

직렬 공진형 컨버터와 병렬 공진형 컨버터가 적용된 차량 탑재형 충전기의 특성 비교 및 분석

김지교, 이정민, 안효민, 이병국[†]
 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

Comparison and Analysis of Series Resonant Converter and Parallel Resonant Converter for On Board Charger

Ji Gyo Kim, Jung Min Lee, Hyo Min Ahn, and Byoung Kuk Lee[†]
 Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문은 3.3 kW급 전기자동차의 탑재형 충전기에 적용된 직렬 공진형 컨버터와 병렬 공진형 컨버터의 특성을 비교 및 분석한다. 동일한 동작 조건으로 설계된 직렬 공진형 컨버터와 병렬 공진형 컨버터의 손실요인을 수학적으로 비교 분석하고 이를 시뮬레이션을 통하여 검증한다.

1. 서론

본 논문에서는 전기자동차용 3.3 kW급 탑재형 충전기에 적용된 Full Bridge 구성의 직렬 공진형 컨버터와 병렬 공진형 컨버터의 손실을 분석 및 비교한다.^[1]

비교 대상인 직렬 공진형 컨버터와 병렬 공진형 컨버터는 동일한 공진 주파수를 갖게 하며 모든 동작 영역에서 ZVS (Zero Voltage Switching) 확보할 수 있도록 한다. 또한 최대 부하 조건에서 스위칭 주파수를 공진 주파수 부근에 위치하도록 하고 두 토폴로지의 특성 비교를 위해서 실제 차량용 배터리 충전 프로파일을 고려하여 설계한다.

직렬 공진형 컨버터와 병렬 공진형 컨버터의 손실 계산은 전력 반도체 소자에 추가적으로 공진 네트워크의 자성체 및 커패시터, 그리고 출력 측 필터 손실을 포함한다. 컨버터의 출력과 손실 계산 및 분석은 수학적 방법과 시뮬레이션을 통해 진행한다. 결과를 통해 전기자동차의 차량용 탑재형 충전기에 쓰이는 적합한 토폴로지를 설계 및 선정하기 위해 직렬 공진형 컨버터와 병렬 공진형 컨버터의 특성을 비교 분석한다.

2. 공진 네트워크 설계

직렬 공진형 컨버터와 병렬 공진형 컨버터의 Q factor는 각각 수식 1과 2와 같다. R_{ac} 는 교류 등가저항으로 부하저항을 환산한 값이며 L 은 공진 네트워크를 구성하는 인덕터의 인덕턴스, ω_0 는 공진 주파수를 나타낸다.^[1]

$$Q_{SRC} = \frac{\omega_0 L}{R_{ac}} = \frac{2\pi f_o L}{R_{ac}} \quad (1)$$

$$Q_{PRC} = \frac{R_{ac}}{\omega_0 L} = \frac{R_{ac}}{2\pi f_o L} \quad (2)$$

Q factor에 의한 전압이득은 각각 수식 3과 4와 같다. ω_s 는 스위칭 주파수, n 은 변압기의 권선 비이다.^[1]

$$G_{SRC} = \frac{n}{1 + j\frac{\pi^2}{8} Q \left(\frac{\omega_s}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega_s} \right)} \quad (3)$$

$$G_{PRC} = \frac{n}{\frac{\pi^2}{8} \left[1 - \left(\frac{\omega_s}{\omega_0} \right)^2 \right] + j\frac{\omega_s}{\omega_0} \left(\frac{1}{Q} \right)} \quad (4)$$

위 수식을 기반으로 실제 차량용 배터리 충전 프로파일을 고려하여 설계하였으며 입력 전압과 전류를 고려하여 MOSFET과 다이오드를 선정하였다. 공진형 컨버터의 정격 정보와 구성 파라미터는 다음 표 1 과 표 2와 같다.

표 1 공진형 컨버터의 정격 및 소자 선정
 Table 1 Ratings and components of resonant converter

정격			
정격	입력 전압	권선 비	
3.3 kW	380 V	1.368	
선정 소자			
전력 반도체 소자	제조사	제품명	정격
MOSFET	IXYS	IXFN82N60P	600V, 72A
다이오드	Infineon	IDH16S60C	600V, 16A

표 2 공진형 컨버터의 구성 파라미터
 Table 2 Parameters of resonant converter

소자	직렬 공진형 컨버터	병렬 공진형 컨버터
공진 인덕터	75uH	31.2uH
공진 커패시터	66nF	159nF
출력 필터 인덕터	100uH	
출력 필터 커패시터	10uF	500uF
공진 주파수	71.5KHz	71.5KHz
출력 전압	240 400V	240 400V

실제 배터리 충전 시 A B C구간은 정전류 충전구간으로 최대 전류 8.25 A 로 일정하게 제어한 상태에서 배터리 단자 전압이 최소 240 V 부터 400 V까지 증가한다. C D E는 정전

압 충전 구간으로 최대 전압 400 V 을 유지한 상태에서 배터리 입력 전류가 최대 8.25 A 부터 최소 1.2 A 까지 감소한다. 이를 고려하여 나타난 주파수에 따른 전압이득은 그림 1과 그림 2와 같다.

3. 시뮬레이션 결과 비교 및 분석

위의 조건대로 직렬 공진형 컨버터와 병렬 공진형 컨버터의 MOSFET 손실, 다이오드 손실, 자성체의 손실 시뮬레이션을 계산하면 그 결과는 그림 3과 같다.[2] 시뮬레이션은 3.3 kW급 차량용 배터리 충전 프로파일을 고려하여 진행 하였다.

전 부하구간에서 직렬 공진형 컨버터가 병렬 공진형 컨버터보다 손실이 작게 발생함을 확인할 수 있다. 그림 3에서 확인할 수 있듯이 다이오드와 MOSFET의 손실이 가장 큰 비중을 차지하는데, 이는 1차 측 출력 폴 전압과 전류의 위상 차이로 해석을 할 수 있다. 그림 4는 부하에 따른 1차 측 전압과 전류의 위상차를 나타낸 그래프이다. 전 부하영역에서 직렬 공진형 컨버터의 위상차이가 병렬 공진형 컨버터의 위상 차이보다 작음을 확인할 수 있다.

위상 차이가 크다는 것은 공진 네트워크에서 무효전력이 더 크다고 할 수 있고, 이는 동일 전력을 배터리에 공급하기 위해 1차 측에 더 높은 전류를 인가해야 됨을 의미하므로, 결과적으로 MOSFET과 다이오드의 도통손실을 크게 하여 손실을 발생하게 된다. MOSFET의 스위칭 손실은 스위칭 시의 전류에 영향을 받는데, 앞서 설명했듯이 병렬 공진형 컨버터의 경우 직렬 공진형 컨버터보다 전류가 크기 때문에, 스위칭 시의 전류 크기가 크기 때문에 더 큰 손실이 발생함을 확인할 수 있다.

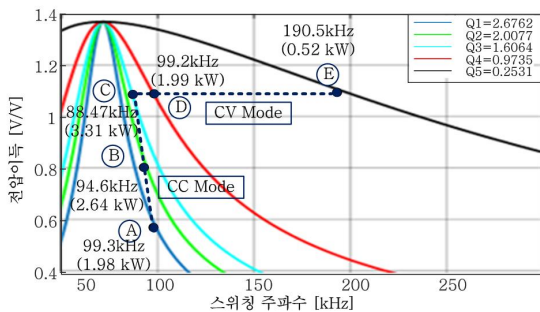


그림 1 설계한 직렬 공진형 컨버터 동작 전압이득
Fig.1 Voltage gain of designed series resonant converter.

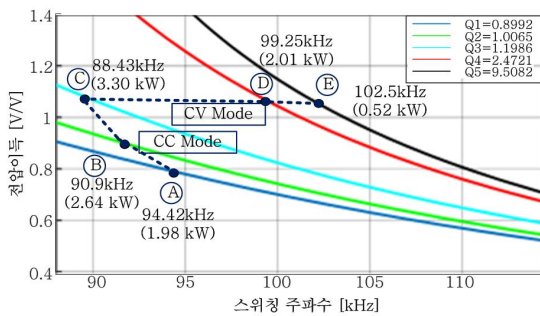


그림 2 설계한 직렬 공진형 컨버터 동작 전압이득
Fig.2 Voltage gain of designed parallel resonant converter.

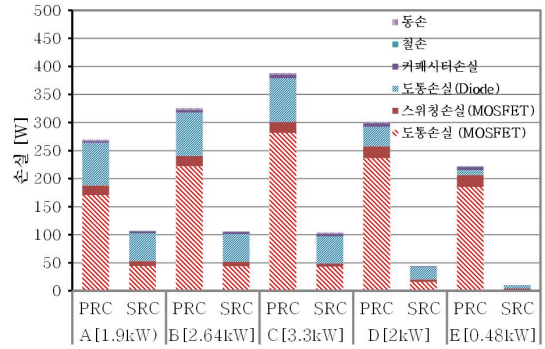


그림 3 공진형 컨버터 구성에 따른 손실비교
Fig. 3 Losses of designed resonant converters.

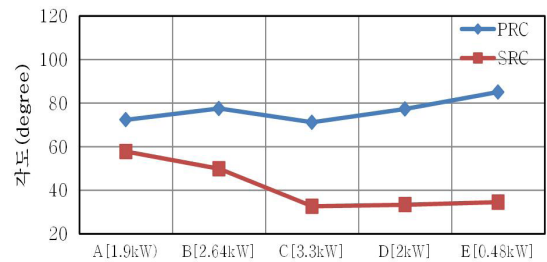


그림 4 각 컨버터의 1차 측 전압/전류 위상차
Fig. 4 Phase difference between voltage and current of designed resonant converters.

전류의 크기는 또한 공진 네트워크의 손실에도 영향을 미치는데, 전류의 크기 및 변화량으로 인해 동손 및 철손 그리고 커패시터 기생 저항에서 발생하는 손실은 상대적으로 직렬 공진형 컨버터가 병렬 공진형 컨버터보다 작게 발생한다.

4. 결론

본 논문은 동일한 조건에서 설계한 직렬 공진형 컨버터와 병렬 공진형 컨버터의 손실을 비교 및 분석 하였다. 손실 분석은 전력 반도체 소자 외에도 공진 네트워크와 출력 필터 손실도 추가적으로 고려하였으며, 차량용 배터리 충전 프로파일을 반영하였다. 그리고 이를 시뮬레이션을 통하여 검증 하였다.

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 에너지인력양성사업으로 지원받아 수행한 인력 양성 성과입니다. (No. 20164030200980)

참고 문헌

- [1] 김종수. (2011). “전기자동차용 탑재형 충전기의 공진 Network 최적 설계에 관한 연구”, 박사학위논문, 성균관대학교, 수원, 대한민국, 201 pages
- [2] 김민국, 우동균, 이병국, 김남준, 김종수. (2014). “전력 변환 장치 효율 개선을 위한 손실 분석 연구”, 전력전자학회 논문지, 19(1), 80-90