

효율적인 CC-CV 충전을 위한 차량탑재형 충전기용 공진형 컨버터의 최적설계 기법

박찬수, 김민재, 정병길, 이상혁, 박준성, 최세완
서울과학기술대학교

Optimal Design Methodology of Resonant Converters for Efficient CC-CV Charging of On-Board Charger

Chansoo Park, Minjae Kim, Byuongkil Jung, Sanghyuk Lee, Joonsung Park, Sewan Choi
Seoul National University of Science and Technology

ABSTRACT

본 논문에서는 3.3kW급 차량탑재형 충전기에 적합한 공진형 컨버터의 최적설계기법을 제안한다. 주어진 배터리 충전 프로파일에 대하여 대표적인 4가지 공진형 컨버터를 각각 최적의 궤적에 따라 동작하도록 하는 설계기법을 제안한다. 또한 이 충전 궤적에 따른 각 컨버터의 도통전류, 턴오프전류 등의 비교를 통하여 최적의 컨버터를 제안하고 시작품으로 타당성을 검증한다.

1. 서론

최근 전세계적으로 화석연료의 고갈과 환경오염으로 인해 온실가스를 발생시키는 기존의 내연기관 자동차를 대신하여 전기자동차가 주목을 받고 있다. 이에 따라 충전기를 차량에 탑재하여 가정용 전원으로 충전이 가능한 차량탑재형 충전기에 대한 개발이 요구되고 있다. 이 차량탑재형 충전기는 소형 경량화를 위해 높은 스위칭주파수를 사용해야 한다. PWM 컨버터를 비롯해 부하직렬 공진 컨버터와 LLC 공진 컨버터와 같은 공진형 컨버터를 이용한 개발이 시도되고 있다. 현재 개발되고 있는 공진형 컨버터를 적용한 차량탑재형 충전기는 또한 본 응용에 최적화된 설계가 이뤄지지 않는 상황이다.

본 논문에서는 효율적인 CC CV 충전을 위한 차량탑재형 충전기용 공진형 컨버터의 최적설계 기법을 제안한다. 공진형 컨버터는 스위칭손실이 낮아 고주파동작이 가능해 부피가 작은 장점을 갖는다. 차량탑재형 충전기로 고려가능한 4가지 공진형 컨버터를 각각 Li Ion 배터리를 위한 CC CV 충전 방식에 적합한 설계를 수행하여 차량탑재형에 가장 적합한 공진형컨버터를 선정한다. 선정된 공진형 컨버터는 3.5kW급 시작품을 제작하여 그 성능을 검증한다.

2. 공진형 컨버터의 최적설계 기법

전기자동차용 배터리로는 높은 셀 전압과 에너지 밀도를 가지면서 메모리 효과가 없는 리튬 이온 배터리가 가장 많이 사용되고 있는데 일반적으로 과충전을 피하기 위해 CC CV 모드로 충전을 한다. 한 예로서 그림 1에 이러한 CC CV 모드 충전 프로파일을 나타내는데 공진형 컨버터의 부하특성 해석을 위하여 배터리의 등가저항도 함께 표현한다.

공진형 컨버터는 공진주파수 우측 영역에서 동작시 영전압 스위칭이 가능하고 낮은 턴오프 전류를 가지므로 차량탑재형 충전

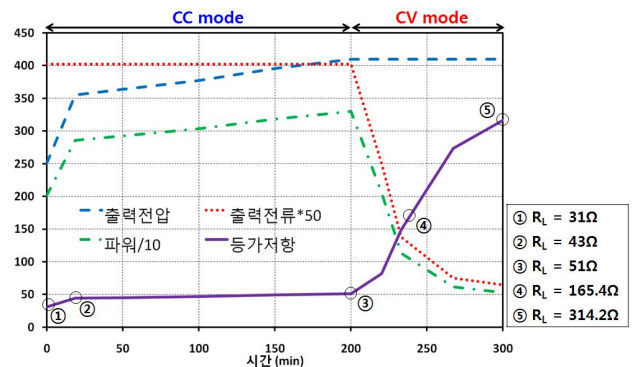


그림 1 CC-CV 충전 프로파일과 배터리 등가저항

기와 같이 소형화 및 경량화가 요구되는 응용에 적합하다. 본 논문에서는 그림 2의 대표적인 각 공진형 컨버터에 대하여 주어진 배터리 충전 프로파일에 대하여 최적의 동작궤적을 따라 동작하도록 하는 기법을 제안하고 충전 프로파일에 따른 각 컨버터의 도통전류, 턴오프전류 및 장단점을 비교하여 최적의 컨버터를 제안한다.

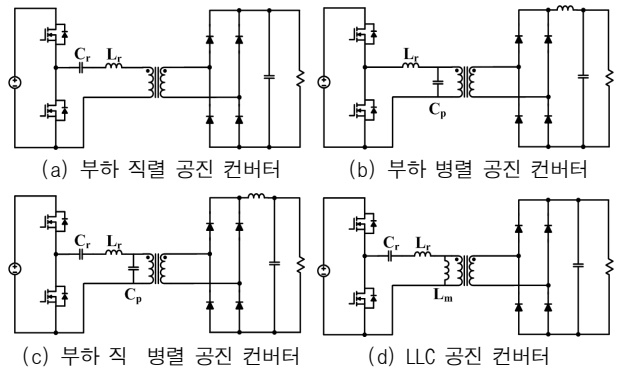


그림 2 차량탑재형 충전기로 고려가능한 공진형 컨버터

2.1 부하 직렬 공진 컨버터(SRC)

SRC는 부하 감소에 따라 스위치의 도통전류도 감소하는 특성이 있어 경부하 및 중간부하의 효율이 좋고, 공진인덕터 L_r 이 커지면 스위칭주파수 범위가 좁아지는 장점을 갖는다. 그러나 경부하에서 특성곡선의 기울기가 완만해짐에 따라 스위칭주파수 범위가 넓어지는 단점이 있다^[1]. SRC의 최대 전압이득이 0.5이므로 이를 이용하여 변압기의 턴비를 정한다. 그리고 컨버

터의 부피제한을 고려하여 최소 스위칭주파수를 정하고 동작범위를 고려하여 최대 스위칭주파수를 정한다. 그런 다음 식 (1)을 이용하여 최대부하에서 최소 스위칭주파수로 동작하고 CV 모드가 종료되는 지점에서 최대 스위칭주파수로 동작 하도록 공진 소자를 설계한다.

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

그림 3은 위 설계절차에 따라 설계된 SRC의 주어진 충전프로파일(그림 1)에 따른 동작 궤적을 나타낸다. 일정전류로 충전이 진행되는 동안 스위칭주파수가 조금씩 감소하여 최대부하에서는 공진주파수 부근에서 동작을 한다. CV 모드에서는 스위칭주파수를 점점 증가시켜 일정전압으로 충전이 이뤄진다.

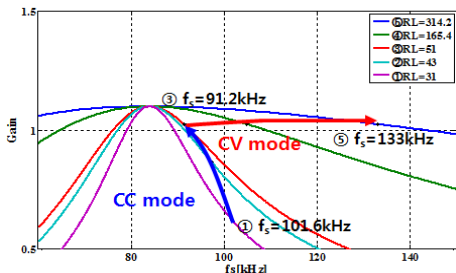


그림 3 충전프로파일(그림 1)에 따른 SRC의 동작궤적

2.2 부하 병렬 공진 컨버터(PCR)

PCR는 상대적으로 특성곡선의 기울기가 급격하여 스위칭주파수의 범위가 좁고 공진인덕터 L_r 이 작으면 최대 전압이득이 커지는 장점이 있다. 하지만 부하변동에 상관없이 스위치의 도통전류가 일정해서 경부하 및 중간부하 효율이 좋지 않고 풀부하에서 출력전압 제어가 어려운 단점이 있다^[1]. 턴비는 1차측 스위치의 도통전류를 고려하여 최소값으로 정한다. 부하병렬 공진 컨버터도 부하직렬 공진 컨버터와 마찬가지로 부피를 고려하여 최소 스위칭주파수를 결정하고 최대부하에서의 동작이 이 지점에서 이뤄지도록 식 (2)를 이용하여 공진소자 값을 선정한다.

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{n}{\frac{\pi^2}{4} \left\{ 1 - \left(\frac{\omega_s}{\omega_0} \right)^2 \right\} + j2 \frac{\omega_s}{\omega_0} \left(\frac{1}{Q} \right)} \quad (2)$$

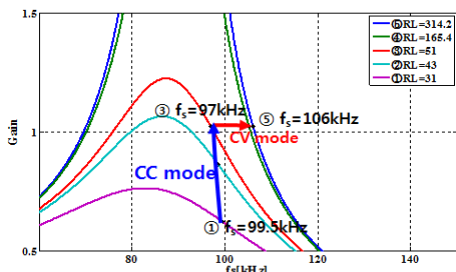


그림 4 충전프로파일(그림 1)에 따른 PRC의 동작 궤적

그림 4는 위에 따라 설계된 PRC의 주어진 충전프로파일(그림 1)에 따른 동작 궤적을 나타낸다. CC모드 동안은 스위칭주파수 변동이 거의 없고 공진주파수 인근에서 동작하고 CV 모

드에서 스위칭주파수를 상대적으로 조금만 변동시켜 일정전압으로 충전을 진행한다.

2.3 부하 직·병렬 공진 컨버터(SPRC)

본 논문에서 SPRC는 부하감소시 스위치의 도통전류가 함께 감소하는 SRC의 특성과 풀부하영역에서도 출력전압제어가 가능한 PRC의 특성이 각각 CC 모드와 CV 모드에서 나타나도록 최적설계를 하였다. 컨버터의 부피제한을 고려하여 최소 스위칭주파수를 정하고 SRC와 PRC의 특징이 나뉘지는 경계지점을 부하상황에 따라 각각 결정한 후 식 (3)을 이용하여 C_p 를 구한다.

$$k \cdot Z_{cp} = R_{ac} \quad (3)$$

턴비는 1차측 스위치의 도통전류를 고려하여 최소값으로 정한다. 식 (4)를 이용하여 전부하에서 요구되는 전압이득을 만족하고 최대부하에서 공진주파수에 가장 근접하게 동작하는 L_r 과 C_r 값을 구한다. 그리고 SRC의 장점이 잘 나타나는 최적설계를 위해 k 값을 낮춰가며 위 과정을 반복한다.

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{n}{\frac{\pi^2}{4} (1 + \omega_0^2 C_p L_r - \omega_s^2 L_r C_p) + j2Q \left(\frac{\omega_s}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega_s} \right)} \quad (4)$$

그림 5는 위 설계절차에 따라 설계된 SPRC의 주어진 충전프로파일(그림 1)에 따른 동작 궤적을 나타낸다. 부하가 변동함에 따라 최대 전압이득과 공진주파수가 변동하고 충전이 진행되는 동안 SRC와 유사한 충전 궤적을 갖는다.

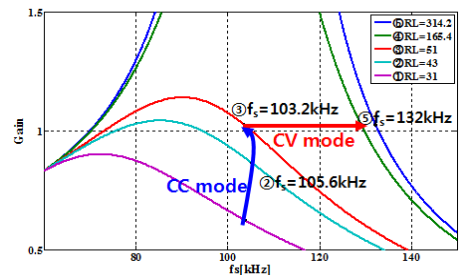


그림 5 충전프로파일(그림 1)에 따른 SPRC 충전 궤적

2.4 LLC 공진 컨버터

LLC 공진 컨버터에서는 자화인덕턴스 L_m 전류의 피크값이 스위치의 턴오프 전류이다. 따라서 L_m 이 증가할수록 스위치의 턴오프 전류가 낮아져 스위칭 손실이 줄어드는 장점을 갖는다. 반면에 L_m 이 증가 할수록 스위칭주파수 범위가 넓어지고 출력전압 및 부하변동이 넓은 응용에서 설계가 어려운 단점이 있다. 또한 정확한 L_m 값도록 하는 변압기 제작이 어려우며 공극 추가에 따른 발열이 문제가 되기도 한다.

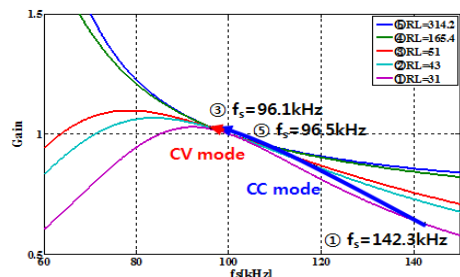
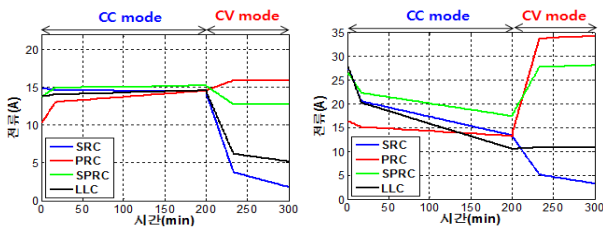


그림 6 충전프로파일(그림 1)에 따른 LLC 공진 컨버터 충전 궤적

LLC 공진 컨버터는 스위치의 도통손실과 스위칭손실을 고려하여 최적의 L_m 값을 선정 한 후 식 (5)를 이용하여 최대 전압 이득을 만족하는 공진소자 값을 정한다[2].

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{L_n f_n^2}{L_n f_n^2 + (f_n^2 - 1)(1 + j f_n L_n Q)} \quad (5)$$

그림 6은 위 설계절차에 따라 설계된 LLC의 주어진 충전 프로파일(그림 1)에 따른 동작 궤적을 나타낸다. CC 모드에서는 스위칭 주파수가 점점 감소하고 최대부하 및 CV 모드에서는 스위칭 주파수 변동이 거의 없이 공진주파수 인근에서 동작한다.



(a) 스위치 도통전류

(b) 스위치 턴오프전류

그림 7 CC-CV 충전 프로파일에 따른 공진형 컨버터 손실 비교

위의 설계를 바탕으로 각각의 공진형 컨버터 스위치의 도통 전류와 턴오프 전류를 비교하여 그림 7에 나타낸다. CC모드에서는 PRC의 특성이 다소 좋게 나타나지만 CV모드에서는 SRC와 LLC의 특성이 좋게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 전체 충전구간의 효율을 고려했을 때 PRC와 SPRC에 비해 SRC 및 LLC가 더 우수한 특성을 가진다. 또 LLC에 비해 SRC는 CV 모드에서 다소 좋은 특성을 가지며 LLC와 같이 L_m 에 따른 제작 및 발열문제가 없다. 따라서 CC CV 충전 프로파일에 따른 동작궤적과 고주파변압기 제작측면을 고려할 때 차량탑재형 충전기에 가장 적합한 공진형 컨버터로 SRC를 제안한다.

3. 실험 결과

전자부하를 사용하여 정전류 및 정전압모드에서 동작할 수 있도록 시험을 진행하였다. 그림 8에 실험파형을 나타내었다. 전 부하영역에서 ZVS 턴온을 성취하고 부하가 증가함에 따라 턴오프전류가 점점 감소하는 것을 확인할 수 있다.

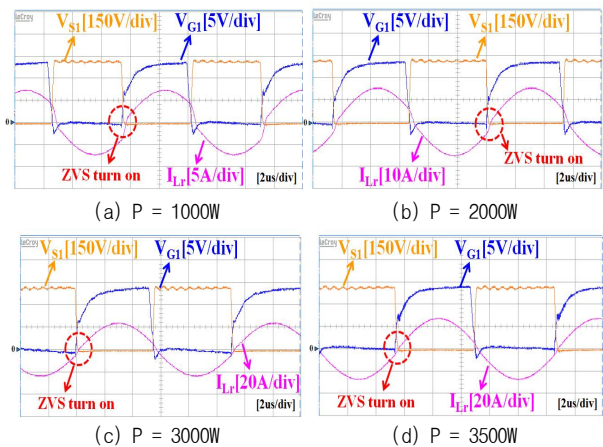


그림 8 실험 파형

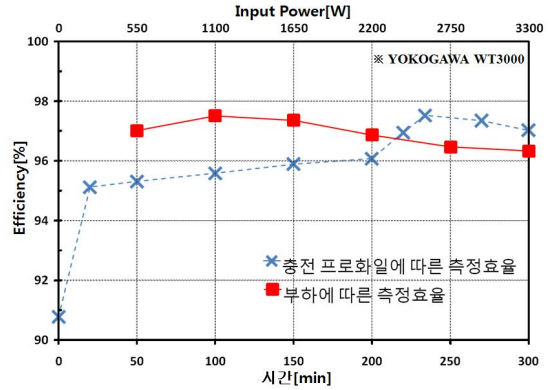


그림 9 SRC의 측정효율



그림 10 3.3kW급 SRC 시작품

그림 9와 그림 10은 각각 측정 효율과 3.3kW급 SRC 시작품을 나타낸다. 1kW에서 최고효율 97.5%, 최대부하에서 96.3%의 효율을 달성하였다. CC 모드로 충전시 초기에 다소 낮은 효율을 보이지만 이는 전체 충전시간의 6% 정도에 해당하므로 대부분의 CC CV 충전시간동안 95% 이상의 고효율을 갖는다.

4. 결론

본 논문에서는 3.3kW급 차량탑재형 충전기에 적합한 공진형 컨버터의 최적설계기법을 제안한다. 주어진 배터리 충전 프로파일에 대하여 4가지 공진형 컨버터를 각각 최적의 궤적에 따라 동작하도록 하는 설계기법을 제안하였고 이에 따라 각 컨버터의 스위칭 주파수 동작영역, 도통전류, 턴오프전류, 변압기 제작측면, 발열문제 등을 비교한 결과 SRC가 가장 적합한 것으로 나타났다. 3.3kW 시작품으로부터 최고효율 97.5%, 최대부하에서 96.1%의 효율을 달성하였다.

참고 문헌

[1] R. STEIGERWALD, "A Comparison of Half Bridge Resonant Converter Topologies", IEEE Trans. Power Electron., vol. 3, no. 2, pp. 174-182, 1988, April.
 [2] B. Lu, W. Liu, Y. Liang, F.C. Lee, J.D. van Wyk, "Optimal Design Methodology for LLC Resonant Converter", IEEE APEC 2006, March., pp. 533-538.