

SiC-MOSFET을 이용한 전기차용 인버터 DC-Link 캐패시터 설계 연구

최장혁, 이준혁, 양형규, 김명원, 박정욱
연세대학교

Research of DC-Link Capacitor Design for Electric Vehicle Inverter With SiC-MOSFET

Jang-Hyeok Choe, Junhyuk Lee, Hyoung-Kyu Yang, Myeong-Won Kim, Jung-Wook Park
Yonsei University

ABSTRACT

본 논문은 SiC-MOSFET 기반 전기차용 인버터의 DC-Link 캐패시터 전기용량을 선정하는 방법에 대해 연구하였다. 인버터 시스템에 주로 사용되는 DC-Link 캐패시터는 안정적인 전원 및 고주파 전류 공급 등의 중요한 역할을 한다. 그러나 인버터가 고용량일수록 캐패시터 사이즈가 커지고 무게가 늘어나는 문제가 발생한다. 따라서, 차세대 전력 반도체 소자로 각광받는 SiC-MOSFET의 높은 동작 주파수의 특성을 활용하여 캐패시터 소형화를 실현시켰다. 또한, PSIM 시뮬레이션을 통해 제안하는 연구의 타당성을 검증하고 Si-IGBT 인버터와 비교하여 그 효과를 입증하였다.

1. 서 론

전기차용 인버터는 전압과 주파수를 가변시켜 모터의 동작을 제어해주는 핵심 전력 변환 장치로 주로 Si-IGBT를 이용한 인버터 개발이 활발하게 진행되어왔다. 현재까지도 Si-IGBT인버터는 하이브리드 차량과 전기차, 산업기기 등 다양한 분야에서 사용되고 있지만, 스위칭 손실과 전도 손실이 비교적 크기 때문에 고효율화, 고출력화 달성을 위해서는 한계가 있다. 또한, 열 방출에 필요한 방열판과 DC-Link 캐패시터 등이 많은 공간을 차지하므로, 경량화, 소형화 측면에서 불리한 점이 있다.

한편, 최근 각광받는 SiC-MOSFET은 Si-IGBT에 비해 고온 안정성과 고내전압의 특성을 가지며, 전도도 변조를 사용할 필요가 없어 턴 오프 시 테일 전류가 발생하지 않으므로 스위칭 손실을 줄일 수 있다. 또한, 스위칭 되는 시간이 상대적으로 짧기 때문에 Si-IGBT보다 높은 주파수의 동작이 가능하다.

본 논문에서는 이러한 SiC-MOSFET의 장점을 활용하여 DC-Link 캐패시터 용량을 줄이는 방법을 제안하고, Si-IGBT와의 차이를 비교하며, 결과 값을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

2. 본 론

2.1 DC-Link 캐패시터 전압 리플

전기차용 인버터가 이상적인 모터제어를 하기 위해서는 DC-Link 캐패시터의 전압 리플($\Delta v_{cap}(t)$)을 최소화하여 안정

적인 전압상태를 유지하는 것이 중요하다. 다음과 같이 순시적인 캐패시터의 전압($v_{cap}(t)$) 성분은 식 (1)로 표현할 수 있다.

$$v_{cap}(t) = V_{dc} + \Delta v_{cap}(t) \quad (1)$$

여기서, V_{dc} 는 배터리 전압 DC성분의 평균값이다. 따라서, DC-Link 캐패시터 선정 시 인버터 스위칭 동작 특성에 따라 발생 되는 $\Delta v_{cap}(t)$ 의 크기를 고려해야 한다.

2.2 DC-Link 캐패시터 용량 선정

DC-Link 캐패시터 용량은 인버터 제품의 가격과 무게, 크기를 결정할 수 있다. 그러므로, 적절한 캐패시터 용량 선정이 중요하며, 다음과 같이 표현하여 DC-Link 캐패시터의 용량(C)을 선정할 수 있다.[1]

$$C \geq \frac{0.15}{f_{sw}} \cdot \frac{I_{o-peak}}{\Delta V_{pp}^{Max}} \quad (2)$$

여기서, I_{o-peak} 는 출력 상전류 피크값, f_{sw} 는 스위칭 주파수, ΔV_{pp}^{Max} 는 DC-Link 전압 최대 리플 값이다. 식 (2)는 실험을 위해 설계된 모터 역률각이 30도 일 때를 기준으로 정규화된 최대 전압 리플 크기를 0.15 값으로 고려하여 반영하였다.

2.3 데드타임을 활용한 스위칭 주파수 선정

직류 단 전압에 대한 인버터 출력 상전압의 기본과 크기 비를 표현하는 전압 변조 지수(MI)는 펄스 폭 변조(PWM) 기법에서 중요한 요소 중 하나이다. PWM 기법들에 따라 다양한 최대 $MI(MI_m)$ 를 얻을 수 있는데, 공간 벡터 전압 변조 방식(SVPWM)의 경우 이론적으로 MI 를 1.15까지 최대 선형변조가 가능하다. 이러한 MI_m 와 데드타임(T_d)을 활용하면, 최대 f_{sw} 를 구할 수 있는데, 다음과 같이 표현할 수 있다.[2]

$$f_{sw} \leq \frac{1}{2T_d} \left(1 - \frac{\sqrt{3}}{2} MI_m\right) \quad (3)$$

위의 식 (3)에 따라, T_d 가 Si-IGBT보다 짧은 SiC-MOSFET의 특성을 이용하여 f_{sw} 를 높일 수 있기 때문에 C 값을 감소시킬 수 있다. 이때, T_d 의 영향은 높은 f_{sw} 인 경우가 낮은 f_{sw} 인 경우보다 더 크므로 T_d 선정에 있어서 주의가 필요하다.

2.4 시뮬레이션 구성

PSIM을 통해 114 kW급 전기차용 매입형 영구자석 동기 모터 구동용 인버터 시스템을 구성하고 SiC-MOSFET과 Si-

IGBT의 성능을 비교하였다. 모터의 사양을 고려하여 정격속도 2500 rpm과 정격토크 130 Nm에서 실험을 진행하였다. 또한, 정상상태를 고려하여 ΔV_{pp}^{Max} 를 배터리 전압의 5%인 20 V 이내로 제한하는 것을 목표로 하였다.

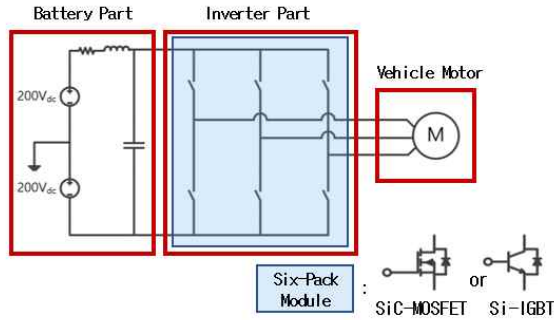


그림 1 매입형 영구자석 동기 모터 구동용 인버터 구성도
Fig. 1 Inverter block diagram with IPMSM

표 1은 전기차용 인버터 스위칭 소자의 사양을 나타내고 있다. 두 소자 모두 동일한 용량으로, 최대 정격전압은 1200 V, 최대 정격전류는 600 A인 모델로 소자를 선정하였다. 또한, 표 1을 고려하여, Si-IGBT와 SiC-MOSFET의 T_d 는 각각 2000 ns, 800 ns로 설정하였다. 여기서, $t_{d(on)}$ 은 턴 온 지연시간, t_r 은 상승 시간, $t_{d(off)}$ 는 턴 오프 지연시간, t_f 는 하강 시간이다.

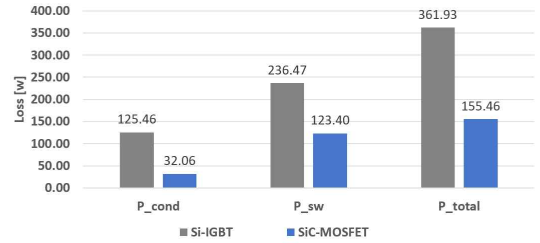
표 1 Si-IGBT와 SiC-MOSFET 사양 비교

Table 1 Comparison with Si-IGBT and SiC-MOSFET Specification

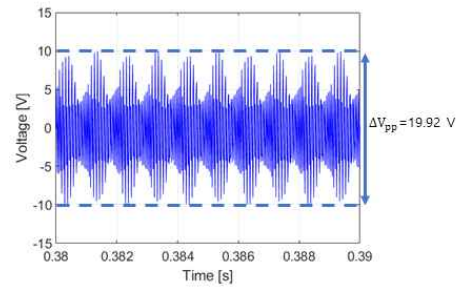
구분	Si-IGBT	구분	SiC-MOSFET
모델명	CM600DU-24F	모델명	BSM600D12P3G001
$t_{d(on)}$	450 ns	$t_{d(on)}$	60 ns
t_r	200 ns	t_r	70 ns
$t_{d(off)}$	800 ns	$t_{d(off)}$	320 ns
t_f	300 ns	t_f	65 ns

2.5 시뮬레이션 결과

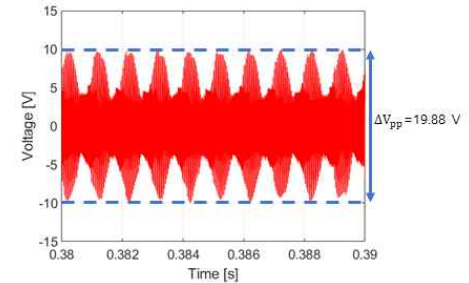
정상상태에서의 스위칭 소자의 총 손실과 전압 리플 값이 그림 2에 비교되어 있다. 이때, $M I_m$ 는 1.1일 때를 기준으로 실험을 진행하였다. 시뮬레이션의 기준값이 되는 Si-IGBT의 f_{sw} 는 통상적으로 많이 사용하는 10 kHz로 선정하였고 I_{o-peak} 가 155 A_{peak}일때의 C 값을 식 (2)에 따라 120 μ F로 설정하였다. SiC-MOSFET의 경우는 식 (2)와 식 (3)을 이용하여 f_{sw} 는 28.58 kHz와 C 는 41.4 μ F로 설정하였다. 그림 2(a)에서 결과값을 살펴보면, 전도 손실과 스위칭 손실 모두 Si-IGBT보다 SiC-MOSFET이 작다는 것을 알 수 있다. 한 주기 내 총 손실은 Si-IGBT이 361.93 W이고, SiC-MOSFET이 155.46 W이므로, Si-IGBT대비 SiC-MOSFET의 총 손실이 약 57% 더 작음을 알 수 있다. 또한, 그림 2(b)의 결과에서 Si-IGBT의 전압 리플은 19.92 V고, 그림 2(c)의 결과에서 SiC-MOSFET의 전압 리플은 19.88 V으로 거의 동일한 전압 리플에서 스위칭 횟수의 차이가 있음을 알 수 있다. 따라서, SiC-MOSFET의 C 값을 Si-IGBT보다 약 65.5%까지 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.



(a) Si-IGBT와 SiC-MOSFET의 총 손실 비교
(a) Si-IGBT and SiC-MOSFET total loss comparison



(b) Si-IGBT 전압 리플
(b) Si-IGBT voltage ripple



(c) SiC-MOSFET 전압 리플
(c) SiC-MOSFET voltage ripple

그림 2 Si-IGBT와 SiC-MOSFET의 시뮬레이션 결과 비교

Fig 2. Simulation result comparison of Si-IGBT and SiC-MOSFET

3. 결론

본 논문에서는 SiC-MOSFET을 통한 전기차용 인버터 DC-Link 캐패시터 용량 선정을 위해 스위칭 소자의 총 손실과 전압 리플을 분석하고 Si-IGBT와 비교하여 검증하였다. 실험 결과, SiC-MOSFET의 인버터가 Si-IGBT 인버터 대비 손실 면에서 우수하고, 데드타임을 작게 설정할 수 있기 때문에 스위칭 주파수를 높일 수 있는 장점이 있어 캐패시터 용량을 감소시킬 수 있다는 결과를 얻었다.

참고 문헌

- [1] Marija Vujacic, Manel Hammami, Milan Srdovic, and Gabriele Grandi, "Analysis of dc-Link Voltage Switching Ripple in Three-Phase PWM Inverters," *Energies*, vol. 11, no. 2, p. 471, Feb. 2018.
- [2] Qingzeng Yan, Xibo Yuan, and Xiaojie Wu, "Comparison of two PWM schemes for SiC-device-based split output converters in high-switching-frequency applications," in *Proc. IET Int. Conf on Power Electron, Machines and Drives*, April 19-21, 2016, pp. 1-6.