

간단한 보조회로를 이용한 새로운 IGBT 직렬 구동 기법에 관한 연구

백주원*, 류명호*, 김성철*, 이영식*, 유동욱*, 김홍근**

* 한국전기연구소 전력전자연구부, ** 경북대학교 전자전기공학부

The study on novel method of IGBT's series connection using simple auxiliary circuit

J. W. Baek*, M. H. Ryu*, S. C. Kim*, Y. S. Lee*, D. W. Yoo*, H. G. Kim**

* Power Electronics Div., KERI, ** Kyungpook National Univ.

Abstract

There exists an acute need for high voltage solid-state-switches in a broad area of applications. With the proposed method using simple voltage balancing circuit with series connected IGBTs, it is realized high voltage semiconductor switches with working voltages of several order kilo-volts. The operation principle of the proposed circuit is explained and analyzed. Transient and static voltage-balancing is tested on a experimental 3kV/45A switch with four series-connected IGBTs.

I. 서론

최근 전력용 반도체 소자 기술의 비약적인 발전과 더불어 높은 전압, 전류 정격의 스위칭 소자들이 출시되고 있다. 이러한 소자들 가운데 IGBT는 구동회로가 간단하고 고속 스위칭이 가능한 장점과 소자의 정격이 MOSFET과 같은 소자에 비해 높은 점 때문에 싸이리스터와 GTO 같은 소자를 중용량은 물론, 대용량 분야에서 점차 대체해 나가고 있다. 그렇지만 IGBT와 같은 소자는 상용화된 최대 정격이 3.3kV/1.2kA이며 이보다 더 큰 정격을 요하는 고압 대용량 분야에는 개별 소자로는 적용이 불가능하다. 이로 인해 다수의 소자를 직렬 연결할 필요성이 있으며 이에 관한 연구가 많은 문헌에서 이뤄졌다. [1]-[3] IGBT 직렬 기술은 소자간의 전압 분배가 균일하게 이뤄져서 소자의 정격 전압 이상으로 과전압이 가해 지지 않게 하는 것이 중요하다. 특히, IGBT의 경우 턴 오프시에 소자간의 특성 차이가 많기 때문에 전압

분배 차이에 따른 과전압이 주로 많이 발생하며 온도에 따른 특성 차이가 소자간에 존재하기 때문에 이러한 전압 불균형이 일정하지가 않다. 그러므로 이를 해소하기 위해 여러 가지 방법이 적용될 수 있으며 크게 스너버회로를 이용하는 수동적인 방법^[2]과 게이트 구동회로로 제어하는 능동적인 방법^[1] [3]으로 분류할 수 있다.

스너버 회로를 사용하여 소자간의 전압 균형을 이루는 방법은 대용량 소자일수록 스너버 콘덴서의 용량이 증가하여 보조회로의 크기가 상당히 되는 점과 스위칭 주파수의 증가에 비례해서 손실 또한 매우 커지는 단점이 뒤따른다. 이와 달리 능동형 게이트 회로는 스너버 회로에서 발생하는 것과 같은 부가적인 손실을 유발하지 않고 신뢰성 있는 동작을 얻을 수는 있으나 소자의 직렬 수가 많아지면 회로의 복잡성이 증대되고 따라서 절연 문제와 장치 전체의 신뢰성을 가지는 데에 어려움이 따르게 된다. 이외에 전력용 반도체 소자의 직렬 구성을 위한 여러 가지 방법이 소개되고 있으나 모두 구성상에 복잡성이나 손실 문제 등 많은 단점을 내포하고 있다.

본 논문에서는 이러한 기존의 직렬기술의 단점을 해소할 수 있는 새로운 직렬구동 기법을 제안한다. 제안하는 새로운 직렬구동 방법은 기존의 능동 게이트 회로를 사용하는 방법이나 스너버 회로나 클램프 회로를 이용하는 방법 등과 달리 간단한 R, C 회로를 이용하여 능동형 게이트 회로와 유사한 동작을 얻는 특징을 갖는다. 본 논문에서 제안하는 회로는 간단한 직렬 구성은 물론, 보조회로의 동작에 따른 스위치나 보조회로의 손실이 경미하므로 용도에 따라 수 kHz 내지 수십 kHz의 동작까지도 가능하다. 특히, 직렬 스택이 간단한 구성으로 가능하므로 스위치 전압 역시 수 kV에서 수십 kV 까지 다양한 구성이 가

능한 우수한 특징을 갖는다. 더욱이, 능동형 게이트 구동회로처럼 선로의 부유 인덕턴스에 의한 과전압도 완화시켜주는 장점을 역시 가지고 있다.

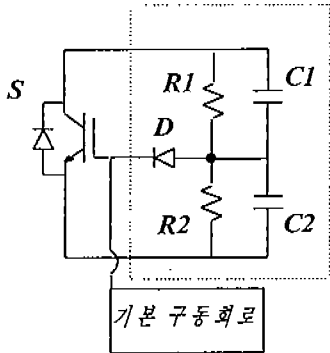


그림 1. 제안한 IGBT 직렬구동을 위한 보조회로

II. 동작원리 및 특징

제안하는 회로는 그림 1에서 나타내었듯이 IGBT 소자와 관련한 요소들 외에 추가되는 보조회로로 분압용 커패시터 두 개, 저항 세 개와 다이오드 하나로 구성되며 모두 작은 용량의 소자로 구성된다.

한편, 직렬 연결된 IGBT의 과전압은 소자간의 전압 분배 불균형과 선로 부유 인덕턴스에 의한 것으로 볼 수 있다. 선로의 부유 인덕턴스에 의한 과전압은 스위치 오프시의 전류와 더불어 소자의 전압의 첨두치에 영향을 준다. 이것은 역시 게이트 에미터 간의 전압이 어느정도 과전압 부분에 대해 조절된다면 컬렉터 전압의 기울기를 조절하여 과전압을 많이 감소시킬 수 있다.

직렬 소자전압의 불균형은 정상상태시에는 단순히 분배저항만으로 해소가 가능하지만 과도상태시에는 효과적인 대처 방법이 필요하다.

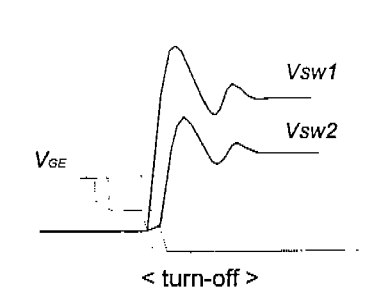


그림 2. 구동회로 시간차에 의한 IGBT 전압차

동작의 차이는 IGBT간의 특성차 즉, 컬렉터-에미터 간의 커패시턴스와 누설전류, 턴-오프 시간차와 게이트 구동회로간의 차이 즉, 게이트 구동전압차와 구동회로 지연시간차이로 발생한다. 그림 2는 예로 구동

회로 시간차가 있을 때의 IGBT 간의 전압 불균형을 나타낸 것이다. 그림에서 나타낸 것과 같이 먼저 턴 오프한 소자는 나중에 소호된 소자 보다 높은 전압이 인가되며 만약 이 전압이 정격전압 이상이면 소자의 파손을 초래하게 된다. 직렬 연결된 소자에서 일부분의 파손은 다른 소자에 전압부담을 가중시키므로 연쇄적으로 전체 소자의 파손 역시 초래 할 수 있다. 그러므로 안정적인 전압 분배를 가능하게 하는 소자나 회로가 필요하며 논문에서 제안하는 회로는 게이트 구동신호를 능동적으로 제어하여 이를 해결한다.

가. 동작원리

다음 그림 3은 제안한 회로의 기본적인 동작 모드를 보여준다. 회로의 설명을 간략화하기 위해 보조회로 및 스위치의 구성은 그림 1에서 나타낸 소자 이외에는 다른 성분이 존재하지 않는 이상적인 상태라고 가정한다. 분압 커패시터 C1은 C2보다 매우 큰 값이며 스위치 소자의 분배전압으로 충전되어 있다.

턴 온이나 턴 오프에서의 동작이 동일하므로 턴 오프 부분을 기준으로 설명한다. 동작 모드는 소자에 과전압이 가해지는 상태라고 볼 때 간략화하여 크게 4가지 모드로 분류할 수 있다.

모드 1: 스위치는 턴 온되어 있고 게이트 전압은 구동신호에 의해 +15V로 되어 있다. 분압 커패시터 C2는 스위치가 온 되므로 C1의 역전압으로 충전되어 있다. 다이오드 D1은 이 역전압이 역시 인가되어 있으며 게이트 회로로 이 역전압이 가해지는 것을 막아준다.

C1은 직렬 연결된 스위치 소자의 분배전압을 일정하게 가지고 있으며 단지, 분압 저항 R1에 의한 약간의 방전 부분만이 존재한다.

모드 2: 스위치는 점차 턴 오프되고, 게이트 전압은 부의 값을 가진다. 스위치로 흐르던 전류는 점차 감소하면서 C2 전압을 빠르게 음의 값에서 영으로 충전시키고 스위치 양단의 전압은 $V_{C1} + V_{C2}$ 의 값으로 나타난다.

모드 3: 스위치 양단의 전압이 C1의 전압 이상으로 증가하고 흐르는 전류는 계속적으로 커패시터 C1과 C2를 충전시키며 점차 감소한다. C1의 값이 C2에 비해 매우 크므로 대부분의 충전 전압이 C2에 나타나고 이 전압은 곧바로 게이트 전압에 가해져서 전체 게이트 전압은 다시 양의 방향으로 증가한다. 그러므로 턴 오프되는 스위치의 전압 기울기가 느려지면서 과전압 부분이 더 이상 나타나지 않게 된다.

모드 4: 전류가 영으로 감소하고 다시 C2의 전압이 영으로 감소한다. 그러므로 게이트 전압이 다시 부의 값을 회복하고 스위치는 완전히 턴 오프 상태를 유지한다. 턴 오프 전압은 분압 저항 R1, R2에 의해 일정하게 분배된다.

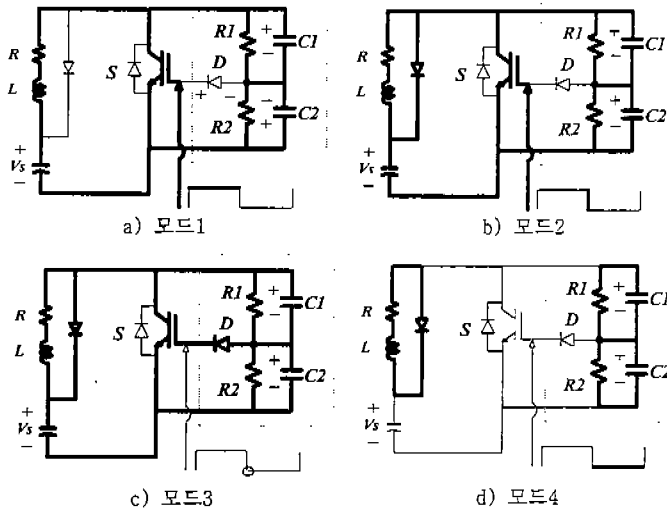


그림 3. 동작모드

나. 회로의 설계

1. 분압 커패시터의 선정

제안한 회로는 적절한 분배 전압을 결정하고 이보다 전압이 상승하는 시점을 검출하기 위해 항상 분압 커패시터 C1의 전압이 일정한 클램프 전압을 가지고 있도록 해야 한다. 또한 턴 온과 오프에 관계없이 거의 일정한 전압이 유지되어야 한다. 실험적으로 C1의 값은 약 10nF 이상의 값을 가져야만 한다.

C2의 값은 C1의 값에 비해 적어도 약 1/10이 되어야만 원활한 동작을 얻을 수 있으며 스위칭 주파수를 고려하고 스위치 턴 온 때의 역 충전전류를 고려해서 2nF 이하의 값을 가지도록 한다.

2. 분압 저항의 선정

저항 R1은 낮은 값을 가질수록 C1의 방전을 도와서 클램프 전압을 낮추는 역할을 한다. 그렇지만 지나치게 낮을 경우, 이로 인한 손실이 역시 발생하므로 R1의 값은 스위치 턴 오프시간동안 C1의 전압이 바라는 분배전압까지 방전될 수 있는 값으로 맞춘다.

다. 회로의 특징

상기 절에서 설명한 바와 같이 사용되는 보조 회로의 소자들은 모두 소용량 소자로 충분하며 이로 인해 발생하는 손실은 단지 분배 저항에 의해 발생하는 수 W가 전부이며 매우 미미하다.

특히, 회로의 동작은 능동형 게이트회로를 장착한 기존의 직렬구동회로와 거의 동일한 방법으로 이뤄지는 우수한 특성을 나타낸다. 또한 빠른 과도상태 제어로 인해 보조회로에 의해 스위치의 턴 온과 턴 오프시간의 기울기가 길어지는 것은 매우 작은 값이며 기본회로만으로 구동하는 것과 거의 차이가 없다. 따라서

제안한 회로는 다음과 같은 장점을 갖는다.

- 소용량의 수동소자로 이뤄진다.
- 간단하며 거의 부가적인 손실이 없다.
- 능동형 게이트회로와 같이 과도전압을 일정전압으로 제어한다.
- 턴 온과 턴 오프의 전압 기울기가 보조회로가 없을 때와 거의 동일하다.

III. 실험결과

제안한 회로의 타당성을 검증하기 위해 다음 그림 4와 같이 1200V/45A의 IGBT를 4개 직렬 연결하여 3kV/45A급 스위치와 주변회로를 구성하였다.

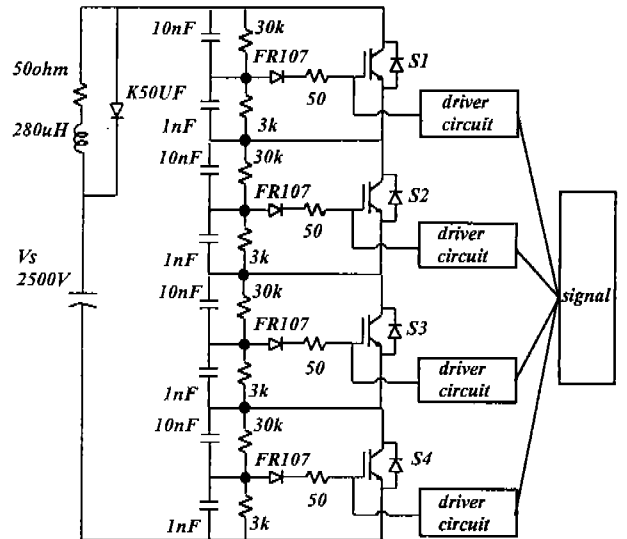


그림 4. 실험에 사용한 회로

다음 그림 5는 기본적인 게이트 구동회로만을 사용할 때의 소자들의 턴 오프 전압차를 보여준다. 제안한 회로의 성능을 보다 잘 살펴보기 위해 두 개의 구동 회로 게이트 저항을 10Ω으로 주고 나머지는 3.3Ω으로 하였다. 그림에서 알 수 있듯이 구동 회로의 특성차이에 의해 스위칭 소자의 전압 분배가 크게 달라짐을 알 수 있다. S2 소자의 피크 전압이 약 1000V_{dc}에 근접하기 때문에 입력 전압을 약 1600V_{dc}로 제한하여 실험하였다. 그림 6은 제안한 회로를 사용한 IGBT 직렬 연결 스위치의 턴 오프시의 파형이다. 입력 전압 2500V_{dc}에서 부하 인덕터에 의한 오버슈트를 제외하고 모든 소자들이 균등한 전압을 가짐을 알 수 있다. 그림 7은 기본 구동회로와 제안한 구동회로를 사용했을 때의 각각의 IGBT 턴 오프시 확대한 파형을 나타낸다. 제안한 회로를 사용하더라도 턴 오프 시간에 별다른 영향을 미치지 않으므로 기본 구동회로와 비교하여 턴 오프 손실이 증가되지 않는

다. 따라서 제안한 직렬 스위치의 동작 주파수를 최대한으로 할 수 있다. 네 개의 스위치가 모두 동일한 턴 오프 시간을 가짐으로써 전체적인 전압 균형이 역시 잘 이뤄짐을 알 수 있다. 그러므로 제안한 회로는 소자의 특성차이가 심하더라도 우수한 동작을 이룸을 잘 알 수 있다.

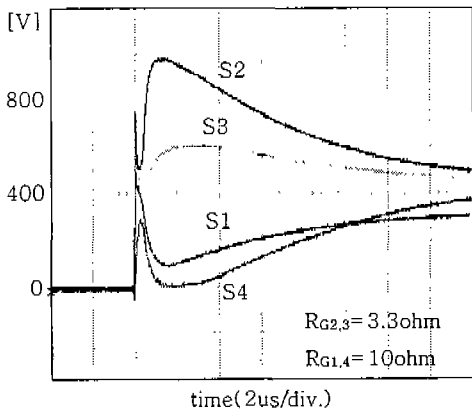


그림 5. 기본적인 구동회로를 이용한 IGBT 직렬 연결 스위치의 턴 오프시의 파형 (입력 전압 : 1600V)

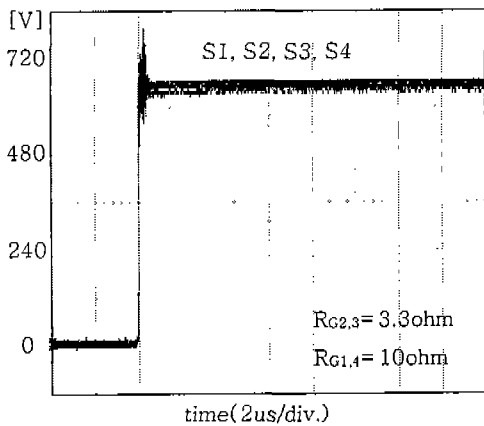


그림 6. 제안한 회로를 사용한 IGBT 직렬 연결 스위치의 턴 오프시의 파형 (입력 전압 : 2500V)

IV. 결론

본 논문에서는 간단한 수동소자만을 이용한 새로운 IGBT 직렬 연결 방법을 제안하였다. 제안한 회로는 능동형 게이트회로를 이용하는 방법과 거의 동일한 성능을 가지면서 보다 간단하고 뛰어난 신뢰성을 가짐을 알 수 있었다. 더욱이, 부가적인 손실이 매우 작고 스위칭 동작에 거의 영향이 없으며 보조회로 소자의 용량이 작은 점으로 향후 직렬연결을 이용한 고압 대응량 IGBT 스위치를 구성하는 데 제안한 회로를 이용하는 것이 매우 유리할 것으로 판단된다.

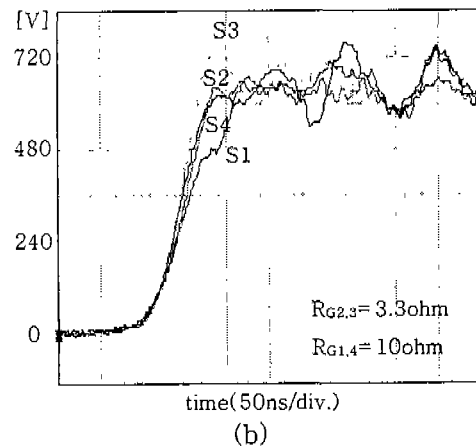
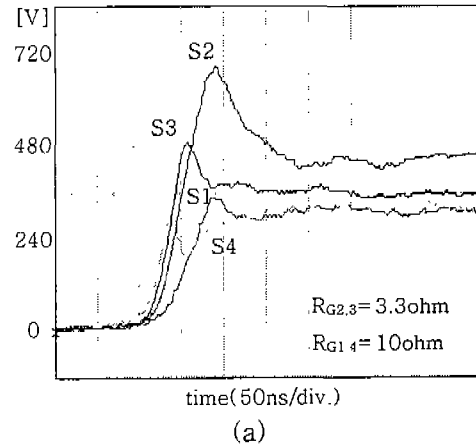


그림 7. 기본 구동회로와 제안한 구동회로를 사용한 IGBT의 턴 오프시 확대 파형
(a) 기본 구동회로 사용
(b) 제안한 구동회로 사용

참고문헌

- 1] C. Gester, "Fast High-power / High-voltage Switch Using Series-connected IGBTs with Active Gate-controlled Voltage-balancing", IEEE-APEC Conf. Rec., pp469-472, 1994.
- 2] J. Sigg, M. Brukmann and P.Turkes, "The Series Connection of IGBTs Investigated by Experiments and Simulation", IEEE-PESC Conf. Rec., Vol. 2, pp1760-1765, 1996.
- 3] A. Consoli, S. Musumeci, G. Oriti, A. Testa, "Active Voltage balancement of Series Connected IGBTs", IEEE-IAS Conf. Rec., Vols 3, pp. 2752-2758, 1995.