이종 IGBT를 이용한 하이브리드 스위치의 특성 해석

김진리, 이정훈, 정세교
경상국립대학교

Characteristic Analysis of Hybrid Switch using IGBTs with Different Characteristics

Jinri Kim, Jeonghun Lee, Se-Kyo Chung
Gyeongsang National University

ABSTRACT

The analysis of the characteristics for parallel hybrid IGBTs is presented. The method of reducing the switching loss is discussed using the parallel connection and delayed switching of IGBTs with the fast switching and low saturation voltage, respectively. The loss analysis is provided to verify the effectiveness of the propsed method.

1. 서론

IGBT는 낮은 가격, 높은 차단전압, 낮은 포화전압의 특성을 가지고 있어 전동기 구동 인버터 등 응용 분야에 광범위하게 사용되고 있다. 그러나 IGBT는 스위칭 손실이 크기 때문에 스위칭 주파수가 제한되는 문제점이 있어 전기 자동차와 같은 고효율 인버터 등에는 빠른 스위칭이 가능한 SiC MOSFET로 대체되고 있다. SiC MOSFET은 IGBT에 비해 스위칭 손실은 작지만 가격이 비싸고 도통저항이 크다는 단점이 있다. 최근 IGBT에 대해서도 지속적인 기술 개발이 이루어지고 있으나, Si IGBT에서는 낮은 포화 전압과 빠른 스위칭 특성을 동시에 만족하기 어렵기 때문에 이러한 두 가지 상반되는 특성을 가지는 IGBT가 각각 개발 및 출시 되고 있다.[1]

본 논문에서는 상반된 특성을 가지는 IGBT를 병렬로 연결하여 기존 IGBT에 비해 스위칭 손실을 저감할 수 있는 하이브리드 스위치의 구현과 특성에 대해서 연구를 수행하였다. 병렬 IGBT 하프 브리지 회로를 통해 하이브리드 IGBT의 스위칭 패턴, 손실 특성에 대해 분석하였다.

2. 하이브리드 IGBT 스위치

2.1 하이브리드 IGBT 스위치의 구성

그림 1은 하이브리드 IGBT의 스위칭 특성을 실험하기 위한 하프 브리지 회로의 구성을 나타내고 있다. 그림 1에서 Q1, Q2는 빠른 스위칭 특성, 그 외 스위치들은 낮은 포화전압 특성을 가지는 IGBT를 사용하여 하이브리드 스위치를 구현하였다. 표 1은 사용된 두 종류의 IGBT에 대한 파라미터를 나타내고 있다. Si 기반의 IGBT는 빠른 스위칭 특성과 낮은 포화전압을 동시에 만족하기 어려우며, 본 논문에서는 상반된 특성을 가지는 두 소자를 병렬 연결하여 낮은 스위칭 손실과 도통 손실을 가지는 하이브리드 스위치를 구현하고자 하였다.

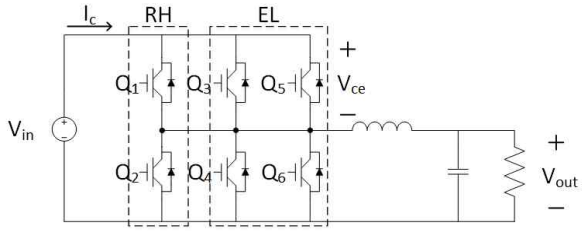

그림 1 하이브리드 IGBT 스위치 테스트 회로
Fig.1 Test circuit of hybrid IGBT switch

표 1 IGBT 파라미터
Table 1 IGBT parameters

Model	IKW75N65EL5	IKW75N65RH5
$V_{ce}[V]$	650	650
$I_c[A]$	75	75
$I_{c,pulse}[A]$	300	300
$V_{ce,sat}[V]$	1.1	1.65
$t_{d(off)}[ns]$	275	180
$t_{d(on)}[ns]$	40	26
$t_f[ns]$	50	15
$t_r[ns]$	11	9
$E_{off}[mJ]$	3.2	0.3
$E_{on}[mJ]$	1.61	0.36

2.2 하이브리드 IGBT 스위치의 스위칭 방법

그림 2와 3은 각각 병렬 IGBT와 하이브리드 IGBT 스위치의 게이트-에미터 전압 패턴과 각 IGBT 스위치의 콜렉터-에미터 전압과 전류에 대한 PSpice 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 여기서 병렬 IGBT는 포화전압이 작은 EL타입의 소자를 3개를 사용하였으며, 하이브리드 스위치는 RH타입 1개와 EL타입 2개를 사용하였다. 스위칭 주파수, 입력전압, 부하전류는 각각 20kHz, 400VDC, 40A이다.

하이브리드 IGBT의 스위칭 동작은 먼저 스위칭 손실 작은 RH타입이 먼저 턴-온 되어 IGBT 양단 전압이 영이되며, 이후 스위칭 손실이 큰 EL타입을 영전압 상태에서 턴-온 한다. 그리고 EL타입이 턴-온되면 주 전류가 포화전압이 작은 EL타입의 소자로 흐르게 되어 도통손실이 줄어들게 된다. 턴-오프 시에는 턴-오프 에너지가 큰 EL타입의 소자가 먼저 영전압 상태에서 턴-오프 되며 스위칭 손실이 작은 RH타입이 나중에

턴-오프 되어 스위칭 손실을 줄이게 된다.

이러한 스위칭 동작에서 과도 상태에서 RH타입 소자로 전체 전류가 흐르게 되나 IGBT의 순간 최대 전류는 정격전류보다 4배 이상 크므로 동작이 가능하다.[2]

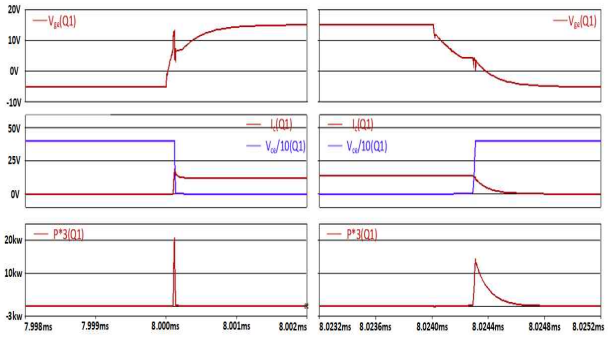

그림 2 병렬 IGBT 동작 파형

Fig. 2 Operational waveform of parallel IGBT switch

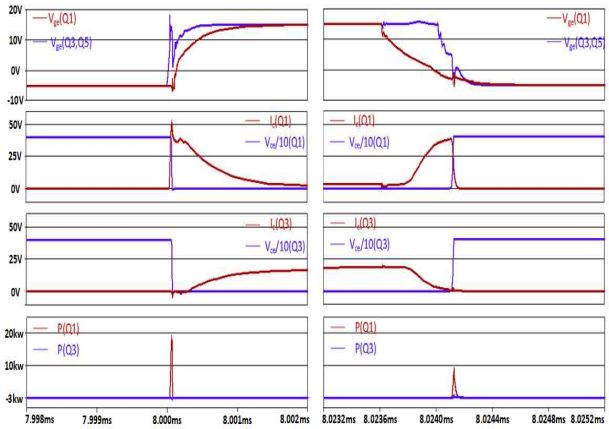

그림 3 하이브리드 IGBT 동작 파형

Fig.3 Operational waveform of hybrid IGBT switch

2.3 손실특성 해석

IGBT의 스위칭 손실은 스위치의 턴-온과 턴-오프 상태에서의 스위칭 손실의 합이다. 스위칭 손실은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{sw} = \frac{1}{T}(E_{on} + E_{off}) \quad (1)$$

여기서 P_{sw}는 IGBT의 스위칭 손실이며 T는 스위칭 주기, E_{on}, E_{off}는 턴-온, 턴-오프 스위칭 에너지를 나타낸다.

한편, IGBT의 도통 손실은 식 (2)와 같이 나타 낼 수 있다.

$$P_{con} = \frac{1}{T}\int_0^T V_{ce.sat}(t) I_c(t) Ddt \quad (2)$$

여기서 P_{con}은 IGBT의 도통 손실이며 $V_{ce,sat}$, I_c, D는 포화전압과 전류, 듀티사이클을 나타낸다.

그림 4는 위의 시뮬레이션 조건에서 온-오프 스위칭 손실과 도통손실, 그리고 전체 소자의 손실을 비교한 그래프이다.

먼저 턴-온 시 스위칭 손실을 분석하면, 턴-온 시 스위칭 에너지는 RH타입 소자가 매우 작지만 모든 전류가 RH타입 소자로 흐르게 되므로 병렬 IGBT로 구성된 소자와 비슷한 손실을 나타낸다. 하이브리드 스위치의 턴-오프 시 특성을 보면 EL타입의 소자가 먼저 영전압 상태에서 턴-오프 되고 RH타입 소자가 턴-오프 되므로 스위칭 손실이 매우 작은 것을 볼 수 있다. 그러나 EL타입 소자의 턴-오프 시 모든 전류가 RH타입 소자로 흐르게 되고, EL타입 소자 3개를 사용한 병렬 IGBT의 도통저항이 작으므로 도통손실은 하이브리드 스위치가 다소 크게 나타난다. 그러나 IGBT의 경우 턴-오프 시 꼬리전류(Tail current)가 손실에 가장 큰 영향을 주므로 주어진 시뮬레이션 조건에서 하이브리드 스위치를 사용하는 경우 전체 손실은 41.1% 감소되는 것을 볼 수 있다. 그림 5는 스위칭 주파수를 변경한 시뮬레이션 결과이다. 병렬 하이브리드 IGBT가 다른 구동 조건에서 전체 손실이 작은 것을 볼 수 있다.

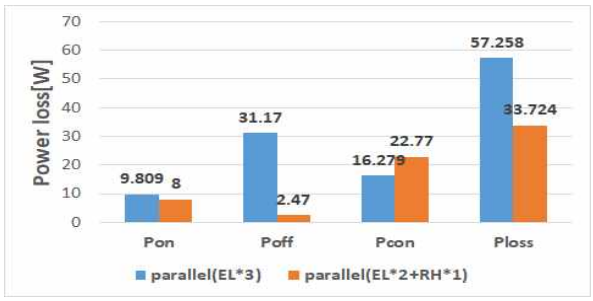

그림 4 스위칭 손실 및 도통 손실

Fig.4 Switching loss and conduction loss

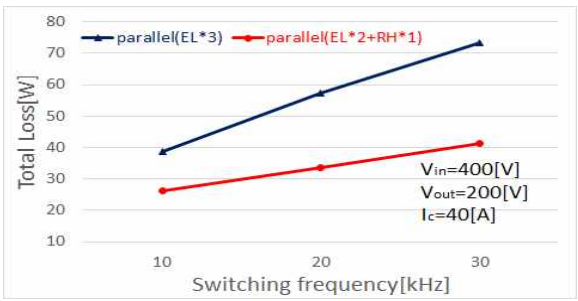

그림 5 스위칭 주파수에 대한 총 손실

Fig.5 Total loss for switching frequency

3. 결 론

본 논문에서는 상반된 특성을 가지는 IGBT를 사용한 하이브리드 스위치를 구현하고, 스위칭 방법에 따른 스위칭 및 도통손실 특성을 분석하였다. 그리고 시뮬레이션 결과로부터 하이브리드 스위치를 사용할 경우 41.1% 손실을 저감 할 수 있음을 알 수 있었으며, 추후 실험을 통해 이를 검증할 계획이다.

본 논문은 2024년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다.(재단 과제관리번호: 2021RIS-003)

참 고 문 헌

[1] Hietpas, Steven M. Mark Naden, “Automatic voltage regulator using an AC voltage-voltage converter.” IEEE Transactions on Industry Applications 2000 pp. 33-38.

[2] LAI, Jih-Sheng, “A hybrid-switch-based soft-switc hing inverter for ultrahigh-efficiency traction motor drivers.” IEEE Transactions on Industry Applications 2013 pp. 1966-1973