

11kW급 양방향 탑재형 충전기

이상연, 이우석, 최승원, 이준영, 이일운[†]
 명지대학교

11kW bi-directional on-board battery charger

Sang-Youn Lee, Woo-Seok Lee, Seung-Won Choi, Jun-Young Lee, and Il-Oun Lee[†]
 Myongji University

ABSTRACT

본 논문은 고효율 11kW급 양방향 탑재형 충전기에 대한 연구결과를 발표한다. 토폴로지는 3상 2-레벨 인버터와 CLLC 공진형 컨버터를 적용하였으며, 모든 전력반도체 소자는 SiC-MOSFET를 적용하였다. CLLC 공진형 컨버터의 고효율 달성을 위해, 배터리 전압에 따라 DC 링크 전압 가변 알고리즘을 적용하였으며 양방향 동작시 정류단이 동기 정류기로 동작하도록 설계하였다. 인버터 스위칭 주파수 20kHz, CLLC 공진형 컨버터 스위칭 주파수 80~300kHz, 배터리 전압 213~413V, 계통 전압 380V/60Hz 사양으로 프로토타입을 설계/제작하였으며 순방향 전력전달 최대 효율 95.8%이상, 역방향 전력전달시 최대효율 95.1%이상의 결과를 달성하였다.

1. 서 론

현재 화석 연료의 환경문제 및 고갈로 인하여 자동차 배출가스의 규제가 강화되고 있고, 자동차 회사들은 규제에 대한 대응으로 하이브리드전기자동차, 순수전기자동차 등 친환경 자동차를 개발하고 있다. 순수전기차와 플러그인 전기자동차는 최대 주행거리를 늘리기 위하여 차내 배터리의 용량을 증가시키고 있으며, 탑재형 충전기에는 고전력밀도와 고효율이 요구되고 있다. 고전력밀도 달성을 위해서 스위칭 주파수를 증가시켜 자성체의 크기를 감소시키는 방법이 주로 사용되지만, 스위칭 주파수의 증가는 반도체소자의 스위칭 손실 증가를 야기한다. 이러한 손실을 최소화하기 위하여 LLC 공진형 컨버터, 위상천이 풀브리지 컨버터 등의 회로를 이용하여 ZVS(Zero Voltage Switching) 기법을 주로 사용하며, 고속 스위칭 동작이 가능하고 낮은 온저항을 갖는 SiC-MOSFET의 사용을 통해 도통 손실을 저감하는 방법도 있다.^[1-2]

본 논문은 넓은 전압 범위에서 동작하는 양방향 탑재형 충전기의 손실을 최소화하기 위하여 배터리 전압에 따라 DC 링크 전압을 가변하여 CLLC 공진형 컨버터가 공진주파수 영역에서 동작하도록 제어하는 DC 링크 전압 가변 알고리즘을 제안한다. 그리고 스위치의 바디 다이오드를 사용한 정류 동작 대신 동기 정류기 동작을 적용하여 스위치의 채널을 사용한 정류 동작으로 손실을 최소화한다. 적용한 알고리즘과 제어방식을 소개하고 그 실험 결과를 발표한다.

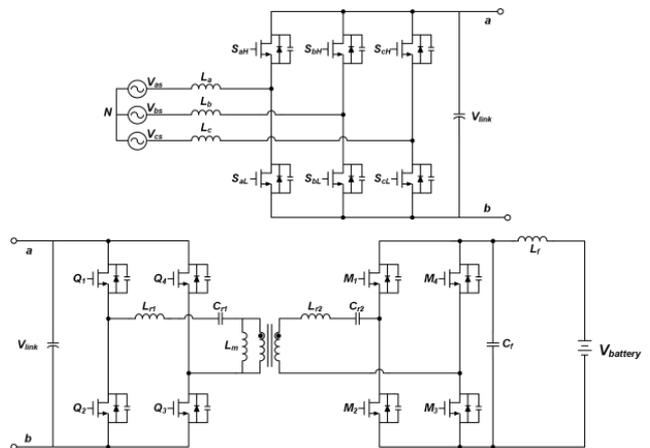


그림 1. 양방향 탑재형 충전기 시스템

2. 양방향 탑재형 충전기

2.1 양방향 탑재형 충전기 시스템

제안한 시스템의 구조는 그림 1과 같다. 입력은 3상 380V/60Hz의 계통을 이용하고, 출력은 213V~413V의 배터리를 사용한다. 3상 2-레벨 인버터와 CLLC 공진형 컨버터를 직렬 연결한 구조를 갖는다. 3상 2-레벨 인버터는 양방향 동작이 가능하고 출력전압 가변이 용이하고 구조가 간단하다. CLLC 공진형 컨버터는 양방향 동작이 가능하며, ZVS동작을 통해 낮은 손실이 발생한다.

2.2 DC링크 전압 가변 알고리즘

CLLC 공진형 컨버터는 스위칭주파수와 공진주파수가 같은 조건에서 동작할 때에 순환 전류가 최소화되고, 스위치의 turn-off 손실이 적게 발생하여 가장 높은 효율을 갖는다. 하지만 전기자동차의 배터리 전압은 넓은 범위를 갖기 때문에 DC 링크 전압이 고정되어 있는 경우 원하는 입출력 이득을 가지기 위한 스위칭 주파수의 범위가 넓어지고 공진주파수 영역에서 떨어져 turn-off 손실이 증가하며, 스위칭 주파수의 증가로 인해 스위칭 손실이 증가한다.

DC 링크 전압 가변 알고리즘은 DC 링크 전압을 배터리 전압에 따라 가변하여 넓은 전압 범위에서도 항상 공진주파수

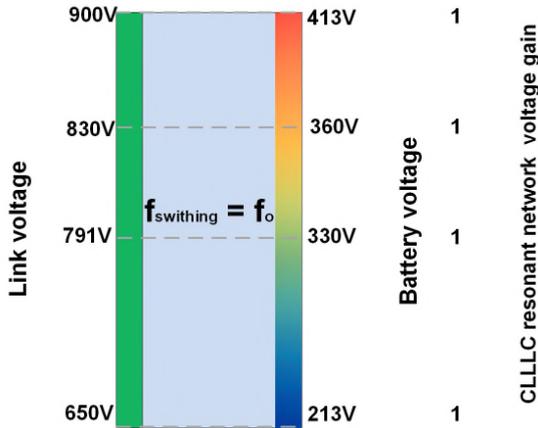


그림 2. DC 링크 전압가변알고리즘

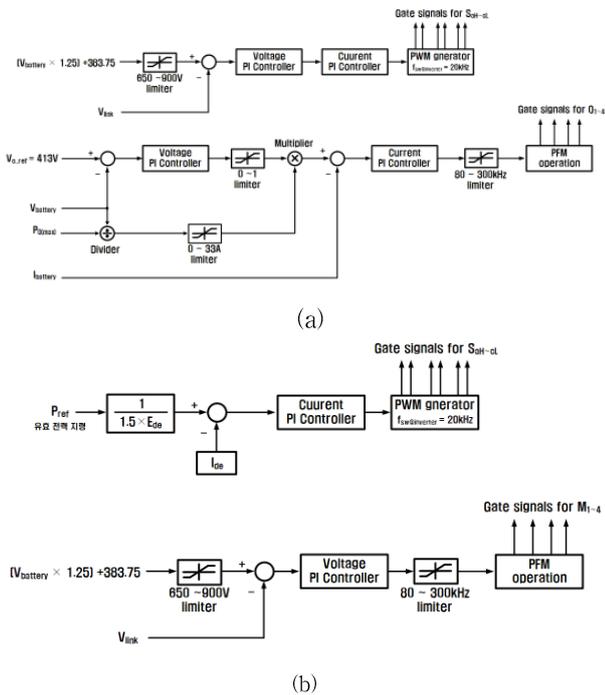


그림 3. DC 링크 가변 알고리즘을 포함한 전체 시스템 제어블록도 (a) 충전모드 (b) 방전모드

영역에서의 동작이 가능하도록 한다. 그림 2는 본 논문에서 사용된 DC 링크 전압 가변 알고리즘을 보여준다. 배터리 전압 213V~413V에서 CLLLC 공진형 컨버터의 스위칭 주파수가 공진주파수 영역에서 동작할 수 있도록 DC 링크 전압을 650V~900V로 가변한다.

DC 링크 전압 가변 알고리즘을 적용한 충전모드 동작의 제어 블록도는 그림 3(a)와 같다. 3상 2-레벨 인버터는 배터리 전압을 센싱하여 CLLLC 공진형 컨버터가 공진주파수 영역에서 동작할 수 있는 DC링크 전압리플을 형성하고 전압제어를 통해 DC 링크 전압을 가변한다. CLLLC 공진형 컨버터는 CC 제어, CP제어, CV제어를 통하여 배터리를 충전한다.

DC 링크 전압 가변 알고리즘을 적용한 방전모드 동작의 제어 블록도는 그림 3(b)와 같다. CLLLC 공진형 컨버터가 배터리 전압을 센싱하고, 공진주파수 영역에서 동작 가능한 DC 링크 전압으로 전압리플을 형성하고 전압제어를 통해 DC 링크 전압을 가변한다. 3상 2-레벨 인버터는 전력제어를 통해 계통으로 방전하는 전력을 조절한다.

2.3 동기 정류기 동작

CLLLC 공진형 컨버터는 양방향 동작을 위하여 1차측, 2차측 모두 스위치로 구성되어 있다. 스위치에 존재하는 바디 다이오드를 통한 정류 동작을 할 경우, 높은 문턱전압으로 인한 손실이 스위치의 채널을 사용한 도통손실보다 크다. 이러한 정류 손실을 저감하기 위해 바디 다이오드 도통 구간에 맞춰 스위치를 turn-on 함으로써 스위치의 채널을 통해 전류가 흐르도록 하였다. 구체적으로 경부하 시에는 정류단 구동 손실을 줄이기 위해 바디 다이오드를 통한 정류 동작을 하도록 하였고, 5kW이상의 부하에서는 정류단 도통손실을 줄이기 위해 동기 정류 동작을 하도록 구현하였다.

3. 실험 결과

11kW 정격 출력을 갖는 3상 2-레벨 인버터와 CLLLC공진형 컨버터의 2단 구조를 갖는 양방향 탑재형 충전기의 프로토타입을 제작하고 실제 고압 배터리를 이용한 충전 실험을 통해 성능을 확인하였다. 그림 5는 제작된 프로토타입의 충전기이고, 표 1은 제작된 양방향 탑재형 충전기의 사양을 보여준다.

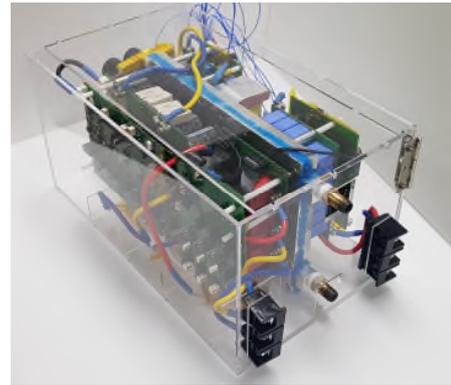


그림 4. 프로토타입 양방향 탑재형 충전기

표 1. 11kW 양방향 탑재형 충전기 사양

파라미터	값	
정격전력	11kW	
계통 전압	$380 \pm 10\% V_{rms} / 60Hz$	
링크 전압	650 ~ 900V	
출력 전압	213 ~ 413V	
AC-DC스위칭주파수	20kHz	
DC-DC스위칭주파수	80 ~ 300kHz	
스위칭 소자	$S_{ah} \sim S_{cl}$	IMW120R045M1 (1200V/36A@100°C)
	Q1 ~ Q4	SCTWA50N120 (1200V/50A@100°C)
	M1 ~ M4	SCT3030AL (650V/49A@100°C)
인덕터(La, Lb, Lc)	2mH	
변압기(T1, T2)	2.4:1	
공진 인덕터(Lr1, Lr2)	20uH 5.46uH	
공진 커패시터(Cr1, Cr2)	55nF / 300nF	
출력 필터 인덕터	50uH	
출력 커패시터	2.2uF	

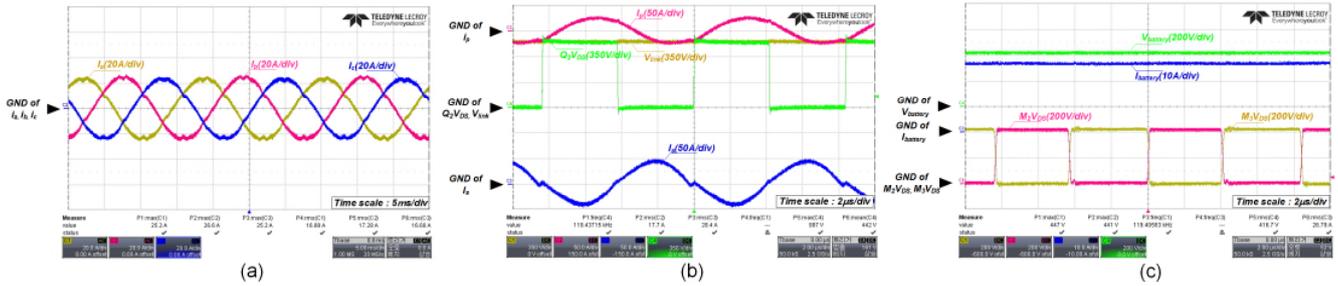


그림 5. 충전 시 배터리 전압 413V일 때의 실험 파형 (a) 입력전류 파형 (b) CLLC 공진형 컨버터의 공진전류 및 1차측 스위치 V_{DS} 전압, DC 링크 전압 파형 (c) CLLC공진형 컨버터의 2차측 주요 파형

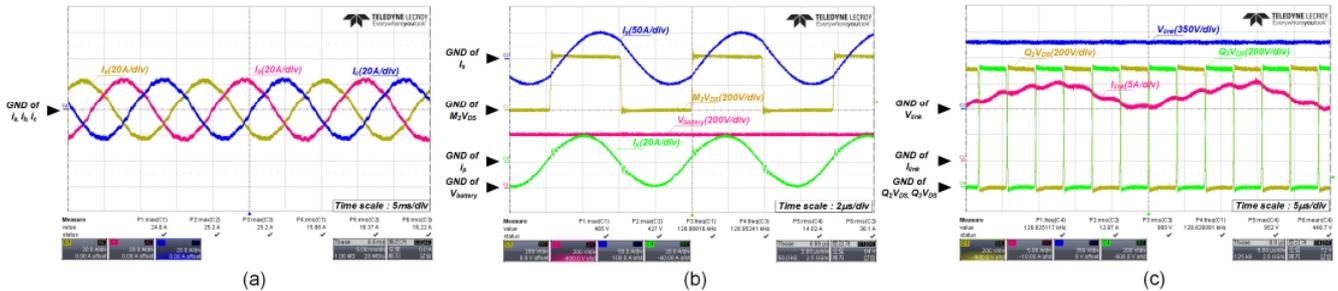


그림 6. 배터리 전압 413V에서의 방전모드 실험 파형 (a) 출력전류 파형 (b) CLLC 공진형 컨버터의 공진전류 및 2차측 스위치 V_{DS} 전압, 배터리 전압 파형 (c) CLLC 공진형 컨버터의 1차측 주요 파형

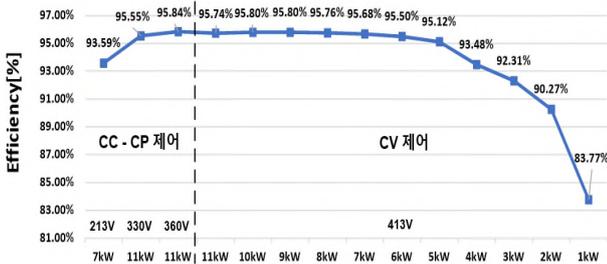


그림 7. 충전 모드 효율

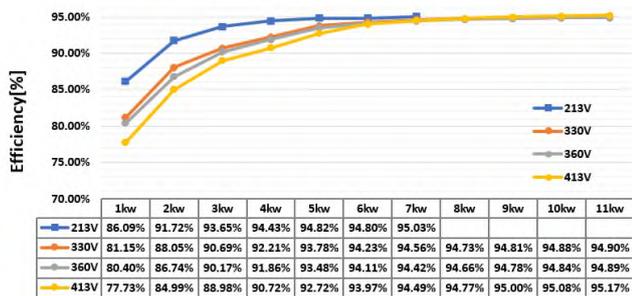


그림 8. 방전 모드 효율

그림 5는 충전 시 배터리 전압이 413V가 되었을 때의 실험 파형을 보여주고, 그림 6은 배터리 전압 413V에서의 방전모드 실험 파형을 보여준다. 파형에서 보듯, 충방전모드 모두에서 입력전류가 입력 계통 전압을 잘 추종하는 것을 확인할 수 있다. 역률은 최대 98.3%이상으로 측정되었고, THD는 최소 4.1%이하로 측정되었다. 그리고 CLLC 공진전류 파형으로부터 충방전모드 모든 조건에서 ZVS 되는 것을 확인하였다.

그림 7은 충전 모드 효율을 보여준다. 배터리 전압 213V 조건에서 충전을 시작하였고, CC-CP제어를 통해 배터리 전압이

413V에 도달하면 CV제어를 시작한다. CV제어 조건에서는 충전전력을 점점 줄여 완충되면 양방향 탐재형 충전기를 OFF 한다. 전부하 조건에서 83%이상의 효율로 동작함을 확인하였고, 최대 95.84%의 효율을 달성함을 확인하였다.

그림 8은 방전 모드 효율을 보여준다. 방전 동작은 배터리 전압 조건, 부하조건에 따라 개별적으로 확인하였다. 전부하 조건에서 77%이상의 효율로 동작함을 확인하였고, 최대 95.17%의 효율을 달성함을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 배터리 전압 213~413V, 계통 전압 380V/60Hz 사양으로 11kW 양방향 탐재형 충전기 프로토타입을 설계/제작하였으며 고효율화를 위하여 DC 링크 전압 가변 알고리즘과 동기정류기 동작을 적용하여 충전모드 전력전달 배터리전압 360V, 11kW 부하조건에서 95.8%이상의 효율을 달성함을 확인하였으며, 방전모드 전력전달 배터리전압 413V, 11kW부하조건에서 95.1%이상의 효율을 달성함을 확인하였다. 양방향 탐재형 충전기의 고효율화를 위해 DC 링크 전압 가변 알고리즘과 동기 정류기 동작을 적용한 3상 2-레벨 인버터와 CLLC공진형 컨버터의 직렬 구조가 타당함을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] 이일운, "전기자동차 탐재형 충전기 응용에서 위상변조 풀브리지 컨버터 성능 분석과 그 개선에 관한 연구", 전력전자학회논문지 2015.10, page(s): 479-490
- [2] 이상규, "전기자동차 충전시스템 효율 향상에 관한 연구", 한국자동차공학회 춘계학술대회 2013.5, page(s): 1887-1892