

EV OBC용 LLC 컨버터의 변압기 턴수에 따른 손실 분석 연구

이호준¹, 이슬¹, 이은수¹
한양대학교 ERICA 전자공학부¹

Loss Analysis Based on Transformer Turns in LLC Converter for EV OBC

Hojun Lee¹, Seul Lee¹, Eunsoo Lee¹
Hanyang University ERICA Electrical Engineering¹

ABSTRACT

EV 산업 발전에 따라 EV에 탑재되는 통합 충전 제어 장치 (ICCU)의 성능 향상과 최적 설계의 중요성이 증가하고 있다. 이를 위해 소형화, 경량화, 저비용을 만족하면서도 고성능 및 고효율을 제공하는 공진형 DC-DC 컨버터 토폴로지에 대한 연구가 활발히 진행 중이며, 특히 LLC 공진 컨버터의 고효율 구동이 필수적이다. 본 논문에서는 OBC (On-Board Charger) 전력 변환을 담당하는 LLC 공진 컨버터에 적용되는 변압기 최적 설계 방안을 제시하였고, 변압기 턴 비에 따른 자성체 손실을 분석한 최적 동작점을 도출하였다. 본 논문에서는 회로 및 FEM 시뮬레이션 기반 제안하는 변압기 설계 방법을 통해 주어진 조건하 컨버터 효율이 최대가 되는 최적 턴수를 도출하였으며, 이를 시뮬레이션 및 실험을 통해 그 성능을 검증하였다.

1. 서 론

최근 전기자동차(EV) 산업은 친환경 정책과 기술 발전에 힘입어 급속한 성장을 보이고 있다. 이에 따라 전기자동차의 핵심 부품 중 하나인 OBC에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. OBC는 전기자동차의 충전 효율과 성능을 결정하는 중요한 요소로, 이에 대한 최적 설계 및 고효율을 목표로 하는 연구가 현재 많은 관심을 받고 있다. 이를 위해 LLC 공진 컨버터가 높은 효율을 제공하는 특성으로 인해 주로 사용되고 있으며, LLC 공진 컨버터의 성능을 최대한 끌어올리기 위해서는 핵심 부품인 변압기의 최적 설계가 필수적이다. 특히, 변압기의 턴수 비율은 전력 변환 효율과 자성체 손실에 직접적인 영향을 미치기 때문에, 이를 최적화함으로써 LLC 공진 컨버터의 효율을 극대화할 수 있다. 이를 위해 본 논문에서는 OBC에 사용되는 LLC 공진 컨버터의 효율 향상을 위해 변압기 턴수 비에 따른 손실 특성을 면밀히 분석하고, 변압기의 턴수 비에 따른 최적 설계 방안을 제시하고자 한다. 또한 FEM 시뮬레이션을 통해 제안된 변압기 설계의 타당성을 검증하고, 실험을 통해 그 성능을 검증하였다.

2. LLC 토폴로지 및 변압기 최적 설계

2.1 LLC 스위치부 손실 분석

LLC 컨버터에서 발생하는 주요 손실 요인 중 하나는 스위치이다. 스위치의 손실은 Turn-on 손실과 Turn-off 손실로 구분된다. Turn on 손실은 식 (1)과 같이, 스위칭 손실과 도통 손실로 나누어진다. 스위치가 켜지기 전 자화 전류가 다이오드를 통해 흐르면서 ZVS 상태가 되며, 이때 Turn on 도통 손실의 일부를 발생시킨다. 이 때의 손실은 RMS 자화 전류와 바디 다

이오드의 R_{on} 에 의해 발생하며 식(2)와 같이 계산할 수 있다. Turn-on 스위칭 손실은 공진 전류가 양의 방향으로 흐를 때 발생하는 스위치의 전압 강하로 인해 발생하며 식(3)을 통해 계산할 수 있다. LLC 컨버터의 특성상 변압기 턴비에 따라 변압기 1차측 전압, 전류, 주파수가 변화하며, 이에 따른 스위칭 손실도 달라진다. 또한 식(1)~식(3)을 통해 Turn-on 손실은 주파수 및 전류에 비례함을 확인할 수 있다. Turn-off 손실을 구하기 위해서는 주로 사용하는 식은 (4)와 같다. I_r 는 공진회로를 흐르는 전류, V_s 는 Mosfet에 가해지는 전압, T_{off} 는 Turn off 시간, C_{oss} 는 정상 상태 출력 커패시턴스를 말한다. 식(4)에서 알 수 있듯이, Turn-off 손실은 공진 전류 및 스위치에 걸리는 전류에 비례한다.

$$P_{on,loss} = P_{diode,loss} + P_{mosfet,loss} \quad (1)$$

$$P_{diode,loss} = I_m^2 R_{on} \quad (2)$$

$$P_{Mosfet,loss} = I_{r,RMS}^2 R_{Mosfet} \quad (3)$$

$$= \left(\left(\frac{2\sqrt{2}NV_L}{2\pi^2 f_s L_m} \right)^2 + \left(\frac{\pi I_L}{2\sqrt{2}N} \right)^2 \right) R_{mosfet}$$

$$P_{Off,loss} = \frac{1}{2} I_r V_s T_{off} f_{sw} \quad (4)$$

2.2 변압기 손실 분석

LLC 컨버터의 손실에 영향을 미치는 다른 주 요인은 바로 변압기이다. 변압기에서의 코어 손실은 (5)와 같이 Steinmertz 방정식을 통해 구할 수 있으며, k 는 주파수에 비례하는 Steinmertz 계수이며, f 는 주파수이므로 주파수에 비례하여 코어 손실이 커지는 것을 알 수 있다. 변압기의 구리 손실의 경우, 식(6)를 통해 구할 수 있다. 첫 번째 항은 LLC 공진 컨버터의 따라 다르며, 두 번째 항은 코어 특성에 의해 결정된다. 본 논문에서는 턴비에 따른 최적 설계를 고려하기 위해 첫 번째 항만을 고려한다. ρ 는 구리의 저항률, λ 는 전체 권선의 길이, I_r 는 권선을 흐르는 전류, k_w 는 권선 밀도 계수를 나타낸다. 이때 턴비에 따라 변화하는 주요 값은 I_r 이므로 변압기의 구리 손실은 전류의 제곱에 비례하는 것을 알 수 있다.

$$P_{core} = k \cdot f^a (B_{max})^b \quad (5)$$

$$P_{copper,loss} = \left(\frac{\rho \lambda I_r^2}{4k_u} \right) \left(\frac{MLT}{W_A A_C^2} \right) \left(\frac{1}{B_{max}} \right) \quad (6)$$

2.3 LLC 토폴로지 설계 및 분석

본 논문에서는 36kW급 LLC 컨버터의 동작을 구현하기 위해 그림 1과 같이 시뮬레이션을 통해 설계하였으며, LLC 컨버터단의 스위치는 GeneSiC Semiconductor CO의 SiC MOSFET G3R75MN12K를 사용하였으며, 그 외 사용된 주요 설계 파라미터는 Table 1에 제시하였다.

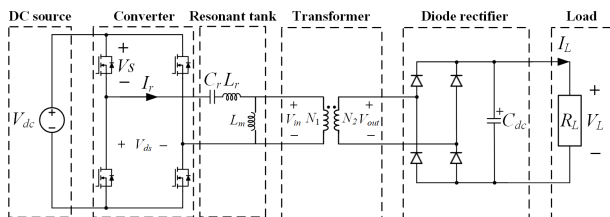


그림 1 LLC 컨버터 토폴로지
Fig. 1 Block diagram of LLC converter

Parameter	Value
Input Voltage V_{dc}	400 V
Output Voltage V_L	400 V
Output Current I_L	9 A
Load Resistor R_L	44.44 Ω
Resonant frequency f_r	118 kHz
Resonant Inductance L_r	20 μ H
Resonant Capacitance C_r	90 nF
Mutual Inductance L_m	80 μ H

표 1 LLC 컨버터의 파라미터
Table 1 Parameter of the LLC converter

각 변압기 턴비 별 스위칭 주파수를 알기 위해서는 전압 이득 곡선을 도출해내는 것이 중요하며, 식(7)을 통해 구할 수 있다. 지령 전압 400V를 위한 변압기 턴비에 따른 전압이득 곡선은 그림 2에 나타내었다. 턴비에 따른 손실 분석을 위해 FEM 시뮬레이션을 통해 변압기를 설계하였다. 코어는 SAMWHA ELECTRONICS社의 PL-17YH PQ6273S를 사용하였고, 설계한 변압기는 그림 3과 같이 코어 내부 평균 자기장 B_{avg} 이 0.3T 미만임을 확인하였다. 스위칭 주파수에 따른 ZVS 파형을 그림 4에 나타내었다. 또한 각 턴비에 따른 스위치 및 코어, 구리 손실 및 효율을 표2에 나타내었다.

$$V_g = \frac{(nV_o)}{V_i} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \lambda - \frac{1}{f_n^2}\right)^2 + Q^2 \left(f_n - \frac{1}{f_n^2}\right)^2}} \quad (7)$$

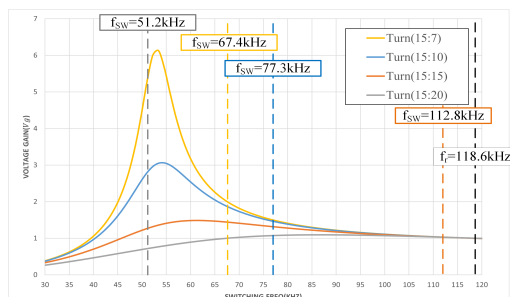


그림 2 변압기 턴비(15:7, 15:10, 15:15, 15:20)에 따른 LLC 전압 이득 곡선
Fig. 2 Voltage gain curve graph of LLC converter based on Transformer Turn Ratios (15:7, 15:10, 15:15, 15:20)

Ratio ($N_1:N_2$)	Switch Loss	Core Loss	Copper Loss	Efficiency
15 : 7	73.86W	193.04W	3.51W	92.77%
15 : 10	40.57W	104.21W	8.31W	95.89%
15 : 15	34.18W	84.57W	21.12W	96.24%
15 : 20	65.78W	127.70W	26.30W	93.79%

표 2 LLC 컨버터의 파라미터
Table 2 Parameter of the LLC converter

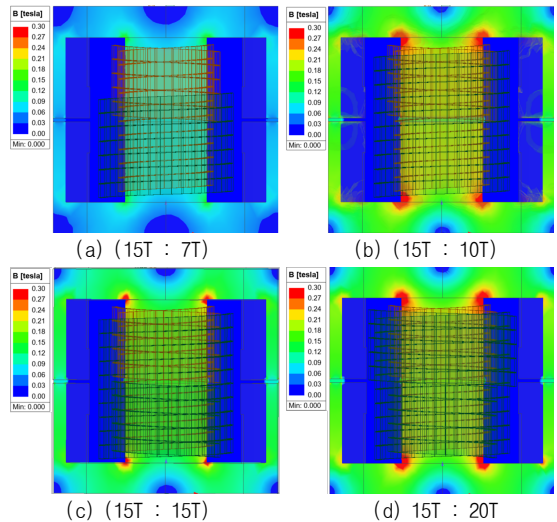


그림 3 턴비에 따른 변압기 시뮬레이션 결과
Fig. 3 Simulation results of transformer based on turn ratios

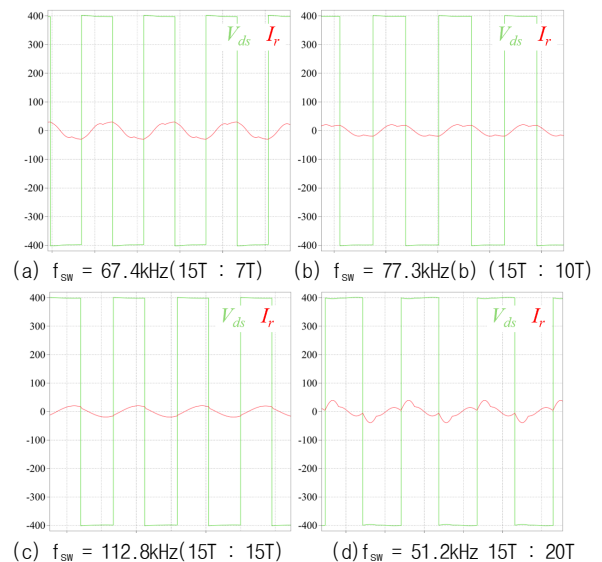


그림 4 변압기 턴비에 따른 LLC 컨버터 ZVS 그래프
Fig. 4 ZVS graph of LLC converter based on transformer turn ratios

3. 결 론

본 논문에서는 LLC 최적 설계를 위한 변압기 턴비에 따른 손실을 분석하였다. 2차측 턴비가 증가함에 따라 권선에 흐르는 전류가 증가하여 구리 손실이 증가하지만, 스위칭 주파수가 공진 주파수에 가까워질수록 ZVS 영역에서의 자화전류가 흐르는 시간이 적어 15:15의 턴비가 최적임을 확인하였다. 이를 통해, 향후 LLC 최적 설계에 있어 변압기의 최적 턴비 적용을 통해 보다 다양한 조건에서의 고효율을 달성하고 OBC의 최적 설계에 있어 유용할 것으로 전망한다.

참 고 문 헌

- [1] M. Noah et al., "An investigation into a slight-variation of the transformer effective permeability in LLC resonant converter," 2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe), Warsaw, Poland, 2017, pp. P.1-P.7
- [2] H. Choi, "Analysis and Design of LLC Resonant Converter with Integrated Transformer," APEC 07 - Twenty-Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Anaheim, CA, USA, 2007, pp. 1630-1635