

V2G 충전기를 위한 양방향 파워모듈

전기자동차(Electric Vehicle, EV)는 주행거리와 충전 속도를 개선하기 위해 초기 400V급 배터리 전압에서 최근 800V급으로 고전압화 되는 추세에 있고, 충전 중인 EV의 배터리를 통합하여 수요 자원으로 활용하는 기술인 V2G 기술 등이 연구되면서 EV 충전기는 150V-1000V의 넓은 전압과 양방향 제어가 가능한 전력변환기 기술이 요구되고 있다. 본고에서는 기존에 개발된 단방향 파워모듈의 성능을 분석하고 SiC 반도체 스위치를 적용한 3-stage 구조의 양방향 파워 모듈 기술을 소개하고자 한다.

1. 서론

최근 환경오염 및 CO₂ 규제가 중요시되면서 각 나라의 정부는 보조금 지원 등 장려 정책을 시행하여 전기자동차 보급이 급격히 증가하고 있다. 전기자동차의 급증에 따라 EV 충전의 불편함을 해소하기 위해 충전 인프라 구축 또한 세계적으로 이슈이다. 기존의 EV 충전기는 그림 1과 같이 전기자동차가 충전기에 연결되는 즉시 충전이 시작되고, 완충 시 충전이 종료되는 단순 전력공급(V0G) 방식이 주로 설치되어 왔다¹⁾. 그러나 EV 10만대는 약 7000MW급 ESS와 같은 수요 자원이므로 EV의 배터리 제어를 통해 에너지 자원으로 활용이 가능하기 때문에 양방향 충·방전 제어(V2G)에 대한 연구가 급증하고 있다²⁾. 또한 전기적 안전 때문에 절연이 요구되고 급속 충전을 위해 전기자동차의 배터리 전압 사양이 높아지고 있는 추세이기 때문에 다양한 배터리 전압 사양을 만족시키는 양방향 EV 충전기 개발이 필요하다.

이러한 EV 충전기의 직류변환장치는 일반적으로 절연형인 공진형 컨버터와 위상천이 풀브릿지(Phase Shift Full Bridge, PSFB) 컨버터를 많이 사용한다³⁾.

두 컨버터 모두 소프트 스위칭이 가능하여 스위칭 손실을 줄일 수 있지만 PSFB 컨버터는 가장 높은 듀티비를 갖는 최대 전압에서 효율이 높고 출력전압이 낮아질수록 듀티비가 작아져서 순환전류로 인해 효율이 감소하는 특징이 있다.

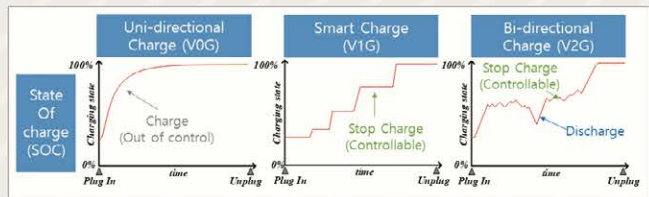


그림 1 전기자동차 충전 방식

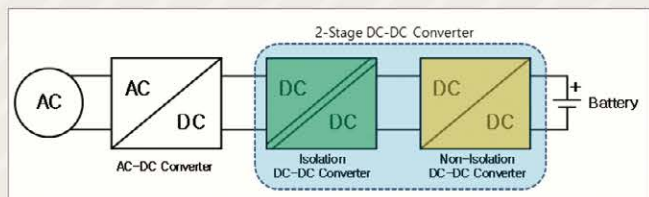


그림 2 2-stage DC-DC 컨버터 구조를 적용한 충전기 토폴로지

따라서 종래의 PSFB를 이용한 방식은 양방향 제어가 불가능하고 출력전압 범위가 점점 더 넓어지면서 한계에 도달하였다. 공진형 컨버터의 경우 반도체 스위치가 On이 되었을 때 피크 전류가 크기 때문에 높은 전압과 전류를 만족하는 부품을 선정하기 어렵고 넓은 전압을 제어하는 것이 쉽지 않다. 이러한 단점을 극복하기 위해 최근에는 그림 2와 같이 절연형 직류변환장치와 비절연형 직류변환장치로 구성된 2단 점속 방식의 직류변환 장치에 대한 연구가 활발하게 이루어졌다. 기존에 2단 점속 방식에서 절연형 컨버터는 전압 제어를 하지 않고 최적의 고정된 전압에서 전류제어만 하고 비절연

컨버터로 출력전압을 제어하는 방식으로 넓은 전압 범위에서 높은 효율을 달성하였지만 2개의 컨버터가 항상 동시에 동작 되어 최고 효율이 낮은 문제가 있다. 본고에서는 기존에 충전기에 적용되었던 전력변환장치의 문제점을 극복할 수 있는 DAB+Buck 구조의 양방향 파워모듈의 구조와 성능을 검토한 결과를 소개하고자 한다.

2. 단방향 20kW 파워모듈

표 1은 기존에 출시된 INFY社의 20kW급 단방향 충전기 파워 모듈의 사양을 보인다. 이 파워 모듈의 AC-DC 컨버터는 Vienna rectifier 토폴로지를 사용하여 3상 380V를 입력받아 Link 커패시터에 DC 전원을 공급 하고 이 DC 전원은 PSFB 구조의 DC-DC 컨버터를 통해 150-1000V의 전압을 제어한다.

그림 3은 기존 파워모듈의 성능을 검증하기 위해 실차(볼트EV)를 사용하여 구성된 시험 환경이고 그림 4는 INFY社의 20kW급 제품의 효율 그래프로서 전체적인 전압 영역에서 부하 전류가 약 13A 정도에서 효율이 가장 높고 출력 DC 전압이 클수록 효율이 높아지는 경향을 볼 수 있다. 이 파워 모듈의 경우 3레벨 PSFB 컨버터 구조의 DC-DC 컨버터를 적용하여 전압정격을 절반으로 줄일 수 있기 때문에 MOSFET 선정에 유리하지만 3레벨 구조를 위해 1차측에 다이오드 4개가 추가



그림 3 EV를 이용한 단방향 파워모듈 시험

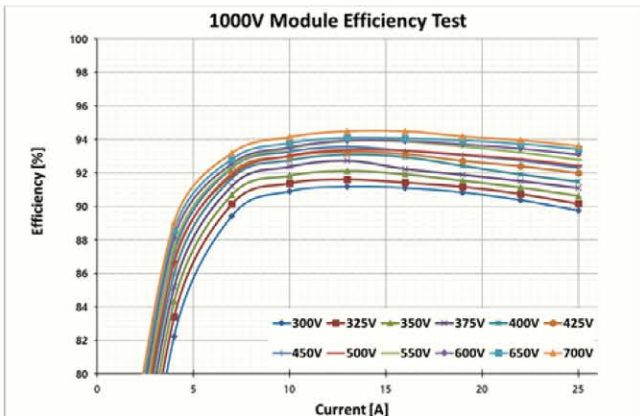


그림 4 단방향 파워모듈의 전압 및 전류에 따른 효율

표 1 기존 파워모듈 사양

Parameter	Specification	Note
Rated power	20[kW]	-
Input voltage	380[Vrms]	AC
Output voltage	150 - 1000[V]	DC
Output current	0 - 25[A]	DC
Power factor	0.99	rate power
THD	< 5%	rate power
Maximum efficiency	95%	rate power
Charging method	CC-CP	-

되어 회로가 다소 복잡해지고 양방향 제어가 불가능하기 때문에 V2G 시스템에서 적용하기에 적합하지 않다.

3. 개선된 20kW 양방향 파워모듈

본고에서 소개하는 개선된 양방향 충전기는 표 1과 동일한 설계 사양을 가지며, 그림 5는 전체적인 토폴로지를 보인다. AC-DC 컨버터는 효율을 높이기 위해 3레벨 구조의 토폴로지를 사용하였으며 DC-DC 컨버터는 양방향이 가능하고 넓은 출력범위에서 고효율을 유지하기 위해 DAB(Dual Active Bridge) 컨버터와 Buck 컨버터를 직렬 연결한 결합형 컨버터를 사용하였고 On저항($R_{DS(on)}$)이 작은 실리콘카바이드(SiC) MOSFET를 적용하여 도통손실을 줄였으며, 특정 전압 범위에서 효율을 극대화하기 위한 제어방식이 적용되었다.

3.1 AC-DC 컨버터

3상 AC-DC 컨버터는 3상 AC 계통 전압을 DC 전압으로 변환하면서 계통 전류의 고조파 성분 제거 및 역률 보상을 수행한다. AC-DC 컨버터는 3레벨 구조의 대표적인 T-type 토폴로지를 사용하였다. 3레벨 구조는 2레벨 구조에 비해 소자 수가 많지만 전압 정격이 낮아 비교적 손실이 적고, 계통 입력단 필터부의 수동소자를 작게 사용할 수 있는 장점이 있다^[4]. 제안하는 양방향 충전기의 AC-DC 컨버터는 배터리 전압에 따라 DC Link 전압(V_{link})을 가변하여 제어하면서, 계통 전류 THD 성능을 위해 고조파 보상 제어가 포함된 전류 제어가 입력 역률 제어를 한다. 회로에 적용된 반도체 스위치 모듈은 실리콘(Si) IGBT 4개가 T-type 구조

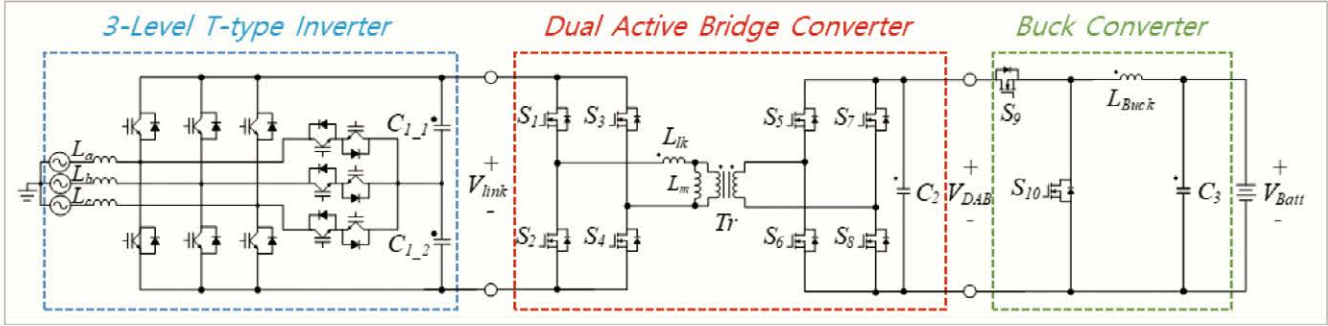


그림 5 개발한 3-stage 양방향 파워모듈의 토폴로지

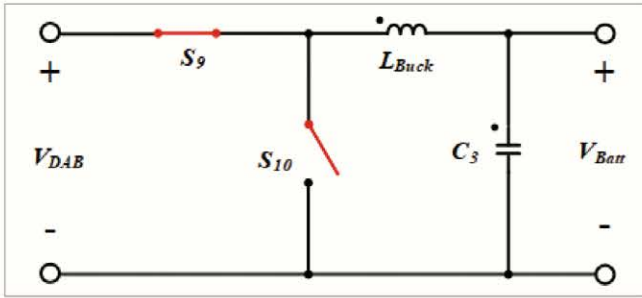


그림 6 Buck 컨버터의 바이패스 동작 예시

동작하고 상보 동작하는 서브 스위치(S_{10})는 Off하여 바이패스 회로로 동작하면 손실을 최소화할 수 있다. 회로에 적용된 반도체 스위치 모듈은 SiC MOSFET가 2개가 직렬로 연결되어 구성된 Infineon社의 1200V/30A(@25℃) 사양을 갖는 FF11MR12W1M1_B11모델이 적용되었다.

3.3 제안하는 충전회로의 동작 원리

최근 출시되는 전기자동차의 배터리 전압 사양이 높아지고 있는 추세이기 때문에 높은 전압 영역에서의 효율 극대화가 필요하다. 이를 위해 그림 7과 같이 배터리 전압별 충전기의 동작을 정의하였다. 출력전압이 750V보다 낮은 전압 A 영역에서는 AC-DC 컨버터가 DC Link 전압을 650V로 고정하여 제어하고 DAB 컨버터는 변압기의 1차측과 2차측의 턴비와 동일한 비율로 DC Link 전압을 승압하여 C_2 에 걸리는 전압을 제어한다. 이때 변압기의 턴비는 1:1.2이고 DAB의 출력전압은 780V이다. Buck 컨버터는 Duty를 가변하여 DAB의 출력전압을 전기자동차가 요청하는 배터리 전압까지 강압하여 동작한다.

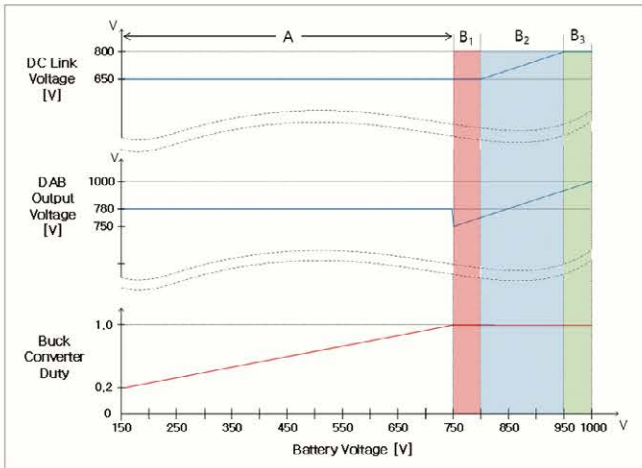


그림 7 배터리 전압별 충전기의 동작

로 구성된 1200V/30A (@100℃) 사양을 갖는 Infineon社의 F3L75R12W1H3_B27을 사용하였다.

3.2 DC-DC 컨버터

2-stage 구조의 DC-DC 컨버터에서 절연형 컨버터로 DAB 컨버터가 적용되었다. 소프트 스위칭이 가능한 공진형 컨버터와 위상천이 스위칭을 하는 준공진형 컨버터가 적용될 수 있으나, DAB 컨버터가 적용된 것은 충전기의 출력 전압이 최대 1000V로 높은 전압에서 동작하기 때문이다. 이러한 높은 출력 전압은 DAB 컨버터가 공진형 컨버터에 비해 작은 피크 전류를 가지도록 하여, 부품선택에 유리한 면이 있기 때문이다. 비절연형 컨버터는 그림 6과 같이 Buck 컨버터를 선정하였고 높은 출력전압 범위에서 메인 스위치(S_9)를 계속 On으로

B_1 - B_3 의 영역에서는 Buck 컨버터의 Duty가 1이 되어 바이패스 회로로 동작하여 효율이 높은 영역이다. B_1 영역에서 DC Link 전압은 A 영역과 동일하게 650V를 일정하게 제어하고 DAB 컨버터의 전압을 제어하여 최종 출력 전압을 배터리 전압만큼 가변한다. B_2 영역에서 DAB 컨버터는 A 영역과 동일하게 변압기의 턴비만큼 C_2 의 양단전압을 제어하고 AC-DC 컨버터가 DC Link 전압을 최대 800V까지 제어하여 최종 출력전압에 관여한다. B_3 영역은 DC Link 전압이 800V로 고정이고 DAB 컨버터의 출력을 가변하여 최대 1000V까지 제어한다.

DAB 컨버터는 특성상 입력전압과 출력전압의 비율이 변압기의 턴비와 동일한 비율일 때 피크 전류가 작고 부하에 따른 소프트 스위칭 영역이 넓기 때문에 효율이 가장 좋다. 따라서 A 영역에서 2-stage DC-DC 컨버터의 두 컨버터가 모두 동작하지만 DAB의 효율이 높은 영역에서 동작하기 때문에 전체 효율은 비교적 많이 감소하지 않는다. 또한 B_1 과 B_3 영역에서는

Buck 컨버터가 바이패스 회로로 동작하는 전압 범위를 넓히기 위해 DAB 컨버터의 출력전압을 가변하였다. 이때 B_1 과 B_3 의 전압 범위는 DAB 컨버터가 제어 가능한 위상 내에서 피크 전류와 소프트스위칭 영역을 고려하여 선정한다.

3.4 실험 결과

그림 8은 개선된 파워 모듈의 타당성을 검증하기 위한 20kW 시작품과 시험 환경을 보인다. 제어부의 DSP는 TI사의 Dual-core TMS320F28337D를 사용하여 하나의 IC로 AC-DC 컨버터와 2-stage DC-DC 컨버터를 모두 제어하고 3상 380V AC 전원을 입력받아 출력전압을 150V에서 1000V까지 제어하였으며 최대 20A까지 측정하였다.

그림 9(a)는 AC-DC 컨버터의 계통측 3상 전압과 전류를 보여주고 정격부하에서 THD는 약 3%로 측정되었다. 그림 9(b)는 DC 링크 전압과 3레벨 전압을 보여준다. 9(c)는 DC Link 전압을 배터리 전압에 따라 700V에서 800V까지 가변하는 상황을 보여준다.

그림 10은 YOKOGAWA사의 WT3000을 이용하여 측정된 효율이고, 그림 10(a)는 전류에 따른 전압별 효율 그래프이다. 800V에서 최대 약 97%의 효율을 달성하였고 정격부하에서 약 95.5%의 효율을 달성하였으며 충전 모드와 방전 모드에서의 효율은 거의 동일하였다. 그림 10(b)는 기존 충전기에서 사용되는 20kW급 단방향 파워 모듈의 효율과 제안하는 충전기의 효율을 비교한 그래프이다. 기존 파워 모듈의 경우 최대 전압에서 최대 효율이 나타나지만 전압이 낮아질수록 효율이 급격하게 감소하는 반면 개발한 파워모듈의 경우 넓은 전압에서 고효율을 유지하는 것을 확인할 수 있다.

그림 11은 개발한 양방향 파워 모듈의 실차 충전시험 환경을 보여준다. 실차 충전에는 800V급 아이오닉5와 EV6 그리고 400V급 차량인 코나EV, 소울EV, 볼트 EV 등이 사용되었다. 그림 12는 실차 충전 시 측정된 전압 및 전류 파형을 보인다.



그림 8 개발한 파워모듈 시제품 및 시험 환경

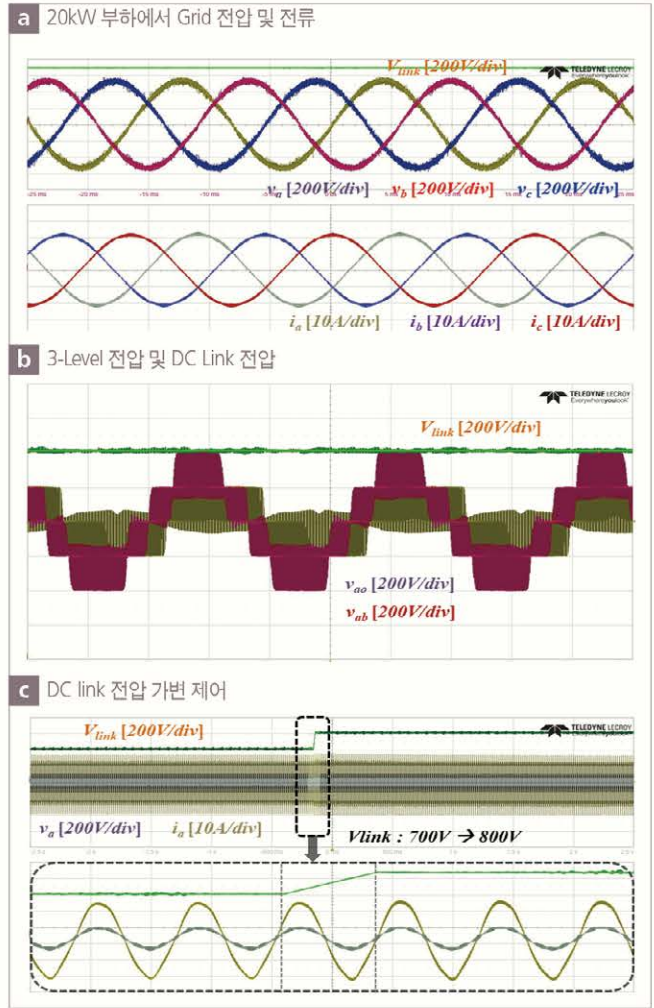


그림 9 AC-DC converter의 실험 파형

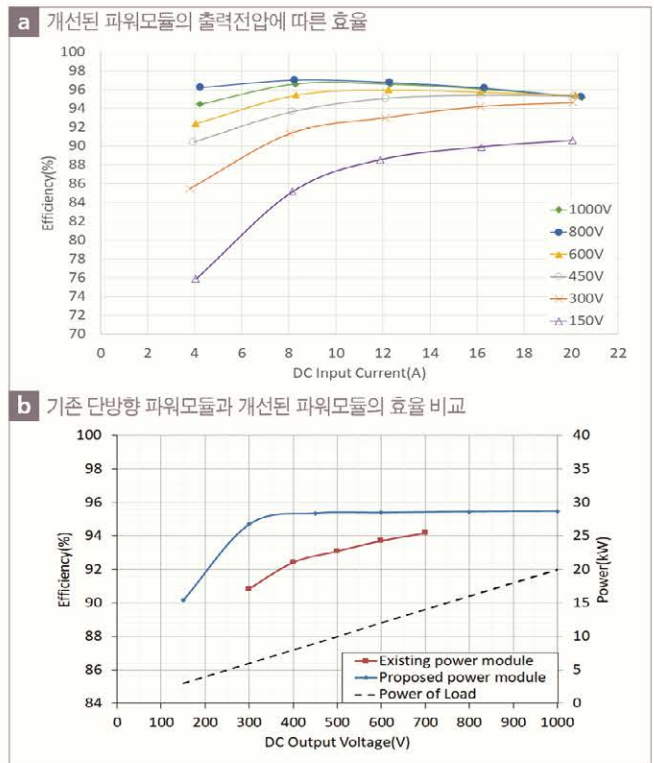


그림 10 출력전압 및 부하에 따른 파워모듈의 효율 그래프



그림 11 EV를 이용한 충전 및 방전 시험

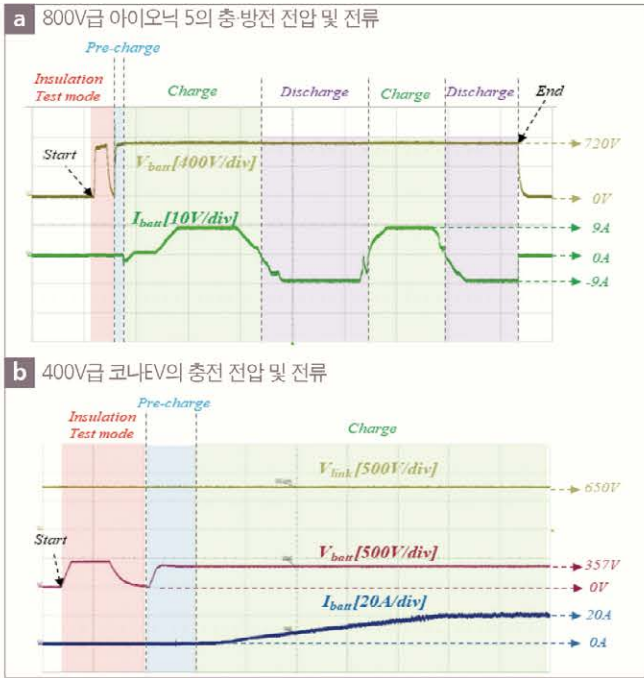



그림 12 개선된 양방향 파워모듈의 충전 및 방전 파형

그림 12(a)는 아이오닉5의 충전 및 방전 파형으로서 먼저 절연을 측정하기 위해 약 700V로 Insulation test를 진행하고 문제가 없으면 Pre-charge 단계로 넘어간 후 EV에서 받은 배터리 전압정보와 비슷한 레벨로 충전기의 출력전압을 제어한다. 충전기의 전압이 배터리 전압값의 오차 범위 내로 제어가 되면 전기자동차 내부 릴레이가 On이 되어 충전기와 도통이 되고 전기자동차에서 요청하는 전류 지령 값으로 전류제어를 하게 된다. 충전 중 사용자 또는 전력거래소의 요청에 의해 방전 요청이 발생하면 EV에서 출력할 수 있는 전류의 값으로 Grid 또는 기타 부하 장치로 전력을 공급하게 된다. 그림 12(b)는 400V급 코나 EV의 충전 전압과 전류의 파형을 보인다.

4. 결론

본고에서는 넓은 충전전압 범위를 갖는 20kW급 V2G용 양방향 파워 모듈을 소개하였다. 기존 위상천이 풀브릿지 구조의 단방향 파워모듈이 최대 전압에서만 효율이 높은 점을 개선하기 위해 DC-DC 컨버터는 DAB 컨버터와 Buck 컨버터를 직렬로 결합한 2-stage 구조를 적용하였고 AC-DC 컨버터는 3레벨 토폴로지로 적용하여 DC Link 전압 가변과 Buck 컨버터의 바이패스 모드 동작을 통해 넓은 출력전압에서 전체적인 효율을 높였다. 최대효율은 약 97%로 기존 파워모듈의 최고효율보다 약 1% 이상 높았고 정격효율은 약 95.5%를 달성하였다. 또한 양방향 제어가 가능하여 V2G 충·방전 기술에 적용할 수 있기 때문에 전력공급망의 안정에 기여할 것으로 기대된다. 

참고문헌

- [1] J. Y. Lee and H. J. Chae, "6.6-kW onboard charger design using DCM PFC converter with harmonic modulation technique and two-stage DC/DC converter," IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 61, No. 3, pp. 1243-1252, Mar. 2014.
- [2] G. B. Sahinler and G. Poyrazoglu, "V2G applicable electric vehicle chargers, power converters & their controllers: a review," in 2020 2nd Global Power, Energy and Communication Conf., pp. 59-64, Oct. 2020.
- [3] D. Aggeler, F. Canales, H. Z. D. L. Parra, A. Coccia, N. Butcher, and O. Apeldoorn, "Ultra-fast dc-charge infrastructures for EV-mobility and future smart grids," in Proc. IEEE Power Energy Soc. Innovative Smart Grid Technol. Conf., Europe, pp. 1-8, Oct. 2010.
- [4] J. H. Kim, W. S. Lee, S. W. Choi, J. Y. Lee, and I. O. Lee, "A new DC-DC converter topology for high- efficiency electric vehicle rapid chargers," The Transactions of Koran Institute of Power Electronics, Vol. 23, No. 3, pp. 182-189, 2018.

나재호 한국자동차연구원 그린카연구본부 연구원

1989년 3월 9일생. 2014년 공주대 제어계측공학과 졸업.
2017년 동 대학원 전기전자제어과 졸업(석사).
2020년~현재 한양대 전기공학과 박사과정. 2018년~현재 한국자동차연구원 그린카연구본부 연구원.



박준성 한국자동차연구원 그린카연구본부 책임연구원

1982년 4월 26일생. 2009년 서울과학기술대 제어계측공학과 졸업.
2011년 동 대학 에너지환경대학원 신에너지공학과 졸업(석사). 2016년 동 대학원 졸업(공학박사).
2015년~현재 한국자동차연구원 그린카연구본부 책임연구원.



신외경 한국자동차연구원 그린카연구본부 본부장

1970년 8월 28일생. 1994년 경상대 고분자공학과 졸업. 1996년 동 대학원 고분자공학과 졸업(석사).
2010년 연세대 기계공학과 졸업(공학박사).
1996년~현재 한국자동차연구원 그린카연구본부 본부장.

