

PSFB 컨버터를 이용한 전기자동차용 6.6kW 탑재형 충전기 설계

안정훈, 김윤성, 구근완, 이병국*
성균관대학교 정보통신대학

Design of 6.6kW On-Board Battery Charger for Electric Vehicle using Phase-Shift Full-Bridge Converter

Jung Hoon Ahn, Yun Sung Kim, Keun Wan Koo, and Byoung Kuk Lee*
College of Information & Communication Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문은 전기자동차 (Electric Vehicles, EVs)용 리튬 이온 (Li Ion) 배터리의 충전 및 충전 속도 향상을 위하여 6.6kW급 고전력 탑재형 충전기 (On Board Charger, OBC)를 설계한다. 높은 부하 가변범위와 차량 실장 특성을 고려하여 가용 가능한 토폴로지들 중 최적의 토폴로지로서 위상천이 폴 브릿지 컨버터 (Phase Shift Full Bridge, PSFB)를 제안하고 타당성을 밝힌다. 또한 토폴로지를 구동하는 스위칭 주파수와 주요 수동소자의 변화에 따른 부피와 효율 등의 Trade Off 관계를 이론적으로 전개하여 최적화한다.

1. 서론

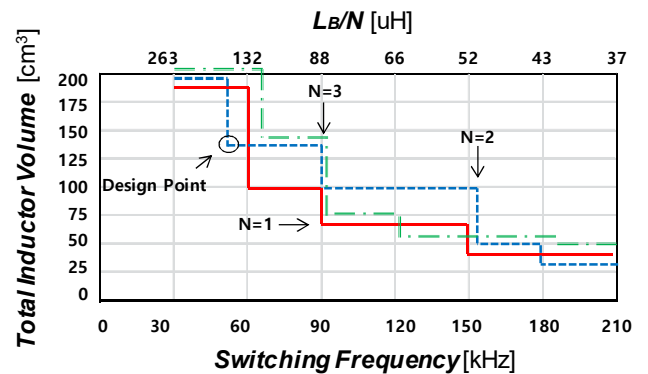
최근 에너지 환경 문제의 심화로 EV를 포함하는 친환경 차량에 대한 정책적 지원 및 관심이 모아지고 있다. 이때, EV의 동력원이 되는 고전압 배터리를 보다 빠르고 높은 효율로 충전하는 충전기의 개발은 EV의 성공적인 보급 상용화 시점을 앞당겨줄 핵심기술이다. 특히, 가정이나 빌딩에서 충전이 가능한 OBC 기술은 부족한 EV 충전 인프라의 대응책으로서 주목받고 있으며, 다수의 업체 및 기관을 통하여 그 연구가 활발하다. 하지만, 개발되고 있는 3.3kW급 OBC의 경우 고전압 배터리의 완충을 위하여 6시간 이상을 필요로 하기 때문에 내연기관 차량에 익숙한 사용자의 편이를 보장할 수 없다^[1].

본 논문에서는 OBC의 배터리 충전시간을 향상시키기 위하여 보편적인 용량의 두 배에 해당하는 6.6kW급 OBC를 설계한다. 차량 탑재 특성과 증가된 용량을 반영하여 토폴로지의 선정에서부터 주요 소자 설계까지의 과정을 기술한다. 특히 비대해진 시스템이 EV의 일충전 거리를 감소시킴에도 불구하고 고효율 설계에 과집중된 종래의 방식과 달리 모든 소자의 선정에 있어서 전력밀도(부피, 밀도)와 관련된 Trade Off 관계를 함께 고려함으로써 EV를 위한 OBC설계의 최적점을 제안한다.

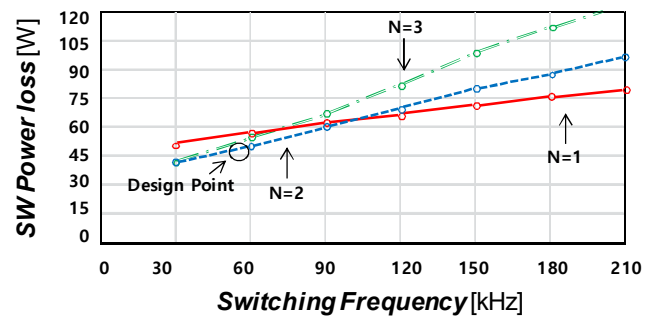
2. 6.6kW급 PFC 컨버터 설계

충전기의 입력단에는 입력전류의 품질 향상을 강제하는 국제 규격 IEC 61000 3 2 의 만족을 위해 PFC 컨버터가 필수적이다. 설계의 최적화를 위하여 6.6kW급 다상 인터리브드 PFC의 상의 개수와 주파수에 따른 부피 및 손실의 Trade Off 곡선을 구하고 그림 1로 나타내었다. 인덕터 총 부피 및 스위칭

손실의 총합의 관점에서 단상 PFC의 성능이 우수하나 개별 스위치에서 발생하는 도통손실 및 발열이 가장 높아 6.6kW의 고전력 시스템에 적합하지 않다. 단상 PFC 보다 다상 PFC의 스위치 손실합이 낮은 영역은 90kHz 이하에 위치하며, 이때의 최저 부피에서 손실이 가장 작은 최적점은 50kHz로 스위칭 하는 2상 인터리브드 방식으로 도출된다. 인덕터 전류 및 출력전압



(a) N상 PFC 회로의 인덕터 부피 [창성 High Flux 트로이달 코어(2적층), CCM 동작, 최대 상전류 리플률: 0.4]



(b) N상 PFC 회로의 반도체 소자에서 발생하는 손실 [MOSFET : IPW60R045CP, DIODE : DSEI60-06A, L/N=158uH, CCM]

그림 1 6.6kW급 다상 인터리브드 PFC 컨버터의 최적 설계점
Fig. 1 Optimal design point of 6.6kW interleaved boost PFC converter

$$L_B = \frac{V_o \times n}{4 \times f_s \times \Delta I_{L,pk-pk,max}} \quad (1)$$

$$C_o = \frac{P_o}{2 \times w_s \times \left(\frac{V_o}{\Delta v_o} \right)} \quad (2)$$

의 리플을 40%, 16V로 하면, 수식 (1), (2)를 이용하여 나머지 파라미터 및 소자를 표 1과 같이 결정 할 수 있다.

표 1 선정된 6.6kW급 PFC 컨버터 구성 소자
Table 1 Major element selected for 6.6kW PFC

SW	IPW60R45CP	Co	2.82mF [470uF/450V *6]
DIODE	DSEI60 06A	Lo	CH468123 [320uH, 2적층]
Rectifier	DX50B80 50A	IC	UCC28070

3. 6.6kW급 DC-DC 컨버터 설계

OBC의 출력단에는 전기적 절연 및 충전알고리즘의 구현을 위하여 절연형 컨버터를 사용한다. 전체 시스템의 전력밀도를 높이고 손실을 최소화하기 위해서는 공진형 토폴로지의 사용이 필수적이다. 하지만, 3.3kW OBC에 주로 사용된 SRC, LLC 등 부하 공진형 컨버터의 경우 6.6kW OBC에 그대로 적용할 경우 넓은 부하 범위의 제어가 가능한 공진 네트워크의 설계가 어려우며, 더 큰 공진 전류 스트레스를 감당해야 하기 때문에 시스템이 비대해진다. 또한, 가변 주파수 제어를 하는 이들 방식은 EMI 해석 및 Filter 설계 또한 불리하다. 반면에 PSFB 컨버터의 경우 넓은 부하범위에도 고정주파수로 선형적인 제어 및 ZVS가 용이하여 신뢰성 있는 CC CV 제어를 통한 배터리 충전이 가능하다. 따라서, 6.6kW급의 고전력 탑재형 충전기에서 기존 SRC나 LLC 보다 PSFB 컨버터가 경쟁력이 있다.

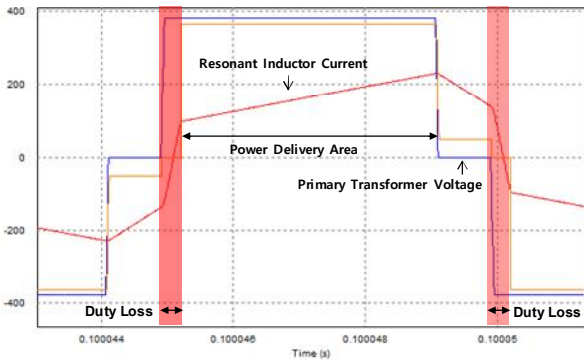


그림 2 PSFB 컨버터의 주요 파형
Fig. 2 Major waveform of PSFB converter

$$\frac{1}{2} \times L \times I_{pk}^2 = \frac{1}{2} \times \left(\frac{8}{3} \times \cos\alpha + C_{TR} \right) \times V_i^2 \quad (3)$$

PSFB컨버터는 공진 인덕터(누설 인덕터)와 스위치의 기생 커패시터의 공진을 이용하여 ZVS효과를 얻으며 공진이 발생하는 영역은 그림 2와 같다. 성공적인 PSFB를 설계하기 위해서는 이 영역을 결정하는 공진 인덕터 최적 설계가 가장 중요하며, 공진 에너지의 교환은 식 (3)을 따른다. 공진 인덕턴스가 낮으면 경부하 영역에서 ZVS동작이 어렵고, 반대로 공진 인덕턴스가 높으면 도통손실 및 듀티손실이 증가하기 때문에 전력 밀도 및 신뢰성을 저감시킨다. 공진 인덕턴스의 최적 설계를 위하여 이들의 Trade Off 관계를 그림 3으로 표현하였다.

이때, 270V 430V의 충전전 전압 범위를 갖는 리튬 이온 배터리를 6.6kW급 OBC를 통하여 CC CV모드로 충전 할 경우

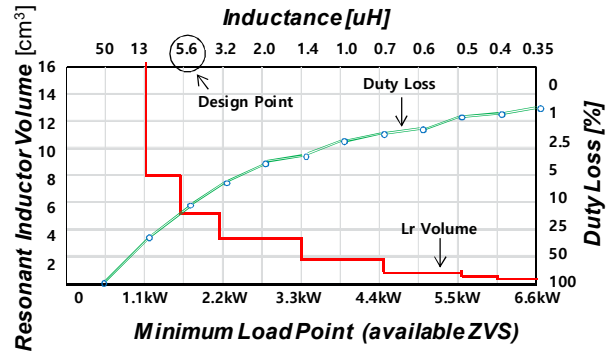


그림 3 OBC용 PSFB 컨버터 공진 인덕터의 최적 설계점
Fig. 3 Optimal design point of 6.6kW PSFB converter

최적 CC 전류값은 15.34[A]이므로 ZVS가 가능한 최소 부하량은 4.1kW 미만이어야 하며, 3.3kW급 OBC로도 동작 가능하게 설계하였을 때, ZVS가 가능한 부하의 최저 용량은 2.05kW이다. 동일 조건에서 부피가 가장 작은 5.6[uH]가 최적점으로 도출된다. 스위칭 주파수가 100kHz, BCM경계가 최대부하의 10%, 최대 출력전압 맥동이 1%미만이 되게 하면 수식 (4), (5)를 이용하여 나머지 파라미터를 표 2와 같이 결정 할 수 있다.

$$L_o = \frac{(1-2 \times D)}{2 \times (2f_s)} \times \frac{R_{Load,max}}{LoadRatio} \quad (4)$$

$$C_o = \frac{(1-2D)}{8 \times L \times (2f_s)^2 \times RippleRatio} \quad (5)$$

표 2 선정된 6.6kW급 PSFB 컨버터 구성 소자
Table 2 Major element selected for 6.6kW PSFB converter

SW	IPW60R45CP * 2병렬	Co	9.4uF [4.7uF/450V * 2]
Rectifier	VBE 55 06NO7	Lo	CH468060 [120uH, 2적층]
Lr	CH203060 [5.6uH, 2적층]	IC	UCC28950

4. 결론

본 논문은 기존 3.3kW급 OBC의 충전속도 향상을 위하여 용량을 6.6kW급으로 높여 설계한다. 특히, 증가된 전력에 최적화하기 위하여 토폴로지 선정에서 부터 주요 소자의 구체적인 파라미터에 이르기까지 차량실장 및 OBC성능과 관련된 Trade Off를 밝히고 합리적인 타협점을 제시하였다.

본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

(No. 20104010100630 12 1 000)

참고 문헌

- [1] Musavi, F, Edington, M, Eberle, W, "Evaluation and Efficiency Comparison of Front End AC DC Plug in Hybrid Charger Topologies", Smart Grid, IEEE Transaction on, Vol. 3, No. 1, pp. 413 421, 2012, March.