

전기자동차 OBC 용 Phase-Shifted Full-Bridge 컨버터의 고효율 및 고전력밀도 달성을 위한 스위칭 주파수 설계

이재한, 손원진, 안상준, 변종은, 이병국[†]
성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

Switching Frequency Design of Phase-Shifted Full-Bridge Converter in On Board Charger in Electric Vehicles for High Efficiency and High Power Density

Jae Han Lee, Won-Jin Son, Sangjoon Ann, Jongeun Byun, Byoung Kuk Lee[†]
Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

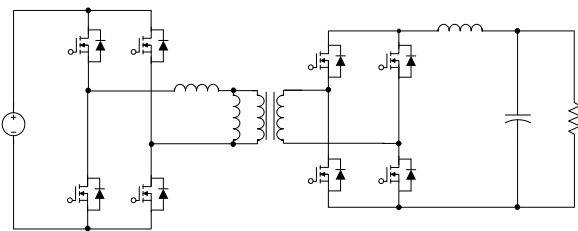
ABSTRACT

본 논문에서는 3.3 [kW] on-board charger (OBC) 용 phase-shifted full-bridge (PSFB) 컨버터의 고효율 및 고전력밀도 달성을 위한 스위칭 주파수 설계 방안을 제안한다. 스위칭 주파수에 따라 달라지는 손실 양상 및 전력 밀도에 대해 분석하기 위해 각 스위칭 주파수 별 반도체 소자 손실과 수동 소자 손실을 계산하고, 수동 소자의 부피 변화에 따른 전력밀도 변화를 분석한다. 분석 결과를 바탕으로 고효율 및 고전력밀도 달성을 위한 시스템 설계 포인트를 선정하고 시뮬레이션을 통하여 설계 결과를 검증한다.

1. 서론

전기자동차용 on-board charger (OBC) 시스템은 차량 내부에 설치되는 시스템으로 고효율 및 고전력밀도 달성에 대한 요구가 증가하고 있다. 일반적으로는 스위칭 주파수를 증가시킴으로써 수동 소자의 부피를 감소시킬 수 있지만, 기존의 Si 반도체 소자를 사용하는 경우 스위치의 스위칭 특성으로 인해 스위칭 주파수의 최대값이 제한된다. 하지만 최근에는 스위칭 특성이 우수한 wide band gap (WBG) 소자가 개발되어 낮은 스위칭 손실로 높은 주파수의 스위칭 동작이 가능하다. 따라서 OBC 시스템의 고효율 및 고전력밀도 달성을 위해 높은 주파수 범위에서의 손실 및 전력밀도 분석이 필요하다.

일반적으로 OBC 시스템의 DC-DC 컨버터는 phase shift (PS) 제어로 출력을 제어하는 phase-shifted full-bridge (PSFB) 컨버터 또는 주파수 제어로 출력을 제어하는 LLC 공진형 컨버터를 사용한다.^{[1],[2]} 이 중 PSFB 컨버터는 PS 제어를 통하여 고정 주파수에서 넓은 전압 이득을 얻을 수 있기 때문에 효율 및 전력밀도를 고려한 최적 주파수 설계가 가능하다.



따라서 본 논문에서는, PSFB 컨버터의 스위칭 주파수에 따른 반도체 소자 및 수동 소자의 손실을 분석하고 스위칭 주파수가 증가함에 따라 감소하는 시스템 부피를 도출하여 이를 손실 양상과 비교 분석한다. 분석 결과를 바탕으로, 고효율 및 고전력밀도를 달성을 위한 스위칭 주파수를 선정한다.

2. 스위칭 주파수에 따른 시스템 설계

2.1 반도체 소자 선정 및 시스템 설계

그림 1은 PSFB를 사용하는 OBC의 회로도를 나타낸다. 이 중 1차측 인버터의 스위치는 고주파 동작을 고려하여 스위칭 특성이 우수한 SiC MOSFET C3M0120090D를 선정하였고 2차측 스위치는 변압기 턴 비를 고려하여 전압정격이 더 높은 C2M0160120D로 선정하였다. 이 때 1차측 스위치의 경우 스위칭 특성이 우수한 반면 역병렬 다이오드의 V_F 가 크게 나타나기 때문에 역병렬 다이오드로서 순방향 전압 강하가 낮은 STBR3012WY를 추가하여 다이오드 손실을 개선하였다.

인덕터 및 변압기의 파라미터는 실제 PSFB 컨버터의 입력 전력 전압을 고려하여 $V_{in}=380$ [V], $V_o=480-750$ [V]를 기준으로 선정하였다. 효율 및 전력밀도를 고려한 최적 스위칭 주파수 설계를 위하여 스위칭 주파수를 100 [kHz]에서부터 50 [kHz] 간격으로 증가시키며 파라미터 설계를 진행하였고, 스위칭 손실의 과도한 증가를 방지하기 위하여 최대 스위칭 주파수를 300 [kHz]로 제한하였다. 스위칭 주파수에 따른 시스템 파라미터 설계 결과는 표 1과 같다.

Parameter	Value				
V_{in} [V]	380				
V_o [V]	480 - 750				
f_{sw} [kHz]	100	150	200	250	300
1차측 스위치	C3M0120090D (900V, 23A)				
1차측 다이오드	STBR3012WY (1200V, 30A)				
2차측 스위치	C2M0160120D (1200V, 19A)				
L_m [mH]	1.913	1.276	0.956	0.765	0.638
L_s [H]	6.252	4.168	3.126	2.501	2.084
L_o [H]	1.857	1.238	0.929	0.743	0.619
N_p	18	16	16	14	14
N_s	45	40	40	35	35

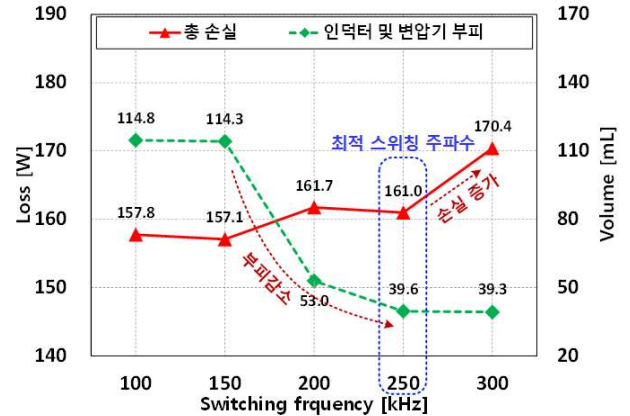
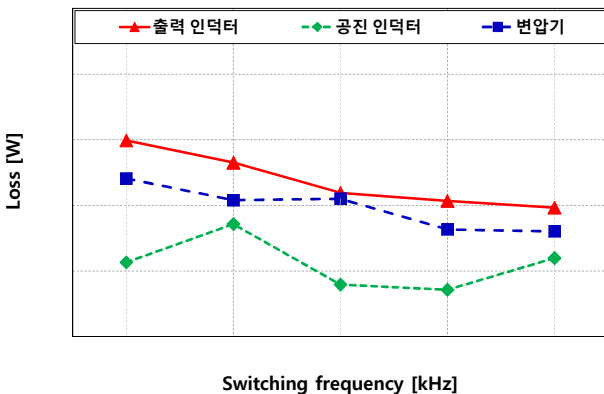
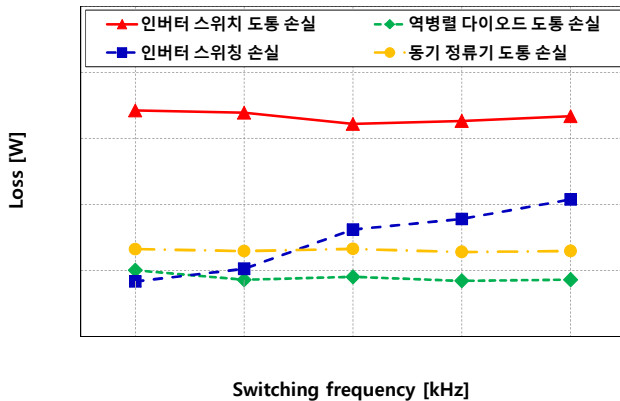
Parameter	Value				
f_{sw} [kHz]	100	150	200	250	300
변압기 코어	50/50	50/50	40/40	35/35	35/35
공진 인덕터 코어	35/35	32/20	26/20	20/20	20/16
출력 인덕터 코어	CH610	CH572	CH508	CH508	CH468

2.2 인덕터 및 변압기 설계

인덕터 및 변압기와 같은 수동 소자의 부피는 시스템 부피에서 큰 비중을 차지하기 때문에 스위칭 주파수에 따른 최적 설계를 통해 전체 시스템의 전력밀도를 개선할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 각각의 스위칭 주파수에서 인덕터 및 변압기의 크기를 최소화하는 방향으로 설계를 진행하였다. 인덕터 및 변압기의 코어는 표 1의 파라미터를 적용한 시뮬레이션을 통하여 도출된 각 소자에 흐르는 전류를 기반으로 설계하였으며 설계 결과는 표 2와 같다. 코어 선정 시 교류 전류가 흐르는 L_s 와 변압기는 ferrite 코어 중 자화 특성이 좋은 PC95 재질의 코어를 사용하였고, 직류 전류가 흐르는 L_o 의 경우 직류 중첩 특성이 좋은 high flux 재질의 코어를 선정하였다. Wire 직경 및 turn 수는 인덕턴스와 전류 크기를 고려하여 선정하였다.

2.3 손실 및 부피 비교

그림 2, 3은 스위칭 주파수에 따른 반도체 소자와 수동 소자의 손실 양상을 나타낸다. 그림 2에서 반도체 소자의 손실



분석은 1차측 ZVS 동작 및 2차측 동기정류 동작을 고려하여 진행하였으며 전체 손실에 영향이 적은 항목은 분석에서 제외하였다. 그림 3은 인덕터 및 변압기의 손실을 나타낸 것으로, high flux 코어의 코어 손실은 steinmetz 방정식을 통해 계산하였고, ferrite 코어의 코어 손실은 제조사의 datasheet를 기반으로 계산하였다. 그림 4는 스위칭 주파수에 따른 총 손실과 코어의 부피의 변화 양상을 나타낸다. 그림 4에서 스위칭 주파수에 따라 공진 인덕터 및 변압기의 코어 size가 급격히 감소하는 구간이 있는 반면, 총 손실이 급격히 증가하는 구간도 존재한다. 따라서 본 논문에서는 효율과 전력밀도를 모두 고려하여 PSFB 컨버터의 스위칭 주파수를 250 [kHz]로 선정하였다.

3. 결론

본 논문에서는 3.3 [kW] on-board charger (OBC) 용 phase-shifted full-bridge (PSFB) 컨버터의 고효율 및 고전력밀도 달성을 위한 최적 스위칭 주파수 설계 방안을 제안하였다. 스위칭 주파수에 따라 시스템 파라미터를 설계하고 반도체 소자와 수동 소자의 손실을 계산하였으며, 전력밀도 분석 결과와의 비교를 통하여 고효율 및 고전력밀도 달성을 위한 최적 스위칭 주파수를 설계하였다.

본 연구는 2018년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 에너지인력양성사업으로 지원받아 수행한 인력양성 성과입니다. (No. 20184030202190)

참고 문헌

- [1] Hengshan Xu, Zhongdong Yin, Yushan Zhao and Yongzhang Huang, "Accurate Design of High-Efficiency LLC Resonant Converter With Wide Output Voltage", IEEE Access., vol 5, pp. 26653 - 26665, Sept, 2017.
- [2] C. Zhao, X. Wu, and Z. Qian, "Design and comparison of two frontend DC/DC converters: LLC resonant converter and soft-switched phaseshifted full-bridge converter with primary-side energy storage inductor," in Proc.24th Annu. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo., pp. 1073 - 1077, Sep, 2009.