

고밀도 OBC용 LLC 컨버터를 위한 Planar 변압기 설계

손원진, 이재한, 안상준, 변중은, 이병국[†]
 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

Design of Planar Transformer for LLC Converter of OBC for High Power Density

Won-Jin Son, Jae Han Lee, Sangjoon Ann, Jongeun Byun, and Byoung Kuk Lee[†]
 Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문은 OBC의 전력 밀도를 향상시키기 위한 LLC용 planar 변압기의 설계 방법을 제안한다. 이를 위해 상용 planar 변압기 코어를 사용한 OBC를 바탕으로 planar 변압기 코어 최적 파라미터와 패턴 배치에 따른 영향을 FEM 시뮬레이션을 통해 설계하고 분석한다. 분석 결과를 바탕으로 설계된 planar 변압기를 3.3 [kW]급 LLC 컨버터 prototype을 통해 검증한다.

1. 서 론

최근 전기 자동차의 충전을 위한 탑재형 충전기 (on-board charger, OBC)의 전력 밀도 향상을 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 전력 밀도를 향상시키기 위한 방법으로는 wide band gap (WBG) 소자를 이용한 고속 스위칭으로 수동 소자의 크기를 줄이거나, DC-DC 컨버터의 절연을 위해 사용된 변압기를 planar 변압기로 사용하여 전체의 높이를 줄여 전력 밀도를 높이는 방법 등이 연구된다. 이 중 planar 변압기의 경우 기존 변압기에 비해 낮은 코어 높이와 PCB winding으로 생산성을 높일 수 있는 특징을 갖지만, 필요 면적이 넓어진다는 단점이 있다. 또한, 상용 planar 코어의 경우 각 어플리케이션에 맞게 최적화가 되어 있지 않기 때문에, 전력 밀도를 높이기 위해서는 코어의 최적화 작업이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 고밀도 OBC를 위한 LLC용 planar 변압기를 설계한다. Planar 변압기 설계를 위해 상용 planar 코어를 기준으로 변압기를 설계하고, 설계된 결과를 바탕으로 최적의 패턴 배치와 코어의 크기 및 형상을 제안한다. 패턴의 배치, 코어의 크기 및 형상의 타당성을 검증하기 위해 유한 요소 해석 (finite element analysis, FEM)의 JMAG 시뮬레이션을 이용하여 패턴 간 기생 커패시터와 각 파라미터를 추출한다. 그리고 이를 3.3 [kW]급 LLC 컨버터 prototype에 적용하여 고밀도에 적합한 최적의 planar 변압기를 선정한다.

2. 시스템 사양 및 Planar 변압기 설계

2.1 시스템 구성

일반적으로 OBC의 DC-DC 컨버터에는 절연형 컨버터가 사용되는데, phase-shift full bridge (PSFB) 컨버터나 LLC 컨버터의 토폴로지가 사용된다^[1]. 이 중 LLC 컨버터의 경우 넓은 부하 범위에서 높은 전력효율 달성이 가능하고, 출력 인덕터가

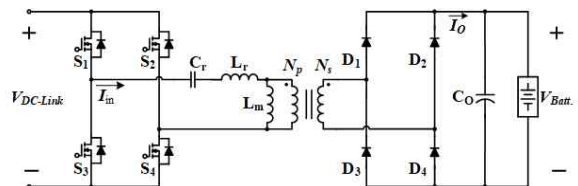


그림 1 OBC용 LLC 컨버터 회로
 Fig. 1 LLC converter circuit for on-board charger.

표 1 LLC converter 시스템 사양

Table 1 System specifications of LLC converter

Parameter	Value	Parameter	Value
V_{DC_Link}	380~640 [V]	f_r	300 [kHz]
$V_{Batt.}$	440~820 [V]	f_{sw}	250~310 [kHz]
P_o	3300 [W]	$N_p : N_s$	5:6

불필요하여 높은 전력 밀도가 달성 가능한 장점을 갖고 있다. 그림 1은 본 논문에서 사용되는 3.3 [kW]급 OBC용 DC-DC 컨버터의 LLC 컨버터이다. 시스템에 사용되는 파라미터는 표 1과 같으며, LLC 컨버터 고효율 동작을 위해 입력 DC-link를 가변하여 주파수 변동 범위를 최소화하도록 변압기를 설계하였다. 변압기 설계 조건은 입력 DC-link 전압이 500 [V]일 때, 출력 전압 600 [V]를 기준으로 설계되었다. 이때 변압기에 필요한 자화 인덕턴스 값은 58.64 [μ H]이며, 누설 인덕턴스 값은 9.77 [μ H]이다. 일반적인 LLC 컨버터의 경우 공진 인덕터를 변압기 자체의 누설 인덕턴스로 사용할 수 있지만, planar 변압기의 경우 낮은 누설 인덕턴스를 갖기 때문에 본 논문에서는 공진 인덕터를 추가하여 필요한 누설 인덕턴스를 충족시켰다.

2.2 Planar 변압기 설계

Planar 변압기 설계 시 기본적으로 고려될 사항은 일반적인 변압기와 동일하게 코어 크기와 코일이다. 우선 변압기 코어 크기에 대한 설계식은 식 (1)과 같이 나타낸다.

$$A_p = A_c A_{cw} = \frac{P_o D_{cma}}{10 K_t B_{max}} [cm^4] \quad (1)$$

위 수식에서 A_p 는 코어의 유효 단면적 A_c 와 유효 창면적 A_{cw} 의 곱으로 나타낸다. K_t 는 토폴로지에 따른 상수로 풀 브릿지 인버터의 경우 0.0014 값을 가지며, D_{cma} 는 전류 밀도를 나타내며, 단위는 [cir. mils/A]이다. 본 논문에서는 500으로 선정

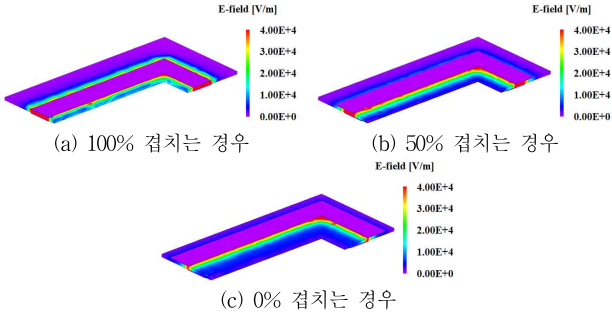


그림 2 PCB 패턴에 따른 기생 커패시터의 분포
Fig. 2 Distribution of parasitic capacitors according to PCB pattern.

표 2 패턴 두께 및 너비에 따른 전류 밀도

Table 2 Current density according to pattern thickness and width

패턴 두께 [oz]	3.00				
패턴 너비 [mm]	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
전류 밀도 [A/mm^2]	123.81	61.90	41.27	30.95	24.76
패턴 두께 [oz]	4.00				
패턴 너비 [mm]	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
전류 밀도 [A/mm^2]	92.86	46.43	30.95	23.21	18.57

하였다. 또한, B_{max} 는 자속 변화량의 최대값을 나타내며, 단위는 [mT]로 표기한다. B_{max} 는 변압기의 철손을 결정하기 때문에 본 논문에서는 B_{max} 가 250 [mT] 조건을 기준으로 만족하는 A_p 값 이상을 갖는 코어로 선정하였다.

코일의 경우 PCB 패턴으로 구현되는데, 패턴의 두께와 너비에 따라 코일에 흐르는 전류 밀도가 결정된다. 전류 밀도를 결정하기 위해 본 논문에서는 최소 PCB 패턴 두께는 3 [oz]를 기준으로 설계하였다. 변압기의 1차 측과 2차 측에 흐르는 최대 전류의 크기가 각각 13 [A_{rms}]와 6 [A_{rms}]이며, 이를 바탕으로 패턴의 너비를 선정하게 된다. PCB 패턴의 수냉 방식을 고려하였을 때, 흐를 수 있는 전류 밀도는 40 [A/mm^2] 미만으로 설계한다. 따라서 표 2의 패턴 두께 및 너비에 따른 전류 밀도를 비교한 결과 3 [oz] 및 4 [oz]에서 4 [mm] 이상의 패턴 너비가 필요한 것을 알 수 있다. 패턴 너비가 넓어질수록 전류 밀도가 낮아져 발열이 줄어들지만, 그만큼 필요 면적이 커지기 때문에 이를 고려한 시스템 설계가 필요하다.

본 논문에서는 A_p 조건을 만족하며 낮은 코어 손실을 갖는 Hitachi metal 社의 planar 변압기용 코어인 ML27D 재질의 PEE 5821 코어를 사용하여 변압기를 설계하였다. 코어 크기 및 PCB의 한 층에 최대 3 턴을 넣는다고 고려하였을 때, 최대 패턴의 너비는 5 [mm]까지 설계가 가능하다. 표 1의 설계 기준을 바탕으로 변압기에 필요한 턴 비는 5:6이며, B_{max} 조건을 만족하기 위해서는 10:12의 턴 수가 필요하다. 이를 바탕으로 4층 PCB로 설계하게 될 경우 2개의 PCB로 각각 1차 측 winding과 2차 측 winding으로 설계된다.

이러한 PCB로 winding을 설계하게 될 때 고려되어야 하는 것이 층 간 패턴의 배치에 따라 발생하는 기생 커패시터이다. 그림 2는 JMAG 시뮬레이션을 이용하여 PCB 층 간 패턴의 배치에 따라 생성되는 기생 커패시턴스를 측정된 결과이다. 이를 통해 패턴이 겹치는 정도가 커짐에 따라서 기생 커패시턴스가 크게 발생하는 것을 볼 수 있다. 패턴 간 발생하는 기생 커패시턴스가 크게 나타날 경우 고주파 스위칭 동작을 하는 LLC 컨버터 성능에 악영향을 미칠 수 있다^[2]. 따라서 각 PCB의 패

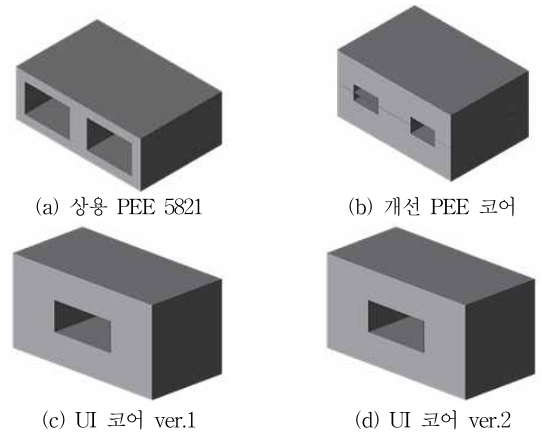


그림 3 Planar 변압기 최적 코어 형상 설계
Fig. 3 Design of optimal planar transformer core shape.

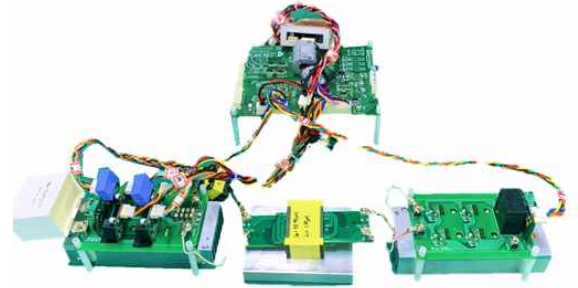


그림 4 3.3 kW급 LLC 컨버터 프로토타입
Fig. 4 3.3 kW LLC converter prototype.

턴 배치 시 기생 커패시턴스의 영향을 최소화하기 위해 층 간 패턴을 교차하여 PCB를 설계하였다.

2.3 코어 형상 최적화

동일한 B_{max} 를 얻기 위한 변압기의 유효 단면적은 코일의 턴 수와 관련되기 때문에 넓은 면적을 차지하는 planar 변압기의 코일 면적을 줄이기 위해서는 코어의 유효 단면적을 크게 가져가는 게 고밀도화에 유리하다. 따라서 기존의 상용 PEE 5821 코어의 유효 단면적의 크기를 두 배로 하게 될 경우 턴 수를 절반으로 줄여도 똑같은 B_{max} 를 얻을 수 있다. 설계 결과 그림 3 (a)의 상용 PEE 5821 코어 창면적은 낮은 높이를 갖는 PCB winding에 비해 많은 높이의 여유가 있기 때문에, 창면적 높이를 줄이고 그에 맞게 내부의 창면적을 줄이면, 유효 단면적을 증가시킬 수 있어, 사용하는 변압기를 최적화시킬 수 있다. 이를 통해 개선한 PEE 코어 형상은 그림 3 (b)와 같이 턴 수 5:6에 패턴 너비 4 [mm] 기준으로 최적으로 설계하였다.

또한, 현재 4층 PCB 기판을 2장 사용하는 PEE 코어의 경우 상단에 위치하는 PCB의 패턴 방열이 어려워 높은 열이 발생하게 될 경우, 시스템의 소손될 수 있는 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위해 UI 코어를 사용하게 될 경우, 4층 PCB 기판을 1장으로 1차 측과 2차 측 winding 모두 구현할 수 있어 PCB 전체 방열이 가능하다. 이를 통해 그림 3의 (c), (d)와 같이 UI 코어를 최적화하여 10:12의 턴 수에 패턴 너비 4 [mm] 기준으로 상용 PEE 5821 코어와 같은 유효 단면적을 갖는 서로 다른 크기의 코어를 2가지 설계하였다.

2.4 실험 검증

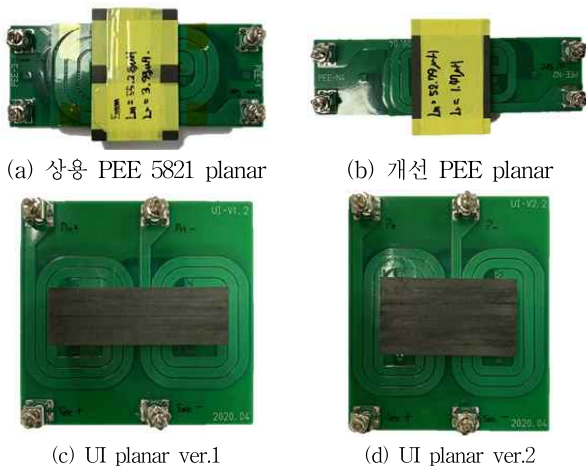


그림 5 코어 최적화를 통해 제작된 planar 변압기
Fig. 5 Distribution of parasitic capacitors according to PCB pattern.

표 3 Planar 변압기 별 면적 및 부피

Table 3 Area and volume according to planar transformer

Transformer	상용 PEE 5821	개선 PEE
Area [mm ²]	6,000	4,988
Volume [mm ³]	132,000	119,712
Transformer	UI ver.1	UI ver.2
Area [mm ²]	5,280	5,590
Volume [mm ³]	216,480	173,290

그림 4는 planar 변압기의 동작 및 성능을 검증하기 위해 제작된 3.3 [kW]급 LLC 컨버터의 프로토타입이며, 설계된 planar 변압기의 실제 사진은 그림 5와 같으며, 각 planar 변압기가 차지하는 면적 및 부피는 표 3과 같다. 성능 검증을 위한 실험은 입력 전압 500 [V], 출력 전압 600 [V]의 3.3 [kW]에서 진행하였다.

2.5 실험 결과 분석

그림 6은 각 planar 변압기 종류별 실험 결과 파형 및 효율을 나타낸다. 변압기의 종류에 따른 파형은 큰 차이 없이 정상 동작하는 것을 확인할 수 있으며, 효율은 상용 PEE 5821 코어가 97.61%로 가장 높게 나타난 것을 확인하였다. 그림 7은 공냉 조건에서 planar 변압기에서 발생한 열을 나타낸다. 측정 결과 코어의 형상과 관계없이 코일의 안쪽에서 가장 높은 열이 발생하였으며, 상용 PEE 5821 코어를 사용한 planar 변압기의 경우 50~65°C의 비교적 낮은 발열이 발생하는 것을 확인하였다. 결과적으로 표 3과 그림 6과 7을 비교하였을 때, 효율과 부피적인 측면을 고려한 최적의 planar 변압기는 유효 단면적을 개선한 PEE 코어를 사용한 변압기인 것을 확인하였다.

3. 결론

본 논문에서는 고전력 밀도를 위한 OBC용 LLC 컨버터의 planar 변압기를 설계하였다. 이를 위해 변압기의 기본 설계부터 최적화를 위한 형상 설계를 진행하였으며, 시뮬레이션 및 실험을 통해 검증하였다. 결과적으로 고밀도에 적합한 OBC용 LLC 컨버터의 planar 변압기를 설계하였다.

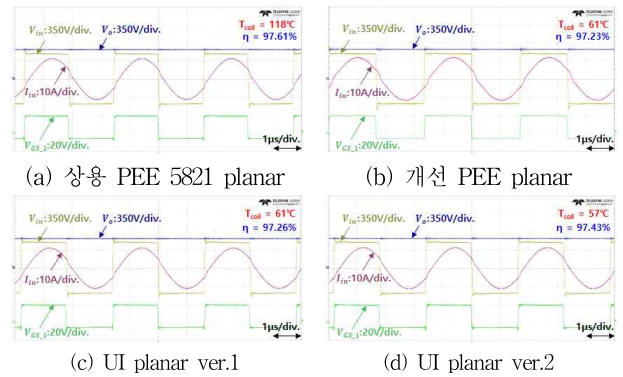


그림 6 Planar 변압기에 따른 실험 결과 (Po = 3.3kW)

Fig. 6 Experimental results according to planar transformer core (Po = 3.3kW).

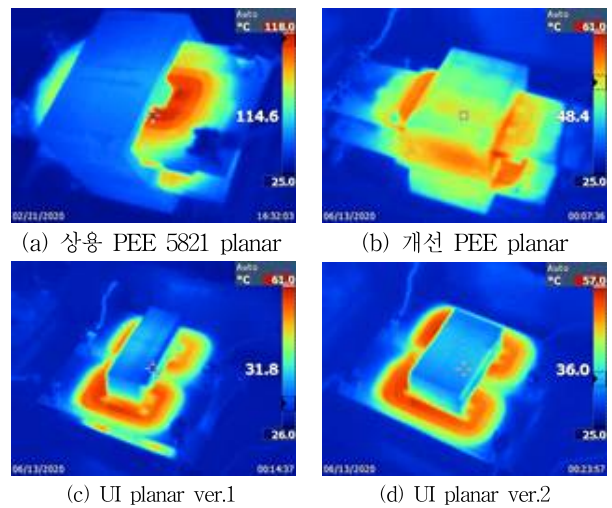


그림 7 Planar 변압기 종류에 따른 온도 분포 (Po = 3.3kW)

Fig. 7 Temperature distribution according to planar transformer core (Po = 3.3kW).

본 연구는 2018년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 에너지인력양성사업으로 지원받아 수행한 인력양성 성과입니다. (No. 20184030202190)

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2020R1A2C2003445).

참고 문헌

- [1] H. Xu, Z. Yin, Y. Zhao, and Y. Huang, "Accurate Design of High-Efficiency LLC Resonant Converter With Wide Output Voltage," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 26653-26665, Sept. 2017.
- [2] M. A. Saket, N. Shafiei, and M. Ordonez, "LLC Converters With Planar Transformers: Issues and Mitigation," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 6, pp. 4524-4542, June. 2017.