

다른 사양을 가지는 IGBT의 병렬 동작 특성

임정우, 정용수, 정세교
경상국립대학교

Parallel Operation Characteristics of IGBTs with Different Specifications

Jeong-Woo Lim, Young-su Jeong, Se-Kyo Chung
Gyengsang National University

ABSTRACT

This paper deals with the method of reducing the switching loss using the parallel connection of heterogeneous IGBTs with different specifications. The switching method to reduce the switching loss of the IGBT is proposed and the loss analysis is presented. The simulation results for the actual IGBTs are provided to show the validity of the proposed method.

1. 서론

최근 SiC MOSFET의 적용 범위가 넓어지고 있지만, 여전히 많은 응용 분야에서 IGBT가 사용되고 있으며 소자의 성능개선이 지속적으로 이루어지고 있다[1]. IGBT는 가격이 싸고 도통 손실이 상대적으로 낮다는 장점을 가지고 있으며, 최근 포화 전압($V_{CE,sat}$)이 매우 낮은 소자들이 출시되고 있다. 그러나 IGBT는 스위칭 시 소모되는 에너지가 매우 크며, 특히 턴 오프 시 지연 전류에 대한 스위칭 손실이 가장 큰 문제점이다. 또한 실리콘(Si) 기반 소자의 특성 상 포화 전압과 스위칭 에너지는 상반된 특성을 가지고 있어, 포화 전압이 낮아질수록 스위칭 에너지는 커지게 된다.

이러한 문제점을 개선하기 위해 IGBT와 MOSFET를 병렬 IGBT의 스위칭 특성을 개선하는 방법에 대한 연구가 진행되어 왔으며 MOSFET의 빠른 스위칭 특성을 이용하여 스위칭 손실을 저감하였다[2-3]. 이와 달리 본 논문에서는 상반된 특성을 가지는 2종의 IGBT를 병렬 연결하여 스위치의 손실을 저감하는 기법에 대한 연구를 수행하였다. 먼저 낮은 포화 전압을 가지는 소자와 스위칭 에너지가 작은 상반된 특성을 가지는 두 소자를 병렬 연결하여, 스위칭 손실을 최소화하는 게이트 구동 방법을 제안하였다. 그리고 각 소자의 실제 파라미터를 적용한 시뮬레이션을 통하여 IGBT의 손실이 저감 될 수 있음을 검증하였다.

2. 이종 IGBT의 병렬 동작

2.1 테스트 회로 구성

이종 IGBT의 병렬 동작 특성을 분석하기 위한 테스트 회로의 구성은 그림 1과 같으며 Q_S , Q_C 에 서로 상반된 특성을 가진 IGBT를 적용하였다. 각 소자의 주요 파라미터는 표 1과 같다.

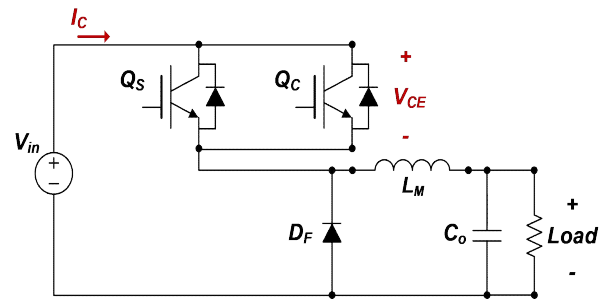


그림 1 테스트 회로 구성

Fig. 1 Test circuit configuration

적용된 IGBT는 Infineon의 IKZ75N65EL5와 IKZ75N65EH5이며 EL5 타입 소자는 포화 전압이 매우 낮으며, EH5 타입 소자는 스위칭 에너지가 상대적으로 작으며 특히 턴 오프 시 스위칭 에너지가 EL5 타입 소자의 13.5% 수준으로 매우 작다.

표 1 적용된 IGBT 주요 파라미터
Table 1 Applied IGBT main parameters

항목	Q_C	Q_S
Part No.	IKZ75N65EL5	IKZ75N65EH5
Collector-emitter voltage $V_{CE,Max}$	650 V	650 V
DC collector current, limited $I_{C,Max}$	100 A	90 A
Collector-emitter saturation $V_{CE,sat,Max}$	1.35 V	2.1 V
Input capacitance C_{ies}	12,100 pF	4300 pF
Output capacitance C_{oes}	150 pF	130 pF
Turn-on delay time, $t_d(on)$	120 ns	26 ns
Rise time (t_r)	23 ns	11 ns
Turn-off delay time, $t_d(off)$	275 ns	347 ns
Fall time (t_f)	50 ns	15 ns
Turn-on energy (E_{on})	1.57 mJ	0.68 mJ
Turn-off energy (E_{off})	3.20 mJ	0.43 mJ
Total switching energy (E_{ts})	4.77 mJ	1.11 mJ

2.2 병렬 IGBT의 스위칭 방법

그림 2는 병렬 IGBT의 손실 저감을 위한 스위칭 방법을 나타내고 있다. 턴 온(Turn-on) 시 스위칭 특성이 우수한 EH5 타입 소자를 먼저 턴 온 시켜 스위치 양단의 전압 V_{CE} 를 영으로 만들어 준 다음 EL5 타입 소자를 턴 온 한다. EL5 타입 소자는 영전압에서 턴 온할 수 있으므로 스위칭 손실이 저감된다. EL5 타입 소자가 켜진 후 대부분의 전류는 EL5 타입 소자로 흐르게 되고 도통 손실은 EL5 타입 소자의 특성을 가지게 된다.

턴 오프 동작 시 EL5 소자가 먼저 턴 오프 되며, 이 때 EH5 타입 소자는 여전히 켜진 상태이므로, 스위치 양단의 전압 상승 없이 EL5 타입 소자를 턴 오프 할 수 있다. EH5 타입 소자는 EL5 소자에 흐르는 전류가 거의 영인 상태에서 턴 오프 되며, 턴 오프 시 스위칭 특성은 EH5의 특성을 가지게 된다. 따라서 이 방법을 적용하면 병렬 IGBT는 스위치 턴 온/오프 시의 스위칭 에너지가 작은 EH5 타입 소자, 온 상태에서는 포화 전압이 낮은 EL5 소자의 특성을 가지도록 동작하게 된다.

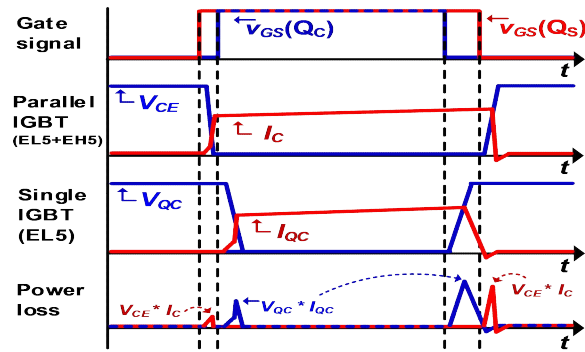


그림 2 IGBT 스위칭 방법 및 파형
Fig. 2 IGBT switching method and waveform

3. 병렬 IGBT의 손실 특성 분석

3.1 손실 특성 시뮬레이션

병렬 IGBT의 손실 저감 효과를 검증하기 위하여 PSIM 소프트웨어를 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저 표 1에 주어진 각 소자의 특성 파라미터를 사용하여 IGBT 모델을 만들고 그림 1의 회로에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 3은 턴 온 시 특성을 나타내는 시뮬레이션 결과이다. 그림 3(a)와 (b)는 각각 EL5 소자만을 사용한 경우와 두 소자를 병렬로 연결한 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 위로 부터 게이트 신호, 소자의 전압과 전류, 그리고 손실을 나타내며, 병렬 동작 시 스위칭 손실이 줄어듦을 볼 수 있다.

그림 4는 턴 오프 시 특성을 나타내는 시뮬레이션 결과이다. 그림 4(a)와 (b)는 각각 EL5 타입 소자만을 사용한 경우와 두 소자를 병렬로 연결한 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 나타내며 병렬 동작 시 스위칭 손실이 크게 줄어듦을 볼 수 있다. 그림 5는 다양한 부하 조건에 대한 스위치의 총 손실을 나타낸 그래프이며 병렬 동작 시 손실이 크게 저감되는 것을 알 수 있다.

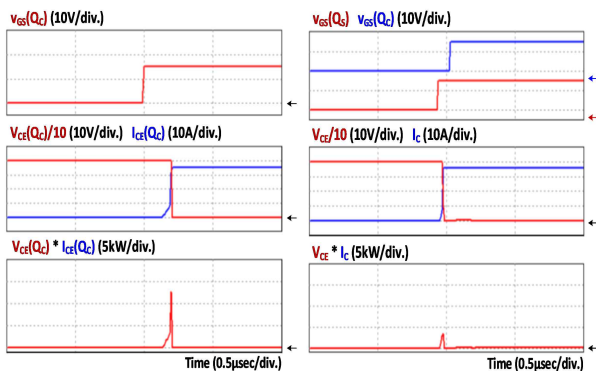
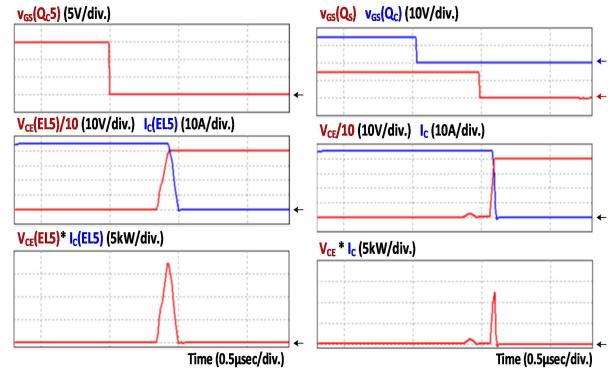


그림 3 턴 온 시 시뮬레이션 파형
Fig. 3 Simulation waveform at turn-on



(a) 단일 IGBT(EL5) (b) 병렬 IGBT(EL5+EH5)
그림 4 턴 오프 시 시뮬레이션 파형
Fig. 4 Simulation waveform at turn-off

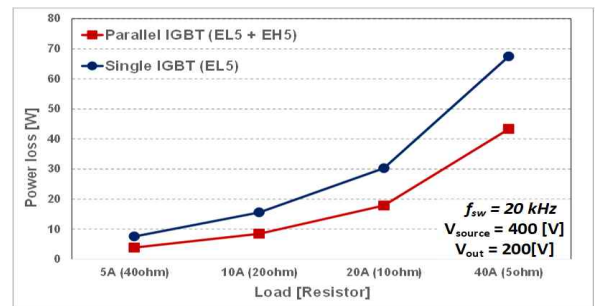


그림 5 부하 조건에 따른 스위치 손실
Fig. 5 Switching loss at load condition

4. 결론

본 논문에서는 상반된 특성을 가지는 IGBT를 병렬로 연결하여 소자의 스위칭 손실을 저감하는 기법에 대한 연구를 수행하였다. 병렬연결 IGBT의 손실 저감을 위한 게이트 구동 방법을 제안하였으며 각 소자의 실제 파라미터를 적용한 시뮬레이션을 통하여 IGBT의 손실이 저감 될 수 있음을 검증하였다. 제안된 기법은 병렬 소자로 구성되는 IGBT 모듈의 스위칭 특성 개선에 응용할 수 있을 것이다.

이 논문은 중소벤처기업부의 구매조건부 과제(S3045967)의 연구결과임.

참고 문헌

- [1] S. Woothipatanapan, et al, "Efficiency improvement of converter for switched reluctance motor drives by mixed parallel operation of IGBT and MOSFET", TENCON 2010, pp. 1841-1846, November, 2010.
- [2] S. Che, et al., "Thermal Analysis of Integrated Power Supply in Parallel with Si IGBT and SiC MOSFET Inverter Based on PLECS", in IEEE ITEC Asia-Pacific, pp. 1-6, November, 2022.
- [3] Z. Lu et al., "Optimal PWM Frequency Acquisition Method Based on Parallel Structure of IGBT and WBG Inverter", 2022 ICPET, pp. 323-328, October, 2022.