

An Improved Gate Control Scheme for Overvoltage Clamping under IGBT Series Connection

金完中*, 崔昌鎬**, 玄東石***

(Wan-Jung Kim, Chang-Ho Choi, Dong-Seok Hyun)

Abstract - Series connection of power semiconductor devices is selected in high voltage and high power applications. It is important to prevent the overvoltage from being induced across a device above ratings by the 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 controlling the slope of collector voltage under the turn-off transient in the series connected IGBTs. The proposed gate control scheme changes the slope of collector voltage 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.

Key Words : Turn-off, Series connected IGBTs, Voltage balance, Overshoot, Gate control

1. 서 론

최근 산업의 대규모화 추세에 따른 전력변환장치의 용량 증가로 고압 전력 변환 장치의 필요성이 더욱 증가하고 있다. 고압 전력 변환 장치 분야에서는 정격이 높은 사이리스터나 GTO 등의 소자를 주로 사용하고 있지만 최근에는 제어하기가 용이하며 고속 스위칭이 가능한 특성을 가진 전력용 반도체 소자에 대한 요구가 높아지고 있다.

여러 전력용 반도체 소자 가운데 Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBTs)는 게이트 구동 회로의 구현이 간편하고 제어가 용이하며 스위칭 전이 시간이 짧아 고속 스위칭이 가능하기 때문에 고압 전력 변환 장치 분야에서 사이리스터나 GTO를 대신하여 널리 쓰이고 있다. 그러나 IGBT는 아직 사이리스터나 GTO에 비하여 정격 용량이 작기 때문에 응용에 한계가 있다.

현재 IGBT는 소자의 용량 및 특성 향상을 위한 연구가 지속적으로 이루어져 정격 1700V/1800A, 3300V/1200A의 소자가 실용화되고 있다[1]. 그러나 개별 소자의 사용은 내압과 용량의 한계, 가격적인 불리함이 존재하게 되는데 이로 인해 여러 소자를 직렬로 연결하여 전압 정격을 높이는 기술이 절실히 요구되고 있다. 직렬 연결 기술은 소자간에 적절한 전압 분배가 이루어져서 개별 소자에 정격 이상의 과전압이 인

가되는 것을 방지하는 것이 큰 관건이다. 턴-온시에는 나중에 점호되는 소자가, 턴-오프시에는 먼저 소호되는 소자가 전압을 많이 부담하게 된다. IGBT의 경우 턴-온시에는 소자마다 스위칭 특성의 차이가 크지 않고 di/dt를 제한하는 회로 내의 인덕턴스 성분에 의해 전압 불균형에 대한 문제가 크지 않다[4]. 그러나 턴-오프시에는 온도와 조건에 따라 스위칭 특성의 차이가 많고 이로 인하여 전압 불균형이 크게 발생한다. 또한 회로 내의 부유 인덕턴스에 의하여 발생하는 과전압도 고려를 해 주어야 한다. 따라서 턴-오프시 전압 제어가 직렬 연결시 가장 중요한 사항이 된다.

본 논문에서는 직렬 연결된 IGBT 턴-오프시 전압 불균형과 부유 인덕턴스에 의한 과전압에 대하여 서술하고 이러한 문제를 해결하기 위한 방법에 대하여 고찰하였다. 또한 컬렉터 전압을 검출하여 게이트 구동회로로 컬렉터 전압 기울기를 제어하여 전압 불균형에 의한 과전압과 부유 인덕턴스에 의한 과전압을 제한하는 새로운 게이트 구동기법을 제안한다. 제안하는 게이트 구동회로는 과도상태시 전압 분배를 위한 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.

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

* 準 會 員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 碩士課程

** 正 會 員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 博士課程

*** 正 會 員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 1998년 11월 9일

最終完了 : 1999년 2월 4일

과전압이 있다. 그림 1은 IGBT 턴-오프시 파형이다. 게이트에 문턱전압 이하가 인가되면 IGBT는 턴-오프 된다. 이 때 컬렉터 전압이 상승하여 DC 입력전압에 이르면 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 (컬렉터 전압이 DC 전압일 때) 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[8].

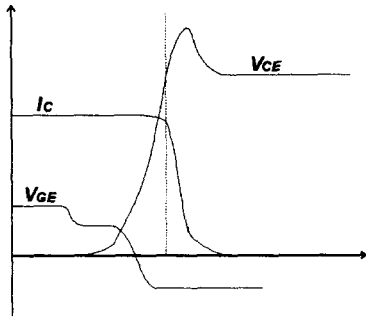


그림 1 IGBT 턴-오프 스위칭 파형
Fig. 1 IGBT switching waveform at turn-off.

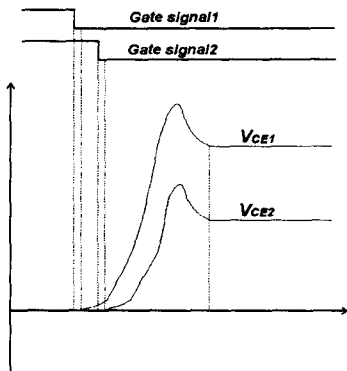


그림 2 직렬 연결된 IGBT 턴-오프시 모델
Fig. 2 Simple model for series connected IGBTs at turn-off.

그림 2는 직렬 연결된 IGBT의 턴-오프에 대한 기본적인 모델이다. IGBT 직렬 구동시에는 IGBT간의 특성차 (컬렉터-에미터 커패시턴스, 누설 전류, 턴-오프 지연 시간)와 게이트 구동회로 간의 특성차 (게이트 구동 전압차, 구동회로의 지연 시간)로 인해 그림 3과 같이 동시에 턴-오프가 이루어지지 않는다. 따라서 먼저 소호된 소자는 나중에 소호된 소자에 비해 높은 전압을 부담하게 되고 이로 인해 과다한 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.

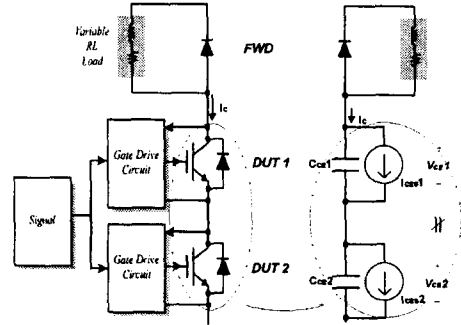


그림 3 직렬 연결된 IGBT 턴-오프 스위칭 파형
Fig. 3 Switching waveforms at turn-off for series connected IGBTs.

2.2 IGBT 직렬 연결시 과전압 제한 연구

직렬 연결된 IGBT 턴-오프시에는 전압 불균형과 부유 인덕턴스에 의해 과전압이 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 다양한 방법들이 연구되어 왔다[2-7].

턴-오프 정상상태시 전압 불균형은 개개의 소자에 병렬로 분압 저항을 연결하여 간단하고 효과적으로 해결할 수 있다 [2]. 분압 저항은 개별 소자의 누설 전류와 분압 저항에서의 손실을 고려하여 결정한다. 정상상태시에는 위에 언급한 방법으로 쉽게 해결할 수 있지만 턴-오프 과도상태시 전압 분배에는 다음과 같은 여러 가지 방법들이 연구되어 왔다.

- 스너버 회로의 사용[3,4]
- 스위칭 시점 동기화[5]
- 능동 게이트 구동회로 사용[6,7]

스너버 회로를 사용하여 소자의 스위칭 궤적을 변화시키는 방법은 현재 실용화되고 있으나 소자의 용량 증가에 따라 콘덴서 용량이 증가하고, 이에 따른 효율 감소 및 경제성 저하의 단점을 지니고 있다. 스너버 회로의 단점으로 최근에는 게이트 구동회로에서 전압 분배 문제를 해결하려는 추세이다. 전력용 반도체 소자의 직렬 연결시 게이트 구동회로에서 소자의 턴-오프 시점을 제어함으로써 전압 분배를 해결하려는 방법이 연구되었다. 이 방법은 스위칭 손실의 증가가 없는 장점이 있지만 초기에 1펄스 지연이 생기고 IGBT의 경우 턴-오프 시점은 온도에 따라 변하기 때문에 턴-오프 시점을 동기화 시키는 방법은 적절하지 않다[9]. 또한 부유 인덕턴스에 의한 과전압 제한을 별도로 고려해 주어야 한다. 따라서 IGBT의 경우에는 스위칭 시간과 손실은 다소 증가하지만 순

시적으로 컬렉터 전압의 기울기를 조정하는 능동 게이트 구동회로로 전압분배를 이루는 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

2.3 제안한 IGBT 직렬 연결용 게이트 구동회로

그림 4는 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.

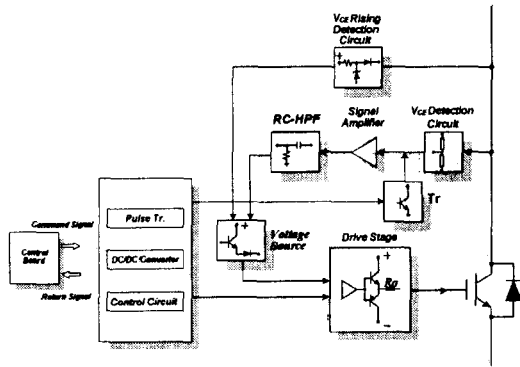


그림 4 제안한 직렬연결용 IGBT 게이트 구동회로 블록도
Fig. 4 Block diagram of the proposed gate drive circuit for series connected IGBTs.

- 직렬 연결을 위한 회로

직렬 연결을 위한 회로는 턴-오프시에만 동작되며 컬렉터 전압의 기울기를 제어하여 안정된 전압 분배와 과전압 제한이 가능하다.

제안한 회로는 턴-오프시에만 컬렉터 전압을 검출하게 하는 트랜지스터(T_r)와 컬렉터 전압 상승 시점을 검출하여 전압원을 동작시키는 전압상승 감지회로와 컬렉터 전압의 기울기를 제어하는 컬렉터 전압 검출회로, 높은 대역폭을 갖는 검출전압 증폭회로, RC 고역 통과 회로(RC-HPF), 전압원으로 구성된다.

컬렉터 전압이 상승하기 전에는 기본적인 구동회로만 동작을 하고 컬렉터 전압이 상승하면 제안한 회로가 동작하므로 컬렉터 전압이 상승하기 전에는 IGBT의 스위칭 특성에는 영향을 주지 않는다. 먼저 게이트 신호가 턴-오프 되면 T_r 은 오프가 되고, 컬렉터 전압이 상승을 하면 전압 상승 감지회로에 의해 제안한 회로가 동작할 수 있는 상태가 된다. 이 때 컬렉터 전압 검출회로에 의해 검출된 컬렉터 전압은 증폭기를 거쳐 RC-HPF에 입력된다. 그리고 전압의 상승 기울기에 따른 RC-HPF의 출력 전압은 전압원에 의해 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 큰 값을 가지기 때문에 먼저 소호된 소자의 RC-HPF 출력 값은 상대적으로

크게 된다. 그 출력값이 전압원에 의해 게이트 구동회로에 인가되어 게이트-에미터 전압을 상승시키게 되므로 먼저 소호된 소자는 나중에 소호된 소자보다 컬렉터 전압 상승 기울기는 더욱 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 입력이 되어 게이트-에미터 전압을 상승시키게 된다. RC-HPF의 출력전압은 검출 전압의 크기와 상승 기울기에 따라 변화하므로 허용 전압 이상의 크기와 기울기를 가진 컬렉터 전압이 검출되면 RC-HPF의 출력전압은 게이트-에미터 전압을 문턱전압 이상으로 상승시킨다. 그러면 IGBT에는 채널이 형성되고 채널을 통해 캐리어가 주입되므로 IGBT의 축적 캐리어의 양은 증가하게 된다. 결과적으로 컬렉터 전류의 감소 시간은 증가하게 되고 과전압은 감소하게 된다. 그 후에 T_r 이 턴-온 되어 회로의 동작이 끝난 후에는 스위칭에 아무런 영향을 주지 않는다.

제안한 회로에서 전압 분배의 정도와 부유 인덕턴스에 의한 과전압 제한의 정도는 컬렉터 전압 검출회로의 저항비와 RC-HPF의 저항과 커패시턴스 값에 따라 변하게 된다. 컬렉터 전압 검출회로의 저항비와 RC-HPF의 시정수가 크면 게이트에 재인가되는 전압이 크게 되어 컬렉터 전압 상승 기울기와 컬렉터 전류 하강 기울기도 크게 감소된다. 따라서 컬렉터 전압 검출회로의 저항비와 RC-HPF의 시정수가 작게 설정된 것에 비해 전압 분배와 과전압 제한이 안정되게 이루어진다. 그러나 이에 따라 스위칭 시간과 손실이 증가하게 되므로 소자의 정격을 고려하여 알맞게 설정해야 한다.

3. 실험 및 고찰

3.1 실험용 전력 회로 구성

제안한 IGBT 직렬 연결용 게이트 구동회로의 타당성을 검증하기 위해서 그림 5와 같이 2개의 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 20Ω 이며 부하의 인덕턴스는 $30\mu H$ 이고 부하 저항을 10Ω 과 2.8Ω 으로 각각 사용하였다.

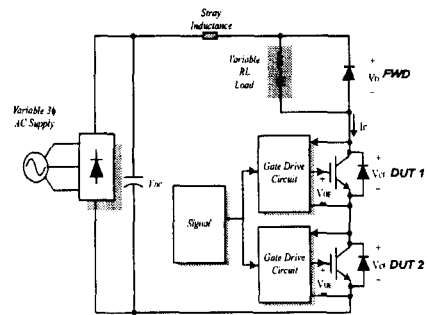


그림 5 제안한 회로를 검증하기 위한 실험 장치
Fig. 5 Experimental setup for the proposed gate drive circuit.

3.2 실험 결과 및 고찰

그림 6과 그림 7은 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, 컬렉터 전류 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 생기고 DUT1과 DUT2는 3:1 정도의 전압 불균형이 발생하였으며 회로내의 부유 인덕턴스에 의한 전압 최대값이 DUT1은 부하전류 40A시 390V, 부하전류가 140A시 480V가 발생하였다. 실제의 경우에는 DC 입력 전압이 더욱 높기 때문에 한 소자의 정격을 초과하면 소자들이 연쇄적으로 파괴될 수가 있다.

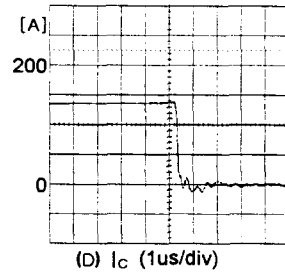
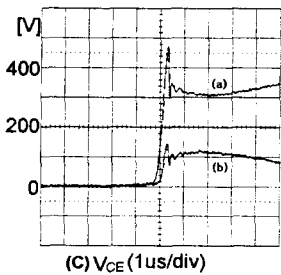
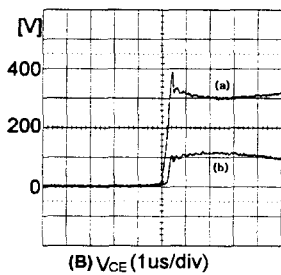
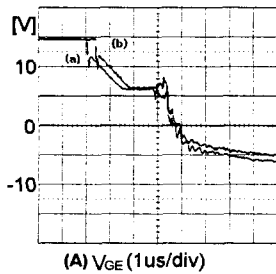


그림 6 기본적인 게이트 구동회로를 적용한 경우의 실험 파형

(a)DUT1 (b)DUT2

(A)부하전류 40A에서 게이트-에미터 전압

(B)부하전류 40A에서 컬렉터-에미터 전압

(C)부하전류 140A에서 컬렉터-에미터 전압

(D)부하전류 140A에서 컬렉터 전류

Fig. 6 Experimental results with the conventional gate drive circuit.

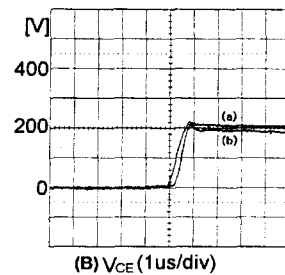
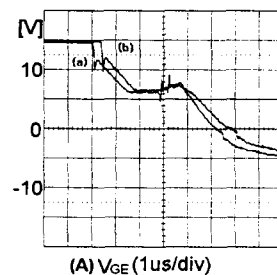
(a)DUT1 (b)DUT2

(A)Gate-emitter voltage at load current 40A

(B)Collector-emitter voltage at load current 40A

(C)Collector-emitter voltage at load current 140A

(D)Collector current at load current 140A



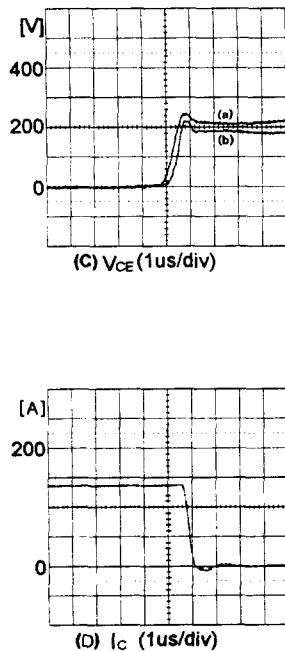


그림 7 IGBT 직렬 구동용 게이트 구동회로를 적용한 경우 실험 파형

- (a)DUT1 (b)DUT2
- (A)부하전류 40A에서 게이트-에미터 전압
- (B)부하전류 40A에서 컬렉터-에미터 전압
- (C)부하전류 140A에서 컬렉터-에미터 전압
- (D)부하전류 140A에서 컬렉터 전류

Fig. 7 Experimental results with the proposed gate drive circuit for IGBT series connection.

- (a)DUT1 (b)DUT2
- (A)Gate-emitter voltage at load current 40A
- (B)Collector-emitter voltage at load current 40A
- (C)Collector-emitter voltage at load current 140A
- (D)Collector current at load current 140A

제안한 IGBT 직렬 연결용 게이트 구동회로를 사용했을 경우에는 RC-HPF는 스위칭 시간 증가와 안정된 전압분배와 부유 인덕턴스에 의한 과전압 제한을 고려하여 저항 3.3kΩ, 커패시턴스 1nF를 사용하였다. 그림 7(A)를 살펴보면 컬렉터 전압이 상승하기 전까지는 기본적인 게이트 구동회로와 동작이 같고 컬렉터 전압 상승시 (Miller Plateau)에 게이트-에미터 전압이 재인가됨을 알 수 있다. 인가된 전압에 의해 DUT1의 컬렉터 전압 기울기는 DUT2에 비해 감소하였고 이로 인하여 두 소자간의 전압이 안정되게 분배되었음을 알 수 있다. 또한 그림 7(D)에서 컬렉터 전류의 하강 기울기는 그림 6(D)에 비하여 증가하였는데 이로 인하여 회로내의 부유 인덕턴스에 의한 과전압은 DUT1에서 부하전류 40A시 220V, 부하전류가 140A시 240V로 줄어들었음을 알 수 있다. 하지만 그림 7(B)와 (C)를 보면 두 전압간의 미소한 차이가 존재

하며, 그림 7(D)에서 같이 컬렉터 전류 하강 시간이 증가하면 스위칭 손실이 다소 증가하게 된다. 따라서 안정된 전압 분배와 스위칭 시간과 손실의 증가를 고려하여 RC-HPF의 값을 설정해야 한다.

실험 결과를 통해 볼 때 제안한 회로는 부하조건이 변화하여도 소자간의 전압을 효과적으로 분배하고 과전압을 제한할 수 있다.

4. 결론

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 조절하므로써 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] Anders Lindberg et al, "MACS ICON - IGBT Based Propulsion Systems." in *Proc EPE'97*, vol. 3, pp.492-497, 1997.
- [2] 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.
- [3] J. Sigg, M. Brukmann and P. Turkes, "The Series connection of IGBTs investigated by experiments and simulation," *IEEE-PESC Conf. Rec.*, Vol. 2, pp. 1760-1765, 1996.
- [4] S.Saadate, R.Le Doeuff and R. Periot, "High voltage chopper for electrical traction application using series connection of large GTO Thyristors.", *IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 177-185, 1989.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.

- [8] H. G. Lee, Y. H. Lee, B. S. Suh, D. S. Hyun,, "A new intelligent gate control scheme to drive and protect high power IGBTs.", in *Proc EPE'97*, vol. 1, pp.1400-1405, 1997.
- [9] R. Kraus, K. Hoffmann, and P. Turkes, "Analysis and modeling of the technology dependent electro-thermal IGBT characteristics.", *IPEC.*, pp. 1128-1133, 1995.

저 자 소 개



김 완 중(金完中)
1974년 9월 29일생. 1997년 한양대학교 공대 전기공학과 졸업. 현재 한양대학교 공대 전기공학과 석사과정 재학중



석연구원

최 창 호(崔昌鎬)
1956년 10월 18일생. 1979년 아주대학교 전자공학과 졸업. 1984년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1983년~1987.4 금성산전 연구소 주임연구원. 1987.5~1991.4 한국 써보 연구소 선임연구원. 1991~현재 포스콘 기술연구소 수



석연구원

현 동 석(玄東石)
1950년 4월 8일생. 1973년 한양대학교 공대 전기공학과 졸업. 1978년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1984년~1985년 미국 토레도대학 객원 교수. 1988년~1989년 원형공과대학 객원