한 후의 $V_{TM}-Q_{RR}$ 분포도를 나타내었다. 전자선을 조사한 후의 소자의 역회복전하는 2400 μC 에서 2800 μC 의 분포를 보이고 있으며 이때의 온-상태 전압 V_{TM} 은 3000A에서 1.57V에서 1.64V의 범위에 집중되어 있다. 이 값은 그림 5에 나타낸 온-전압 특성 simulation 결과와 매우 잘 일치한다. 본 연구에서의 온-상태 전압은 전자선을 조사하기 전의 사이리스터 소자의 온-상태 전압 V_{TM} 에 비해 약간 증가하였으나 일반적인 사이리스터 소자의 역회복 전하량 Q_{RR} 이 6000 μC 에 비하면 2배 이상 줄어들었다.

또한 역회복전하량 Q_{RR} 편차가 매우 적어 직류직접전송(HVDC)용 사이리스터 밸브의 특성이 많이 향상될 것으로 판단된다.

3. 결 론

본 연구에서는 전력계통분야에서 직류직접전송(HVDC)에 전력변환 소자로 사용되는 고전압 사이리스터 소자를 제작하기 위해서 기본적인 특성을 얻기위한 모델링을 수행하였다. 내전압 5.5kV 이상을 얻기 위해서는 일반적으로 목표값에 비하여 20% 이상의 여유를 두고 설계하는 것이 보통이다. 따라서 본 연구에서는 5.5kV의 내전압을 얻기 위한 웨이퍼의 저항률 및 두께를 결정하였다. 계산에 의해 얻은 웨이퍼의 사양은 저항률 300 Ωcm 이며 5.5kV를 인가하였을 경우 pn 접합에서의 공핍층의 폭을 계산하여 웨이퍼의 두께를 1000 μm 로 설계하였다.

또한 사이리스터 소자에 있어서 온상태전압 V_{TM} 과 역회복전하 Q_{RR} 의 관계는 매우 중요하다. 직류송전에 이용되는 사이리스터 소자는 개별적으로 사용되지 않고 여러개의 사이리스터 소자가 하나의 밸브에 직·병렬로 연결되어 사용되기 때문에 Q_{RR} 의 편차가 적어야 한다.

본 연구에서는 조사 에너지가 12MeV이고 도즈량이 $4 \times 10^{12} \text{electrons/cm}^2$ 의 전자선을 조사하여 역회복전하량을 2400 μC 에서 2800 μC , 온-상태 전압은 약 1.6V의 값을 얻을 수 있었다. 이 때의 온-전압 값은 통상적인 사이리스터 소자의 온-전압에 비해서는 약간 큰 값이나 일반적인 사이리스터소자의 Q_{RR} 값인 6000 μC 에 비해 2배 이상 줄어든 결과를 얻을 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 지원의 한·중 국제공동 연구사업으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] A. A. Jaecklin, Power Semiconductor Devices and Circuits, Plenum Press, 1992.
- [2] A. Blicher, Thyristor Physics, Springer-Verlag, 1976.
- [3] B. Jayant Baliga, Modern Power Devices, John Wiley & Sons, 1987.
- [4] ISE Integrated System Engineering, ISE TCAD Manuals, Release 6, ISE AG, Switzerland.
- [5] Paul d. Taylor, "Thyristor Design and Realization", John Wiley & Sons, 1986, pp. 44-45.