

IGBT소자 직렬연결 구동 연구

홍 순욱*, 양 훈준*, 김 준모*, 이 학성*, 장 병훈**, 오 관일**
 효성 중공업(주) 기술 연구소*, 한국전력공사 한국전력연구원**

A Study on Active Voltage Control of Series Connected IGBTs

S.W. Hong*, H.J. Yang*, J.M. Kim*, H.S. Lee*, B.H. Chang**, K.I. Oh**
 R & D Institute, Hyosung Industries Co., Ltd., Korea Electric Power Research Institute, KI

Abstract - This paper describes a gate drive circuit for series connected IGBTs in high voltage applications. The proposed control criterion of the gate circuit is to actively limit the voltages during switching transients, while minimizing switching transient and losses. In order to achieve the control criterion, an analog closed loop control scheme is adopted. The performance of gate drive circuit is examined experimentally by the series connection of three IGBTs with conventional snubber circuits. The experimental results show the voltage balancing by an active control under wide variation in loads and imbalance conditions.

1. 서 론

전력계통분야에서 Thyristor나 GTO를 이용한 직렬구동이 많이 이용되고 있다. 이러한 직렬구동은 소자간에 적절한 전압분배가 이루어져서, 개별소자에 정격이상의 과전압이 인가되는 것을 방지하는 것이 가장 큰 관건이다. 고전압회로에서는 소자를 직렬연결하면서 발생하는 stray inductance에 의하여 스위칭 과도상태에서 소자에 과전압이 발생하게 되며 이에 의하여 소자의 파손이 발생될 수 있다. 소자간의 전압분배를 위하여 저항과 커패시터를 이용한 수동적 제어가 사용되어 왔으나 과도한 손실과 스위칭 속도가 느리다는 단점으로 높은 주파수대역에서의 PWM제어가 불가능하였다. 대용량 IGBT가 상업화됨에 따라 고압회로에서 IGBT를 이용하여 PWM방식의 인버터를 사용하게 되면 기존의 대용량 회로의 구성이 간단해지고 전력전자부의 효율과 특성이 향상되며 소형화가 가능해진다. 그러나 IGBT는 과도상태가 빠르고 stray inductance에 민감하기 때문에 수동제어회로에 의한 전압평형이 불가능하여 직렬구동의 구현이 어렵다는 문제가 있다. 현재 여러 가지 연구가 진행되고 있으나 실용화된 IGBT 직렬연결 구동회로는 제한적으로만 사용되고 있는 실정이다. 본 논문에서는 IGBT의 직렬연결시에 발생할 수 있는 과전압의 현상과 원인을 파악하고, 이를 적절하게 제어할 수 있는 구동회로를 제작, 실험하여 본 논문에서 제안하고 있는 제어방식 및 gate drive circuit의 유효성을 입증하였다.

2. 본 론

2.1 IGBT 직렬구동의 제어

2.1.1 IGBT 과전압 발생원인

IGBT 직렬연결회로에서 소자간의 전압 불평형이

나 소자의 과전압이 발생하게 되는 주요 원인들은 다음과 같다.

- ① 스너버 커패시터간의 커패시턴스 차
- ② 게이트 구동회로간의 특성 차
- ③ 직렬연결된 IGBT간의 특성 차

이러한 불평형의 원인을 회로적으로 구현하여 전압 제어를 확인하기 위하여 다음과 같은 방법으로 실험적인 모델링을 할 수 있다.

- ① 각각 다른 규격의 IGBT사용
- ② 각각 다른 용량의 스너버 커패시터 사용
- ③ 각 게이트 신호에 시간지연 사용

전체 전력변환회로의 동작에 영향을 주지 않고 과전압을 방지하기 위하여는 각 전력용 반도체소자의 스위칭 과도상태 이내에 과전압을 제어하여야 한다. 또한 제어에 의한 손실을 최소화시켜야하고 스위칭소자의 스위칭 과도특성의 지연도 최소화 시켜야한다.

2.1.2 제어방식

사용된 제어의 블럭전도는 그림 1과 같이 구성되어 있다. 제어방식은 크게 2가지 나누어진다. 첫째로 과도상태 전압제어는 turn-on/off transient에서 발생하는 과도상태의 전압을 일정한 전압 이하로 제한한다. 제어대상이 과전압의 크기에 따라서 스위칭소자의 전압이 제어되므로 과전압이 발생하게 되어도 제어의 시간은 거의 일정하다. 또한 직렬연결된 IGBT 중 하나의 게이트에 turn-on신호가 지연되면 나머지 IGBT는 모두 turn-on상태가 되고 지연이 발생한 스위칭소자에 과도한 전압이 인가되게 된다. 이 경우 static limiter회로를 이용하여 제어한다. 한편 turn-off 신호가 하나의 IGBT에 시간지연을 갖고 동작하는 경우에는 나머지 IGBT들이 그 만큼의 전압을 분배하게 되므로 transient controller만의 제어로도 충분히 제어될 수 있다.

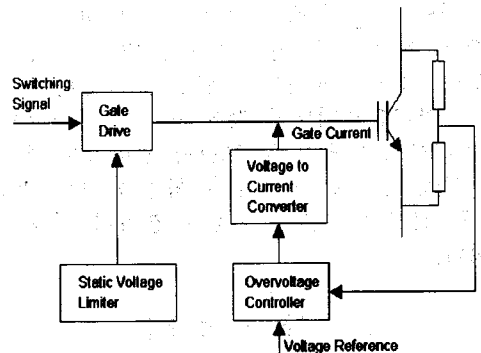


그림 1 제어 블럭전도

2.2 실험용 전력회로 구성

IGBT의 직렬연결에 의한 소자간의 전압불평등 현상을 시험하기 위하여 그림 2와 같은 회로를 구성하였다. 구동회로의 과도특성 및 제어에 의한 일반적인 과도특성 해석을 위하여는 정격이 서로 다른 3개의 소자를 직렬 연결하여 하나의 밸브로 구성, 실험하였으며, 부하특성에 따른 제어특성을 해석하기 위하여 유도성 및 저항부하에 대한 실험을 하였다. DC 전압은 1.1kV로 설정되었으며 능동제어기에서의 기준 전압은 370V로 설정하여 불평형 전압 조건에서 각각의 IGBT가 전압을 제어하도록 하였다.

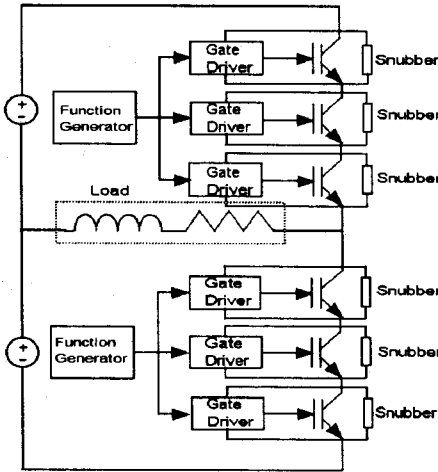


그림 2 실험에 사용된 회로의 블록도

2.3 실험결과

실험에서는 전압불평형의 두 가지 주된 요인에 대하여 고려하였다. 첫째는 외부 스너버 커패시터에 의한 전압불평형이며 둘째는 게이트 신호의 지연에 의한 전압불평형이다. 게이트 신호 지연에 의한 전압불평형에서 turn-on 과도상태와 turn-off 과도상태는 각기 다른 특성을 가지므로 이 두 가지를 분리해서 고려하였다.

2.3.1 커패시터 용량차에 의한 전압 불평형

그림 3.1의 윗그림은 유도성부하에서 서로 상이한 값을 갖는 스너버 커패시터에 의하여 소자에 발생하는 전압불평형을 보여준다. 제어는 인가되지 않았으며 과전압이 스너버 커패시터가 작은 소자에 인가되었는데, 이는 turn-off 과도상태 동안에 높은 dv/dt 를 갖기 때문이다. 그림 3.1의 아래 그림은 능동제어가 가해진 경우의 전압평형을 나타내고 있다. 전압은 과도상태와 정상상태 모두에서 기준전압으로 원활하게 제어되고 있음을 알 수 있다. 그림 3.2는 저항부하에 대한 실험결과이다. 전압의 overshoot가 크지는 않지만 능동제어가 유도성부하의 경우보다 긴 시간동안 지속되고 있음을 알 수 있다. 본 실험에서 채택한 50%의 스너버 커패시터 차이를 가정하였는데 이는 매우 큰 값으로 현실적인 커패시터의 차이는 이보다 작을 것으로 예측되므로 스너버 커패시터에 의한 전압불평형은 제한한 제어방식을 이용하여 제어됨을 확인할 수 있었다.

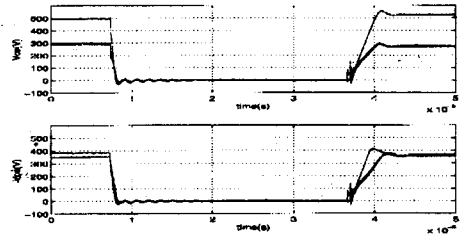


그림 3.1 유도성 부하에 대한 응답 (스너버 커패시터 차에 의한 전압불평형)
상단 : 제어없음, 하단 : 제어작용

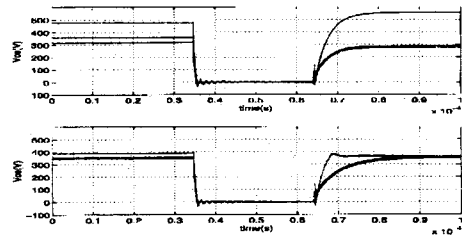


그림 3.2 저항 부하에 대한 응답 (스너버 커패시터 차에 의한 전압불평형)
상단 : 제어없음, 하단 : 제어작용

2.3.2 Turn-on delay에 의한 전압 불평형

Turn-on delay는 정상상태에서 전압불평형을 발생시키지는 않지만 스위칭 과도상태에서 전압스파이크를 발생시킬 수 있다. 실험에서는 명확한 전압스파이크를 관찰하기 위해서 IGBT의 게이트 신호에 1μs의 delay를 발생시켰다. 그림 3.3의 윗그림은 유도성부하에서 turn-on과도상태 동안 delay된 게이트신호에 의하여 발생하는 전압스파이크를 보여준다. 그림 3.3의 아래그림은 과도상태에서의 능동전압제어된 결과를 보여준다. Turn-on 과도상태에 의하여 능동제어기간동안에 비교적 큰 overvoltage가 관찰된다. 그림 3.4는 같은 실험조건에서 저항부하에 대한 경우의 turn-on과도상태 응답을 보여주고 있다. Turn-on과도상태에 대하여 스위칭 특성은 저항부하나 유도성부하의 두 가지 경우에 대하여 유사한 결과를 나타내고 있다.

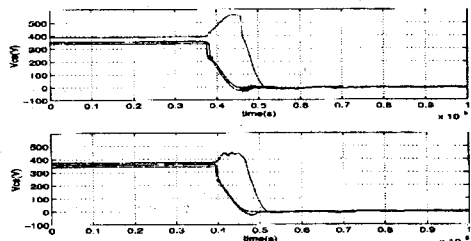


그림 3.3 유도성 부하에 대한 응답 (Turn-on 과도상태에서의 전압불평형)
상단 : 제어없음, 하단 : 제어작용

3. 결 론

본 연구에서 직렬연결된 IGBT에서 소자간의 특성 차이 및 외부회로에 의하여 발생하는 전압 불평형을 능동적으로 제어하여 소자에 인가되는 과도전압을 설정값 이내로 유지하는 IGBT 구동회로를 제안하였다. 제안된 제어기의 특성을 검증하기 위하여 발생 가능한 전압불평형조건을 가상으로 설정하여 이에 대한 제어기의 특성을 실험을 통하여 확인한 결과, 2 μsec 이하의 빠른 속도로 과전압제어가 가능함을 확인할 수 있었다. 대용량 IGBT 인버터의 경우 deadtime이 일반적으로 3~5 μsec 이상인 점을 감안할 때, 소자의 직렬연결로 인한 과도상태의 지연시간은 deadtime이내에 이루어지므로 시스템의 안정된 동작을 기대할 수 있음을 검증하였다. 본 연구에서 제시된 능동제어의 장점은 다음과 같다.

- ① 제어회로는 과전압이 발생하는 경우에만 동작하게 되므로 정상적인 전압분배시에는 제어회로가 동작하지 않는다. 따라서 정상적인 전압분배가 이루어질때는 제어회로에 의한 손실이 없다.
- ② 아날로그 방식의 제어를 사용하여, 제어주파수가 약 50MHz 정도에서 이루어지므로 디지털 방식에 의한 제어기의 센싱 및 연산속도에 의한 제어속도한계가 없고 경제적이다.
- ③ 직렬로 연결된 각 IGBT의 과전압 제어가 독립적으로 이루어지므로 제어회로가 간단하고 다른 IGBT에 의한 간섭효과를 최소화 할 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] P.R. Palmer and A.N. Githiari, "The series Connection of IGBTs with Optimized Voltage Sharing in the Switching Transient", Proceedings of IEEE PESC 1995, Vol 1, pp.44-49
- [2] C. Gerster, "Fast High Power/High Voltage Switch Using Series Connected IGBTs with Active Gate Controlled Voltage Balancing", APEC 1994, pp.469-472
- [3] C.Gerster, P. Hofer, N. Karrer, "Gate-control S for Snubberless Operation of Series Connected IGB", PESC 1996, pp. 1739-1742
- [4] A. Consoli, S. Musumeci, G. Oriti, A. Testa, "Voltage Balancement of Series Connected IGB", Proceedings of the IEEE Industry Applications So Meeting 1995, Vol. 3, pp. 2752-2758

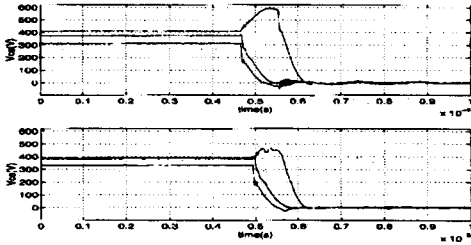


그림 3.4 저항 부하에 대한 응답
(Turn-on 과도상태에서의 전압불평형)
상단 : 제어없음, 하단 : 제어작용

2.3.3 Turn-off delay에 의한 전압불평형

Turn-off 게이트 신호에 의해 delay가 발생할 때 직렬로 연결된 IGBT에는 전압불평형이 발생한다. 가장 높은 전압 불평형은 한 개의 게이트 turn-off 신호가 다른 turn-off신호에 비하여 먼저 인가될 때 관찰된다. Turn-off 과도상태에서의 delay는 정상 상태/과도상태 모두에 대하여 전압불평형을 야기시킨다. 이 경우 정상상태에서 가장 빠른 응답을 갖는 소자가 높은 전압을 제한하기 시작하며 나머지 소자들은 그 이후에 전압제한을 시작한다. 그림 3.5의 위그림은 유도성부하에서 turn-off 과전압을 보여주고 있다. 능동제어기간동안에도 무시할 수 없는 크기의 overshoot가 발생하고 있음을 알 수 있다.

그림 3.6에서도 동일한 실험조건에 대한 turn-off 과도상태 동안의 저항부하에서의 응답을 보여주고 있다. Turn-off시 느린 속도의 RC응답에 의하여 능동제어의 settling time은 유도성 부하의 경우보다 더 길어짐을 알 수 있다. 두 가지 경우 모두, 전압 overshoot가 기준전압의 10%이내의 영역에서 제어되었다.

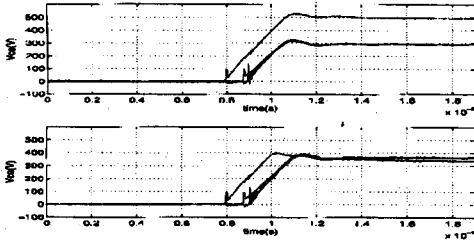


그림 3.5 유도성 부하에 대한 응답
(Turn-off 과도상태에서의 전압불평형)
상단 : 제어없음, 하단 : 제어작용

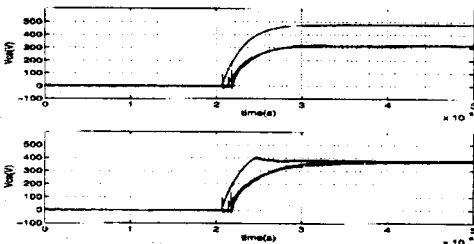


그림 3.6 저항 부하에 대한 응답
(Turn-off 과도상태에서의 전압불평형)
상단 : 제어없음, 하단 : 제어작용