

전기자동차용 급속충전기를 위한 넓은 충전전압 범위를 갖는 공진 컨버터 비교 및 설계기법

정헌수, 박준성, 최세완
서울과학기술대학교

Comparison and Design Method of Resonant Converter with Wide Charging Voltage Range for EV Fast Charger

Heon soo Jeong, Jun Sung Park, Sewan Choi
Seoul National University of Science and Technology,

ABSTRACT

전기자동차용 급속 충전기에서 전력변환 효율은 절연형 DC DC 컨버터에 의해 좌우된다. 이때 DC DC 컨버터의 출력전압 범위가 넓기 때문에 기존의 LLC 공진 컨버터를 Region2에서 설계하는 경우 스위칭 주파수 범위가 매우 넓어지는 문제가 있다. 본 논문에서는 전기자동차용 급속충전기를 위한 넓은 충전전압 범위를 갖는 공진 컨버터 비교 및 최적 설계기법을 제안한다. 제안한 SRC below영역 설계는 모든 스위치와 다이오드의 ZCS 턴오프를 성취하므로 IGBT 사용 시 유리하다. 또한, 주파수 변동범위가 작으므로 주로 낮은 배터리 전압에서 동작하는 CC충전 모드 시 스위칭 손실을 줄일 수 있다. 설계 영역에 따른 LLC, SRC를 비교하여 손실을 분석하고 제안한 설계기법의 타당성을 검증하였다.

1. 서 론

전기자동차의 보급 확대와 운용 활성화를 위해 기존 주유기에 해당하는 급속충전기의 충전 인프라 구축이 필수적이다. 그림 1과 같이 급속충전기는 인버터와 절연형 DC DC 컨버터로 구성된다. 표 1은 급속충전기의 사양 예를 나타낸다. 절연형 DC DC 컨버터는 다양한 배터리의 충전전압을 만족하기 위해 넓은 출력전압 범위를 갖는다. 또한, 급속충전기의 전력변환 효율은 절연형 DC DC 컨버터에 의해 좌우되므로 고효율의 달성이 필수적이다. 따라서 손실 및 EMI발생 측면에서 유리한 공진형 DC DC 컨버터의 적용이 주로 고려되고 있다. 특히 여러 분야에 적용되고 있는 LLC 공진 컨버터가 검토되고 있는데 이를 일반적으로 가장 많이 사용하는 Region2에서 설계하는 경우 스위칭 주파수 범위가 매우 넓어져서 스위치 턴오프 전류가 큰 Region1까지 동작되기 때문에 주로 낮은 배터리 전압에서 동작하는 CC충전 모드 시 스위칭 손실이 매우 커지는 문제가 있다.

본 논문에서는 전기자동차용 급속충전기를 위한 넓은 충전전압 범위를 갖는 공진 컨버터 비교 및 최적 설계기법을 제안한다. 공진 컨버터의 토폴로지로써 LLC 공진 컨버터와 SRC를 고려하며 설계 시 일반적으로 사용하는 Above(Region2)영역 뿐 아니라 Below(Region3)영역을 고려하여 스위칭 손실과 주파수 범위를 줄일 수 있는 방법을 제시한다. 또한 스위칭 소자로서 IGBT를 사용하는데 IGBT 스위칭 특성에 가장 적합한 토폴로지와 설계기법을 제시한다.

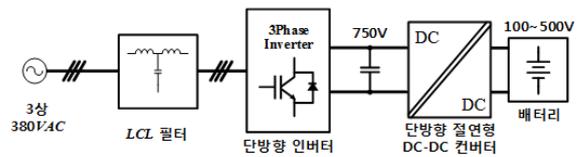


그림 1 급속충전기 시스템 구성도

표 1 급속충전기 목표 사양 예

구분	주요사양	비고
용량	50kW	
입력전압	3상 380V	AC
출력전압	100~500V	DC
출력전류	0~100A	DC
역률	0.95 이상	Rated Power
효율	94% 이상	Rated Power
전압리플	3% 이내	정격전압 대비
충전방식	CC CV	

2. 제안하는 공진형 컨버터 설계기법

일반적으로 LLC 공진 컨버터를 그림 2(a)의 Region2에서 동작하도록 설계하면 그림 3(b) 같이 스위치가 ZVS 턴온 하고 낮은 전류로 턴오프 한다. 그러나 IGBT를 사용하는 경우 스위치 턴오프 전류가 존재하기 때문에 tail current가 발생하여 손실이 생긴다. 더욱이 본 급속충전기와 같이 주파수 변동범위가 큰 경우 Region2 에서만의 동작이 어려워지고 낮은 배터리 전압에서 동작하는 CC충전 모드 시 Region1으로 동작이 넘어가게 되어 그림 3(a)와 같이 스위칭 손실이 매우 커지는 문제가 있다.

또한 LLC 공진 컨버터를 그림 2(a)의 Region3에서 동작하도록 설계하면 그림 3(c)와 같이 스위치가 ZCS 턴오프를 하기 때문에 IGBT를 사용할 시 tail current 문제가 발생하지 않게 된다. 그리고 위의 Region2 동작보다 주파수 변동범위가 작기 때문에 CC CV 전 동작을 Region3에서 할 수 있게 된다. 하지만 Region3에서 동작하는 LLC 공진 컨버터는 Lm 공진으로 인하여 전압이득이 커지기 때문에 그림 2(a)의 빨간 화살표 부근에서 동작하게 되고 그림 3(d)와 같이 주로 스위치 턴온 전류가 큰 부분에서 동작하게 되어 스위칭 손실이 커지게 된다. 또한 Lm 전류가 순환전류로 되기 때문에 SRC에 비해 순환전

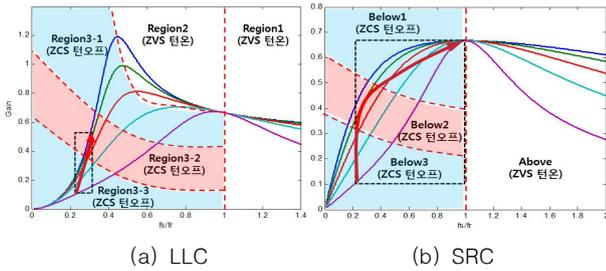


그림 2 공진 컨버터 전압이득곡선

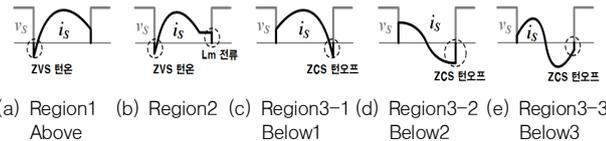


그림 3 공진 컨버터 동작영역에 따른 스위칭 특성

류 손실이 발생하게 되고 Lm을 설계요소로 작게 만들어야 해서 제작에 어려움이 있다.

따라서 본 급속충전기와 같이 주파수 변동범위가 큰 응용에서 SRC Below영역 설계를 제안한다. SRC를 Below영역에서 동작시켜 ZCS 턴오프를 성취하여 IGBT의 tail current를 무시할 수 있다. 또한 Below영역에서도 그림 2(b)의 Below1과 Below3에서 동작시켜 그림 3(c), (e)와 같이 스위치 턴온 전류가 작은 부분에서 동작하게 되어 스위칭 손실을 줄일 수 있고, 큰 Lm으로 인하여 LLC 공진 컨버터 보다 순환전류 손실을 줄이고 제작이 간단한 장점이 있다.

표 2는 50kW 급속충전기를 3개의 모듈로 나누어 17kW로 각 공진 컨버터를 설계한 특성비교 표이다. 제안하는 SRC의 Below영역 설계는 LLC Type 1에 비해 주파수 변동범위 및 스위치 턴온, 순환전류가 작고 tail current가 발생하지 않는다. LLC Type 2 보다 주파수 변동범위가 크긴 하지만 스위치 턴온, 순환전류가 작아서 스위칭 손실을 최소화 할 수 있다. 또한 제안하는 SRC는 변압기 KVA정격은 LLC Type 1의 51%, LLC Type 2의 33%로 변압기 부피를 줄일 수 있는 장점이 있다.

그림 4는 LLC Type 1, LLC Type 2, 제안하는 SRC를 17kW로 각각의 영역에 맞게 설계하여 계산한 1차측 스위치와 변압기의 손실을 나타내었다. LLC Type 1의 경우 출력전압이 100~200V로 낮은 경우 Region1에서 동작하기 때문에 스위칭 손실이 매우 크다. 또한 스위치 오프 전류가 있기 때문에 tail current가 발생하여 스위칭 손실이 더욱 커질 것이다. LLC Type 2의 경우 출력전압이 높아질수록 그림 2(a)와 같이 스위치 턴온 전류가 큰 부분에서 동작하여 스위칭 손실이 커진다. 제안하는 SRC는 스위칭 손실이 다른 설계방법의 컨버터 보다 매우 낮기 때문에 전체 손실 또한 매우 낮다.

표 2 각 공진 컨버터의 특성비교

항목		LLC Type 1	LLC Type 2	제안하는 SRC
동작영역		Region1,2	Below3, 2, 3	Below1, 3
스위치 특성	턴온	ZVS	하드스위칭	하드스위칭
	턴오프	하드스위칭	ZCS	ZCS
변압기 KVA rating		57 KVA	50.4 KVA	37.7 KVA
주파수 범위		12~36.5kHz	14.5~15.3kHz	14.5~27.7kHz
순환전류		큼	중간	작음
턴온 전류		큼	중간	작음
tail current 발생		큼	없음	없음

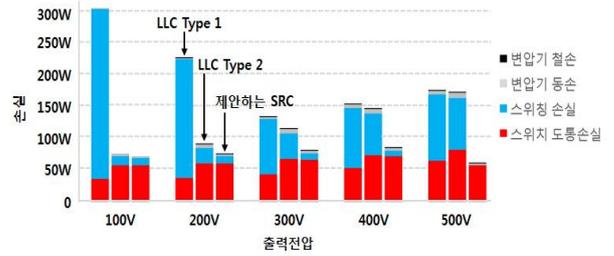


그림 4 각 공진컨버터 손실 비교

3. 실험 결과

제안하는 시스템의 축소모델 실험 사양은 아래와 같다.

- $P_{out} = 3kW$
- $V_{in} = 600V$
- $V_{bat} = 100\sim500V$
- $f_{sw} = 14.5\sim27.7kHz$
- $L_r = 30\mu H$
- $C_r = 2\mu F$

그림 5(a), (b)는 각각 출력전압이 100V, 500V일 때의 스위치 전압과 누설인덕턴스 전류 실험파형이다. 각각 Below1, Below3 영역에서 동작시켜 스위치 턴온 전류가 매우 낮은 것을 확인할 수 있다.

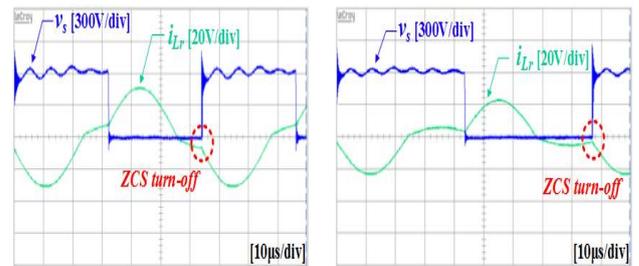


그림 5 주요 실험파형

4. 결론

본 논문에서는 넓은 충전전압 범위를 갖는 전기자동차용 급속충전기에 적합한 공진 컨버터의 최적 설계기법을 제안하였다. 제안한 SRC의 Below영역 설계로 IGBT의 tail current를 최소화하고 턴온 전류가 낮은 구간에서 동작시켜 스위칭 손실을 최소화 할 수 있다. 17kW 설계 및 3kW 축소 시작품을 통하여 제안한 설계방법의 타당성을 검증하였다.

참고 문헌

[1] R. Beiranvand, et. al, "A design procedure for optimizing the LLC resonant converter as a wide output range voltage source," IEEE Trans. Power Electron., vol. 27, no. 8, pp. 3749-3763, Aug. 2012.

[2] S. R. Jang, H. J. Ryoo, J. S. Kim, and S. H. Ahn, "Design and analysis of series resonant converter for 30 kW industrial magnetron," in Proc. 36th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc., Dec. 2010, pp. 415-420.