800-V 전기자동차 OBC DC-DC단 최적설계를 위한 스위칭 소자 비교분석

송지호, 박기범
한국과학기술원

Comparative analysis of switching devices for optimal design of on-board charger DC-DC stage in 800-V electric vehicle

Jiho Song, Ki-Bum Park
Korea Advanced Institute of Science and Technology

ABSTRACT

최근 충전 시간을 단축하기 위해 전기자동차 배터리 전압이 800-V로 증가하고 있는 추세이다. 이에 따라 다양한 제조사로부터 1200-V 정격의 상용 스위칭 소자가 개발되고 있다. 하지만 이러한 소자들은 다양한 성능을 가지고 있기 때문에, 어떤 소자의 손실이 가장 낮게 나타나는지 분석이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 전기차 탑재형 충전기 (on-board charger; OBC)의 DC-DC단의 최적설계를 위해 손실 측면에서 스위칭 소자 비교분석을 진행하였다.

1. 서 론

최근 전기차 충전 시간을 줄이기 위해 배터리 전압이 800-V로 증가하고 있는 추세이다. 전기차 내부에는 외부의 교류 전력을 배터리 충전에 필요한 직류 전력으로 변환하는 탑재형 충전기 (on-board charger; OBC)가 존재한다. OBC는 그림1과 같이 PFC단과 DC-DC단으로 구성되며, DC-DC단 토폴로지로 양방향 전력전송이 가능한 Dual Active Bridge (DAB) 컨버터를 적용하고 있는 추세이다[1]-[3].

DAB 각 스위치 양단에 걸리는 전압이 DC링크 전압과 동일하기 때문에, 스위치 전압 800-V 이상의 정격전압을 갖는 스위칭 소자가 필요하다. 이를 위해 Infineon, Cree 등의 다양한 제조사에서 1200-V 정격의 상용 스위칭 소자를 만들고 있으며, 특히 스위칭 손실을 줄이기 위해 SiC MOSFET을 개발하고 있는 추세이다.

하지만 이러한 SiC MOSFET은 그림2와 같이 다양한 on-state 전압강하 및 스위칭 에너지를 가지고 있으므로 어떤 제조사의 스위칭 소자 손실이 가장 작은지 분석할 필요가 있다. 이에 따라 본 논문에서는 OBC DC-DC단 최적설계를 위해 쿨링 시스템 열저항, 외부 온도 등의 다양한 동작조건을 고려하여 손실 측면에서 스위칭 소자 비교분석을 진행하였다.

2. 스위칭 소자 비교분석

1.1 스위칭 소자 전도 손실 모델

스위칭 소자의 평균 전도 손실 P_{cond} 은 식 (1)을 통해 계산되었다. 여기서 i_{sw} 는 스위치 전류, T_{jc} 는 스위칭 소자 접합온도, dt는 샘플링 시간, T는 기본 주파수에 해당하는 주기,

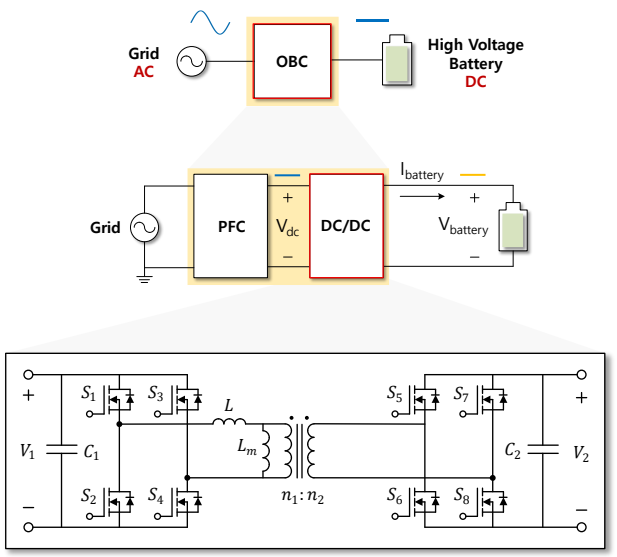

그림1 전기차 OBC DC-DC단 DAB 컨버터 개략도
Fig.1 Schematic of DAB converter for DC-DC stage of OBC in EV

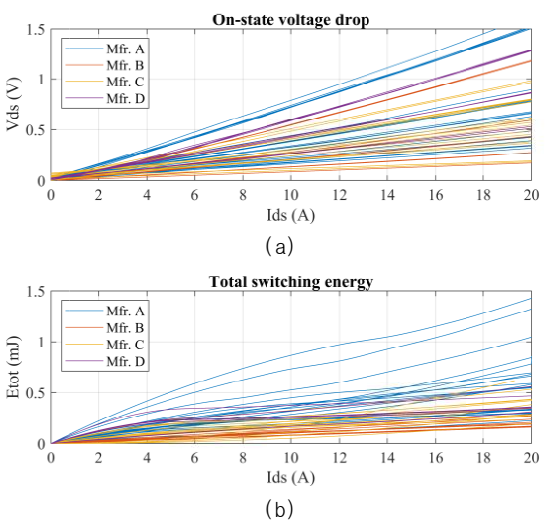

그림2 다양한 1200V SiC MOSFET의 손실 특성 비교 (a) On-state 전압강하 (b) 스위칭 손실 에너지
Fig.2 Comparison of loss characteristic of various SiC MOSFETs (a) on-state voltage drop (b) switching loss energy

그리고 V_{on} 는 스위치 전류가 흐를 때 스위치 양단 전압을 의미한다. 이때 V_{on} 는 스위칭 소자 데이터시트로부터 구할 수 있다.

$$P_{cond} = \frac{1}{T}\sum V_{on}(i_{sw}, T_{jc}) \times i_{sw} dt \quad (1)$$

1.2 스위칭 소자 스위칭 손실 모델

스위칭 소자의 평균 스위칭 손실 P_{sw} 은 식 (2)를 통해 계산되었다. 여기서 $i_{sw@on/off}$ 는 turn-on/off 할 때 발생하는 스위치 전류, T_{jc} 는 스위칭 소자 접합온도, $V_{sw@on/off}$ 는 turn-on/off 할 때 발생하는 스위치 전압, T 는 기본 주파수에 해당하는 주기, V_{test} 는 스위칭 손실 에너지 측정할 때의 스위치 전압, 그리고 $E_{sw@on/off}$ 는 turn-on/off 할 때 발생하는 스위치 손실 에너지를 의미한다. 이때 V_{test} 와 $E_{sw@on/off}$ 는 스위칭 소자 데이터시트로부터 구할 수 있다.

$$P_{sw} = \frac{1}{T} \times E_{sw@on/off}(i_{sw@on/off}, T_{jc}) \times \frac{V_{sw@on/off}}{V_{test}} \quad (2)$$

1.3 스위칭 소자 열 모델

그림3은 스위칭 소자 열 모델을 나타낸 것이며, 스위칭 소자의 접합온도 T_{jc} 는 식 (3)를 통해 계산되었다. 여기서 R_{jc} 는 스위칭 소자의 접합-케이스 열저항, R_{ca} 는 쿨링 시스템 열저항, T_a 는 외부온도를 의미한다. 그리고 P_{tot} 은 각 스위칭 소자에서 발생하는 평균 전도 손실과 평균 스위칭 손실을 합한 값이다. 이때 R_{jc} 는 스위칭 소자 데이터시트로부터 구할 수 있다. V_{on} 과 $E_{sw@on/off}$ 이 스위치 접합 온도에 따라 값이 변하므로, 이를 고려하여 특정 온도에 수렴할 때까지 반복계산을 수행하였다.

$$T_{jc} = R_{jc}P_{tot} + R_{ca}P_{tot} + T_a \quad (3)$$

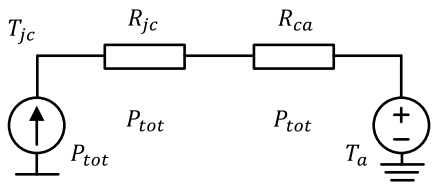

그림3 스위칭 소자 열 모델 개략도
Fig.3 Schematic of thermal model of switching devices

1.4 스위칭 소자 비교분석 결과

그림4와 그림5는 입출력 전압 $V_1 = V_2 = 800\,\mathrm{V}$, 스위칭 주파수 $f_{sw} = 50\,\mathrm{kHz}$, 부스트 인덕턴스 $L = 30.53\,\mu\mathrm{H}$, 턴 수비 $n_1/n_2 = 1$, 듀티 $D = 0.5$, 출력파워 $P_{out} = 11\,\mathrm{kW}$, 위상차 $\phi = 10°$ 일 때, 쿨링 시스템 열저항 R_{ca}, 외부 온도 T_a 에 따른 제조사별 스위칭 소자 손실 및 접합 온도를 비교한 것이다.

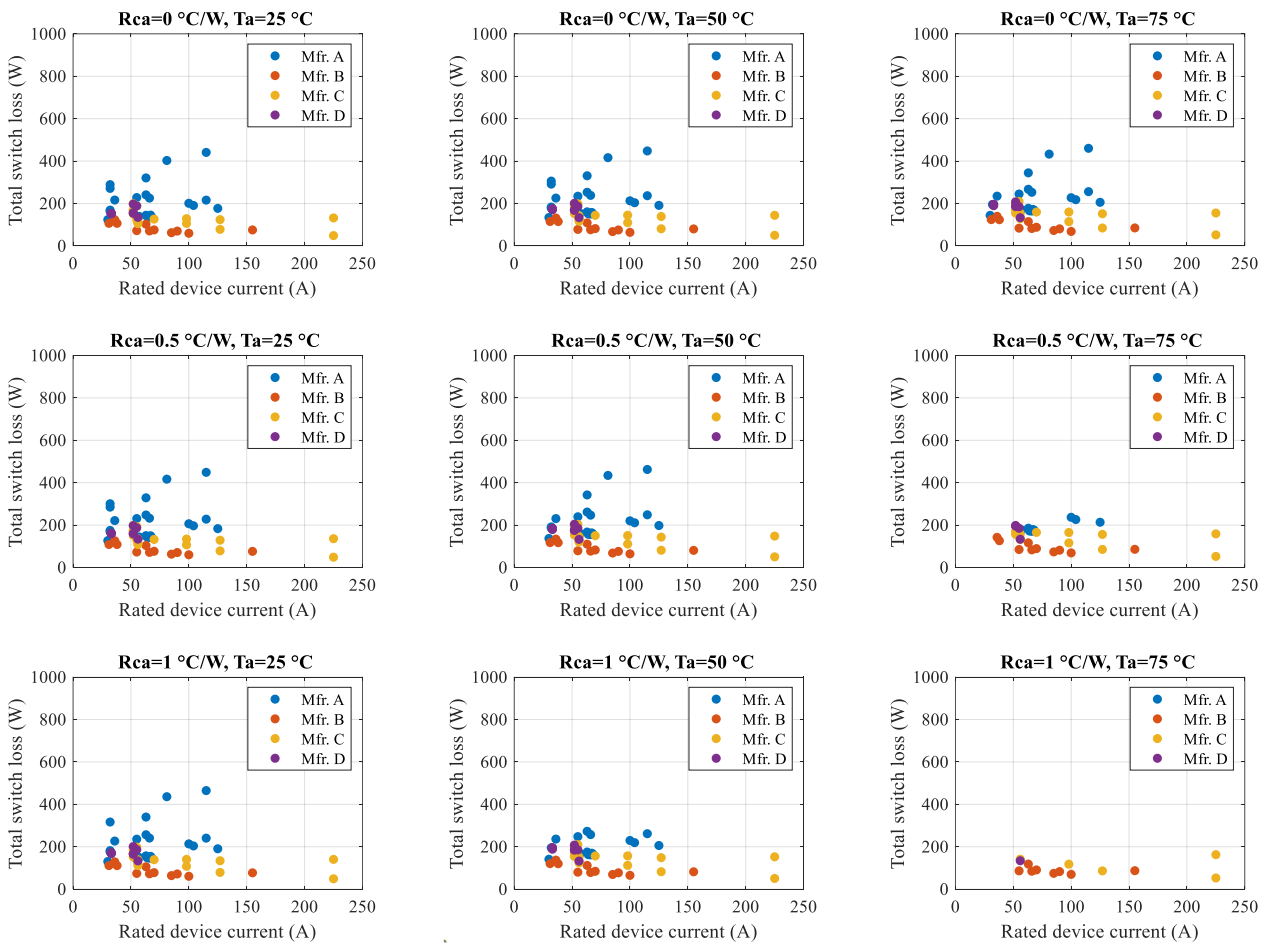

그림4 쿨링 파라미터에 따른 제조사별 스위칭 소자(SiC MOSFET) 손실 비교
Fig.4 Comparison of switch losses depending on cooling parameters

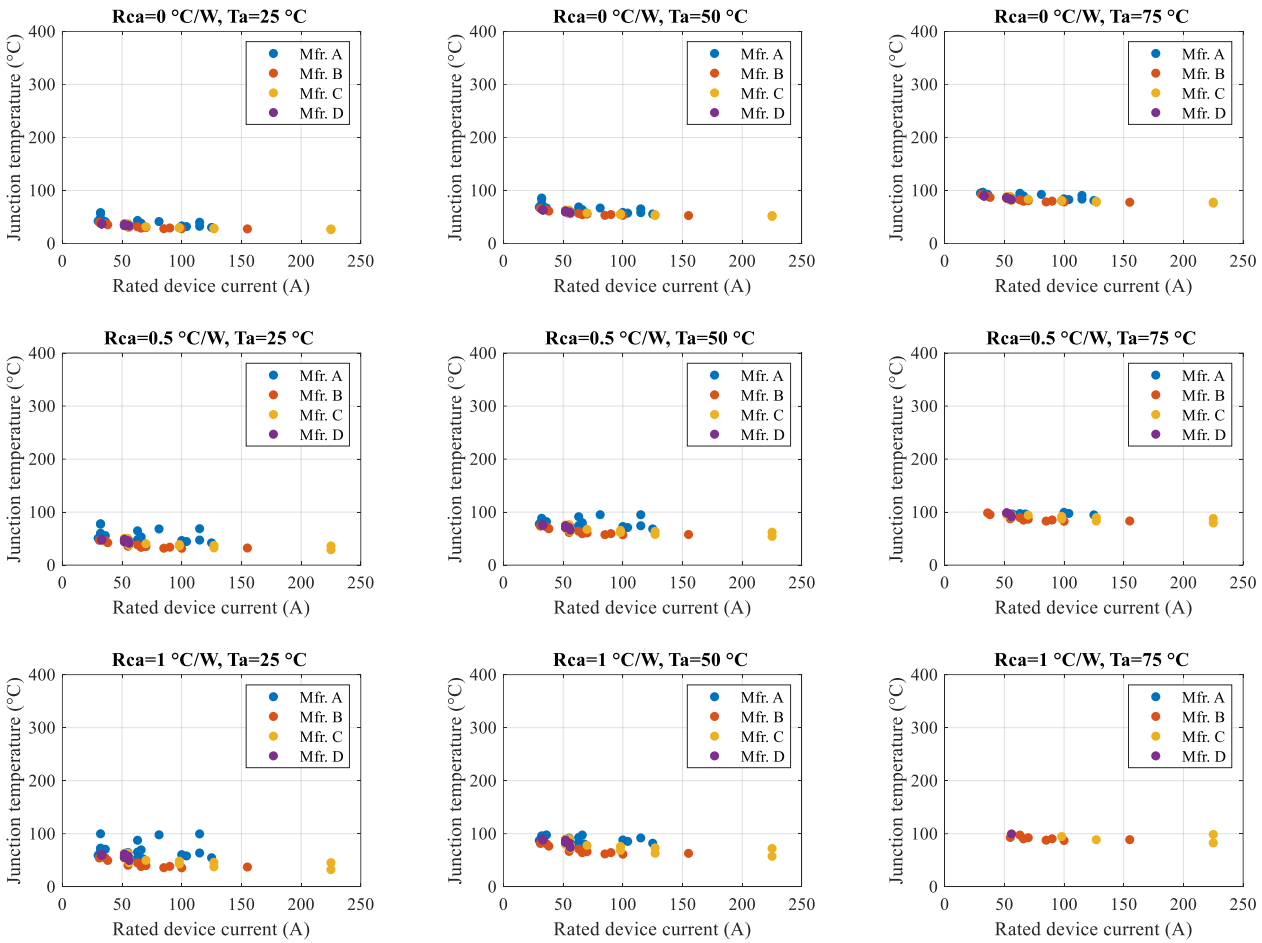

그림5 쿨링 파라미터에 따른 제조사별 스위칭 소자(SiC MOSFET) 접합온도 비교
Fig.5 Comparison of switch junction temperatures depending on cooling parameters

쿨링 시스템 열저항 R_{ca} 이 클수록, 그리고 외부 온도 T_a 가 높을수록 식 (3)에 따라 스위치 접합 온도가 높아지는 경향이 있으며, 최대 온도 100℃를 초과하는 스위치 소자들은 그래프에서 제외하였다. 여기서 쿨링 시스템 열저항 R_{ca} 의 증가는 동일한 접합온도를 유지하기 위해 요구되는 쿨링 시스템 성능 및 비용을 감소시킬 수 있다는 것을 의미한다. 하지만 쿨링 성능이 감소함에 따라 온도가 증가하는 결과를 가져온다. 그리고 외부 온도 T_a 가 높아지는 것은 소자가 고온 환경에 노출되어 있다는 것을 의미한다. 전반적으로 제조사 B와 제조사 C의 스위칭 소자가 비교적 손실이 작음에 따라 쿨링이 좋지 않은 조건에서도 동작이 가능함을 확인하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 800-V 배터리 충전을 위한 전기자동차 OBC DC-DC단에 필요한 1200-V 정격의 스위칭 소자(SiC MOSFET)를 제조사별로 손실과 접합온도 측면에서 비교분석을 진행하였다. 비교분석 결과, 출력파워 11kW, 스위칭 주파수 50 kHz에 대해서 쿨링 조건이 악화됨에 따라, 즉 쿨링 시스템 열저항과 외부 온도가 증가함에 따라, 전반적으로 제조사 B와 제조사 C의 스위칭 소자들의 손실과 접합온도가 작아서 최악의 쿨링 조건에서도 최대 온도 100℃ 내로 동작이 가능함을 확인하였다.

추후 연구로서, 쿨링 조건 뿐만 아니라 입출력 전압, 스위칭 주파수 등의 다양한 동작조건을 고려하여 컨버터 최적설계를 위한 스위칭 소자 비교분석을 확장할 예정이다.

참 고 문 헌

[1] I. Aghabali, J. Bauman, P. J. Kollmeyer, Y. Wang, B. Bilgin and A. Emadi, "800-V Electric Vehicle Powertrains: Review and Analysis of Benefits, Challenges, and Future Trends," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 7, no. 3, pp. 927-948, Sept. 2021.

[2] R. Pradhan, M. Narimani and A. Emadi, "Converter Topology Comparison for a Two-Stage Level-2 Onboard Charger in 800-V EV Powertrains," *IECON 2022 – 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Brussels, Belgium, 2022, pp. 1-6.

[3] Z. Li, K. -W. E. Cheng, K. K. W. Chan and J. Hu, "Enhanced EV Charging Experience with an Ultra-rapid Charger and 800-V Battery," *2022 IEEE 9th International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA)*, Hong Kong, Hong Kong, 2022, pp. 1-5.