

전기자동차용 비절연형 탑재형 충전기 및 충전 효율 향상을 위한 제어 알고리즘 개발

김동희, 김윤성, 우동균, 오창열, 성원용, 이병국
성균관대학교 정보통신대학

Development of Non-Isolated On-Board Battery Charger for Electric Vehicles with Novel Control Algorithm

Dong Hee Kim, Yun Sung Kim, Dong Gyun Woo, Chang Yeol Oh, Won Yong Sung, and Byoung Kuk Lee

College Information & Communication Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문에서는 효율 향상과 부피저감을 위한 전기자동차용 3.7kW급 비절연형 탑재형 충전기를 소개하고, 강압영역에서의 성능 개선을 위한 알고리즘을 제안한다. 제안한 충전기 토폴로지는 Cascaded Buck Boost 컨버터로 두개의 Pole로 구성되어 있으며, 강압영역에서 제어는 기존의 제어 방식과 다르게 두개의 Pole를 동시에 제어하지 않고 각각을 제어하여 인덕터의 전류 리플을 저감하여 충전효율을 증가시킬 수 있다. 제안한 시스템 및 알고리즘은 실험을 통해 검증한다.

1. 서론

환경문제에 대한 경각심 증가, 화석연료의 가격 상승으로 인해 플러그인 하이브리드 전기자동차 (Plug in Hybrid Electric Vehicles, PHEVs)와 전기자동차 (Electric Vehicles, EVs)에 대한 사용 요구와 이에 따른 연구가 활발히 진행되고 있다. PHEVs와 EVs는 차량의 구동을 위해 충전기를 이용하여 계통으로부터 전기에너지를 공급받아 배터리를 충전한다. 이러한 배터리 충전기 중 탑재형 충전기 (On Board Charger, OBC)의 경우 높은 전력밀도와 충전효율이 필수적으로 요구된다.

기존의 OBC에 대한 연구는 입력전류의 역률 보상을 위한 PFC회로와 배터리 충전을 위한 절연형 구조의 DC DC 컨버터를 이용하여 구성되었지만, 2 Stage 구조로 인해 전체 시스템의 부피 및 손실이 증가하는 단점을 가진다. 하지만 OBC용 고전압배터리의 경우 저전압 배터리와는 달리 전기 구동차량의 표준인 SAE J1772^[1]에 따라 OBC의 경우 차량의 샤시와 Floating 처리만 수행하면 절연이 반드시 필요하지 않다. 따라서 전체 구조를 간단히 하고 전력밀도와 효율을 증가시킬 수 있는 비절연형 구조의 충전기 구조를 고려할 수 있지만 이에 대한 연구는 활발히 진행되지 않았다.

본 논문에서는 PHEVs 및 EVs용 OBC의 충전효율 및 전력밀도 향상을 위한 비절연형 OBC를 소개하였으며, 기존의 제어 기법의 단점을 분석하여 이를 극복할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘은 강압 영역에서 인덕터 전류 리플을 저감을 통해 인덕터 손실을 감소시켜 충전효율을 상승시킬 수 있는 제어기법이며, 이를 통해 3.7kW용량의 최고 97.5%의 고효율 및 0.99 역률과 3.79L의 저부피를 구현하였으며 강압영역에서 기존 대비 최대 3.5%의 효율 향상을 이루었다.

2. 비절연 충전기의 구현

2.1 비절연형 충전기 구조

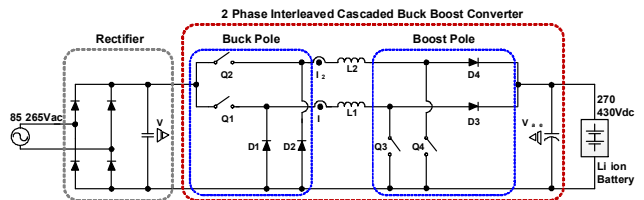


그림 1 제안한 비절연형 OBC 구조
Fig. 1 A configuration of a proposed non-isolated OBC

그림 1은 제안한 비절연형 OBC 구조로 넓은 입출력 전압범위를 충족하기 위해 승강압 동작이 가능한 직렬 연결된 Buck Boost 컨버터 토폴로지를 선택하였다. Buck 스위치가 오프되면 입력전류는 부하로 흐르지 못하기 때문에 불연속이 되어 입력단 필터 사이즈를 증가시켜 컨버터를 병렬로 구성하여 인터리빙 제어를 통해 두 개의 상중 하나의 상은 항상 도통할 수 있도록 하였다.

2.2 기존 제어 알고리즘 분석

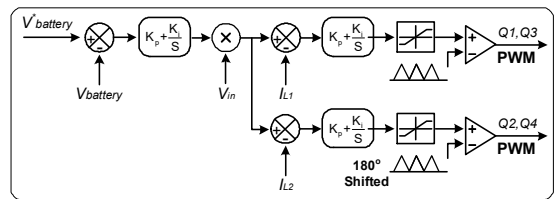


그림 2 기존 제어 알고리즘
Fig. 2 A conventional control algorithm

제안한 OBC 구조는 입력전압과 배터리전압의 크기에 따라 동작 모드가 변경된다. 입력전압이 240Vac일 경우 충전전압이 340V 미만일 경우에는 강압동작, 340V 이상일 경우 승압동작을 수행한다. 승압 동작일 경우 Buck 스위치 Q1, Q2를 도통시키고 Boost 스위치 Q3, Q4의 제어를 수행한다. 기존의 제어 방식의 강압 동작은 Boost 스위치를 오프하고 Buck 스위치를 제어하여 입력전류의 역률과 출력 전압을 제어한다. 하지만 Buck 컨버터 특성상 입력전류는 입력전압이 출력전압보다 클 경우만 흐르게 되므로, 교류입력이므로 입력전류가 흐를 수 있는 범위가 제한되어 입력전류의 PF와 THD의 성능이 감소된다.

이러한 강압 영역에서의 단점을 보완하기 위해 Buck 스위치와 Boost 스위치를 동시에 제어하여 PF와 THD 성능을 개선한 그림 2와 같은 제어기법이 제안^[2] 되었지만 PF제어 특성상 AC 입력전압이 큰 구간에서 듀티가 줄어들어 됨에 따라 두 상의 Buck 스위치 중 하나의 스위치만 도통 될 경우 입력전류는 한상으로도 흐르므로 각 소자의 전류 스트레스가 크게 증가하고, 특히 인덕터의 전류 리플이 커져 충전 효율이 감소된다.

2.3 향상된 제안 알고리즘

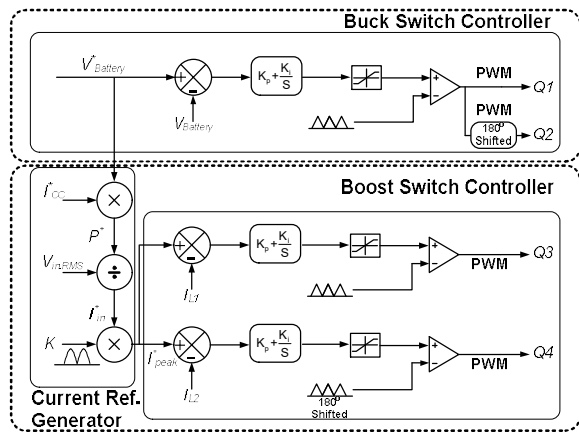


그림 3 제안한 제어 알고리즘
Fig. 3 A proposed control algorithm

본 논문에서는 기존의 강압영역에서의 제어 문제점을 해결하기 위해 그림 3과 같이 Buck 스위치와 Boost 스위치의 PWM 생성을 다른 제어를 통해 발생시켰다. 이는 각각의 스위치의 기능을 분담 시켜 제어를 하기 위함으로 Buck 스위치는 출력 DC 전압을 제어하며 Boost 스위치는 입력 전류의 역률 제어만을 수행한다. 따라서 Buck PWM의 경우 정상상태에서 매주기 듀티가 가변되지 않고 유지되며, 듀티의 크기 자체도 기존의 제어방법 보다 크며 이는 Buck 컨버터의 입출력 전압의 듀티 관계에 의해 입력전압의 평균값과 출력전압이 크게 차이가 나지 않기 때문이다. 또한 각각의 스위치의 PWM의 듀티가 다르므로 인덕터 전류의 기울기는 기존과 달리 2개 이상을 가지게 되어 인덕터 전류 리플 자체도 줄어 들 수 있다. 이는 실험을 통해 검증하였다. 그림 3의 Boost 스위치 컨트롤러는 입력전류의 역률과 피크치를 제어하며 이때의 전류 피크치는 충전 전력과 식 (1)에 의해 결정된다. 이때 η 는 시스템 효율을 의미하며 $V_{in,unit}$ 은 크기가 1인 정류된 입력전압이다.

$$k = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{in,unit}}{2 \cdot \eta} \quad (1)$$

3. 시스템 제작 및 검증

제안한 시스템 및 알고리즘을 검증하기 위해 3.7kW 시작품을 제작하였다. 차량의 ECU 및 BMS와의 통신과 제어를 위해 TI사의 TMS320F28335를 사용하였으며 스위칭 주파수는 50kHz, 각 상의 인덕턴스는 0.8mH, 출력 캐패시턴스는 960uF를 사용하였다.

그림 4는 제작된 OBC 시작품으로 3.79L의 부피를 가지며 강압영역에서는 제안한 제어기법을 사용하며 승압영역에서는 Boost 스위치만을 이용하여 출력전압과 역률제어를 수행한다.

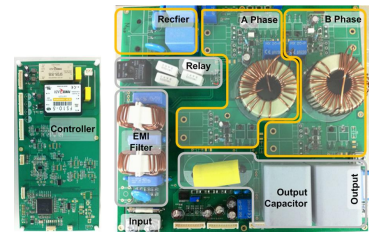
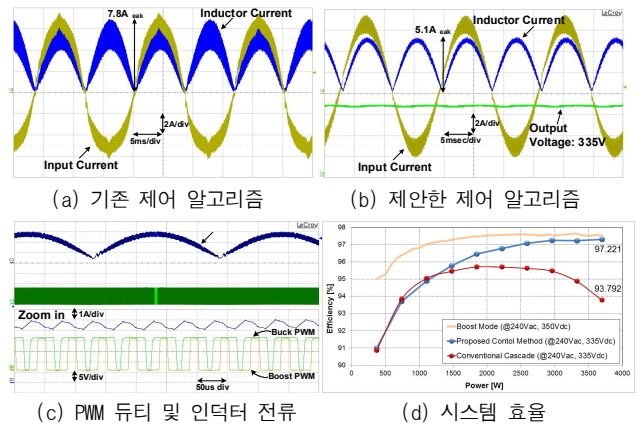


그림 4 3.7kW 비절연형 OBC 시작품
Fig. 4 A test-bed of 3.7kW non-isolated OBC



(a) 기존 제어 알고리즘 (b) 제안한 제어 알고리즘
(c) PWM 듀티 및 인덕터 전류 (d) 시스템 효율
그림 5 시뮬레이션 및 실험 결과
Fig. 5 Results of simulation and experiment

그림 5 (a)는 출력전압 335V, 1200W 조건에서 강압 동작 시 기존의 제어 알고리즘으로 동작할 때의 입력전류와 인덕터 전류 실험파형이다. 입력전류가 한상으로 흐르는 구간이 많기 때문에 인덕터 전류와 입력전류의 피크치가 거의 동일함을 알 수 있다. (b)는 제안한 알고리즘의 시뮬레이션 파형으로 인덕터 전류의 크기와 리플이 기존 제어기법에 비해 크게 줄어들고 출력전압 또한 잘 제어된다. 또한 (c)와 같이 Buck PWM이 기존 제어 방법과 다르게 항상 넓게 유지되며, 인덕터 전류 또한 기울기가 4가지로 구성되어 리플 크기 자체도 줄어든다. 이에 따라 (d)와 같이 기존 제어 기법보다 최대 3.5% 가량 효율 상승을 기대할 수 있으며 이는 EMI 필터와 보조전원의 효율을 포함한 결과다. 또한 출력전압이 350V일 경우 Boost 스위치만을 사용하여 최고효율 97.5%를 얻을 수 있었다.

4. 결론

본 논문은 PHEVs 및 EVs용 비절연형 OBC의 소개와 성능 향상을 위한 알고리즘을 제안하였다. Cascaded Buck Boost 컨버터의 두 개의 폴을 각각 제어하여 각 상의 전류 스트레스를 최소화 하여 강압 영역에서 효율을 극대화 하였으며 기존 제어 기법 대비 최대 3.5%의 효율 향상을 달성하였고, 승압 운전 시 97.5%의 고효율을 확보하였다. 향후 제안한 제어기법을 Li ion 배터리를 대상으로 알고리즘을 검증할 예정이다.

참고 문헌

- [1] Electric Vehicle and Plug in Hybrid Electric Vehicle Conductive Charger Coupler, *SAE Recommended Practice. J1772 Jan2010.*
- [2] B. Sahu, A. R. Mora, "A low voltage, dynamic, noninverting, synchronous buck boost converter for portable application," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 19, No. 2, pp. 443-452, 2004, Mar.