

# 전기자동차 대용량 급속충전기를 위한 40kW, 100-1000V 출력을 갖는 DC/DC 전력 모듈

배세영<sup>1)</sup>, 조달현<sup>1)</sup>, 최민기<sup>1)</sup>, 김주은<sup>1)</sup>, 이일운<sup>1\*</sup>  
 명지대학교<sup>1)</sup>

## A 40kW, 100-1000V Output DC/DC Unit Power Module for EV Fast Chargers

Se-Young Bae, Dal-Hyeon Cho, Min-Gi Choi, Joo-Eun Kim, and Il-Oun Lee  
 Myongji University

### ABSTRACT

본 논문은 전기자동차 대용량 급속충전기에 적용될 수 있는 40kW, 100-1000V 출력 DC/DC 전력 모듈을 발표한다. 전력 모듈은 두 개의 LLC 공진형 컨버터로 구성된다. 두 LLC 공진형 컨버터의 1차측 인버터는 병렬로 배치되어 있으며, 2차측 정류기는 출력 전압 조건에 따라 직렬 또는 병렬로 연결된다. 각 LLC 공진형 컨버터는 두 개의 변압기를 사용하며, 두 변압기의 1차측은 병렬로 연결되고, 2차측은 전력 균형을 맞추기 위해 직렬로 연결된다. 높은 효율을 달성하기 위해, 두 LLC 공진형 컨버터는 공진 주파수와 가깝게 동작하도록 설계되었고, 변압기 누설 인덕턴스 최소화 권선법이 ansys 소프트웨어를 활용하여 연구되었다. 제안된 전력 모듈의 성능은 100-1000V 및 40kW 사양의 프로토타입에서 검증되었다.

### 1. 서론

환경문제가 대두됨에 따라 온실가스 감축을 위한 국내외에서의 내연기관차 규제가 강화되고 있다. 이에 따라 자동차 회사들은 환경규제에 대한 대응으로 전기자동차를 개발, 상용화하고 있다. 하지만, 현재 주요 국가들의 전기자동차 충전기 1기당 담당 대수는 평균 5.6대로 전기자동차 충전기는 매우 부족하다. 따라서 전기자동차 충전인프라 구축이 시급한 상황이다.

전기자동차 충전기는 이용자의 편의를 위해 충전 시간 단축이 필수적이고 차량마다 요구되는 배터리 전압 범위를 충족시켜야 한다. 따라서 전기자동차 급속충전기를 구성하는 DC/DC 전력 모듈의 용량은 최근 30-50kW급으로 증가하고 있고, 출력 전압 범위도 150-1000V로 개발되고 있다. 본 논문은 대용량 급속충전기를 위한 40kW급, 100-1000V 출력이 가능한 DC/DC 전력 모듈에 관해 발표한다.

### 2. 40kW급 DC/DC 전력 모듈

#### 2.1 40kW급 DC/DC 전력 모듈 구성

그림 1은 본 논문에서 발표하는 40kW급 DC/DC 전력 모듈을 보여준다. 전력 모듈은 두 개의 LLC 공진형 컨버터로 구성된다. 대전력 전달을 위해 각 LLC 컨버터는 2개의 변압기를 사용하며 두 변압기의 1차측은 병렬로 연결되고, 2차측은 전력 균형을 위해 직렬로 연결된다. 풀브리지 정류단은 출력전압에 따라 직렬 또는 병렬로 연결되어 넓은 출력전압 범위에서도 고

효율을 달성할 수 있도록 한다. 두 LLC 컨버터가 공진주파수 근처에서 동작할 수 있도록 배터리 전압에 따라 입력 전압을 650V에서 870V로 가변되도록 하는 알고리즘을 적용하였다.

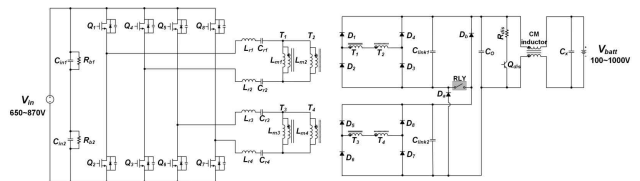
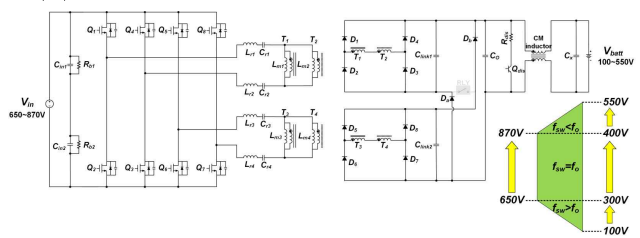


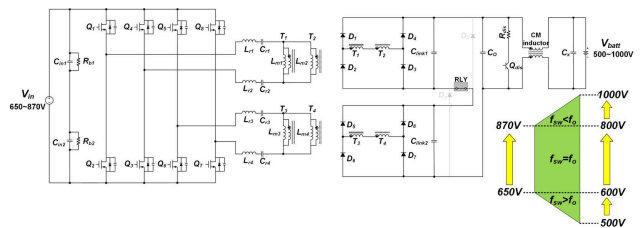
그림 1. 40kW급 DC/DC 전력 모듈

#### 2.2 40kW급 DC/DC 전력 모듈 동작 원리

40kW급 DC/DC 전력 모듈은 넓은 출력전압 범위에도 고효율을 달성할 수 있도록 출력전압 500-550V를 기준으로 정류단이 직병렬 연결된다. 저전압(100-550V) 출력 시 최대 전류는 120A이다. 높은 충전 전류로 인한 스트레스를 줄이기 위해 그림 2(a)와 같이 릴레이가 차단되고 보조다이오드  $D_{a1}$ ,  $D_{b1}$ 가 도통되어 정류단이 병렬 결선된다. 고전압(500-1000V) 출력 시 높은 출력전압에 의한 스트레스를 줄이기 위해 릴레이를 도통시키고 보조다이오드  $D_{a1}$ ,  $D_{b1}$ 가 개방되어 정류단은 그림 2(b)와 같이 직렬 결선된다. 회로의 구조를 결정하는 기준 출력전압 (500-550V)은 공통 동작영역으로 저전압, 고전압 모두 출력 가능하다.



(a) 저전압(100~550V) 출력에서 회로 구성



(b) 고전압(500~1000V) 출력에서 회로 구성

그림 2. 출력전압 범위 변화에 따른 회로 구성

### 2.3 LLC 공진형 컨버터 설계

#### 2.3.1 제안 컨버터 전압 이득 분석

제한한 전력 모듈은 그림 3과 같이 등가화될 수 있다. 이로부터 공진탱크의 전압 이득식은 수식 (1)로 분석된다.

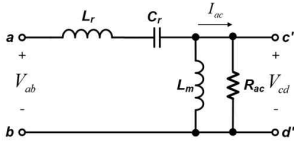


그림 3. 제안 전력 모듈 공진탱크 등가회로

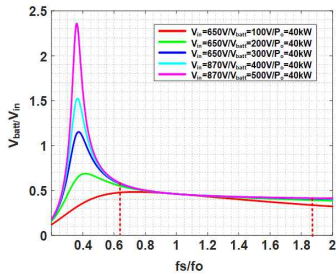
$$M = \frac{V_{cd}}{V_{ab}} = \frac{1}{\sqrt{\left[1 + \frac{1}{k} \left(1 - \frac{1}{f_n^2}\right)\right]^2 + \left[Q \left(f_n - \frac{1}{f_n}\right)\right]^2}} \quad (1)$$

$$f_n = \frac{f_s}{f_o}, \quad k = \frac{L_m}{L_r}, \quad Q = \frac{z_o}{R_{ac}}, \quad z_o = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}$$

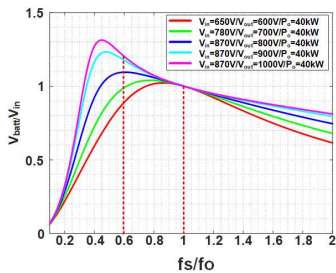
$$V_{ab} = \frac{4}{\pi} V_{in}, \quad V_{cd} = \frac{2n V_{batt}}{\pi}, \quad R_{ac} = \frac{4n^2}{\pi^2} R_{batt} \quad (\text{정류단 병렬 동작 시})$$

$$V_{ab} = \frac{4}{\pi} V_{in}, \quad V_{cd} = \frac{n V_{batt}}{\pi}, \quad R_{ac} = \frac{n^2}{\pi^2} R_{batt} \quad (\text{정류단 직렬 동작 시})$$

그림 4는 위에서 분석한 전압 이득으로부터 도출된 전압 이득 곡선을 보여준다. 공진주파수는 동작 주파수 범위와 효율을 고려하여 120kHz로 선정하였고 충전 중 동작 주파수 범위는 70-197kHz가 되도록 설계하였다. 모든 동작 조건에서 영전압 스위칭 동작을 만족하고 최대 전압 이득이 1.3이 되는 동작점까지 사용하게 된다.



(a) 저전압(100-550V) 출력일 때 이득 곡선



(b) 고전압(500-1000V) 출력일 때 이득 곡선

그림 4. 공진탱크 이득 곡선

#### 2.3.2 공진 파라미터 설계

공진 인덕터와 공진캐패시터는 전 출력 범위에서 이득이 확보되는 공진탱크 특성임피던스와 공진주파수를 고려하여 수식 (2)에 따라 설계하였다. 설계된 공진인덕터는 22μH, 공진캐패시터는 82.5nF이다.

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}}, \quad z_o = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \quad (2)$$

자화인덕턴스는 출력 전 범위에서 영전압 스위칭 동작을 보장하기 위하여 수식 (3)을 이용해 150μH로 설계하였다.

$$I_{LM(ZVS)} = \frac{2 \times C_{oss} \times V_{in}}{T_{d cad}}, \quad L_{M(max)} = \frac{0.25n V_{batt}}{I_{LM(ZVS)} \times f_o} \quad (3)$$

변압기 권선비는 공진주파수와 스위칭주파수가 일치되는 출력전압범위(600-800V)를 기준으로 설계한다. 최소 입력전압은 역률보정을 고려하여 650V로 선정하였고, 이때 출력전압은 600V이다. 이 조건에서 수식 (4)처럼 변압기 권선비가 설계된다.

$$n = \frac{N_p}{N_s} = \frac{V_{in}}{0.25 V_{batt}} = \frac{650}{150} = 4.333 \quad (4)$$

위 권선비에 따라 출력전압 800V에서 공진주파수로 동작할 수 있도록 최대 입력전압을 870V로 선정하였다. 이 설계 결과로 800V 이상으로 배터리를 충전하기 위해 입력전압은 870V로 고정되고 컨버터는 공진주파수보다 낮은 스위칭을 하게 되고, 600-800V 조건에서 입력전압은 650-870V로 가변되어 공진주파수에서 동작한다. 500-600V 조건에서 입력전압은 650V로 고정되고 컨버터는 공진주파수보다 높은 스위칭을 한다. 출력전압 550V 미만은 정류기가 병렬로 결선된 상태이다. 400-550V 조건에서 입력전압은 870V로 고정된 상태에서 컨버터는 공진 주파수보다 낮은 스위칭을 하게 되고, 300-400V 출력전압에서 입력전압은 650-870V로 가변되어 공진주파수에서 동작한다. 100-300V 조건에서 입력전압은 650V로 고정되어 공진주파수보다 높은 스위칭을 하게 된다.

#### 2.3.3 반도체 소자 설계

반도체 스위치에 걸리는 최대 전압은 870V이고 최대 전류 실효치는 24.5A, 최대 피크전류는 34.4A이다. 최대 전압의 90% 마진, 전류실효치의 50% 마진, 피크전류의 70% 마진, 계산된 전력손실을 고려하여 SCT3022KL SiC-MOSFET으로 선정하였다.

#### 2.3.4 다이오드 설계

충전 전 범위에서 정류 다이오드에 걸리는 최대 전압은 500V이고, 최대 평균전류는 34A이다. 최대 전압의 80%마진, 최대 평균전류의 70% 마진, 계산된 전력손실을 고려하여 RURG5060-F085 소자를 선정하였다.

보조 다이오드에 걸리는 최대 전압은 500V이고, 최대 평균전류는 60A이다. 정류 다이오드와 동일한 소자로 설계하였다.

#### 2.3.5 변압기 설계

40kW를 단일 변압기로 구현하는 것은 현실적으로 어렵다. 본 연구에서는 충전기 높이와 상용 가능한 코어를 고려하여 10kW 변압기 4개로 구현하였다. 변압기 누설인덕턴스가 시스템의 효율에 큰 영향을 주기 때문에 변압기 누설인덕턴스 최소화 권선법을 아래 표와 같이 ansys 소프트웨어를 활용하여 연구하고 최종 3번으로 제작하였다. 변압기는 EE6565S 코어로 1차측 22turns, 2차측 5turns이고 40kW 기준 코어와 코일 발열이 그림 5와 같이 95도 이하가 되도록 설계하였다.

표 1. 10kW 변압기 시뮬레이션

Parameter	1	2	3
1 layer	5turns	22turns	22turns
2 layer	22turns	5turns	5turns
3 layer	22turns	5turns	5turns
4 layer	5turns	22turns	22turns
primary inductance	285.91μH	282.01μH	288.98μH
leakage inductance	8.22μH	6.06μH	4.04μH

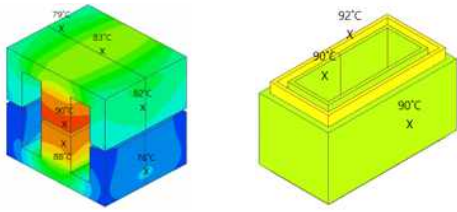


그림 4 변압기 설계 결과

## 2.4 배터리 충전 제어 알고리즘

그림 6은 40kW급 DC/DC 전력 모듈의 배터리 충전제어 알고리즘을 보여준다. 40kW급 DC/DC 전력 모듈은 PFM 방식으로 제어한다. 고효율 달성을 위해 두 컨버터를 인터리빙 동작하도록 하였고 배터리 전압에 따라 컨버터 운전모드가 결정된다. 배터리 전압에 따라 전력 모듈의 운전모드 전환이 필요할 때, 안전한 전환을 위해 방진회로를 통한 mode change 알고리즘을 적용하였다.

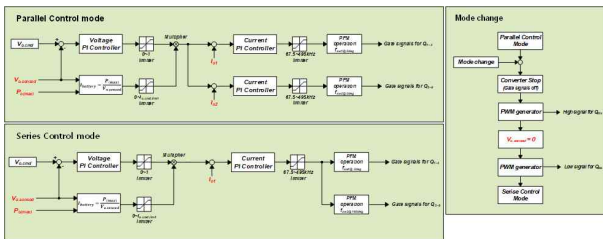


그림 6. 40kW급 DC/DC 전력 모듈 제어 알고리즘

## 2.5 실험 결과

40kW급 DC/DC 전력 모듈의 사양은 표 2와 같다.

그림 7은 제작된 전기자동차 대용량 급속충전기를 위한 40kW, 100-1000V 출력을 갖는 DC/DC 전력 모듈의 프로토타입을 보여준다.

그림 8은 입력 650V, 출력 600V, 30kW 조건에서 주요 동작 파형을 보여준다. 그림 8(a)의 두 공진전류 파형과 그림 8(b)의 두 정류단 파형으로부터 전력 균형이 잘 이루어지고 있는 것을 확인할 수 있다.

그림 9은 입력 870V, 출력 800V, 40kW 조건에서 측정된 효율을 보여준다. 부분 부하에서 97.83% 효율이 달성되고 있는 것을 알 수 있다.

그림 10은 30kW 기준 충전 조건별 전력변환 효율을 보여준다. 최고 효율은 97.9%, 평균 효율은 97.3%의 효율이 달성되고 있는 것을 확인할 수 있다.

표 2. 40kW급 DC/DC 전력 모듈 사양

Parameter	Specifications
정격전력	40kW
입력전압	650-870V
출력전압	100-1000V
출력전류	120A

## 3. 결론

본 논문에서는 전기자동차 대용량 급속충전기를 위한 40kW, 100-1000V 출력을 갖는 DC/DC 전력 모듈과 그 설계 및 실험결과가 발표되었다. 넓은 출력전압 범위에도 고효율 달성을 위해 입력 전압 가변 알고리즘과 정류단이 직병렬 연결되는 회로를 적용하였다. 프로토타입을 통해 그 성능을 확인하고 최대 97.9%의 효율이 달성되어 제안한 전력 모듈의 타당성을 확인하였다.

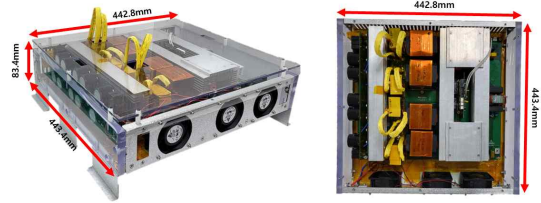
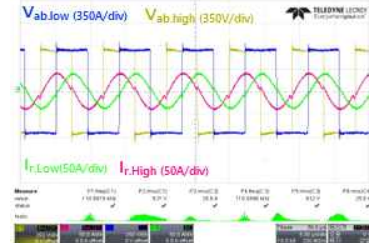
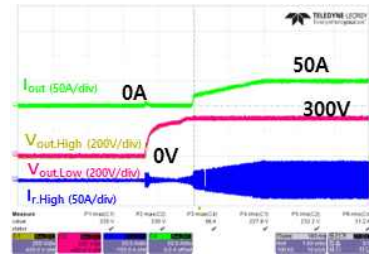


그림 7. DC/DC 전력 모듈 프로토타입



(a) 공진탱크 입력전압, 공진전류 파형



(b) 출력전류, 정류단 전압, 공진전류 파형  
그림 8. 600V, 30kW 출력시 주요 동작 파형



그림 9. 입력 870V, 출력 800V, 40kW 측정 효율

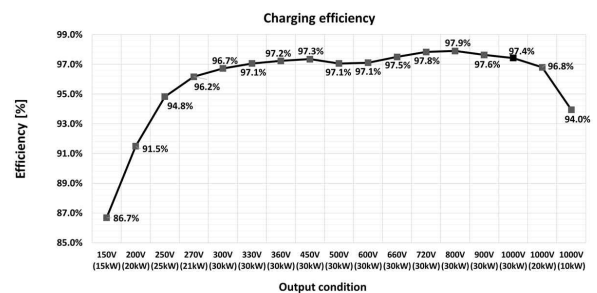


그림 10. 충전 조건별 효율 그래프

## 참고 문헌

- [1] Global EV 2020, International Energy Agency, Paris, France, 2020. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020>. IEA. (2021). Global EV Data Explorer. [Online]. Available:
- [2] Il-Oun Lee, "Three-Level Resonant Converter With Double LLC Resonant Tanks for High-Input-Voltage Applications", IEEE Trans. Ind. Electron, Vol. 59, No. 9, pp. 3450-3462, 2012, September.