

# 배터리 충전 전류 리플 저감 위한 LLC 공진형 컨버터 출력 필터 설계

박상민, 김동희, 주동명, 김민중, 이병국†  
성균관대학교 정보통신대학

## Design of Output Filter of LLC Resonant Converter for Charging Current Ripple Reduction

Sang Min Park, Dong Hee Kim, Dong Myoung Joo, Min Jung Kim, and Byoung Kuk Lee†  
College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University

### ABSTRACT

본 논문에서는 배터리 충전 전류의 리플 저감을 위한 LLC 공진형 컨버터의 필터 설계 가이드라인을 제안한다. 출력 필터가 LLC 공진 네트워크에 끼치는 영향을 수식적으로 분석한 뒤 배터리를 고려한 필터를 설계하고 시뮬레이션을 통해 전류 리플 저감 성능을 검증한다.

### 1. 서 론

IT가전 기술이 발달하면서 사용자의 편의를 제공하는 가전 제품이 각광받고 있다. 더불어 기술의 발달로 인한 가전제품의 소비전력 증가에 따라 배터리의 필요성이 부각되고 있다. 배터리를 사용하는 가전제품은 배터리의 성능에 따라 운전가능시간이 결정된다. 따라서 배터리의 성능과 수명을 유지하는 충전기술이 요구된다<sup>[1]</sup>.

가전제품용 고효율 배터리 충전기는 Power Factor Correction (PFC) 회로의 출력전압을 받아서 저전압 배터리를 충전한다. 충전기 토폴로지는 가전제품 표준규격 때문에 전기적 절연이 필요하다. 다양한 절연형 토폴로지중 LLC 공진형 컨버터는 고주파 스위칭이 가능하며 Zero Voltage Switching (ZVS)가 가능한 장점이 있고 높은 효율을 가지므로 충전기 토폴로지로 적합하다. C 필터를 사용하는 LLC 충전기는 배터리가 큰 커패시턴스 성분의 부하이기 때문에 충전 전류의 리플이 필연적으로 발생한다. 충전 리플 전류는 셀의 저항 성분으로 인해 열손실이 발생하여 배터리 온도가 상승하고 과충전을 유발하며 배터리 수명을 단축시킨다. 따라서 충전 전류의 리플성분을 해결하기 위한 추가적인 하드웨어 필터가 필요하다.

본 논문에서는 리플전류 저감을 위해 그림 1처럼 LLC 공진형 컨버터의 출력단에 인덕터 필터를 추가한다. 추가된 필터의 인덕턴스 성분은 공진 네트워크에 영향을 끼치기 때문에 수학적

분석을 통해 설계해야 한다. 그러므로 추가된 필터의 공진 네트워크 영향을 수학적 분석하고 설계된 인덕터의 충전 전류 리플 저감 성능을 시뮬레이션으로 검증한다.

### 2. 충전기 시스템

#### 2.1 배터리 충전기 사양

배터리를 충전하기 위한 LLC 공진형 컨버터의 입력전압은 Boost PFC의 출력전압 직류 380V이며, 출력전압 범위는 2.5 4.2V Li Ion 배터리 9셀 직렬연결방식의 22.5 37.8V이다. 178.2Wh 배터리를 최대 2C rate로 충전하기 위해서 필요한 최대 전류크기는 16.5A이다. 배터리부하의 커패시턴스 성분은 저장된 에너지를 환산하면 약 1157F이다. 배터리 충전기 시스템에서 부하로 사용되는 배터리와 충전기 사양은 표 1과 같다.

표 1 LLC 공진형 컨버터 시스템 사양  
Table 1 System spec of LLC resonant converter

Parameters	Value [Unit]
Input Voltage, $V_{dc}$	380 [V]
Output Voltage, $V_{dc}$	22.5 – 37.8 [V]
Output Power, $P_{o,max}$	800 [W]
Effective Turns ratio	6.23 [Turn]
MOSFET	IPP50R520CP
Switching Frequency	100 – 400 [kHz]
Battery Watt-hours	178.2 [Wh]
Battery Ampere-hours	5.5 [Ah]
Battery Capacitance	1157 [F]

#### 2.2 공진네트워크 설계

LLC 공진 요소들은 Fundamental Harmonic Approximation (FHA) 방법을 이용하여 공진 네트워크의 구형과 입력 전압의 기본과 성분만 고려하여 등가 할 수 있다<sup>[2]</sup>. FHA 방법을 통해서 2차측 출력 인덕터 필터를 추가한 하프브리지 LLC 공진형 컨버터를 등가회로로 나타내면 그림 2와 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 출력 필터 인덕턴스 성분은 1차측으로 턴수의 제곱에 비례하여 누설 인덕턴스 성분으로 반영되기 때문에 식 (1)의 전압 이득이 바뀌는 문제가 있다. 따라서 추가된 출력 필터는 1차측 누설 인덕턴스와 자화 인덕턴스 성분에 영향을 주기 때문에 이를 고려하여 공진 네트워크를 설계해야 한다.

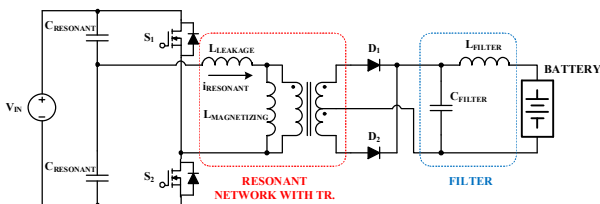


그림 1 출력필터가 추가된 LLC 공진형 컨버터  
Fig. 1 LLC resonant converter scheme added output filter

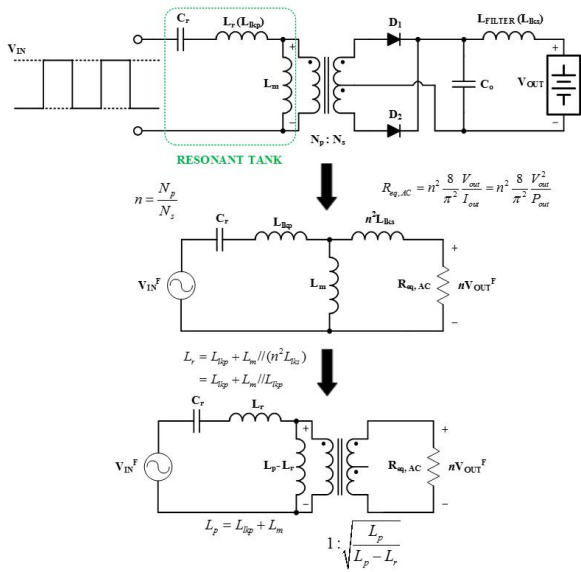


그림 2 LLC 공진형 컨버터 AC 등가모델  
Fig. 2 AC equivalent circuit of LLC resonant converter

$$V_G = \left| \frac{\omega L_m R_{eq, AC} C_r}{j\omega \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_o^2}\right) (L_m + n^2 L_{ks}) + R_{eq, AC} \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_p^2}\right)} \right| \quad (1)$$

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{(L_{lkp} + L_m // (n^2 L_{ks})) C_r}} \quad (2)$$

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{(L_m + L_{lkp}) C_r}} \quad (3)$$

$$\Delta i_{bat.} = \frac{V_L T}{4L}, \quad \Delta v_{bat.} = \Delta i_{bat.} R_{cell\ resistance} \quad (4)$$

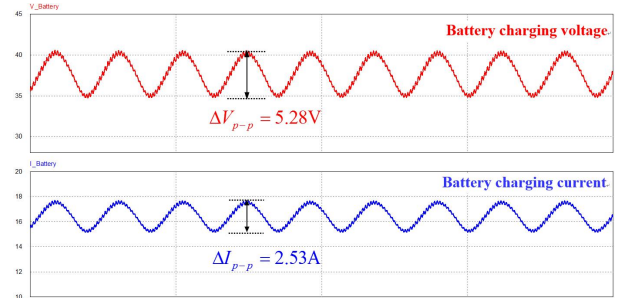
식 (2), (3)은 출력 필터로 인하여 변화된 공진 네트워크의 공진 주파수를 나타낸다. 기존의 충전기 토폴로지에서 리플 전류를 5%이하로 저감하기 위해 필요한 출력 필터의 인덕턴스 최소값은 3.7uH이며 스위칭 주파수와 시뮬레이션상 하프브리 지 듀티가 이상적으로 0.5고 데드타임이 없다는 가정하에 식 (4)를 이용하여 구할 수 있다. 출력전압의 리플 또한 배터리 내부저항과 앞서 구한 전류 리플을 대입하여 구할 수 있다<sup>[3]</sup>.

표 2는 기존의 배터리 충전기용 LLC 공진형 컨버터와 출력 필터가 추가된 제안하는 LLC 공진형 컨버터의 공진 파라미터 값이다. 표에서 볼 수 있듯이 2차측 출력 필터로 인하여 1차측

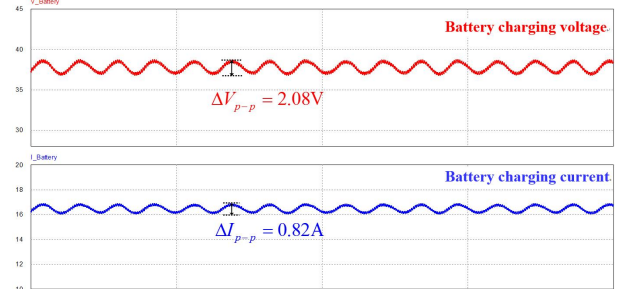
표 2 LLC 공진형 컨버터 파라미터  
Table 2 parameters of LLC resonant converter

Parameters	LLC resonant converter	LLC converter with L Filter	
	Value	Value	
Inductor	$L_r$	61.4 [uH]	25.3 [uH]
	$L_o$	-	3.7 [uH]
Capacitor	$C_r$	41 [nF]	41 [nF]
	$C_o$	136 [uF]	68 [uF]
Turns ratio	6 [Turn]	6 [Turn]	
Vout ripple	5.28 [V <sub>p-p</sub> ]	2.08 [V <sub>p-p</sub> ]	
Iout ripple	2.53 [I <sub>p-p</sub> ]	0.82 [I <sub>p-p</sub> ]	

누설인덕턴스를 줄이는 효과를 얻을 수 있고 추가된 출력 필터로 인하여 리플성분이 줄어들기 때문에 출력 커패시터의 용량을 줄일 수 있다.



(a) 기존 LLC 컨버터



(b) L필터가 추가된 LLC 컨버터

그림 3 배터리 충전 전류 리플 비교

Fig. 3 Comparison of battery charging current ripple

그림 3은 배터리를 2C rate로 충전할때의 전압, 전류 시뮬레이션 파형이다. (a)는 기존 충전기의 배터리 충전 전압 및 전류 파형이고 전류 리플은 충전 전류가 16.5A(2C) 일 때 15.3% 이다. (b)는 출력 필터를 추가했을 때의 파형이다. 전류 리플은 4.96% 이고 기존의 LLC 충전기보다 전류 리플이 10.34% 저감된 것을 확인할 수 있다.

### 3. 결론

본 논문은 배터리 충전 전류의 리플 저감을 위해 LLC 공진형 컨버터 출력단에 인덕터 필터를 추가하였다. 인덕터 출력 필터가 LLC 공진 네트워크에 끼치는 영향을 수식적으로 분석하고 배터리를 고려한 필터를 설계하였다. 인덕터 필터가 추가된 LLC 배터리 충전기의 전류 리플 저감 결과를 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

### 참고 문헌

- [1] Y. C. Chuang, "High efficiency ZCS buck converter for rechargeable batteries," IEEE Trans. Ind. Electron, Vol. 57, no. 7, pp. 2463-2472, Jul. 2010.
- [2] Hang seok Choi, "Design consideration of half bridge LLC resonant converter," Journal of Power Electronics, Vol. 7, No. 1, pp. 13-20, Jan. 2007.
- [3] R. Kroeze and P. Krein, "Electrical Battery Model for Use in Dynamic Electric Vehicle Simulations," in IEEE 2008 PESC, pp.1336-1342, June 2008.