

넓은 출력 전압 범위를 갖는 전기자동차 초급속 충전용 3상 인터리브드 LLC 공진형 컨버터 설계

김재원, 박수성, 김래영
한양대학교

Design of 3-phase interleaved LLC Resonant Converter for ultra-fast charging of Electric Vehicles with a wide output voltage range

Jae-Won Kim, Su-Seong Park, Rae-Young Kim
Hanyang University

ABSTRACT

본 논문에서는 전기차 초급속 충전 시스템을 위한 넓은 출력 전압 범위를 갖는 30kW급 LLC 공진형 컨버터 설계에 대해 다룬다. 시스템의 효율 및 전력 밀도 향상을 위해 SiC(Silicon Carbide) MOSFET를 적용하였으며, 단상 및 2상 인터리브 대비 전류 리플 감소가 가능한 3상 인터리브드 방식을 적용하였다. 설계한 LLC 공진형 컨버터의 1차 측은 3개의 Half-bridge를 Y 결선으로 구성하였고, 2차 측은 넓은 출력 전압 범위를 만족하기 위해 Full-bridge 구조의 다이오드 정류기로 구성하였다. 또한, 2차 측은 출력 전압 범위에 따라 직/병렬 구조로 전환하여 출력 전압 150V-1000V 범위를 만족할 수 있다. 설계한 3상 인터리브드 LLC 공진형 컨버터는 PSIM 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

1. 서론

전 세계적으로 지구 온난화 및 대기 오염 등으로 인한 지구 환경 변화를 억제하기 위해 지속 가능한 발전, 신재생 에너지 사용 및 탄소 중립 등 여러 가지 활동과 연구가 진행 중이다.^[1] 그중에서도 온실가스 저감을 위해 친환경 자동차가 개발되었으며, 매년 전기자동차 수요가 증가하는 추세이다. 최근 전기자동차 제조사들은 충전 시간이 오래 걸리는 단점을 개선하기 위해 기존 400V급 배터리뿐만 아니라 더 높은 정격인 800V급 배터리를 적용하여 주행거리가 향상된 전기자동차를 출시하고 있다.^[2] 이에 따라 모든 전기자동차에 적용할 수 있도록 넓은 출력 전압 범위를 갖는 충전 시스템이 요구되고 있으며, 충전 전력을 늘려 급속 충전이 가능한 전기차 충전 시스템에 대한 지속적인 개발 및 연구가 진행되고 있다. 전기차 충전 시스템에서 DC/DC 컨버터는 전 부하 영역에서 ZVS 동작이 가능하여 시스템 효율을 향상할 수 있는 단상 LLC 공진형 컨버터가 많이 적용되고 있다. 하지만 단상 LLC 컨버터의 경우 고전력 시스템에서 전류 리플의 증가와 넓은 전압 범위 구동이 어렵다는 한계점이 있다.^[3] 이에 대한 해결책으로 다상 인터리브드 LLC 공진형 컨버터가 제안된다. 다상 인터리브드 LLC 공진형 컨버터는 입, 출력 전류 리플 저감이 가능하여 시스템 전력 밀도 향상이 가능하고 고전력분야에 적합하여 최근 많은 관심을 받고 있다. 본 논문에서는 넓은 출력 전압 범위를 갖고 고효율 및 고전력밀도 설계가 가능한 30kW급 전기자동차 급속 충전용 3상 인터리브드 LLC 공진형 컨버터 설계에 대해 다룬다.

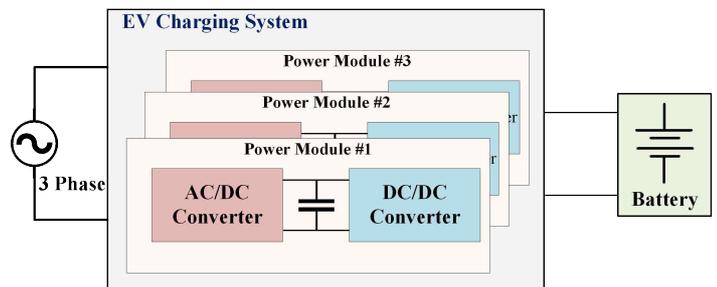


그림 1 전기자동차 급속 충전 시스템 구성
Fig. 1 Configuration of ultra-fast charging system for EV

2. 3상 인터리브드 LLC 공진형 컨버터

2.1 LLC 공진형 컨버터 토폴로지 선정

일반적으로 급속 충전기는 그림 1과 같이 입력 계통 전원을 받아 직류 전압으로 변환하는 AC/DC 컨버터와 전기자동차 배터리에 만족하는 출력 전압으로 변환하는 DC/DC 컨버터로 구성된다. DC/DC 컨버터는 전 부하 조건에서 1차측 ZVS 및 2차측 ZCS 동작을 통해 시스템 효율을 향상이 가능하고 전력 밀도 향상이 가능한 LLC 컨버터가 많이 적용된다. 그중에서 3상 인터리브드 LLC 공진형 컨버터는 단상 LLC 공진형 컨버터 대비 공진 전류의 rms 및 Peak 전류가 감소하여 전도 손실이 저감되는 장점이 있다. 본 논문에서는 그림 2와 같이 1차 측 Y 결선을 이용하여 Half-bridge LLC 컨버터 3개의 모듈을 인터리브 방식으로 구성하였으며, 각 상마다 공진 네트워크가 직렬로 연결된다. 변압기의 경우 2차 측은 두 개의 와인딩을 적용하였고, 각 와인딩마다 Full-bridge 구조의 정류기가 연결된다. 2차측 다이오드 정류기는 고전압 출력을 위해 Full-bridge 구조로 적용하였으며 출력단에 릴레이 3개를 추가하여 출력 전압 범위에 따라 직/병렬 구조로 가변함으로써 넓은 출력 전압 범위에서 동작이 가능하다.

2.2 시스템 동작 모드

시스템 동작 모드는 크게 운전 모드 1과 2로 구성된다. 운전 모드 1은 출력 전압 500V 이상 구동 조건에서 릴레이를 통해 출력단을 직렬로 구성함으로써, 고전압 출력 시, 전압 스트레스 감소가 가능하다. 반대로 출력 전압 500V 이하 구동 조건에서 전류 스트레스 저감을 위해 릴레이를 이용하여 출력단은

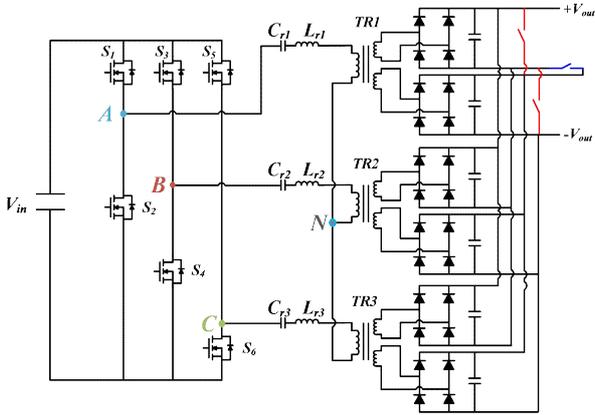


그림 2 3상 인터리브드 LLC 공진형 컨버터 토폴로지
Fig. 2 Topology of three-phase interleaved LLC converter

병렬로 연결된다. 추가적으로 운전 모드 2 안에서는 저전압 출력 시, 손실 저감을 위한 1차측 Full-bridge 모드가 존재한다. Full-bridge 모드는 250V 이하 구동 조건에서 한 레그의 스위치를 모두 Off 함으로써 단상 Full-bridge처럼 동작하며, 스위칭 손실 저감이 가능하다는 장점이 있다.

3. 3상 인터리브드 LLC 컨버터 설계

30kW급 전기차 초급속 충전용 3상 인터리브드 LLC 컨버터 설계 사양은 표 1과 같다. 시스템의 입력 전압 범위는 650V-820V이고, 출력 전압은 150V-1000V의 범위를 갖는다. 스위칭 주파수 범위는 150kHz-300kHz이며, 공진 주파수는 200kHz로 선정하였다. 변압기 턴 비(N)의 경우 입력 최소 전압과 출력 최대 전압을 고려하여 1.09로 선정하였다.

LLC 공진형 컨버터의 전압 이득은 공진 네트워크 파라미터 설계 값에 의하여 결정된다. 본 논문에서는 전압 및 전류의 기본과 성분만 고려한 FHA 분석 방법 기반으로 공진 네트워크를 설계하며, 각 운전 모드 별로 등가 저항 및 전압 이득 곡선을 도출한다. 그림 3 (a)는 운전 모드 1 및 2 동작 시, 한 상의 등가 회로를 나타내며, Full-bridge 모드의 등가 회로는 그림 3 (b)와 같다. 출력단 직렬 연결 및 병렬 연결에 따른 등가 부하 저항 R_{eq} 는 각각 식 1과 2와 같이 구할 수 있으며, 컨버터 전압 이득은 식 3과 같이 구할 수 있다.

여기서 m 은 자화 인덕턴스와 공진 인덕턴스의 비로 $m = (L_r + L_m)/L_r$ 를 의미하고, f_n 은 정규화된 스위칭 주파수로 $f_n = f_s/f_r$ 이다. 품질 계수 Q 는 $Q = \sqrt{L_r/C_r}/R_{eq}$ 로 구할 수 있다.

$$R_{eq(S)} = \frac{4}{\pi^2} R_o N^2 \quad (1)$$

$$R_{eq(P)} = \frac{16}{\pi^2} R_o N^2 \quad (2)$$

$$M = \frac{f_n^2 (m-1)}{\sqrt{(m \times f_n^2 - 1)^2 + f_n^2 (f_n^2 - 1)^2 \times (m-1)^2 \times Q^2}} \quad (3)$$

표 1 전기차 초급속 충전용 3상 인터리브드 LLC 컨버터 설계 사양
Table 1 Design specification of three-phase interleaved LLC converter for for ultra-fast charging of Electric Vehicles

Parameter	Value	Unit
입력 전압 (Vin)	650-820	VDC
출력 전압 (Vout)	150-1000	VDC
출력 전력 (Pout)	30	kW
공진 주파수 (Fr)	200	kHz
스위칭 주파수 범위 (Fs)	150-300	kHz

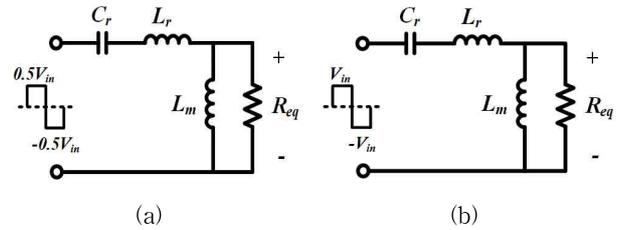


그림 3 (a)운전 모드 1, 2의 등가 회로 (b)Full-bridge 모드의 등가 회로
Fig. 3 (a) Equivalent circuit of operation mode 1, 2 (b)Equivalent circuit of Full-bridge mode

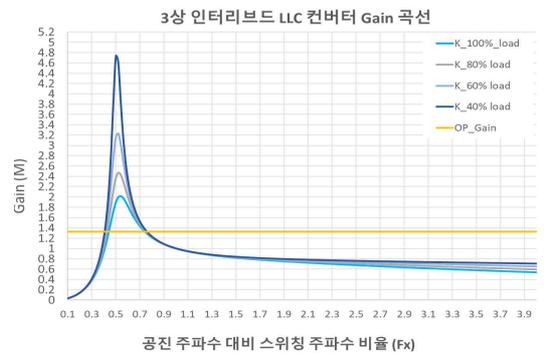


그림 4 운전 모드 1의 LLC 컨버터 전압 이득 곡선
Fig. 4 The voltage gain curve of operation mode 1

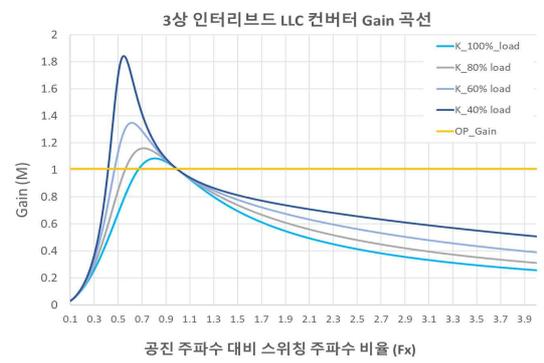


그림 5 운전 모드 2의 LLC 컨버터 전압 이득 곡선
Fig. 5 The voltage gain curve of operation mode 2

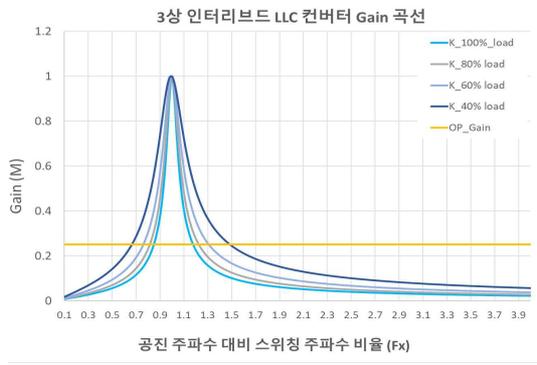


그림 6 Full-bridge 모드의 전압 이득 곡선
Fig. 6 The voltage gain curve of Full-bridge mode

그림 4, 5 및 6은 동작 모드 별 부하에 따른 3상 인터리브드 LLC 공진형 컨버터 전압 이득 곡선을 나타내고, 공진 네트워크 파라미터는 표 2와 같이 설계하였다. 인덕턴스 비율 m 값은 3.9으로 선정하였으며, 품질 계수 Q 값은 0.35로 선정하였다. 이에 따라 자화 인덕턴스와 공진 인덕턴스는 각각 $40\mu\text{H}$, $13.5\mu\text{H}$ 로 설계하고, 공진 커패시턴스는 47nF 로 설계했다. 설계된 파라미터는 각 상의 공진 네트워크에 각각 적용되어 모두 동일한 파라미터 값을 갖는다.

4. 시뮬레이션 검증

설계한 3상 인터리브드 LLC 공진형 컨버터 공진 네트워크 파라미터 값은 PSIM 시뮬레이션을 이용하여 검증하였다. 그림 6은 Full-bridge 모드에서 주요 파형을 나타내고, 출력 전압 최소 전압인 150V 출력을 확인하였다. 그림 7과 그림 8은 동작 모드 2와 1에 대한 주요 파형이다. 출력단 직렬 연결 시, Below 영역에서 최대 전압 1000V로 출력하는 것을 검증하였다.

표 2 3상 인터리브드 LLC 컨버터 공진 네트워크 파라미터
Table 2 Resonant network parameters of three-phase interleaved LLC converter

Parameter	Value	Unit
자화 인덕턴스 (L_m)	40	μH
공진 인덕턴스 (L_r)	13.5	μH
공진 커패시턴스 (C_r)	47	nF
변압기 턴-비 (N)	1.09	-
자화 및 공진 인덕턴스 비(h)	3.9	-
품질 계수 (Q)	0.35	-

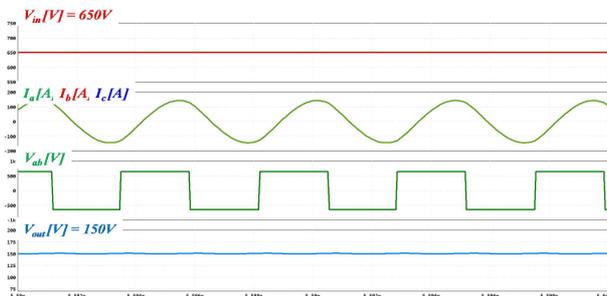


그림 7 동작 모드 1의 전압 및 전류 파형
Fig. 7 Voltage and current waveforms in Operation Mode 1

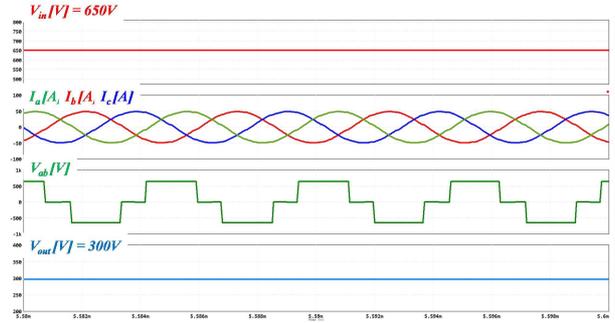


그림 8 동작 모드 1의 전압 및 전류 파형
Fig. 8 Voltage and current waveforms in Operation Mode 1

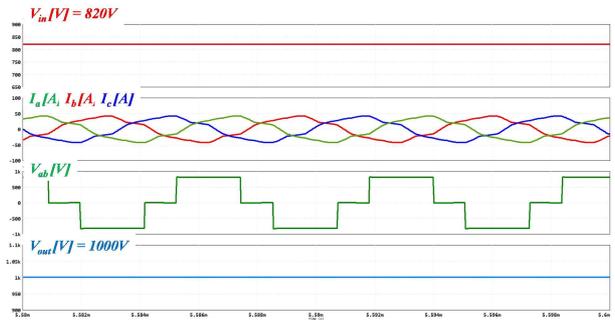


그림 9 동작 모드 2의 전압 및 전류 파형
Fig. 9 Voltage and current waveforms in Operation Mode 2

5. 결론

본 논문에서는 전기자동차 급속 충전용 3상 인터리브드 LLC 공진형 컨버터 설계에 대해 다룬다. 입력 전압 650-820V 및 출력 전압 150-1000V를 만족하는 공진 네트워크 설계를 수행하고, 출력 전압에 따른 동작 모드에 따라 출력단 구조를 가변하여 PSIM 시뮬레이션을 통해 넓은 출력 전압 범위를 만족하는 것을 검증하였다.

이 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (20212020800020, 통합형 최적설계 플랫폼 기반 초고효율 전력변환시스템 개발)

참고 문헌

- [1] 박준성, 전유중, 나재호, 조수연, 신양진, 신외경, 김준호. (2022). 전기자동차 충전을 위한 고효율 파워모듈 개발. 한국자동차공학회논문집, 30(10), 785-792, 10.7467/KSAE.2022.30.10.785
- [2] 이상혁, 민성수, 박해찬, 조영찬, 이상택, 김래영, 이기영. (2023). 넓은 출력전압을 가지는 전기자동차 초급속충전용 30kW 파워모듈 구현. 전기학회논문지 P, 72P(2), 75-82, 10.5370/KIEEP.2023.72.2.75
- [3] 안기정, 정지훈, 김호성, 류명호, 백주원, 김인동. (2012-07-03). Y결선 정류기를 이용한 3상 인터리브드 LLC 공진형 컨버터의 출력전류리플 밸런싱. 전력전자학회 학술대회 논문집, 무주.