

## IGBT 스위칭시 과전압 제한을 위한 게이트 구동기법

김완중<sup>o</sup>, 최창호, 현동석  
한양대학교 전기공학과

### An Improved Gate Control Scheme for Overvoltage Clamping Under High Power IGBTs Switching

Wan-Jung Kim<sup>o</sup>, Chang-Ho Choi, Dong-Seok Hyun  
Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University

#### Abstract

Under high power IGBTs switching, a large overvoltage is induced across the IGBT module due to the stray inductance in the circuit. This paper proposes a new gate drive circuit for high power IGBTs which can actively suppress the overvoltage across the driven IGBT at turn-off while preserving the most simple and reliable power circuit. The turn-off driving scheme has adaptive feature to the amplitude of collector current, so that the overvoltage can be limited much effectively at the fault collector current. Experimental results under various normal and fault conditions prove the effectiveness of the proposed.

#### 1. 서론

전력용 반도체 소자 가운데 Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBTs)는 MOS 입력단으로 구성되어 있는 전압 구동 소자로 적은 게이팅 파워를 요구하며 게이트 구동 회로의 구현이 간편하고 제어가 용이하며 스위칭 전이 시간이 짧기 때문에 고속 스위칭이 가능하다는 장점을 지니고 있다. 또한 소수 캐리어 소자의 특성으로 인해 고압 대전류의 정격을 지닐 수 있을 뿐만 아니라 용량 및 특성 향상이 지속적으로 이루어져 정격 1700V/1800A, 3300V/1200A의 IGBT가 실용화되고 있다 [1].

IGBT를 이용한 PWM 인버터의 스위칭 시에는 DC 입력 전원과 IGBT 사이에 존재하는 부유 인덕턴스에 의해 과전압이 발생하게 되는데 이로 인해 IGBT 소자 자체에 충격을 주게 되고 스위칭 노이즈에 의해 EMI문제를 일으키므로 시스템 신뢰성에도

많은 영향을 준다. 따라서 여러 가지 과전압 제한 방법이 연구되고 있다. [2-8].

과전압은 부하 전류가 증가할수록 커지게 되기 때문에 PWM 인버터의 최대 허용 부하 전류와 제어 가능한 전력은 스위칭 시 발생하는 과전압으로 인해 많은 제약을 받는다. 특히, 단락 사고와 같은 대전류의 턴-오프 시 발생하는 과전압은 시스템의 안전성에 크게 영향을 미치기 때문에 과전류나 단락 사고의 턴-오프 시 게이트 저항을 증가시키거나 제너 다이오드 등을 사용함으로써 과전압을 제한하는 방법이 일반적으로 많이 사용되고 있다 [6]. 또한 단락회로시 뿐만 아니라 정상 전류의 턴-오프 시 발생하는 과전압을 제한하기 위한 능동 과전압 제한 회로가 제시되었다 [7]. 그러나, 이 방법은 단락 회로 경우와 같은 대전류를 턴-오프 시킬 때 안전한 과전압 제한 능력은 보장해줄 수 있지만 이로 인해 정격 전류 이하의 전류를 턴-오프 시키는 경우에 과다한 손실이 발생한다.

본 논문에서는 게이트 구동 회로로 컬렉터 전류의 변화율을 제어하여 IGBT에 발생하는 과전압을 제한하는 IGBT 게이트 구동 회로를 제시한다. 제안하는 IGBT 게이트 구동회로는 과전압을 제한하기 위한 스너버 회로의 사용을 배제하여 주 전력 회로의 간소함을 도모하고 신뢰성을 향상시키며 제어 전력을 증가시킬 수 있게 한다. 제안한 턴-오프 과전압 제한 회로는 단락 사고 시 더욱 안전한 과전압 제한 기능을 부여하여 기존의 경우 문제점이던 정격 전류 이하에서 발생하는 손실의 증가를 최소화하는 특성을 지닌다. 제안하는 IGBT 게이트 구동회로의 타당성과 우수성을 실험을 통하여 검증하고자 한다.

## 2. 제안하는 IGBT 게이트 구동회로

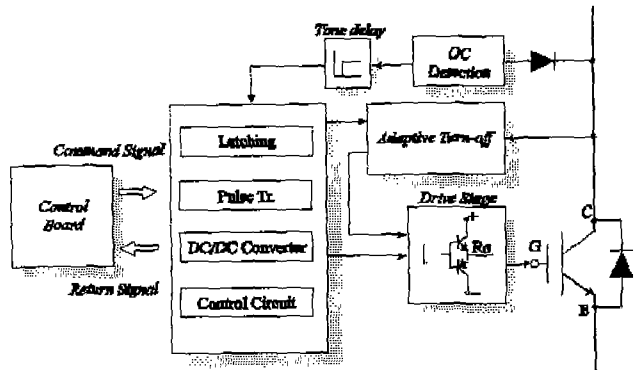


그림 1 제안하는 IGBT 게이트 구동회로의 블록도

그림 1은 제안하는 게이트 구동회로의 블록도를 보여준다. 기본적인 게이트 구동회로는 제어 회로와 과전류 검출 회로, 절연을 위한 펄스 트랜스포머, DC/DC 컨버터로 구성된 입력단과 Push-pull 증폭기의 구동부로 구성된다. 이러한 기본적인 구동회로에 과전압을 제한하기 위한 Adaptive 턴-오프 회로를 새로이 추가하였다.

### - Adaptive 턴-오프

제안한 Adaptive 턴-오프 회로는 컬렉터 전류의 하강 기울기를 적응적으로 감소시켜 스위칭 손실의 증가를 최소화하며 과전압을 효과적으로 제한하는 특성을 가진다.

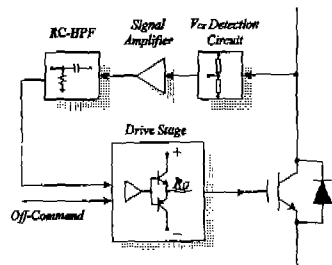


그림 2 제안한 Adaptive 턴-오프 회로의 블록도

그림 2은 Adaptive 턴-오프 회로의 블록도를 보여준다. 제안한 Adaptive 턴-오프 회로는 컬렉터-에미터 전압 검출 회로, 높은 대역폭을 갖는 검출전압 증폭회로와 컬렉터-에미터 전압의 상승 시 전압의 상승 기울기에 따라 과전압 제한 기능을 적응적으로 동작시키기 위해 RC의 수동소자로 구성된 RC-HPF (RC high-pass filter) 로 구성되어 있다.

컬렉터 전압이 상승할 때까지는 기본적인 턴-오프 구동회로만이 동작을 하고 컬렉터 전압이 상승을 하면 Adaptive 턴-오프 회로가 동작을 하므로 컬렉터 전압이 상승할 때까지는 Adaptive 턴-오프 회로는 IGBT의 스위칭 특성에 영향을 주지 않는다. 컬렉터

전압이 상승을 하면  $V_{CE}$  검출 회로에 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 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.

단락사고 시  $V_{CE}$  검출 회로에는 정상 턴-오프 시보다 더욱 큰 기울기의 전압이 입력된다. 이때 RC-HPF의 출력전압은 정상 턴-오프시보다 크게 되고 게이트-에미터 전압 또한 커지게 되어 과전압 제한 기능은 더욱 효과적으로 동작하게 된다. 따라서 단락 사고 시 안전한 과전압 제한 기능을 확보하기 위하여 정상 턴-오프 시 필요 이상의 과전압 제한 기능을 가질 필요가 없으므로 정상 턴-오프 시 전류의 감소 시간의 증가로 인한 스위칭 손실의 증가는 최소화된다.

## 3. 실험 및 고찰

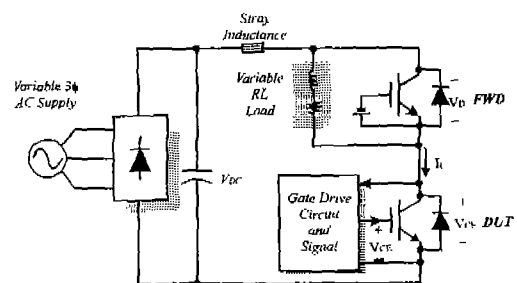


그림 3 제안한 게이트 구동회로를 검증하기 위한 실험 장치

제안한 IGBT 게이트 구동회로의 타당성과 우수성을 검증하기 위한 실험 사양을 그림 3에 나타냈다. 일단 IGBT는 오프 시킨 후 내장 다이오드를 환류 다이오드 (FWD)로 사용하고 아래 IGBT (DUT)를 스위칭 시키는 Step-down 컨버터로 실험을 하였다. 실험에 사용한 IGBT는 Semikron사의 SKM 400GA 163D (1600V/400A)를 2개 병렬로 연결하여 사용하였고 게이트 저항은 모든 실험 조건에서  $2.8\Omega$ 을 사용하였다. DC 입력 전압은 입력 교류 전원을 가변하여 실험하였으며 DC링크와 DUT 사이의 부유 인덕턴스 성분을 감소시키기 위해서  $40\mu\text{F}$  스너버 회로용 무유도 필름 커패시터를 삽입하였다. 정격 전류 이하의 정상 턴-오프 실험은 부하를 가변하여 여러 가지 부

하 조건에서 실험을 하였다.

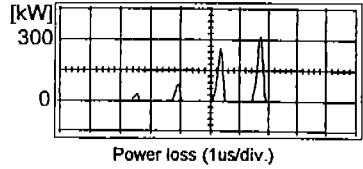
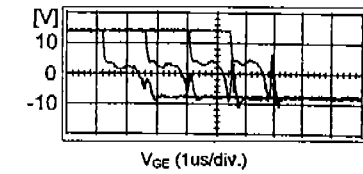
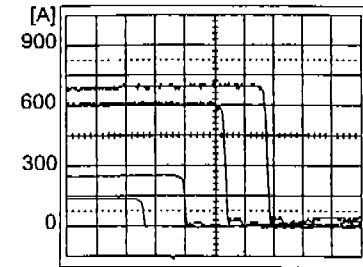
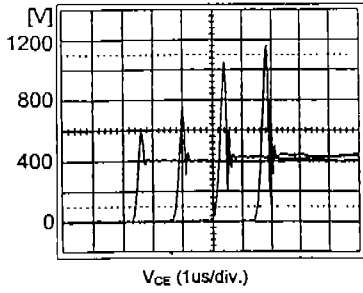


그림 4 기본적인 게이트 구동회로를 적용한 경우의 턴-오프 실험 파형  
(부하저항 :  $3\Omega$ ,  $1.6\Omega$ ,  $0.66\Omega$ ,  $0.57\Omega$ )

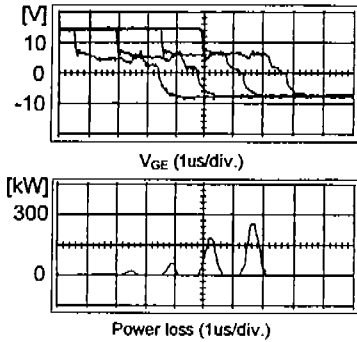
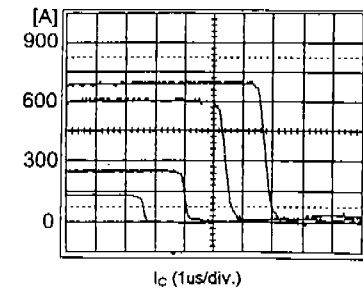
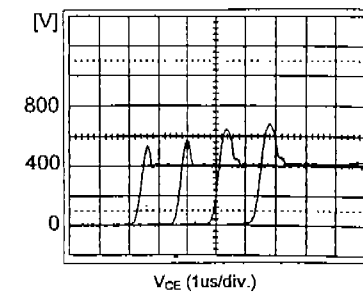


그림 5 Adaptive 턴-오프 적용한 경우의 턴-오프 실험 파형  
(부하저항 :  $3\Omega$ ,  $1.6\Omega$ ,  $0.66\Omega$ ,  $0.57\Omega$ )

그림 4와 그림 5는 DC 입력 전압 400V의 경우 기본적인 턴-오프 구동회로만을 사용한 경우와 제안한 Adaptive 턴-오프 회로를 적용한 경우의 각 부분 실험 파형을 저장 후 비교한 것이다. 두 가지 경우에서 측정된 부유 등가 인덕턴스는 300nH이며 부하조건은 각각  $3\Omega$ ,  $1.6\Omega$ ,  $0.66\Omega$ ,  $0.57\Omega$ 이다. 기본적인 턴-오프 구동회로와 비교해 보면 Adaptive 턴-오프 회로는 턴-오프 지연 시간을 가지지 않지만 컬렉터 전류의 하강 시간은 길어진다. 이것은 게이트-에미터 전압은 컬렉터 전류의 하강 시간에만 제어된다는 것을 보여 준다. 또한 제안한 회로의 파형을 보면 게이트 전압 파형이 부하 전류에 따라 각각 다르게 되어 있고, 이것에 의해 과전압은 부하 전류가 크더라도 부하 전류가 작을 때와 같은 크기로 제어됨을 알 수 있다. 이것은 Adaptive 턴-오프 회로가 부하전류에 따라 적응적 기능을 가진다는 것을 의미한다. 반면에 기본적인 턴-오프 구동회로만을 사용한 경우 과전압의 증가는 부하전류의 증가에 따라서 커지게 되고 부하 전류 700A의 경우 1200V의 피크 전압이 생기게 되고 고주파 전압 오실레이션이 생기게 된다.

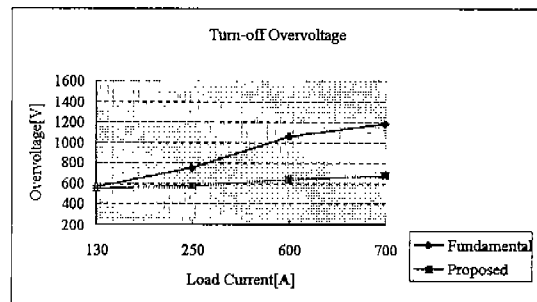


그림 6 부하 전류에 따른 과전압 비교

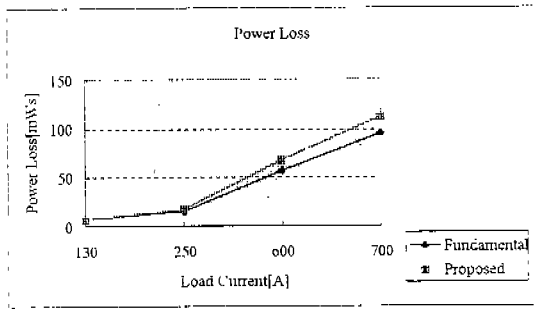


그림 7 부하 전류에 따른 턴-오프 손실 비교

그림 6과 그림 7은 기본적인 턴-오프 구동회로를 적용한 경우와 Adaptive 턴-오프를 적용한 경우에서 과전압의 크기와 손실을 비교한 그래프이다. Derating rate를 고려한 정격전류인 700A인 경우에 기본적인 턴-오프 구동회로의 경우 과전압이 DC 전압의 약 300%인 1200V가 발생하였지만, 제안한 Adaptive 턴-오프 회로를 적용한 경우 과전압은 DC 전압의 170%정도인 680V가 발생하여 520V가 감소하였지만 손실은 약 18%가 증가하였다. 그러나 부하 전류가 130A인 경우에는 과전압이 각각의 경우 590V와 550V가 발생하였고 손실은 거의 증가하지 않았다. 즉, 부하 전류가 큰 경우에는 과전압이 제한되면서 손실의 증가가 발생하지만 부하 전류가 작은 경우에는 손실의 증가가 거의 발생하지 않았다. 따라서 과전압의 크기에 따라 적응적으로 동작하게 된다.

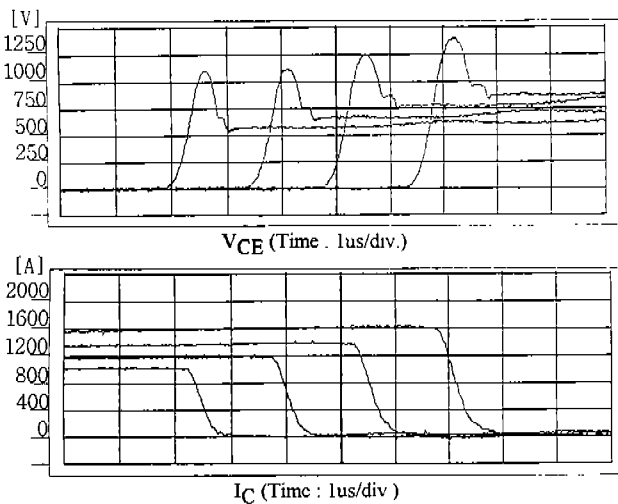
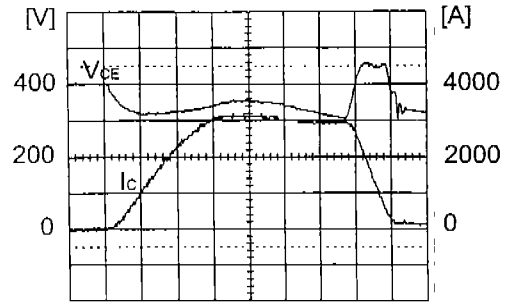
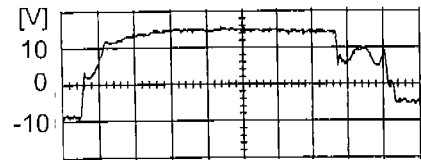


그림 8 과전류 검출시 실험 파형

그림 8은 800A 정격 전류 이상의 과전류가 흘렀을 때의 턴-오프 결과이다. 과전류 값을 얻기 위하여 DC 링크 전압을 일정한 부하값에서 증가시켰다. 이때에 부하 전류는 900A에서 1600A까지 변화하게 되는데 제안한 턴-오프 회로에 의해 과전압이 500V 정도로 제한된다.



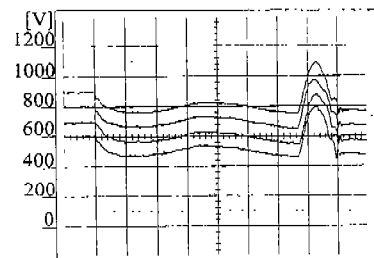
VCE, IC (time : 1us/div.)



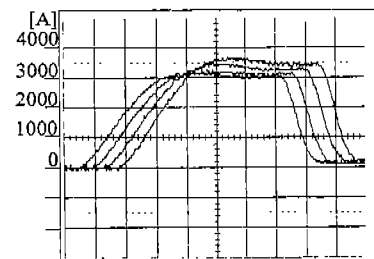
VCE (time : 1us/div.)

그림 9 제안한 회로를 적용한 단락 회로 실험 파형

단락 회로 실험은 부하를 단락 시킨 후 먼저 DC 입력 전원을 충전시킨 상태에서 DUT를 턴-온 시켰다. 단락 사고가 발생하면 과전류 검출 회로는 DUT를 자동적으로 턴-오프 시키고 DUT를 오프 상태로 유지시킨다. 그림 9는 DC 입력 전압 400V의 경우에서의 단락 회로 실험 파형이다. 컬렉터 전류는 약 3000A가 흐르고 과전압은 Adaptive 턴-오프의 동작으로 450V가 발생하였다. 그림 4의 정격 전류 이하의 정상 턴-오프의 경우와 비교하면 단락 사고 시 과전압 제한이 가장 우수하게 동작함을 알 수 있다.



VCE (Time : 1μs/div.)



IC (Time : 1μs/div.)

그림 10 입력전압 가변에 따른 단락 회로 실험 파형

그림 10은 DC 입력전압을 600V, 700V, 800V 그리고 900V로 변화시켰을 때 비교되는 실험파형이다. 각각의 경우 턴-오프시 발생하는 과전압이 DC 입력 전압의 약 30% 정도로 비슷하였는데, 이는 전류크기 변화에 큰 차이가 없으며 하강시간도 비슷하게 턴-오프 세어되었기 때문이다. 개발한 게이트 구동회로의 전반적인 구동 특성이 우수하게 나타났음을 알 수 있다

#### 4. HIGBT 구동에 관한 고려사항

HIGBT를 이용한 PWM 인버터에서는 일반 IGBT 소자보다 대전류가 흐르게 되고 과전압이 걸리게 된다. 따라서 소자에 발생하는 과전압은 일반 IGBT 소자보다 크게 되고 이로 인한 소자의 손상과 스위칭 노이즈로 인한 문제가 심각해진다. 특히 PWM인버터에서 HIGBT의 장점을 살려 스너버 없이 운전을 하려면 정상 상태 턴-오프 시와 단락 사고 시에 발생하는 과전압을 제한하는 것이 중요한 고려사항이 된다.

또한 HIGBT의 과전압을 줄이기 위해 단순히 게이트 저항값을 높여주는 방법은 HIGBT의 게이트-에미터 커패시턴스 값이 크기 때문에 스위칭 시간과 손실이 상당히 증가하게 된다.

본 논문에서 제안한 게이트 구동기법은 IGBT전압을 분압하여 RC-HPF를 거쳐 다시 게이트 입력단으로 피드백 되므로 HIGBT경우에도 과전압의 크기를 효과적으로 제한할 수 있고 시스템의 간소함과 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것이다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 IGBT를 이용한 PWM 인버터에서 IGBT의 턴-오프 스위칭 시 발생하는 과전압을 제한하는 새로운 IGBT 게이트 구동 회로를 제시하였다.

제안하는 게이트 구동 회로는 턴-오프 시 전류의 크기에 따라 과전압을 제한하기 때문에 발생하는 손실의 증가를 최소화시키는 특성을 지니고 단락사고와 같은 대전류가 흐르는 경우 더욱 효과적으로 동작한다. 따라서, 제안하는 게이트 구동회로는 IGBT PWM 인버터를 설계하는데 있어 스너버 회로 등의 주 전력 회로의 간소함을 도모할 뿐만 아니라 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

#### 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] Rahul Chokhawala et al, "Gate Drive Considerations for IGBT Modules," *IEEE-IAS Conf. Rec.*, Vol. 2, pp. 1186-1195, 1992.
- [3] F. Calman et al, "Analysis of the IGBT dv/dt in Hard Switching Mode," *6th European Conference on Power Electronics and Application Rec.*, Vol. 1, pp. 234-239, 1995.
- [4] Gerster. Ch et al, "Gate-Controlled dv/dt- and di/dt- Limitation in High Power IGBT Converters," *EPE Journal*, Vol. 5, No 3/4, Jan. pp. 11-16, 1996.
- [5] Majumdar, G at al, "Active Surge Voltage Clamped 600A IPM for High Power Application." *ISPSD'95 Yokohama, Japan, Proc*, pp. 75-79, 1995.
- [6] H. G. Eckel et al, "Optimization of the Turn-off Performance of IGBT at Overcurr and Short Circuit Current," *5th European Conference on Power Electronics and Application Rec.*, Vol. 1, pp. 317-322, 1993.
- [7] S. Gediga et al, "High Power IGBT Converter with New Gate Drive and Protection Circuit," *6th European Conference on Power Electronics and Application Rec.*, Vol. 1, pp. 66-70, 1995.
- [8] Chokhawala R et al, "Switching Voltage Transient Protection Schemes for High Current IGBT Modules," *APEC' 94 Orlando, Florida, USA, Proc*, pp.459-468 1994