

LLC 공진 컨버터에 적합한 자동화 권선 LLC 공진 변압기 설계에 관한 연구

A Study on LLC Resonant Transformer Design with the Winding Method of Automatic Type suitable for LLC Resonant Converter

배 준 형*, 김 종 해**★

Jun-Hyung Bae*, Jong-Hae Kim**★

Abstract

This paper presents the comprehensive transformer design methodology with the winding method of automatic type suitable for LLC resonant converter. The problem with conventional LLC resonant transformer is that it is difficult to implement the winding method of automatic type because all windings are wound in one bobbin. Therefore, the LLC resonant transformer, which is capable of the winding method of automatic type to multiple section bobbin without insulation tape and barrier tape, is proposed in this paper and the design procedure of the proposed LLC resonant transformer is also shown. Modeling and analysis of the proposed LLC resonant transformer using Maxwell 3D simulation tool are described in detail and a prototype 150W LLC resonant converter using the proposed LLC resonant transformer manufactured by 3D modelling is also verified through the experimental test.

요 약

본 논문은 LLC 공진 컨버터에 적합한 자동화 권선 변압기 설계에 대한 포괄적인 방법에 대해서 나타낸다. 기존의 LLC 공진 변압기는 하나의 보빈에 모든 권선이 감겨져 있기 때문에 자동화 권선 구현이 어렵다는 문제점이 있다. 따라서 본 논문에서는 절연 테이프와 배리어 테이프가 없이 다중 보빈으로 자동 권선이 가능한 LLC 공진 변압기를 제안하였으며 제안한 LLC 공진 변압기의 설계 절차에 대해서도 나타내었다. Maxwell 3D 시뮬레이션 툴을 이용하여 제안한 LLC 공진 변압기의 해석 및 모델링을 상세하게 기술되었으며 또한 3D 모델링에 의해 제작된 제안한 LLC 공진 변압기를 이용하여 프로토타입 150W LLC 공진 컨버터를 실험을 통해 확인하였다.

Key words : Automatic winding, LED-TV, LLC resonant converter, Magnetics design, Maxwell 3D simulation

* Flight Control System Integration Team KFX Program
Division, Korea Aerospace Industries, LTD.

** School of Electronic and Electrical Engineering, Daegu
Catholic University

★ Corresponding author

E-mail : kjhassk@cu.ac.kr, Tel : +82-53-850-2781

Manuscript received Sep. 12; revised Sep. 23, 2019;

accepted Sep. 24, 2019.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

최근 LED-TV시장은 대화면, 고화질, 고성능 및 슬림한 디자인을 선호하는 추세가 진행됨에 따라 이로 인해 TV에 필요한 전원장치의 슬림화, 고집적화 및 고효율 기술이 요구되고 있다. 또한 급증하는 수요에 대응하고 저가격 및 불량률 감소를 위해서는 전원장치의 자동화 기술이 절실히 필요한 실정이다.

현재 LED-TV 전원장치는 소프트 스위칭을 통하여 고효율 전원장치 구현이 가능한 LLC 공진형 컨버터가 각광받고 있다. LLC 공진형 컨버터는 특성

상 큰 누설 인덕턴스를 필요로 하므로 이를 수용할 수 있는 LLC 공진형 변압기 설계가 필요하다. 기존 슬림한 LLC 공진형 변압기 설계는 하나의 보빈에 일반 권선과 EFD 코어를 주로 사용한다[1][2]. 권선형 변압기는 일, 이차 권선 사이의 안전거리 규격에 의하여 절연 테이프가 필요하며 일정한 권선 층을 형성하기 위하여 보빈에 배리어 테이프가 필요하며, 이러한 테이프는 수작업으로 제작되었다. 그 결과 많은 제조 단계를 거치게 되며 권선의 구조에 의하여 결정되는 누설 인덕턴스가 일정하지 않고 각 권선 간에는 커플링 계수의 편차가 나는 문제점이 있었다. 또한 EFD 코어의 특성상 센터 코어와 바깥쪽 코어의 높이가 달라서 센터 코어에 권선을 감을 경우 권선의 높이를 포함한 변압기의 높이를 일정하게 만들기 어려워지므로 불량률이 높아진다. 또한 EFD 코어에서 발생한 자속과 백커버와의 자기결합에 의해 누설 자속이 증가하므로 이를 차폐하기 위해서는 고가의 AL(Aluminium) shield가 필요하다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 저가격으로 권선 자동화가 가능하도록 일반 권선을 사용하면서 다중 조립형 보빈을 이용한 LLC 공진 변압기를 제안한다. 또한 본 논문에서는 Maxwell 3D 시뮬레이션 툴을 이용하여 모델링한 결과값을 토대로 3D 모델링으로 제안한 LLC 공진 변압기를 제작하여 프로토타입 150W LLC 공진 컨버터에 장착하여 실험을 통해 정당성을 입증한다.

II. 본론

1. EFD코어를 사용한 LLC 공진 변압기 구조

그림 1은 기존의 LLC 공진 컨버터에 LLC 공진 변압기가 장착되어 있는 150W LED-TV 전원장치를 나타내고 있다. 기존 LLC 공진형 컨버터 변압기는 일반 권선을 쓰면서 슬림한 형태를 유지하기 위해서 주로 FED 코어를 사용하였다. 전원장치 전체 높이는 14.5mm로 많은 소자들 중에서 변압기의 높이가 전원장치의 전체 높이와 비슷하다. 그림 2는 그림 1의 LED-TV 전원장치에 기존의 LLC 공진형 컨버터 변압기를 나타내고 있다. 그림 2에서 EFD 코어는 보빈의 x축 방향으로 넣는 구조로 되어 있기 때문에 권선에 의한 자속이 z축 방향으로 발생하게 되어 철의 재질을 가지는 LED-TV의 Back cover와 자속 결합을 통한 누설 자속에 의해 LLC 공진 변압기의 온도가 상승하는 문제가 발생한다. 이러한 문

제를 해결 할 수 방안으로 변압기의 표면에 AL shield를 장착함으로써 문제를 해결 할 수 있다.

Conventional transformer of LLC resonant converter

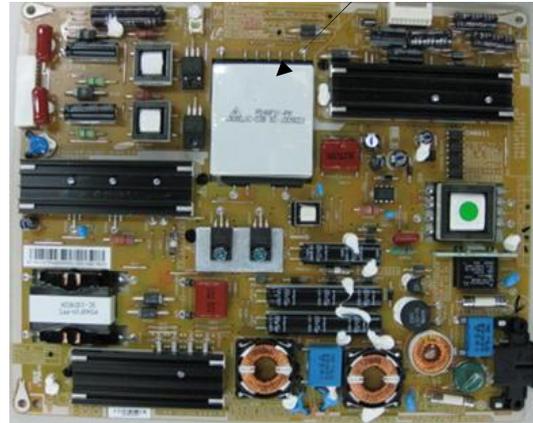


Fig. 1. Conventional transformer of LLC resonant converter. 그림 1. LLC 공진 컨버터의 기존 변압기

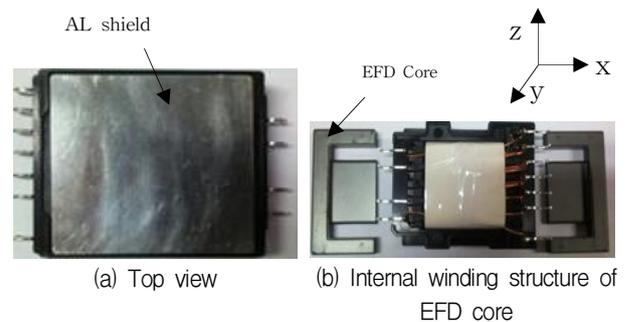


Fig. 2. Top view and internal winding structure with AL shield of conventional LLC transformer. 그림 2. AL차폐를 고려한 기존 LLC 변압기의 상면 및 내부 권선 구조

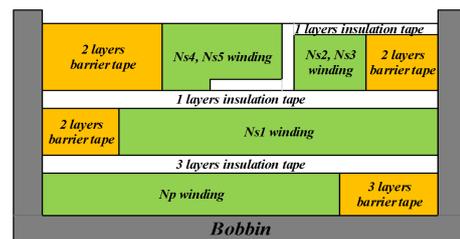


Fig. 3. Winding structure of conventional LLC transformer. 그림 3. 기존 LLC 변압기의 권선구조

그림 3은 EFD 코어를 사용하고 일반 권선으로 구성된 LLC 공진형 컨버터 변압기의 권선 구조를 나타내고 있다. 그림 3에서 알 수 있듯이, 일차 권선은 하나이며 이차 권선이 다중으로 구성되어 있으며 하나의 보빈에 모든 권선을 하는 구조로 각 권선간의 안전거리 규격을 위한 절연 테이프와 일정한 권선 층을 형성하기 위하여 보빈에 배리어 테이프가 수작업으로 작업되어 있다. 또한 기존의

LLC 공진 변압기의 일차권선과 이차 권선은 총 17 단계의 조립과정을 거쳐 제작된다.

2. 조립형 보빈 구조의 LLC 공진 변압기

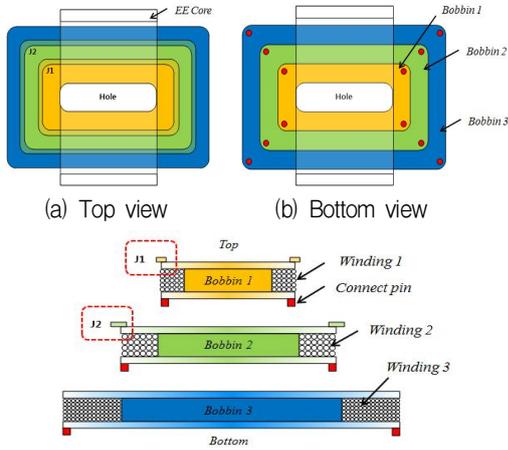


Fig. 4. Structure of proposed LLC resonant transformer with multi section bobbin.

그림 4. 다중 보빈을 고려한 제안 LLC 공진 변압기 구조

그림 4는 절연 테이프와 배리어 테이프가 없이 자동 권선이 가능한 조립형 보빈 구조를 가지는 LLC 공진 변압기를 나타내고 있다. 제안 LLC 공진 변압기는 누설 인덕턴스를 조절하기 위해서 절연 테이프를 이용하거나, 권선의 위치를 바꿀 필요가 없이 보빈의 이격 거리를 활용하면 된다. 고정된 보빈의 이격 거리로 인하여 누설 인덕턴스의 변동 폭을 대폭 줄일 수 있다는 장점을 가진다.

3. 제안 LLC 공진 변압기 설계

2장의 1절과 2절에서 기술한 기본적인 조립형 보빈 개념도를 이용하여 실제 LED-TV에 사용하고 있는 LLC 공진 컨버터 변압기를 대상으로 물리적, 전기적 특성이 비슷하도록 변압기를 설계한다. 본 논문에서 제안하는 변압기는 기존 변압기의 자화 인덕턴스와 턴 비를 유지하면서 변압기의 구조만 바꾸는 것이기 때문에 기존의 LLC 공진형 컨버터의 회로 파라메타는 표 1과 같다.

변압기의 사이즈를 축소하기 위하여 일차 측 턴 수를 50턴에서 35턴으로 약 30% 줄였다. 턴 수가 감소하므로 B_{max} 는 증가하게 된다. 기존 변압기의 B_{max} 는 수식 (1)과 같다.

$$B_{max} = \frac{V_{inmax}}{2f_s \cdot N_p \cdot A_e} = 0.15 [T] \tag{1}$$

Table 1. Circuit parameter of conventional LLC resonant converter.

표 1. 기존 LLC 공진 컨버터의 회로 파라미터

Parameter	Value
P_o	150[W]
L_m	450[μ H]
L_k	50[μ H]
B_{max}	0.36[T]
A_e	83[mm ²]
V_{inmax}	400[V]
f_s	100[kHz]
Turn ratio	1.7
Transformer size	58[mm]*47[mm]*14.5[mm]
Core loss limit	120[kW/m ³]

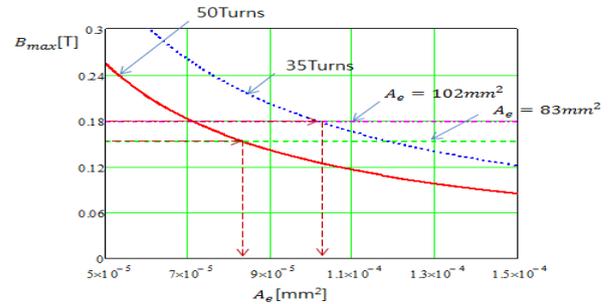


Fig. 5. Flux density according to the variation of A_e at 50 turns(N_p) and 35 turns(N_p) on the primary side.

그림 5. 1차측 35턴과 50턴에서 단면적 변화에 따른 자속밀도

4. Maxwell 3D 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 LLC 변압기의 누설 인덕턴스 및 자화 인덕턴스를 분석하기 위하여 Maxwell 3D 프로그램의 정자장해석(Magnetostatic)방법을 채택하여 각 권선에 1A와 턴 수를 1턴으로 하여 퍼미언스(Permeance) 값을 구하였다. 수식 (2)를 이용하여 Maxwell 3D 프로그램에서 구한 퍼미언스 값을 이용하여 각 단자의 턴 수를 제공하여 각 권선의 인덕턴스 값을 계산하였다.

$$L_m = P \cdot N_p^2 \tag{2}$$

각 권선의 자기 인덕턴스 값과 상호 인덕턴스 값을 이용하여 커플링 계수를 구하고 커플링 계수를 이용하여 누설 인덕턴스 값을 구한다. 커플링 계수를 구하는 공식은 식 (3)과 같다.

$$k_{12} = \frac{L_{12}}{\sqrt{L_{11} \cdot L_{22}}} \tag{3}$$

여기서 L_{11} 은 일차 자기 인덕턴스, L_{22} 은 이차 자기 인덕턴스, L_{12} 는 상호 인덕턴스이다.

본 논문에서 제안한 LLC 변압기의 권선 배치는 다음과 같이 총 3가지 형태로 Maxwell 3D 시뮬레

이선을 수행 하였다.

- 1) Np:Ns2:Ns3:Ns4:Ns5:Ns1=35:1:1:2:2:20
- 2) Np:Ns1:Ns2:Ns3:Ns4:Ns5=35:20:1:1:2:2
- 3) Np1:Ns2:Ns3:Ns4:Ns5:Np2:Ns1=18:1:1:2:2:17:20

위의 3가지의 권선 배치 중 LLC 공진형 컨버터에 적합하고, 보빈 개수가 작은 2)번 권선 배치를 선택하였다.

5. LLC DC-DC 공진 변압기의 3D 모델링

그림 6은 본 논문에서 제안한 자동 권선형 LLC 공진 변압기를 3D 모델링한 3차원도와 조립과정을 나타내고 있다. 권선은 실제 사이즈를 바탕으로 2D 도면에 배치하여 권선을 할 때 보빈의 너비가 부족하지 않도록 지그재그형태로 권선을 배치하였다. 제안한 LLC 공진 변압기에 사용한 보빈의 재질은 최소 두께가 0.4mm까지 가능한 LCP 재질을 사용하였다. 그림 6의 제안 LLC 공진 변압기는 기존 변압기에 비해 제조 단계가 17단계에서 11단계로 감소한 총 6단계로 권선 자동화와 제조 시간을 단축시킬 수 있는 구조로 구성되어 있으며, AL shield와 절연 테이프 및 배리어 테이프 모듈을 제거할 수 있으므로 제조 단가를 크게 낮출 수 있다는 장점을 가지고 있다.

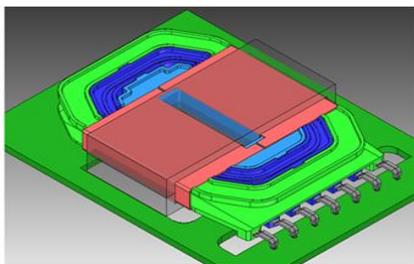


Fig. 6. 3D view of proposed LLC resonant transformer. 그림 6. 제안 LLC 공진 변압기의 3차원도

6. 제안 LLC 공진 변압기 제작

Maxwell 3D 시뮬레이션 결과를 바탕으로 조립형 보빈을 사용하여 본 논문에서 제안한 LLC 공진 변압기를 제작하였다. 그림 7은 다중 보빈으로 실제 제작한 LLC 변압기의 외관을 나타내고 있다. LLC 공진 변압기 코어의 공극은 센터에 위치한다. 본 논문의 Maxwell 3D 시뮬레이션 결과를 토대로 제작한 LLC 공진 변압기의 자화 인덕턴스와 누설 인덕턴스를 기존 변압기와 비교/검토하였다. LLC 공진 변압기의 이차 측이 다중 권선일 경우 일차 측에서 바라본 누설 인덕턴스는 두 권선 변압기와 다르게 측정해야 한다. 그 이유는 상호 인덕턴스가 계산식에 의해서 구하였기 때문이다. Maxwell 3D 시뮬레이션 툴을 이용할 경우는 각 단자의 상호 인

덕턴스를 알 수 있기 때문에 커플링 계수를 구하기가 쉽다. 하지만 측정 방법을 통해서 정확한 상호 인덕턴스 값을 구할 수가 없다. 따라서 정확한 상호 인덕턴스를 구하기 위해서는 우선 각 단자를 개방시킨 상태에서 자기 인덕턴스를 측정한다. 그런 후 한 단자를 단락시킨 후에 다른 단자의 누설 인덕턴스를 측정한다. 위 누설 인덕턴스를 측정하는 방법을 반복한 후 식 (4)을 이용하여 커플링 계수 표를 만든다.

$$k_{12} = \sqrt{1 - \frac{L_{k12}}{L_{11}}} \quad (4)$$

여기서 L_{11} 은 일차 자기 인덕턴스, L_{k12} 는 일, 이차 누설 인덕턴스이다.

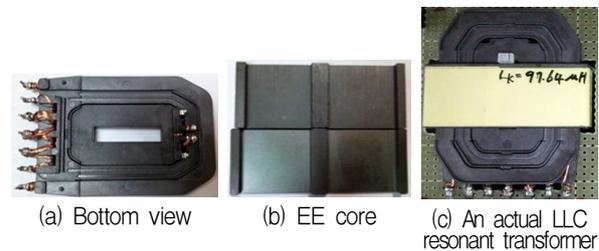


Fig. 7. Visual appearance of an actual LLC resonant transformer. 그림 7. 실제 LLC 공진 변압기의 외관

III. 결론

본 논문에서는 절연 테이프와 배리어 테이프가 없이 다중 보빈으로 자동 권선이 가능한 LLC 공진 변압기를 제안하였다. 본 논문에서 제안한 조립형 보빈을 이용하는 변압기는 수동으로 제작하던 변압기를 권선 자동화를 하게 함으로써 생산량 증가와 불량률 감소 및 저가격을 이룰 수 있으므로 향후 LED-TV 용 변압기뿐만 아니라 LED조명, Server Power등의 다양한 응용 분야에 사용되리라 사료된다.

References

[1] Sihun Yang; Shoyama, M.; Abe, S., "Design of low-profile LLC resonant converter for low transformer loss," *TENCON 2010 - 2010 IEEE Region 10 Conference*, pp.1301-1306, 2010. DOI: 10.1109/TENCON.2010.5685947

[2] Yang, B. "Integrated magnetic for LLC resonant converter," *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2002. APEC 2002. Seventeenth Annual IEEE*, vol.1, pp.346-351 2002. DOI: 10.1109/APEC.2002.989269