

## IGBT 직렬 연결을 위한 게이트 구동기법

김완중\*, 최창호, 현동석  
 한양대학교 전기공학과

### An Improved Gate Control Scheme of Series Connected IGBTs

Wan-Jung Kim\*, Chang-Ho Choi, Dong-Seok Hyun  
 Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University

**Abstract** - The large scale industry needs high voltage converters. Therefore series connection of power semiconductor devices is necessary. It is important to prevent a device induced the overvoltage above ratings by proper voltage balancing in the field of IGBT series connection. In addition, the overvoltage induced by a stray inductance has to be limited in the high power circuit.

This paper proposes a new gate control scheme which can balance the voltage properly and limit the overshoot by control the slope of collector voltage under series connected IGBT turn-off transient. The propose gate control scheme limits the overvoltage by sensing the collector voltage and controlling the gate signal actively. The new series connected IGBT gate driver is made and its validity is verified by the experimental results for series connected IGBT circuit.

에 턴-오프 시점을 동기화 시키는 방법은 적절하지 않다 [6]. 또한 부유 인덕턴스에 의한 과전압 제한을 별도로 고려해 주어야 한다. 따라서 순시적으로 컬렉터 전압의 기울기를 조정하는 능동 게이트 구동회로를 사용하여 전압분배를 이루는 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[4,5].

본 논문에서는 직렬 연결된 IGBT 턴-오프시 전압 불균형과 부유 인덕턴스에 의한 과전압에 대하여 고찰하였다. 또한 컬렉터 전압을 검출하여 게이트 구동회로로 컬렉터 전압 기울기를 제어하여 전압 불균형에 의한 과전압과 부유 인덕턴스에 의한 과전압을 제한하는 게이트 구동기법을 제안한다. 제안하는 게이트 구동회로는 스너버의 사용을 배제하여 시스템의 간소화와 신뢰성을 향상시킬 수 있고 각 소자마다 독립적으로 제어하기 때문에 소자간의 간섭현상이 없어 직렬 연결의 수를 증가시킬 수 있다. 실험을 통하여 IGBT 직렬 연결용 게이트 구동회로의 타당성과 우수성을 검증하고자 한다.

## 1. 서 론

산업 설비가 대용량화되고 고압 응용분야가 발전함에 따라 고압 전력 변환 장치의 필요성이 증가하고 있다. 고압 전력 변환 장치 분야에서는 정격이 높고 제어하기가 용이하며 고속 스위칭이 가능한 전력용 반도체 소자를 요구하고 있다. 따라서 Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBTs)는 사이리스터나 GTO를 대신하여 널리 쓰이고 있다. 하지만 IGBT는 사이리스터나 GTO에 비하여 정격 용량이 작기 때문에 응용에 한계가 있다. 이로 인해 여러 소자를 직렬 연결하는 기술이 절실히 요구되고 있다.

직렬 연결 기술은 소자간에 적절한 전압 분배가 이루어져서 개별 소자에 정격 이상의 과전압이 인가되는 것을 방지하는 것이 큰 관건이다. 턴-오프시에는 온도와 조건에 따라 스위칭 특성이 많이 차이므로 이로 인하여 전압 불균형이 크게 발생한다. 또한 회로 내의 부유 인덕턴스에 의하여 발생하는 과전압도 고려를 해 주어야 한다. 따라서 턴-오프시에 전압 제어가 직렬 연결시 가장 중요한 사항이 된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 다양한 방법들이 연구되어 왔다[1-5].

턴-오프 정상상태시 전압 불균형은 개개의 소자에 병렬로 분압 저항을 연결하여 간단하고 효과적으로 해결할 수 있다[1]. 하지만 턴-오프 과도상태시 전압 분배 문제는 어려운 사항이기 때문에 여러 가지 방법들이 연구되어 왔다.

스너버 회로를 사용하여 소자의 스위칭 궤적을 변화시키는 방법[2]은 현재 실용화되고 있으나 소자의 용량 증가에 따라 콘덴서 용량이 증가하고, 이에 따른 효율 감소 및 경제성 저하의 단점을 지니고 있다. 또한 전력용 반도체 소자의 직렬 연결시 게이트 구동회로에서 소자의 턴-오프 시점을 제어함으로써 전압 분배를 해결하려는 방법[3]이 연구되고 있다. 이 방법은 스위칭 손실의 증가하지 않는 장점이 있지만 초기에 1μs 지연이 생기고 IGBT의 경우 턴-오프 시점은 온도에 따라 변하기 때문

## 2. IGBT 직렬 구동

### 2.1 IGBT 턴-오프시 과전압

IGBT 턴-오프시에 발생하는 과전압은 부유 인덕턴스에 의한 과전압과 직렬 연결시 소자간에 전압 불균형으로 인한 과전압이 있다. 그림 1은 IGBT 턴-오프시 파형이다. 게이트에 문턱전압 이하가 인가되면 IGBT는 턴-오프 된다. 이 때 컬렉터 전압이 상승하여 DC 입력전압에 이르르면 컬렉터 전류는 감소하기 시작한다. 이 때 회로 내의 부유 인덕턴스와 감소하는 전류로 인해 과전압이 발생한다. 이 과전압의 크기를 결정하는 컬렉터 전류의 감소 기울기는 전류의 감소 시 게이트-에미터 전압의 크기와 IGBT의 내부의 축적 캐리어에 의해 결정된다. 게이트-에미터 전압이 문턱전압 이하인 경우 IGBT의 채널을 통한 캐리어의 주입이 없으므로 축적 캐리어의 양은 적고 컬렉터 전류는 빠르게 감소하여 큰 과전압이 발생한다. 그리고 게이트-에미터 전압이 문턱전압 이상인 경우 IGBT의 채널을 통한 캐리어의 주입이 있으므로 축적 캐리어의 양은 많고 컬렉터 전류는 천천히 감소하여 과전압은 제한된다.

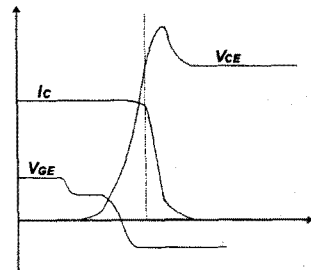


그림 1 IGBT 턴-오프 스위칭 파형

그림 2는 직렬 연결된 IGBT의 턴-오프 스위칭 파형이다. IGBT 직렬 구동시에는 IGBT간의 특성차 (컬렉터-에미터 커패시턴스, 누설 전류, 턴-오프 지연 시간)와 게이트 구동회로 간의 특성차 (게이트 구동 전압차, 구동 회로의 지연 시간)로 인해 동시에 턴-오프가 이루어지지 않는다. 따라서 먼저 소호된 소자는 나중에 소호된 소자에 비해 높은 전압을 부담하게 되고 이로 인해 과도한 전압이 먼저 소호된 소자의 파괴 전압을 초과했을 경우 직렬 연결된 소자들이 연쇄적으로 파괴될 수 있다[5].

안정된 전압 분배를 위해서는 전압 상승시 각각의 소자에 걸려있는 컬렉터 전압의 크기와 기울기를 감지하여 그 양에 따라 게이트-에미터 전압을 인가시켜줌으로써 전압 균형을 이룰 수 있다.

그러므로 직렬 연결된 IGBT에서 각 소자의 컬렉터 전압 상승 기울기를 독립적으로 제어하여 안전한 전압 분배와 아울러 부유 인덕턴스에 의한 과전압을 줄일 수 있다.

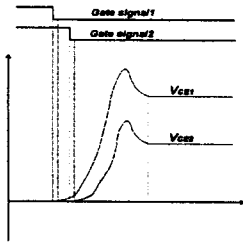


그림 2 직렬 연결된 IGBT 턴-오프 스위칭 파형

## 2.2 제안하는 IGBT 직렬 구동용 게이트 구동회로

그림 3은 제안한 IGBT 직렬 연결용 게이트 구동회로의 블록도이다. 기본적인 게이트 구동회로 부분은 제어 회로와 절연을 위한 펄스 트랜스포머, DC/DC 컨버터로 구성된 입력단과 푸시-풀 증폭기의 구동부로 구성된다. 이러한 기본적인 구동회로에 직렬 연결을 위한 회로를 새로이 추가하였다.

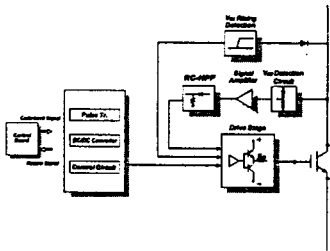


그림 3 제안한 직렬 연결용 IGBT 게이트 구동회로 블록도

### - 직렬 연결을 위한 회로

제안한 회로는 전압 상승 시점을 검출하기 위한 다이오드, 전압상승 감지회로와 컬렉터 전압의 기울기를 제어하기 위한 컬렉터 전압 검출회로, 높은 대역폭을 갖는 검출전압 증폭회로, 고역 통과 회로(RC-HPF)로 구성된다.

컬렉터 전압이 상승할 때까지는 기본적인 구동회로만 동작하고 컬렉터 전압이 상승하면 제안한 회로가 동작하므로 컬렉터 전압이 상승할 때까지는 IGBT의 스위칭 특성에는 영향을 주지 않는다. 컬렉터 전압이 상승을 하면 전압 상승 감지회로에 의해 제안한 회로가 동작한다. 이때 컬렉터 전압 검출회로에 의해 검출된 컬렉터 전압은

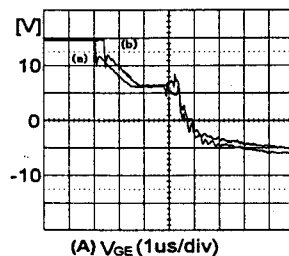
증폭기를 거쳐 RC-HPF에 입력된다. 그리고 전압의 상승 기울기에 따른 RC-HPF의 출력 전압은 게이트에 인가되어 게이트-에미터 전압을 상승시키게 된다. RC-HPF의 출력 전압은 검출 전압의 크기와 상승 기울기에 따라 변화하므로 컬렉터 전압의 크기와 기울기에 따라 게이트-에미터 전압을 상승시키게 된다. 따라서 먼저 소호된 소자의 컬렉터 전압 크기와 기울기는 나중에 소호된 소자보다 큰값을 가지기 때문에 먼저 소호된 소자의 RC-HPF 출력 값은 상대적으로 크게 된다. 그 출력값이 게이트 구동회로에 인가되어 게이트-에미터 전압을 상승시키게 되므로 나중에 소호된 소자보다 컬렉터 전압 상승 기울기는 완만해지고 결국 나중에 소호된 소자와 일치된 컬렉터 전압의 크기를 가진다.

컬렉터 전압이 상승하여 DC 입력전압에 도달하면 컬렉터 전류가 하강하기 시작한다. 컬렉터 전류 하강 구간에서 컬렉터 전압에 과전압이 발생하므로 전압의 크기와 기울기는 증가한다. 그 값이 RC-HPF의 입력되어 게이트-에미터 전압을 상승시키게 된다. RC-HPF의 출력전압은 검출 전압의 크기와 상승 기울기에 따라 변화하므로 허용 전압 이상의 크기와 기울기를 가진 컬렉터 전압이 검출되면 HPF의 출력전압은 게이트-에미터 전압을 문턱전압 이상으로 상승시킨다. 그러면 IGBT에는 채널이 형성되고 채널을 통해 캐리어가 주입되므로 IGBT의 축적 캐리어의 양은 증가하게 된다. 따라서, 결과적으로 컬렉터 전류의 감소 시간은 증가하게 되어 과전압은 제한된다.

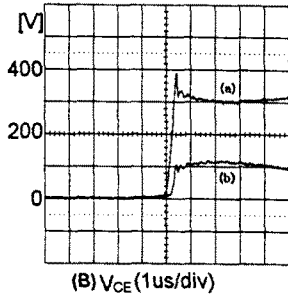
## 3. 실험 및 고찰

제안한 IGBT 직렬 연결용 게이트 구동회로의 타당성을 검증하기 위해서 IGBT를 직렬 연결한 강압 컨버터 실험 장치를 구성하였다. 실험에 사용한 IGBT는 Semikron사의 SKM400GA 163D (1600V/400A) 이고, DC 입력 전원은 입력 교류 전원을 가변하여 400V에서 실험하였다. 실험에 사용한 게이트 저항은 20Ω이며 부하의 인덕턴스는 30μH이고 부하 저항은 10Ω, 2.8Ω을 사용하였다.

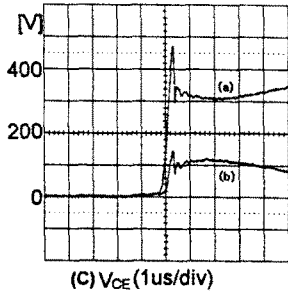
그림 4와 그림 5는 기본적인 게이트 구동회로를 사용했을 때와 제안한 IGBT 직렬 연결용 게이트 구동회로를 사용했을 때의 파형이다. 각각 부하전류가 40A일 때의 게이트-에미터 전압, 컬렉터-에미터 전압, 부하 전류가 140A일 때의 컬렉터-에미터 전압 파형이다. 여기서 DUT1은 먼저 소호된 소자이고 DUT2는 나중에 소호된 소자이다. 먼저 기본적인 게이트 구동회로를 사용한 경우를 살펴보면 IGBT간의 특성 차이와 게이트 구동회로 간의 특성 차이로 인하여 DUT1과 DUT2의 컬렉터 전압 상승시점의 차이는 약 300ns가 생긴다. 또한 DUT1과 DUT2는 3:1 정도의 전압 불균형이 발생하였으며 회로내의 부유 인덕턴스에 의해 DUT1은 부하전류 40A시 390V, 부하전류가 140A시 480V의 과전압이 발생하였다. 실제의 경우에는 DC 입력 전압이 더욱 높기 때문에 한 소자의 정격을 초과하면 소자들이 연쇄적으로 파괴될 수 있다.



(A)  $V_{CE}(1\mu s/div)$



(B)  $V_{CE}$  (1us/div)

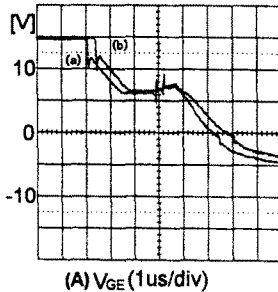


(C)  $V_{CE}$  (1us/div)

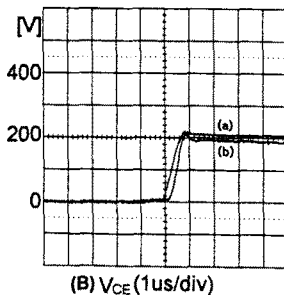
그림 4 기본적인 게이트 구동회로를 적용한 경우의 실험 파형

(a)DUT1 (b)DUT2

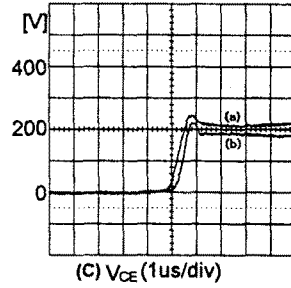
- (A)부하전류 40A에서 게이트-에미터 전압
- (B)부하전류 40A에서 컬렉터-에미터 전압
- (C)부하전류 140A에서 컬렉터-에미터 전압



(A)  $V_{GE}$  (1us/div)



(B)  $V_{CE}$  (1us/div)



(C)  $V_{CE}$  (1us/div)

그림 5 IGBT 직렬 구동용 게이트 구동회로를 적용한 경우의 실험 파형  
(a)DUT1 (b)DUT2  
(A)부하전류 40A에서 게이트-에미터 전압  
(B)부하전류 40A에서 컬렉터-에미터 전압  
(C)부하전류 140A에서 컬렉터-에미터 전압

제안한 IGBT 직렬 연결용 게이트 구동회로를 사용했을 때는 밀러 구간에 게이트-에미터 전압이 인가됨을 알 수 있다. 인가된 전압에 의해 DUT1의 컬렉터 전압 기울기는 DUT2에 비해 감소하였고 이로 인하여 두 소자간의 전압이 균등하게 분배되었음을 알 수 있다. 또한 과전압도 줄어들었음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 직렬 연결된 IGBT에서 소자간의 특성 차이 및 게이트 구동회로 간의 특성 차로 인하여 발생하는 전압 분배 문제를 해결할 수 있는 게이트 구동회로를 제안하였다.

제안한 IGBT 직렬 연결용 게이트 구동회로의 특징은 다음과 같다.

- <1>제안한 회로는 턴-오프 과도상태시 게이트 전압을 제어하여 컬렉터 전압의 기울기를 조절함으로써 전압을 분배하고 과전압을 제한하였다.
- <2>스너버 회로를 사용하지 않아 시스템의 간소화와 신뢰성을 향상시킬 수 있다.
- <3>직렬 연결된 각 IGBT의 과전압 제어가 독립적으로 이루어지므로 제어회로가 간단하고 다른 IGBT에 의한 간섭효과가 없어 직렬 연결의 수를 늘리기가 용이하다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] T. A. Meynard, H.Foch, "Multi-level conversion : high voltage chopper and voltage-source inverter." *IEEE-PESC Conf. Rec.*, Vol. 1, pp. 397-403, 1992.
- [2] R. Lator, "Series connection of mosfet, bipolar and IGBT device." *SGS-Thomson Designers Guide to Power Product*, pp. 759-770, 1992.
- [3] C. Gerster, "Fast high power high voltage switch using series connected IGBT's with active gate controlled voltage balancing.", *IEEE-APEC Conf. Rec.*, pp. 480-486, 1994.
- [4] A.Consoli, S. Musumeci, G. Oriti, A. Testa, "Active Voltage Balancement of Series Connected IGBT's", *IEEE-IAS Conf. Rec.*, Vols 3, pp. 2752-2758, 1995.
- [5] P. R. Palmer and A. N. Githiari, "The Series connection of IGBTs with optimized voltage sharing in the switching transient.", *IEEE-PESC Conf. Rec.*, Vol. 1, pp. 44-49, 1995.
- [6] R. Kraus, K. Hoffmann, and P. Turkes, "Analysis and modeling of the technology dependent electro-thermal IGBT characteristics.", *IPEC*, pp. 1128-1133, 1995.