

단상 전기자동차 양방향 충전기용 CHFL 컨버터 스위치 손실 비교분석

김재근 김승권 오원현 박성민
 홍익대학교 전자전기공학과

Comparative Analysis of Switch Losses in Cycloconverter-type High Frequency Link Converter for Single-Phase EV Bidirectional Battery Charger

Jae-Keun Kim, Seung-Gwon Kim, Won-Hyun Oh, Sung-Min Park
 Dept. of Electronic & Electrical Engineering, Hongik University

ABSTRACT

본 논문에서는 전기자동차용 단상 양방향 온보드 충전기를 위한 Cycloconverter-type high frequency link 컨버터에 Si-IGBT와 SiC-FET을 적용하여 전력반도체의 전력 손실을 예측하고 비교하고 분석한다. 와이드밴드갭 전력반도체 중 하나인 SiC-FET은 기존 Si기반의 IGBT를 대신하여 사용될 전력반도체로써 각광받고 있다. 또한, 낮은 온-저항으로 인해 적은 전력손실과 고주파 스위칭을 통한 직류단 필터의 크기감소를 통해 높은 전력밀도를 달성할 수 있다. 이에 Si-IGBT와 SiC-FET을 Cycloconverter-type high frequency link 컨버터에 적용하여 전력손실을 PSIM thermal module을 통해 시뮬레이션하고 비교 분석한다.

1. 서론

최근 대기오염이 심해짐에 따라 자동차의 내연기관에서 연소되는 화석연료에 의한 이산화탄소와 질소산화물 등의 대기오염물질을 줄이기 위한 전기자동차의 관심과 판매가 급격하게 늘어나고 있다. 전력전자분야에서는 전기자동차의 핵심부품 중에 하나인 배터리충전장치에 대한 연구가 활발히 일어나고 있으며, 전력제어방법 및 토폴로지에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다 [1]–[2]. 또한 전기자동차의 배터리의 활용성을 극대화를 시키기 위한 Vehicle-to-grid(V2G) 응용을 위한 양방향 배터리 충전기에 대한 연구 및 개발이 이루어지고 있다.

최적의 토폴로지 선택과 전력손실을 예측하는 것은 배터리 충전기 설계 및 개발에서 중요한 단계이다. 대부분의 전력손실은 수동 소자와 전력반도체에서 발생하게 되며, 특히 전력반도체의 손실은 재료특성 및 스위칭 주파수 등에 의해 변동의 여지가 크고 전력변환 효율에 많은 영향을 끼치게 된다. 이와 관련하여 양방향 배터리 충전기에 Cycloconverter-type high frequency link (CHFL) 컨버터 구조를 적용하고 SiC-FET을 활용한다면, 전력변환 과정의 줄임과 동시에 전력반도체 스위치 손실을 감소시킴으로써 전력변환 시스템의 전력밀도를 높이고, 부피 및 중량을 감소시킬 수 있다.

본 논문에서는 SiC-FET을 적용한 전기자동차 양방향 충전기용 CHFL 컨버터를 제안한다. Si-IGBT와 SiC-FET을 각각 적용한 시뮬레이션을 이용한 전력손실 평가결과를 토대로 제안된 회로 및 SiC-FET의 우수성을 확인한다.

2. Cycloconverter-type High Frequency Link 컨버터

CHFL 컨버터는 그림1과 같이 dc-ac변환을 위한 위상천이 풀-브릿지 컨버터와 ac-ac변환을 위한 양방향 스위치를 사용한 싸이클로 컨버터, 그리고 galvanic절연을 위한 고주파 변압기로 구성된다. 위상천이 풀-브릿지 컨버터에서 Fig.2(a)의 V_{pri} 와 같이 바이폴라 고주파 파형이 만들어지게 되며 고주파 변압기를 통해

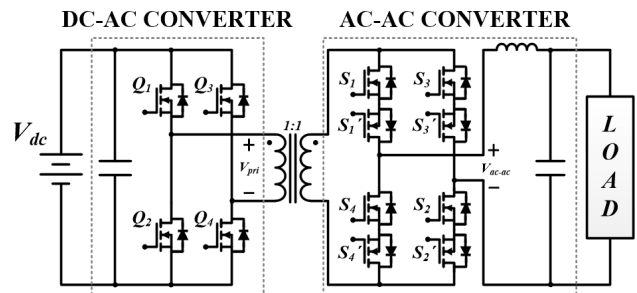


Fig. 1 Cycloconverter-type High Frequency Link 컨버터

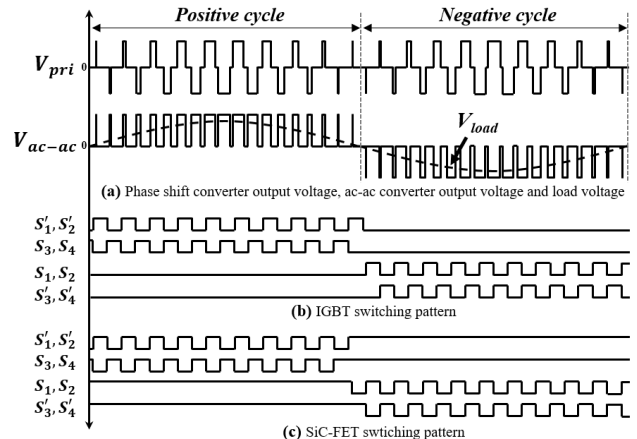


Fig. 2 CHFL컨버터의 전력변환과정 및 스위치별 스위칭 패턴

2차측으로 에너지가 전달되게 된다. 싸이클로 컨버터에서 입력 받은 바이폴라 형태의 전압을 Fig.2(a)의 V_{ac-ac} 와 같이 유니폴라 형태로 정류하기 위하여 Fig.2(b)와 Fig.2(c)와 같은 게이트 신호가 발생하게 되며 정류된 전압은 LC필터를 통해 그리드와 연결되게 된다. 싸이클로 컨버터는 양방향 스위치를 적용하여 정방향과 역방향으로 전류의 흐름을 제어할 수 있도록 되어있다. Fig.2(b)와 Fig.2(c)와 같이 스위칭 패턴을 조정하여 원하는 전압 및 전류를 제어할 수 있다. Fig.2(b)는 Si-IGBT에서 사용할 수 있는 스위칭 패턴이다. 양방향 스위치를 하나의 Arm으로써 사용하게 되면 단방향 도통만 가능한 IGBT 특성상 역병렬 다이오드를 통해 전류가 도통되며 문턱전압으로 인해 도통손실이 높게 발생하게 된다. 또한 이와 같은 스위칭 패턴으로 SiC-FET을 사용하게 될 경우 일반적으로 SiC-FET은 Si기반의 전력반도체보다 바디다이오드의 문턱전압이 높아 도통손실이 높게 발생하게 된다. 때문에 SiC-FET을 사용할 경우 Fig.2(c)와 같이 스위칭 패턴을 변경하여

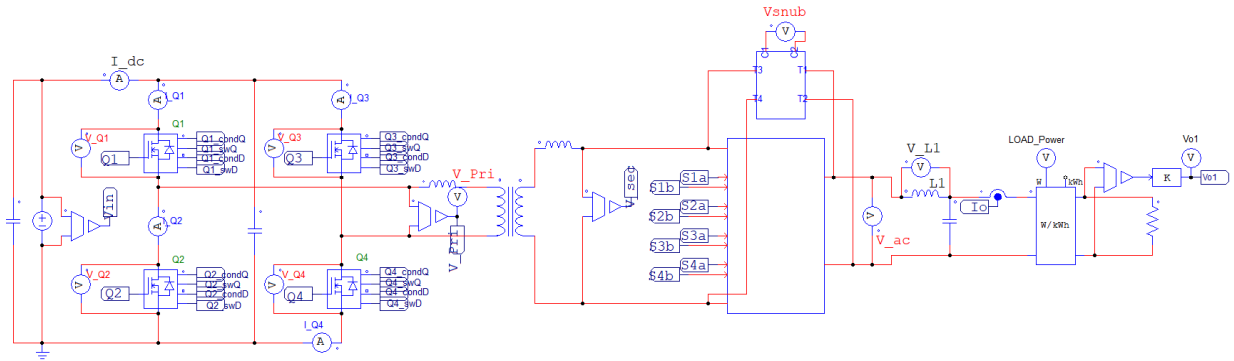


Fig. 3 Cycloconverter-type High Frequency Link 컨버터 PSIM 시뮬레이션 회로

역방향으로도 채널을 통해 도통될 수 있는 특성을 이용한다면 높은 문턱전압에 의한 전력손실을 회피할 수 있다. 이때의 전력 손실은 대부분 온-상태 저항에 의한 전력 손실로 발생하기 때문에 낮은 도통손실이 발생하게 된다. 또한 전류가 도통되는 동안 스위치를 턴오프하여도 역병렬 다이오드를 통해 짧은 시간 도통이 되어, 턴온-오프동안 스위치는 zero voltage switching (ZVS) 동작을 하게 되며, 스위칭 전력손실을 대폭 감소시킬 수 있다. 결과적으로 1차측에서 전달되는 전력은 손실을 최소화하여 정류될 수 있다.

3. 시뮬레이션 결과

Fig.3은 PSIM을 이용한 시뮬레이션 회로를 나타내며 스위칭 소자로는 Infineon의 IKW30N65 ES5 (IGBT)와 CREE의 C2M0040120D (SiC-FET)이다. 각각의 스위칭 소자는 3.3kW CHFL 컨버터의 정격전압과 정격전류를 고려하여 400V, 22A를 기준으로 여유를 두어 비슷한 정격의 스위칭 소자로 선정하였다. 회로에 설정된 스위칭 소자의 스위칭 주파수는 40kHz이며 25°C를 기준으로 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션 결과는 Fig.4과 Table I에 나타내며 각각 Fig.2(b)의 스위칭 패턴을 사용한 IGBT와 SiC-FET과 Fig.2(c)의 스위칭 패턴을 사용한 SiC-FET (SiC-FET_{CH})을 시뮬레이션을 하였다. 시뮬레이션 결과 위상천이 풀-브릿지 컨버터에서는 SiC-FET이 IGBT보다 전력손실이 낮으나, 싸이클로 컨버터에서 IGBT와 동일한 스위칭 패턴을 사용한 SiC-FET은 높은 전도손실이 발생한다. 이는 앞서 언급했던 바디 다이오드의 높은 문턱전압으로 인해 손실이 높게 발생하게 되는 것이다. 이를 개선하여 시뮬레이션한 결과가 Fig.4(c), SiC-FET_{CH}이다. 도통손실은 대부분 하나의 arm당 2개의 스위칭 소자의 온-상태 저항에 의한 전력 손실이 발생하나 기존 IGBT의 스위칭 패턴을 사용했을 때보다 전력손실이 현저하게 감소하는 모습을 보인다. 또한, 스위칭 손실이 ZVS 턴온, 턴오프를 하기 때문에 스위칭 손실이 거의 발생하지 않는다. 이는 곧 빠른 스위칭 속도 및 낮은 온-상태 저항으로 인해 SiC-FET은 기존 Si-IGBT에 비해 현저히 낮은 파워 디바이스 손실을 보이며, 스위칭 패턴의 연구 및 개선을 통해 보다 적은 손실을 이룰 수가 있다.

4. 결론

본 논문에서는 기존의 Si-IGBT와 SiC-FET을 CHFL 컨버터에 적용하여 스위치의 전력손실을 비교하였다. CHFL 컨버터에 와이드밴드갭 디바이스인 SiC를 적용하여 기존의 Si-IGBT보다 적은 손실 운전이 가능함을 시뮬레이션 결과를 통해 확인하였다. 이러한 전력손실 감소는 방열에 소비하는 공간의 활용도를 높일 수 있고, 보다 높은 스위칭 주파수를 사용할 수 있어서 최종적으로 컨버터의 전력밀도를 높일 수가 있다. 결과적으로 CHFL 컨버터와 SiC-FET은 고전력밀도 컨버터를 이루는데 우수한 성능을 발휘할 것으로 기대된다.

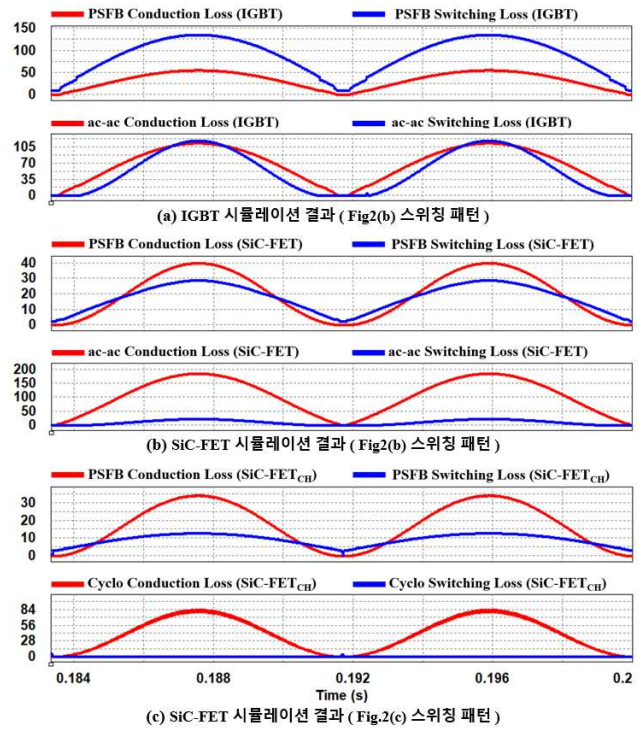


Fig. 4 PSIM thermal module 시뮬레이션 결과

Parameter		IGBT	SiC-FET	SiC-FET _{CH}
phase shift converter	conduction loss	32.96W	19.96W	17.79W
	switching loss	87.99W	17.73W	9.62W
	total loss	120.95W	37.69W	27.42W
ac-ac converter	conduction loss	66.89W	104.99W	43.31W
	switching loss	53.19W	10.48W	0.043-32mW
	total loss	120.08W	115.48W	43.35W

이 논문은 2017년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2017R1C1B2008200)

참고 문헌

- [1]Minho Kwon, and Sewan Choi. "An electrolytic capacitorless bidirectional EV charger for V2G and V2H applications." IEEE Trans. Power Electron., vol. 32, no. 9, pp. 6792-6799, Sept. 2017.
- [2]Lu, Juncheng, et al. "Applying variable-switching-frequency variable-phase-shift control and E-mode GaN HEMTs to an indirect matrix converter-based EV battery charger." IEEE Trans. Transport. Electric., vol. 3, no. 3, pp. 554-564, July 2017.