

LLC 공진형 컨버터 기반 리튬이온 배터리 충전기의 통합형 전압 전류 보상기 설계

최영준, 최시영, 김래영*
Hanyang University

Design of an integrated charging compensator for the LLC resonant converter-based Li-ion battery charger

Yeong-Jun Choi, See-Young Choi, Rae-Young Kim*
Hanyang University

ABSTRACT

본 논문에서는 LLC 공진형 컨버터 기반 리튬 이온 배터리 충전기의 통합형 보상기를 제안하였다. 제안한 보상기는 실효 커패시턴스의 변화를 고려할 수 있는 배터리 모델 기반으로 설계되어 전 충전 구간 동안 안정적인 동작이 가능하며 정전류-정전압 (CC-CV) 충전을 하나의 보상기로 구현하여 충전 모드 전환시의 과도 특성을 가지지 않는다. 제안한 통합형 보상기의 설계는 기본과 근사법과 확장기술함수를 활용하여 진행 하였으며, LLC 공진형 컨버터와 배터리팩을 이용한 실험결과를 통하여 그 유효성을 검증 하였다.

1. 서론

리튬이온 배터리는 메모리 효과가 없으며, 에너지 밀도가 높고 자기 방전 효과 또한 낮아 다양한 분야에 활용되고 있으며 이에 따라 리튬이온 배터리의 충전기와 충전방식의 중요성 또한 증가하고 있다. 배터리 충전기는 벅 컨버터, 플라이백 컨버터 등 PWM 컨버터를 활용하여 설계하는 것이 일반적이었으나, 최근 높은 전력밀도 및 고효율 동작의 필요성이 대두되면서 LLC 공진형 컨버터를 활용하는 연구 또한 활발히 진행되고 있다. LLC 공진형 컨버터는 전 부하영역에서 영전압 스위칭 특성을 가지기 때문에 고효율 운전이 가능하며, 변압기의 누설 인덕터를 공진 인덕턴스로 활용하기 때문에 공진을 위한 추가적인 자기 소자가 필요하지 않아, 가격측면 그리고 부피측면에서 장점을 가진다.

리튬이온 배터리 충전방식중에서는 동작방식이 비교적 단순하며, 강건한 특성을 가지는 정전류-정전압 (CC-CV) 충전방식이 많이 사용되었다. 본 방식을 이용하여 충전시 정전류 충전 구간동안 충전기는 정전류원으로 동작하게 되며, 정전압 충전 구간동안 충전기는 정전압원으로 동작한다. 하지만 본 방식을 구현하기 위해 분리된 전압, 전류 보상기를 각각 설계해야 하므로 설계가 다소 복잡하며 과도상태가 존재한다는 단점이 있다. 따라서 보상기 설계의 복잡성을 감소시키고 과도상태를 제거하기 위한 연구가 필요하다.

LLC 공진형 컨버터 기반 배터리 충전기에 대한 선행연구들 또한 위의 충전 방식 적용을 위하여 분리된 전압 전류 보상기를 기반으로 진행되었다. 하지만 보상기의 설계나 복잡도 감소를 위한 방향으로 연구가 진행되기 보다는 최적 회로 설계에 초점을 맞춰서 대다수의 연구가 진행되었으며, 배터리 부하의 특성을 반영하지 않는 등가저항 모델을 채택하여 모델링을 진행하였기 때문에 배터리의 비선형적

특성을 반영할 수 없었다.

본 논문에서는 이러한 선행 연구들의 제한사항을 보완하기 위하여 LLC 공진형 컨버터기반 리튬이온 배터리 충전기의 통합형 보상기를 제안하였으며, 보상기 설계를 위한 시스템 모델링시 배터리의 실효 커패시턴스까지 반영한 정확한 배터리 모델을 도입, 전 구간에서 안정적인 동작을 가능하도록 하였다.

2. 본론

2.1 LLC 공진형 컨버터

그림 1은 LLC 공진형 컨버터 기반 배터리 충전기와 배터리부하 그리고 제안한 통합형 보상기를 나타낸다. LLC 공진형 컨버터는 50%의 duty ratio로 동작을 하는 스위치 네트워크, 변압기를 포함한 공진탱크 그리고 정류부로 구성된다. 여기서 배터리는 등가저항 R로 표현 되었다.

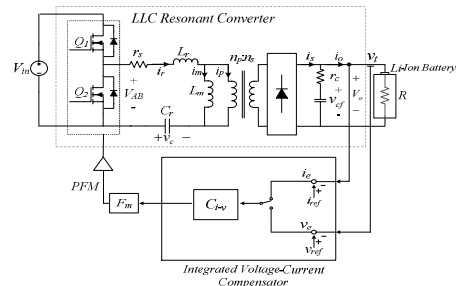


그림1. 배터리 부하와 통합형 보상기를 포함한 LLC 컨버터 기반 충전기 회로도.

2.2 LLC 공진형 컨버터 모델링 및 분석

LLC 공진형 컨버터는 스위칭 주파수가 공진탱크의 고유주파수와 근접하기 때문에 일반적으로 PWM 컨버터 모델링시 사용하는 평균화 모델링을 사용할 수 없어 비선형인 상태변수를 기본파의 사인성분과 코사인 성분으로 나눠 표현하는 확장기술함수 (EDF : Extended Describing Function)를 활용한다. 이를 이용하여 LLC 공진형 컨버터의 출력 전류, 전압의 소신호 모델링을 하여 스위칭 주파수와 관계를 상태공간으로 표현하게 되면 각각 식(1)과 식(2)와 같다. 여기서 ω_{sm} 은 표준화된 스위칭 각 주파수이다. 행렬 A, B, D는 선행 연구에서 확인할 수 있다^[1].

2.3 통합형 전압 전류 보상기

식(1)과 (2)를 통하여 알 수 있듯, 출력전압과 전류의 소신호 모델링의 차이는 C행렬이다. 각 충전 모드별 C 행렬은 표 1과 같다. 여기서, 출력 커패시터의 기생 저항값이 부하보다 충분히 작다고

가정한다면, 두 충전 모드의 C 행렬은 같아지게 되며, 이는 단일 보상기로 정전류, 정전압 충전모드 모두 제어할 수 있음을 의미한다.

$$G_{if}(s) = \frac{\hat{i}_o}{\omega_{sn}} = C_{CC}(sI - A)^{-1}B + D \quad (1)$$

$$G_{vf}(s) = \frac{\hat{v}_o}{\omega_{sn}} = C_{CV}(sI - A)^{-1}B + D \quad (2)$$

표 1. 각 충전 모드별 C 행렬

Stage	C _{cc} or C _{cv}
CC Mode	$[R_r r_c K_b \quad R_r r_c K_{ic} \quad 0 \quad 0 \quad -R_r r_c K_b \quad -R_r r_c K_{ic} \quad R_r]$ where ($R_u = R / (1 + r_c R)$)
CV Mode	$[r_c' K_b \quad r_c' K_{ic} \quad 0 \quad 0 \quad -r_c' K_b \quad -r_c' K_{ic} \quad r_c' / r_c]$ where ($r_c' = R r_c$)

2.4 리튬이온 배터리의 실효 커패시턴스

리튬이온 배터리의 충전기는 전 충전구간에서 안정적인 동작을 보장하기 위하여 반드시 배터리의 비선형성을 고려하여 보상기를 설계해야한다. 최근 연구된 결과에 따르면 리튬이온 배터리의 실효 커패시턴스는 SOC에 따라 변화한다. 이는 LLC 공진형 컨버터의 동특성 변화를 야기하므로 본 논문에서는 그림2와 같이 실효 커패시턴스의 영향까지 반영한 배터리 모델을 도입하여 보상기 설계를 진행하였다. 여기서 R_{eq} 는 등가화 된 저항부하를 표현된 배터리를 나타내며, $C_{effective}$ 는 실효 커패시턴스를 나타낸다.

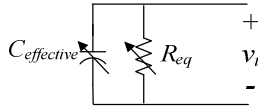


그림2. 실효커패시턴스 까지 고려한 배터리 모델.

3. 설계예제

보상기의 설계는 표 2의 파라미터를 기반으로 진행되었으며, 설계시의 크로스오버 주파수는 100Hz근처에서 형성되도록 설계했다.

표 2. 시스템 파라미터

Designator	Value [Unit]
Nominal Input Voltage (V_{in})	310 [V]
Resonant Frequency (f_o)	110 [kHz]
Output Voltage Range (V_{out})	25 - 42 [V]
Transformer Turn Ratio (n)	6.5
Magnetizing Inductance (L_m)	391 [μ H]
Resonant Inductor (L_r)	78 [μ H]
Resonant Capacitor (C_r)	27 [nF]
Output Capacitor (C_o)	30 [μ F]
ESR of Resonant Current Path (r_c)	500 [m Ω]
ESR of Output Capacitor (r_c)	15 [m Ω]

시스템 파라미터를 기반으로 기본과 근사법 (FHA : First Harmonic Approximation)을 통하여 전압 이득 곡선과^[2] 충전시의 LLC 컨버터 동작점의 이동을 그린 궤적은 그림3과 같다. 보상기 설계시의 최악조건을 유추하기 위해서 본 궤적을 기반으로 구한 배터리의 등가저항을 도입하여 소신호 모델링과 주파수 영역 분석을 실시했으며, 그 결과 D점($R_{eq} = 6\Omega$)이 최악조건으로 분석 되었다.

실효커패시턴스의 영향을 고려하기 위하여 D 점에서의 배터리 커패시턴스를 변화시키며 주파수 영역 분석을 한 결과, 실효 커패시턴스가 증가 할수록 극점이 저주파수 대역으로 이동하게 되며, 실효 커패시턴스가 20F일 때 100Hz 주변의

$$C_{-}(s) = -0.077216 \times \frac{(1+0.086s)}{s(1+3 \times 10^{-5}s)(1+1 \times 10^{-5}s)} \quad (3)$$

위상여유가 가장 낮았다. 따라서 실효 커패시턴스의 최악조건은 20F로 결정하였다. 최종적으로 설계한 보상기는 식(3)과 같으며 보드선도는 그림4와 같다.

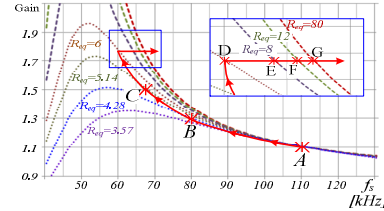


그림3. LLC 공진형 컨버터의 전압이득 곡선 및 충전시 동작 궤적.

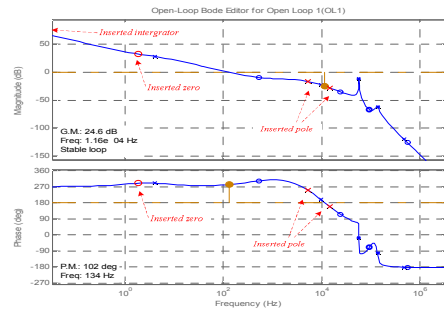


그림4. 통합형 보상기의 보드선도.

4. 실험결과

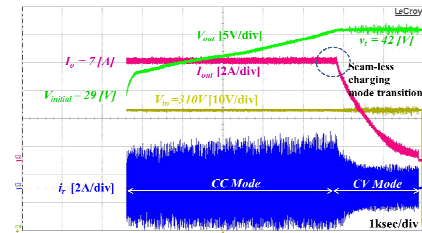


그림4. 제안한 보상기 적용시의 전체충전구간 실험파형.

그림4는 제안한 통합형 적용하여 실험을 수행한 결과이다. 실험결과 정전류, 정전압 충전구간 동안 배터리 충전기가 안정적으로 동작 했으며, 모드 전환시에 과도응답 또한 존재하지 않았다.

5. 결론

본 논문에서는 LLC 공진형 컨버터 기반 리튬이온 배터리 충전기의 통합형 보상기를 제안하고 보상기의 설계 과정을 제시 하였다. 제안된 통합형 보상기는 단일 보상기로 정전압, 정전류 충전을 제어 할 수 있으며, 실효 커패시턴스 변화를 고려한 배터리 모델 기반으로 설계하여 이로 인해 발생하는 극점의 저주파수 이동을 대비할 수 있으며, 전 충전구간 동안 안정적인 동작이 가능하다. 제안한 방식의 유효성은 실험을 통하여 검증하였다.

참고 문헌

[1] C. H. Chang, E. C. Chang, C. A. Cheng, H. L. Cheng, and S. C. Lin, "Small Signal Modeling of LLC Resonant Converters Based on Extended Describing Function," in Computer, Consumer and Control (IS3C), 2012 International Symposium on, 2012, pp. 365-368.

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