

변압기 보조권선을 사용하여 넓은 전압범위를 만족하는 고효율 LLC 공진형 컨버터 배터리 충전기

한형구, 최영준, 최시영, 김래영[†]
한양대학교

The High Efficiency LLC Resonant Converter Battery Charger Adopting Two Auxiliary Windings for Wide Output Voltage Range

Hyeong-Gu Han, Yeong-Jun Choi, See-Young Choi and Rae-Young Kim[†]
Hanyang University

ABSTRACT

본 논문에서는 대표적인 고효율 컨버터인 LLC 공진형 컨버터에 보조권선을 추가한 회로를 제안하였다. 제안한 회로는 배터리의 넓은 전압범위를 만족함과 동시에 고효율 운전이 가능한 배터리 충전기로써 높은 전압 이득이 필요할 때 보조권선을 동작시키게 된다. 본 방식을 활용 하여 LLC 공진형 컨버터의 공진탱크 설계 시 자화 인덕턴스를 크게 설계할 수 있고, 그 결과 자화 전류의 RMS 크기가 감소하여 1차 측 도통 손실이 감소해 컨버터의 고효율 설계가 가능하다. 제안한 회로는 시뮬레이션을 통하여 그 유효성을 검증하였다.

1. 서론

최근 친환경 운송수단의 중요성이 날로 증가함에 따라 전기자전거의 시장이 빠르게 성장했으며, 향후에도 전기자전거 시장은 기하급수적으로 증가할 것으로 예상된다.

전기자전거에 일반적으로 많이 사용되는 리튬이온 배터리는 메모리 효과가 없고, 높은 에너지 밀도를 가지며 자기 방전 효과 또한 낮은 장점을 가진다.

한편 리튬이온 배터리는 과충전 방지를 위하여 그림 1 과 같이 정전류-정전압 (CC-CV) 충전기법을 사용한다. 정전류-정전압 (CC-CV) 충전을 통하여 배터리 전압은 SOC에 따라 완전 방전 전압에서부터 만충 전압까지 변화하게 되는데, 충전기의 DC-DC 컨버터는 넓게 변화하는 전압 범위를 출력할 수 있어야 한다.

LLC 공진형 컨버터를 사용한 충전기에 관한 선행 연구들은 최적 설계 방법에 관한 내용이거나 고 전력용량에 사용 되는 온보드 충전기에 적용 가능한 새로운 회로 개발 연구가 주류를 이루었다^[1]. 하지만 이 연구들은 풀-브릿지 인버터와 전파정류 회로의 기반이기 때문에 넓은 전압범위를 만족시키기 위한 전압이득이 부족하고, 정류부의 높은 도통 손실을 야기한다. 따라서 저 전력용량 충전기 어플리케이션에는 적합하지 않다.

본 논문에서는 이전 연구들의 한계점들을 극복하기 위해서 기존 LLC 공진형 컨버터에 두 개의 보조권선이 동작하는 회로를 제안하였다. 제안한 회로는 배터리 충전시 배터리 전압이 상승함에 따라서 전압 이득을 높여할 때 추가 보조 권선을 동작시킨다. 본 방식 활용 시 LLC 공진형 컨버터의 출력전압 범위를 넓게 설계할 필요가 없어, 공진탱크의 자화인덕턴스를 크게 설계 할 수 있으며, 컨버터의 고효율 설계가 가능하다^[2].

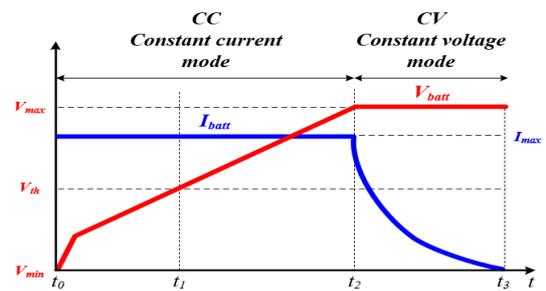


그림 1. 정전류-정전압 (CC-CV) 충전 프로파일

2. 제안한 보조 권선을 갖는 LLC 공진형 컨버터

2.1 제안된 LLC 공진형 컨버터의 회로도

그림 2는 제안한 컨버터의 회로이다. 기본적인 LLC 공진형 컨버터와 거의 동일하며 2차 측에 보조 권선과 보조 스위치가 추가되었다. 그림 2 에서 S_1 , S_2 는 컨버터의 메인 스위치 이며, 공진탱크는 L_{lk} , L_M , C_r 로 구성되어 있다. L_{lk} 와 L_M 은 통합된 변압기를 사용하며 L_M 은 자화인덕턴스 C_r 은 공진 캐패시터이다. 2차 측의 정류기 네트워크는 센터탭 방식의 구조로 이루어져 있다. 보조권선인 N_A 를 동작시키기 위해서 보조 스위치 S_{A1} , S_{A2} 가 추가 되었다. 만약 S_{A1} , S_{A2} 가 Off 상태이면 일반적인 LLC 공진형 컨버터와 동일하게 동작한다. 그리고 보조 스위치 S_{A1} , S_{A2} 가 동작하면 보조권선이 동작하여 더 높은 전압 이득을 얻을 수 있다.

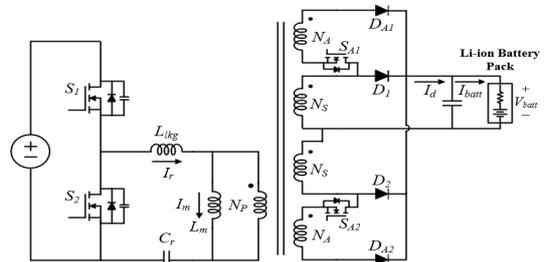


그림 2. 제안된 LLC 공진형 컨버터 회로도

2.2 동작 모드

그림 1. 은 제안된 컨버터의 충전 시 동작 모드 시점을 보여준다.

일반 모드 [$V_{\min} < V_{batt} < V_{th}$] [t_0-t_1]: S_{A1} , S_{A2} 가 Off 상태이기 때문에 변압기 2차 측 권선은 N_S 로 동작하고 보조권선(N_A)에는 전류가 흐르지 않는다.

높은 이득모드 [$V_{th} < V_{batt} < V_{\max}$] [t_1-t_3]: S_{A1} , S_{A2} 가 On 상태 이므로 D_1 , D_2 는 역방향 바이어스 된다. 보조 스위치(S_{A1} , S_{A2})가 On 되므로 보조권선(N_A)에 전류가 흐르므로 2차 측 변압기 권선은 N_S+N_A 로 동작한다. 때문에 이 모드에서는 높은 이득을 통한 고전압의 출력이 가능하다.

2.3 제안된 컨버터의 동작 특성

그림 3은 전압이득수식을 통해 도사한 제안된 LLC 공진형 컨버터의 전압이득곡선이다. 굵은 선으로 나타난 스위칭 레직은 배터리가 충전됨에 따라 0에서 42V 까지 7A로 충전할 때의 스위칭 레직이다. 25V에서 33V까지는 일반 모드로써 2차 측 변압기의 권선이 (N_S)로 동작한다. 33V에서 42V까지는 높은 이득모드로써 2차 측 변압기의 권선이 (N_S+N_A)로 동작하며, 더 높은 전압이득을 얻을 수 있다. 따라서 공진탱크 설계 시 수식 (1) 에 계수인 k 값을 크도록 설계가 가능하다.

$$M = \frac{2n \cdot V_o}{V_{in}} = \left| \frac{\left(\frac{\omega^2}{\omega_p^2}\right) \frac{k}{k+1}}{j\left(\frac{\omega}{\omega_o}\right) \cdot \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_o^2}\right) \cdot Q \frac{(k+1)^2}{2k+1} + \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_p^2}\right)} \right|$$

where $n = \frac{N_P}{N_S}$, $k = \frac{L_M}{L_{lkq}}$ (1)

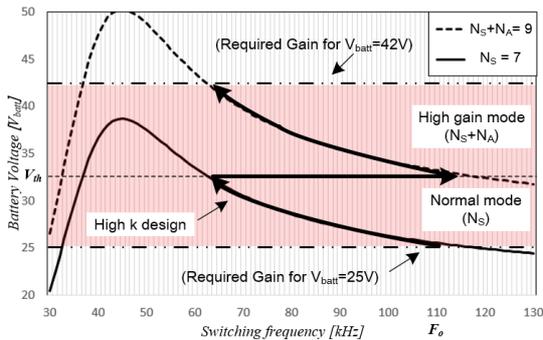


그림 3. 제안된 LLC 공진형 컨버터의 이득곡선

3. 시뮬레이션

제안된 컨버터를 검증하기 위해 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 모델의 정격은 300W 이며, 표 1의 파라미터를 기반으로 진행하였다.

표 1 시스템 파라미터

| Designator | Conventional | Proposed |
|--|--------------|-------------|
| Nominal Input Voltage (V_m) | 310 [V] | 310 [V] |
| Output Voltage Range (V_o) | 25 - 42 [V] | 25 - 42 [V] |
| Resonant Frequency (f_o) | 110 [kHz] | 110 [kHz] |
| Transformer Turn Ratio ($N_P:N_S:N_A$) | 46 : 7 | 46 : 7 : 2 |
| Magnetizing Inductance (L_M) | 391 [uH] | 570 [uH] |
| Resonant Inductor (L_r) | 40 [uH] | 40 [uH] |
| Resonant Capacitor (C.) | 27 [nF] | 27 [nF] |
| Control sampling frequency | 1 usec | 1 usec |

그림 4는 제안된 컨버터의 정상상태 파형이다. 파형에서 볼 수 있듯이 L_M 을 크게 설계함으로써 자화 전류의 크기가 기존 방법 대비 50% 정도 감소하였다.

그림 5는 기존 방법과 제안한 방법의 정전류-정전압 (CC-CV) 충전 시 효율 그래프 이다. CC 충전 시에 제안한 컨버터의 효율은 기존 방법 대비 최대 0.5% 정도 향상 되었으며, CV 충전 시에 제안한 컨버터의 효율은 기존 방법 대비 최대 5% 정도 향상 되었다. 이는 기존 방법에 비해 자화 인덕턴스의 크기를 크게 설계하여 회로 1차 측의 도통 손실이 감소하여 컨버터 전체적인 효율이 증가한 것으로 분석된다.

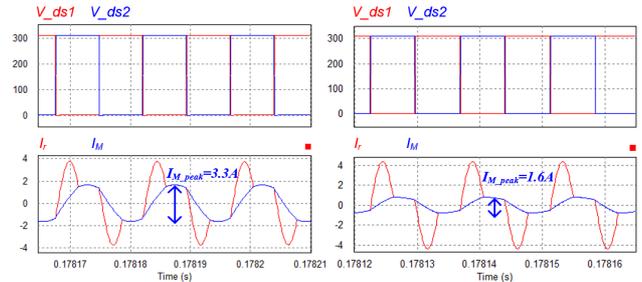


그림 4. 기존 방법과 제안한 방법의 자화전류의 크기 비교

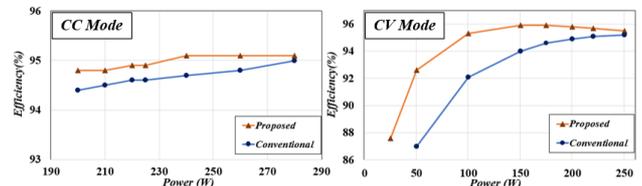


그림 5. 기존 방법과 제안한 방법의 CC-CV 충전 효율

4. 결론

본 논문에서는 두 개의 보조권선을 사용하여 배터리의 넓은 전압범위를 만족하면서도 높은 효율을 갖는 LLC 공진형 컨버터 충전기 회로를 제안하였다. 제안된 회로는 배터리 충전 시 높은 전압이득이 필요한 구간에서 보조 권선을 동작시킨다. 본 방식을 활용하게 되면 컨버터 설계시 공진탱크의 자화 인덕턴스를 크게 설계 할 수 있으며 이로 인해 자화 전류의 크기가 감소하고 컨버터의 고효율 설계가 가능하다. 제안한 방식의 유효성은 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

참고 문헌

[1] C. Liu, B. Gu, J. S. Lai, M. Wang, Y. Ji, G. Cai, et al., "High-Efficiency Hybrid Full-Bridge-Half-Bridge Converter With Shared ZVS Lagging Leg and Dual Outputs in Series", IEEE Transactions of Power Electronics, Vol. 28, pp. 849-861,

[2] H. Choi, "Design consideration of half-bridge LLC resonant converter", J. Power Electron., vol. 1, no. 1, pp. 13-20, 2007.