

전기자동차 탑재형 대용량 배터리 충전기를 위한 위상 변조 제어되는 듀얼 풀 브리지 컨버터

김동한, 강동훈, 장희범, **이일운**
계명대학교

Phase modulated dual full-bridge converter for EV high-power on-board battery charger

Dong-Han Kim, Dong-Hun Kang, Hee-Beom Jang, Il-Oun Lee
Keimyung University

Abstract - 본 논문에서는 전기자동차 탑재형 대용량 배터리 충전기를 위한 위상 변조되면서 제어되는 듀얼 풀 브리지 컨버터에 대한 연구 결과를 발표한다. 제안되는 위상 변조 듀얼 풀 브리지 컨버터는 기존 대용량 풀 브리지 컨버터에 비해 약 50% 이상 도통 손실이 개선되며, 변압기 이차측 정류단 전압스트레스 또한 크게 개선되는 이점을 갖고 있다. 더불어 배터리가 충전되는 전부하 구간에서 일차측 전력반도체스위치의 영전압 스위칭이 보장되며, 출력 필터 인덕터 사이즈 또한 크게 작아지는 장점이 있다. 논문에서는 제안 회로와 그 분석 결과가 발표되어 지고, 그 가능성은 6.6 kW급 배터리 충전기 시뮬레이션 결과로부터 확인되어진다.

1. 서 론

환경적 위협, 화석 에너지의 고갈 등으로 인해 전기 추진 시스템을 장착한 자동차들이 자동차 시장에서 빠르게 출현하고 성장하고 있다. 이러한 자동차에는 순수 전기자동차, 하이브리드 전기자동차, 플러그인 하이브리드 전기자동차, 연료전지 자동차와 플러그인 전기자동차는 배터리에 저장된 에너지를 주동력 에너지원으로 사용하기 때문에 다른 전기자동차들에 비해 훨씬 큰 사이즈 및 용량을 가진 배터리를 필요로 한다. 이 대용량 배터리는 전형적으로 AC-DC 컨버터와 절연형 DC-DC 컨버터로 구성된 탑재형 충전기를 통해 그리드로부터 충전된다. 탑재형 충전기에는 일반적으로 3.3kW급과 6.6kW급이 있으나, 향후 전력반도체 기술의 발전과 전기자동차 대중화에 따른 충전 시간 단축을 위해 보다 큰 용량을 가진 탑재형 충전기에 대한 연구가 수행되어야 한다. 본 논문에서는 6.6kW급 이상의 대용량 탑재형 충전기에 적용될 수 있는 대용량 DC-DC 컨버터 기술을 소개한다.

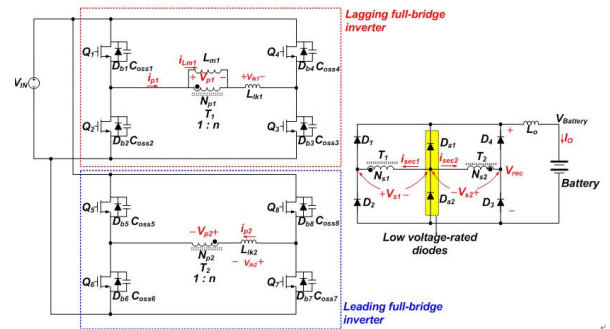
배터리 충전기 개발에 있어 핵심적인 요구 항목들이 있다. 첫 번째로, 패키징을 쉽게 하고 에너지의 이용률을 높이기 위해 충전기의 크기와 무게를 획기적으로 줄여야 한다. 다음으로, 연료 절약과 온실 가스 감축을 극대화하기 위해 배터리가 충전되는 전 시간 동안 고효율을 달성하고, 유지 할 수 있어야 한다. 이러한 요구 항목을 달성하기 위해 탑재형 충전기는 보다 높은 스위칭 주파수로 설계되어야 하며, 고주파 구동에 따른 전력손실을 저감시키기 위해 소프트 스위칭 기술이 전력변환회로에 반영되어야 한다.

본 논문에서는 전기자동차 대용량 탑재형 배터리 충전기를 위한 소프트 스위칭 기술이 반영된 DC-DC 컨버터가 발표되어진다. 제안된 컨버터는 기존 위상 변조되는 풀 브리지 컨버터 회로를 기반으로 하지만, 기존 회로에 존재하던 순환 전류가 최소화되어 지고, 변압기 턴 비 또한 훨씬 작게 설계될 수 있어 이론적으로 변압기 일차측에서 도통 손실이 약 50% 이상 개선될 수 있는 장점을 갖는다. 또한 변압기 이차측에서도 전압스트레스가 낮아져 도통 손실 저감에 유리한 다이오드를 정류단에 사용할 수 있다. 출력 필터단에 사용되는 필터 인덕터 크기 측면에서도 기존 풀 브리지 컨버터보다 훨씬 유리하다. 제안 컨버터의 회로와 그 분석 결과가 논문에서 발표되어 지고, 6.6 kW에서 시뮬레이션 결과를 토대로 그 우수성이 증명되어진다.

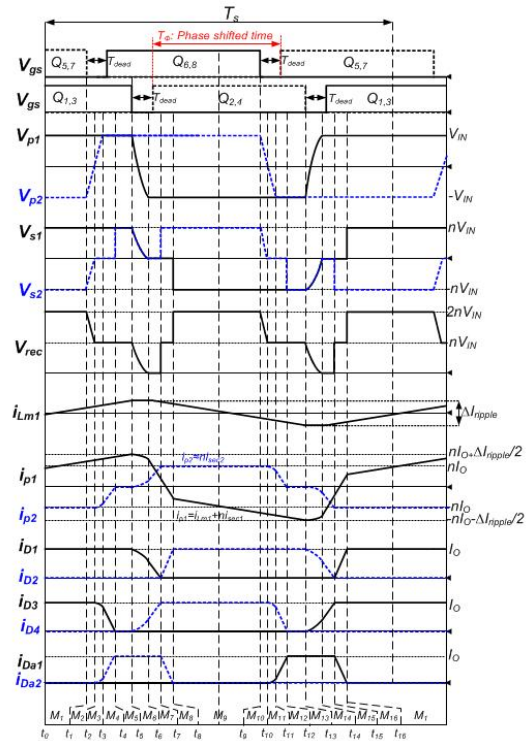
2. 본 론

2.1 제안 회로의 구성

그림 1은 6.6 kW급 이상의 탑재형 충전기를 위한 본 논문에서 발표는 DC-DC 컨버터를 보여 준다. 제안된 컨버터는 변압기 일차측에서 두



<그림 1> 제안 DC-DC 컨버터

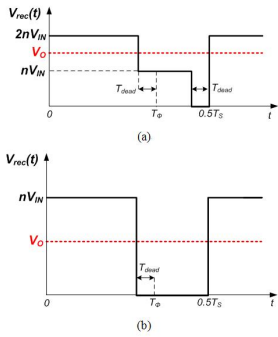


<그림 2> 제안 DC-DC 컨버터의 동작 원리 및 이론적 동작 파형

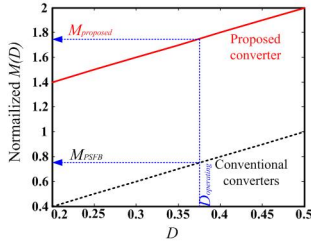
개의 풀 브리지 인버터가 병렬로 연결된 구조를 취하고, 변압기 이차측에서는 두 개의 풀 브리지 정류기가 두 개의 정류단 다이오드를 공유하면서 병렬로 연결된 구조로 구성되어 있다. 제안 회로에서 그 출력 전압 혹은 출력 전류는 일차측에 있는 두 개의 풀 브리지 인버터부가 위상 변조되면서 제어되어진다.

2.2 동작 원리

그림 2는 그림 1에 있는 컨버터의 이론적 동작 파형을 보여준다. 파형에서 보듯이 데드 타임을 무시하면 일차측에 있는 모든 전력반도체 스위치들은 거의 50% 듀티를 갖고 스위칭 하고 있다. 두 개의 풀 브리지



〈그림 3〉 정류단 출력 파형: (a) 제안 컨버터의 정류단 출력 파형 (b) 기존 풀 브리지 컨버터의 정류단 출력 파형



〈그림 4〉 D에 따른 제안 컨버터의 입출력 관계식

인버터 중 하나를 살펴보면, 앞에 있는 스위치 레그의 탑 스위치와 뒤쪽 레그에 있는 버튼 스위치가 동시에 온/오프하며, 그리고 앞쪽 레그 버튼 스위치와 뒤쪽 레그 탑 스위치가 동시에 온/오프하고 있다. 그리고, 탑 스위치들과 버튼 스위치들은 상호 보완적으로 스위칭하고 있는 것을 볼 수 있다. 두 풀 브리지 인버터부 살펴 보면, 아래 있는 풀 브리지 인버터부가 위에 있는 풀 브리지 인버터부보다 위상이 빠르게 운전되고 있음을 볼 수 있는데, 이렇게 두 인버터부의 위상을 다르게 하고 그 위상 차이를 이용하여 제안 회로의 그 출력 전압 또는 출력 전류가 제어되도록 하였다. 제안 회로의 그 동작 파형을 상세히 분석한 결과 한 스위칭 주기 동안 16개의 동작 모드를 가지는 것으로 조사되었고, 동작 모드 각각에서의 그 이론적 동작 파형은 그림 2에서 보여 진다.

동작 모드 중에서 모드 2, 3은 아래쪽 풀 브리지 인버터부에 있는 전력반도체 스위치들의 영전압 스위칭을 보여 준다. 그 영전압 스위칭은 출력 필터 인덕터에 저장된 에너지를 사용해서 달성되고, 그 에너지를 매우 크기 때문에 배터리 충전 전 시간 동안 아래쪽 풀 브리지 인버터부에 있는 전력반도체 스위치들은 고주파 구동이 되더라도 스위칭 손실을 거의 가지지 않게 된다. 모드 6은 위쪽 풀 브리지 인버터부에 있는 스위치들의 영전압 스위칭을 보여 준다. 위쪽 풀 브리지 인버터부의 영전압 스위칭을 위한 에너지는 두 변압기의 리키지 인덕턴스들의 그 합과 변압기 T1의 자화 인덕터에 흐르는 전류로부터 오는데, 그 에너지도 충분히 크기 때문에 배터리 충전 전 시간 동안 위쪽 풀 브리지 인버터부의 모드 스위치들도 영전압 스위칭이 보장된다.

2.3 입출력 관계식 분석

그림 3은 변압기 이차측 정류단 출력 파형을 보여 준다. 그림 3(a)에 있는 제안 컨버터의 정류단 출력 파형을 평균화하면, 우리는 다음과 같은 제안 컨버터에서 입력 전압과 출력 전압간의 관계를 찾을 수 있다.

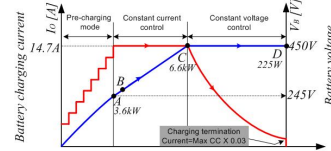
$$M(D) = \frac{V_o}{V_{IN}} = 2n(D+0.5) \quad (1)$$

$$D = (T_\phi - 2T_{dead}) / T_s$$

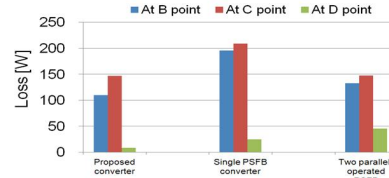
여기서, T_ϕ 는 두 풀 브리지 인버터부의 위상차, T_s 는 스위칭 주기, T_{dead} 는 스위치간 데드 타임이다. 수식 (1)에 보듯이 두 풀 브리지 인버터부의 위상차를 조절하면 출력 전압이 제어될 수 있음을 확인 할 수 있다.

그림 4는 수식 (1)를 분석한 결과를 보여주는데, 그림에서 보듯이 제안 회로에서 입력과 출력의 그 비인 이득이 항상 기존 풀 브리지 컨버터에 비해 훨씬 높게 나타난다. 입력과 출력의 그 비인 이득이 높다는 것은 변압기 설계시 변압기 턴 비가 작아지는 것을 의미한다. 낮은 턴 비는 변압기 일차측에서 전류스트레스가 크게 감소하고, 변압기 이차측에서는 전압스트레스가 크게 개선된 것을 의미한다. 결과적으로 제안 컨버터는 기존 풀 브리지 컨버터에 비해 훨씬 낮은 변압기 턴 비를 가질 수 있게 되고, 변압기 일차측에서 낮은 전류스트레스 때문에 도통 손실이 감소하고, 변압기 이차측에서는 낮은 전압스트레스 때문에 도통 손실이 감소될 수 있는 장점을 갖게 된다.

그림 3을 자세히 살펴 보면, 기존 풀 브리지 컨버터는 변압기 일차측에서 변압기 이차측으로 전력을 전달하는 과정에서 연속적으로 전력을



〈그림 5〉 6.6 kW 배터리 충전기의 충전 프로파일



〈그림 6〉 6.6 kW 배터리 충전기에서 전력손실 결과

〈표 1〉 부품 수 비교

	Proposed converter	Single PSFB converter	Two parallel-operated PSFB converters
Switches	8	4	8
Diodes	6	4	8
Transformers	2	1	2
Resonant inductors	0	1	2
Output inductors	1	1	2
Total	17	11	22

전달하지 못하는 구간이 존재하는 반면에 제안 컨버터에서는 전력이 입력측에서 출력측으로 연속으로 전달되고 있음을 알 수 있다. 이 때문에 기존 풀 브리지 컨버터에는 일차측에서 이차측으로 전달되지 못하고 변압기 일차측 내부에서만 흐르는 큰 순환 전류가 존재하게 되지만, 제안 컨버터에서 그 순환 전류가 발생하지 않게 된다. 앞에서 변압기 턴 비가 작게 설계됨으로써 기존 풀 브리지에 비해 제안 컨버터가 훨씬 작은 도통 손실을 갖게 되었는데, 이처럼 순환 전류 제거로 인해서 변압기 일차측에서 추가적으로 도통 손실이 개선되어 전력변환효율이 기존 풀 브리지 컨버터보다 월등하게 된다.

또한, 그 연속적인 전력 전달 때문에 출력 필터 인덕터의 크기도 크게 줄어 들 수 있게 된다. 그 설계를 분석한 결과, 기존 풀 브리지 컨버터는 약 1mH, 제안 컨버터는 200μH의 인덕터가 필요했다. 즉 인덕턴스 값이 1/5배 감소하는 것을 알 수 있는데, 이는 출력 필터 인덕터 설계시 사용될 수 있는 자성체 부피가 1/5배 감소될 수 있는 것을 나타내기 때문에 제안 컨버터가 기존 풀 브리지 컨버터와 비교해 출력 필터단 설계에서도 매우 유리하다는 것을 알 수 있다.

2.4 성능 평가

제안 컨버터의 그 성능을 확인하기 위해, 그림 5에 있는 6.6 kW 배터리 충전기의 충전 프로파일을 기준으로 변압기, 전력반도체 스위치, 정류단 다이오드, 출력 필터 인덕터 등을 포함한 부품들을 기존 풀 브리지 컨버터, 기존 풀 브리지 컨버터의 두 개 병렬 운전, 그리고 제안 컨버터 입각해서 설계하고, 또한 각각을 PSIM으로 시뮬레이션을 수행하였다. 설계한 부품들의 datasheet 내용과 시뮬레이션을 통해 측정된 전압, 전류스트레스들로부터 전력손실을 계산하였고, 그림 6은 그 결과를 보여 준다. 그리고 표 1은 2개의 비교 컨버터들과 제안 컨버터의 그 부품 수를 분석한 결과를 보여주고 있다. 전력손실면에서는 제안 컨버터와 기존 풀 브리지 컨버터의 두 개 병렬 운전이 매우 우수한 것을 알 수 있고, 부품 수까지 고려한다면 제안 컨버터가 대용량 충전기 응용에서 매우 실용적 일 수 있다는 것을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서 6.6 kW급 이상이 대용량 탑재형 배터리 충전기를 위한 하나의 DC-DC 컨버터 토폴로지를 소개하였다. 제안한 컨버터는 대용량 응용에서 낮은 변압기 턴 비, 순환 전류 제거, 넓은 영전압 스위칭 범위 등의 장점을 갖는다. 그 가능성을 확인하기 위해 6.6 kW 충전기의 배터리 충전 프로파일 기준으로 설계하고 시뮬레이션으로 전력손실을 계산, 비교, 분석을 수행하였다. 다음 단계로 제품을 제작하여 그 우수성을 확인하고자 한다.

[참고 문헌]

- [1] I. Lee, and G. Moon, "Half-Bridge Integrated ZVS Full-Bridge Converter With Reduced Conduction Loss for Electric Vehicle Battery Chargers," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 61, no. 8, pp. 3978-3988, Aug. 2014.