

새로운 형상의 평면변압기를 이용한 LLC 공진컨버터

정봉근, 장상호, 이승민, 노영재, 강철하, 박지훈, 김은수*
 전주대학교

LLC Resonant Converter Using A Novel Planar Transformer

B.G Chung, S.H Jang, S.M Lee, Y.J No, C.H Kang, J.H Park, E.S Kim*
 JeonJu University

1. 서론

최근 이슈화 되고 있는 스위칭전원장치(SMPS : Switching Mode Power Supply)의 슬립화 추세에 맞춰 이에 대응 할 수 있는 고집적 전원장치 개발이 요구되고 있다. 고집적화 및 슬립화를 위해서는 LLC 공진컨버터에 사용되는 변압기의 집적화가 필요하지만 기존 권선형 변압기 사용시 보빈 또는 코어의 높이를 감소시키는데 한계성을 가지게 되어 평면변압기를 적용한 LLC 공진컨버터 개발이 활발히 이루어지고 있다.^[1, 2] 하지만 평면변압기를 적용한 LLC 공진컨버터는 1차측권선과 2차측 권선이 기존 변압기에 비해 매우 밀착되어 있는 구조를 가지기 때문에 누설자속이 적어 높은 결합계수를 가지게 된다. 따라서 원하는 공진특성을 얻기 위해서 그림 1과 같이 외부에 별도의 인덕터를 사용하지만 별도의 인덕터 사용에 따라 부피증가와 단가 증가와 같은 문제점을 갖는다. 이러한 문제점을 개선하고자 그림 2와 같이 변압기(TR)와 공진을 위한 인덕터(Lr)가 하나로 결합되어 있는 코어형상을 가지는 새로운 평면변압기를 제안하였다.^[3, 4] 새로운 코어형상을 갖는 제안된 평면변압기를 200W LLC 공진컨버터에 적용, 실험하였다.

(A_{e3})는 자속이 통과하는 면적을 크게 확보하기 위해 연결하여 큰 전류에도 코어가 쉽게 포화되지 않도록 하였다. 1차측 권선은 그림 2에 나타낸 바와 같이 변압기단 중간자로면적(A_{e1})과 인덕터단 중간자로면적(A_{e4})을 둘러싸며 배치되며 2차측 권선은 변압기단 중간자로(A_{e1})만을 둘러싸며 배치되어 1차측 권선과 결합되는 구조를 가지게 된다. 공진을 위한 누설인덕턴스는 1차측 권선과 2차측 권선이 결합되지 않는 부분인 인덕터단 중간자로(A_{e4})을 둘러싸며 배치되는 1차측 권선에 의해 발생하게 되며 누설인덕턴스는 인덕터단의 중간자로(A_{e4})의 크기나 공극의 길이 변화를 통해 조절이 가능한 형태를 가지게 된다. 하지만 제안된 평면변압기는 변압기단 중간자로(A_{e1})와 인덕터단 중간자로(A_{e4})를 둘러싸며 배치된 1차측 권선에 전류가 흐르게 되면 변압기단과 인덕터단에서 동시에 자속이 발생하게 되며, 대부분의 자속들은 각자의 외각자로(A_{e3})를 통해 자속이 통과되지만 그림 3(c)의 Maxwell 3D 시뮬레이션을 통해 알 수 있듯 변압기단과 인덕터단 서로간의 자기적인 결합에 의해 영향을 받게 된다. 이러한 변압기단(TR)과 인덕터단(Lr) 간의 자기적인 결합은 제안된 평면변압기의 분석 및 설계에 중요한 요소를 가지게 되므로 정확한 분석이 필요하다.

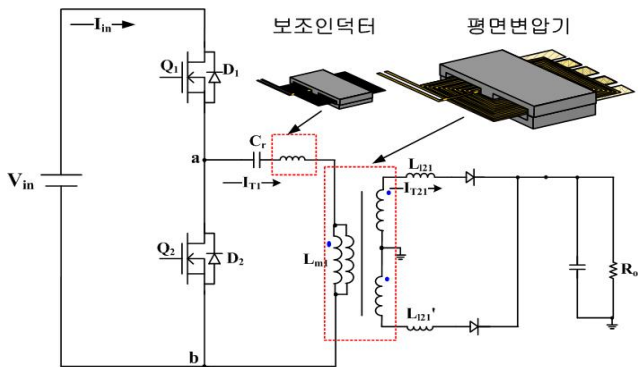


그림 1. 기존 평면변압기를 이용한 LLC 공진컨버터

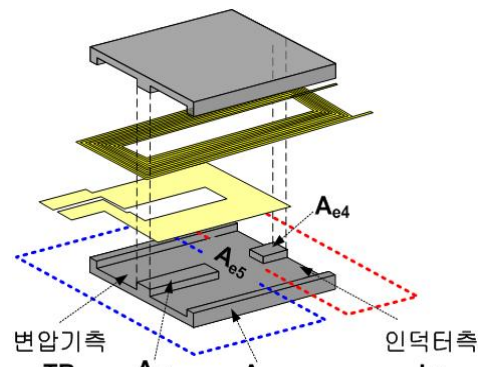
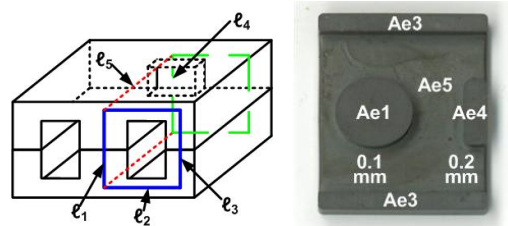


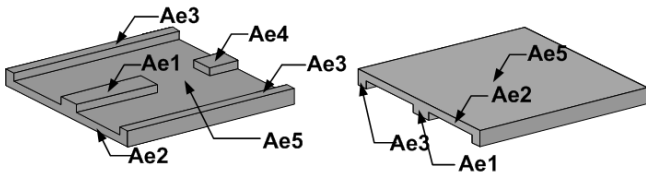
그림 2. 제안된 평면 변압기 형상

2. 제안된 평면변압기 구조 및 형상

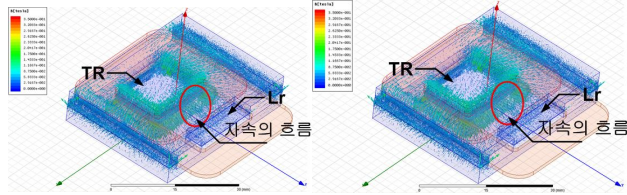
그림 2는 누설인덕턴스 조절이 가능한 제안된 평면변압기의 구조이다. 제안된 평면변압기는 'EE' 형상을 가지는 변압기단 (TR)과 'EE'형상의 인덕터단(Lr)이 결합되어 하나의 변압기 형태를 갖는 것을 특징으로 한다. 변압기단(TR)과 인덕터단(Lr) 중간자로(A_{e1} , A_{e4})는 서로 분리되어 빈 공간 A_{e3} 를 가지게 된다. 이는 2차측 권선이 변압기단 중간자로(A_{e1})을 둘러싸며 배치되어야 하기 때문이다. 또한 제안된 평면변압기의 외각 자로



(a) 제안된 평면 변압기 MPL 및 형상



(b) 제안된 평면 변압기 자로면적



(c) 제안된 평면 변압기 Maxwell 3D 시뮬레이션
그림 3 제안된 평면 변압기 형상 및 시뮬레이션

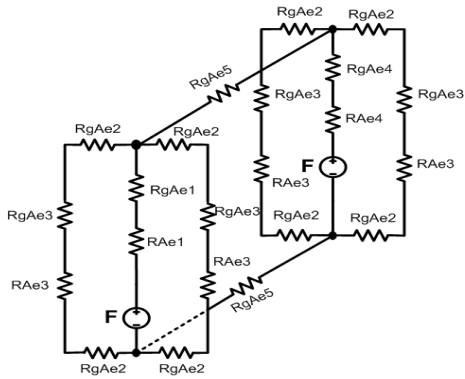
3. 제안된 평면 변압기 설계

3.1 제안된 평면 변압기의 모델링

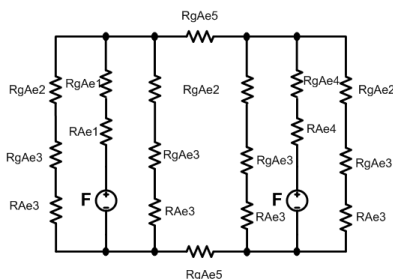
변압기단과 인덕터단 간 발생하는 자기적인 결합계수(k)를 알기 위해 변압기단과 인덕터단을 포함하는 제안된 평면 변압기 전체 등가릴렉턴스 회로는 그림 4(a)와 같이 나타내었다. 3차원 형식으로 표시된 등가릴렉턴스 회로를 2차원적으로 표현하게 되면 그림 4(b)와 같으며 변압기단과 인덕터단의 외각릴렉턴스 ($RA_{e3}+R_{gAe3}+R_{gAe2}$)는 좌우대칭으로 같은 파라메타를 가지게 되므로 식(1)을 통해서 그림 4(c)와 같이 간략화가 가능하게 된다. 여기서 제안된 평면 변압기를 등가릴렉턴스로 변환하기 위하여 식(1)을 적용하였으며 $RA_{e1} \sim RA_{e5}$ 는 코어자로에 대한 자기 릴렉턴스이며 RA_{eg} 는 변압기단과 인덕터단 공극에 대한 자기 릴렉턴스이다.

$$R_{Ae1} = \frac{l_1}{uA_{e1}}, R_{Ae2} = \frac{l_2}{uA_{e2}}, R_{Ae3} = \frac{l_3}{uA_{e3}}, R_{Ae4} = \frac{l_4}{uA_{e4}},$$

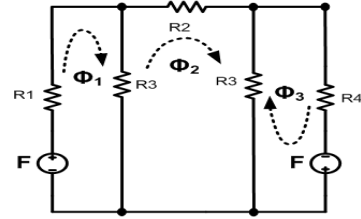
$$R_{Ae5} = \frac{l_5}{uA_{e5}}, R_{Aeg} = \frac{l_g T}{u_o A_e}, R_{Aeg} = \frac{l_g L}{u_o A_e} \quad (1)$$



(a) 제안된 평면 변압기 등가릴렉턴스



(b) 제안된 평면 변압기 2차원 등가릴렉턴스



(c) 제안된 평면 변압기 간략화된 등가회로

그림 4 변압기단과 인덕터단을 포함하는 평면 변압기 등가회로

그림 4(c)와 같이 간략화된 등가회로에서 KCL, KVL을 통해 각 루프에서 발생하는 자속크기를 계산하기 위해 식(2)~식(7)과 같이 표현이 가능하게 되며 이에 따른 결합계수(k)는 식(8)과 같이 표현이 가능하다. 또한 변압기단과 인덕터단에 발생하는 상호인덕턴스(M)를 식(9)을 통해 추출할 수 있게 된다.

$$\begin{pmatrix} (R_1 + R_3) & -R_3 & 0 \\ (R_1 + R_3) & (R_2 - 2R_3) & (R_3 - R_4) \\ 0 & -R_3 & (R_3 + R_4) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \Phi_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_1 \\ 0 \\ F_2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$R_1 = (R_{gAe1} + R_{Ae1}), R_2 = 2R_{Ae5}$$

$$R_3 = \frac{R_{gAe3} + R_{Ae3} + 2R_{Ae2}}{2}, R_4 = R_{gAe4} + R_{Ae4} \quad (3)$$

$$D = (R_1 + R_3) \cdot (R_3 + R_4) \cdot (R_2 - 2R_3) + 2R_3^2 \quad (4)$$

$$\Phi_1 = \frac{F(R_2 - 2R_3)(R_3 + R_4)}{D} \quad (5)$$

$$\Phi_2 = \frac{-F(R_1 + R_3)2R_3}{D} \quad (6)$$

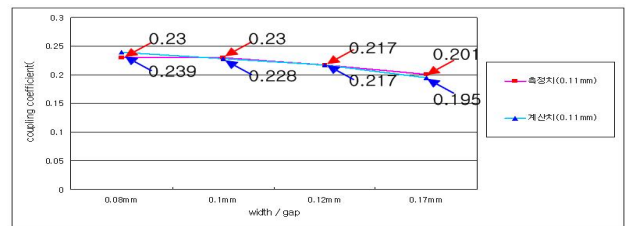
$$\Phi_3 = \frac{F(R_1 + R_3)(R_2 - 2R_3)}{D} \quad (7)$$

$$k = \frac{\Phi_2}{\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3} \quad (8)$$

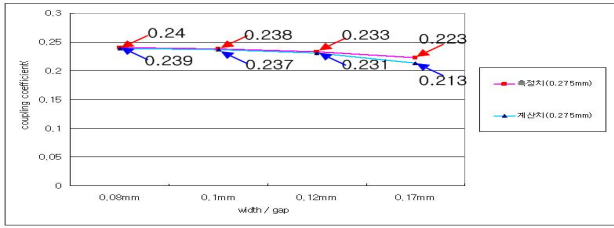
$$M = k \cdot \sqrt{L_T \cdot L_L} \quad (9)$$

그림 5는 변압기단 공극변화(0.11mm~0.275mm)와 인덕터단 공극변화(0.08mm~0.17mm)에 대한 결합계수(k)의 변화를 실제 제작된 변압기의 측정치와 식(2)~(9)를 적용한 계산치 비교 그래프를 나타내고 있다. 그림 5(a)는 변압기단 공극을 0.11mm로 고정시키고 인덕터단 공극을 0.08mm, 0.1mm, 0.12mm, 0.175mm로 변화시켰을 때 결합계수(k) 변화를 나타내고 있으며, 변압기단 공극을 0.275mm로 증가시킨 후 인덕터단 공극변화에 대한 결합계수(k) 변화를 그림 5(b)에 나타내었고, 실제 측정값과 계산 값이 매우 유사한 것을 확인할 수 있었다. 식(10)을 통해 1차측권선의 자기인덕턴스를 얻을 수 있게 된다.

$$L_{pri} = L_T + L_L - 2M \quad (10)$$



(a) 고정된 변압기단 공극(0.11mm)에 인덕터단 공극(0.08mm~0.175mm) 변화에 대한 결합계수 변화



(b) 고정된 변압기단 공극 (0.275mm)에 인덕터단 공극(0.08mm~0.175mm) 변화에 대한 결합계수 변화
 그림 5. 변압기단 공극과 인덕터단 공극 변화에 따른 측정값과 계산 값 결합계수(k) 변화

제안된 평면변압기의 경우 변압기단과 인덕터단 간의 결합계수(k)를 최소화하기 위해서는 그림 5를 통해 알 수 있듯이 인덕터단 공극의 크기를 증가시키고 변압기단 공극의 길이를 감소시켜야 한다. 하지만 변압기단 공극길이를 감소시켜 변압기를 제작할 경우 변압기의 인덕턴스 파라메타 오차범위가 넓어지게 되어 대량 제품생산 시 불량률이 높아지게 되는 문제점이 발생하게 된다. 이는 코어의 연마과정에서 일어나는 코어간의 공극길이 오차에 대해서도 파라메타 오차가 발생하게 되고 특히 작은 공극에서는 코어의 넓은 오차범위를 가지는 투자율에 대해 민감하게 반응을 하기 때문이다. 따라서 제품을 대량생산 시 불량률을 최소화 하기위한 변압기단에 투입되는 최적의 공극길이를 계산하여 변압기관리가 용이하도록 변압기단 공극길이를 제시하여야 한다. 관련하여 상세 설계 및 적용내용은 추후에 발표하고자 한다.

4. 실험결과

본 논문에서는 200W 정격출력용량을 갖는 제안된 평면변압기를 적용하여 입력전압 360~400V 조건에서 최대정격 출력용량 24V/8.3A에 대해 각각 실험하였다. 그리고 적용된 실험조건과 주요정격에 대해 표 1에 나타내었다.

표 1. 제안된 평면변압기 주요 정격

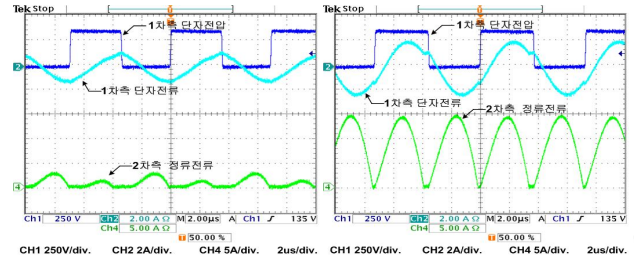
입력 전압(V _{in})	360Vdc~400Vdc
출력전압 및 전류	24V/8.3A
출력 용량(PO)	200W
스위칭 주파수(fs)	156.1kHz~175.2kHz
공진 주파수(fr)	156.1kHz
공진 커패시터(Cr1, Cr2)	8.2nF
입력/출력 커패시터(Cin/Co)	231uF/132uF
스위칭 소자(Q1, Q2)	SD20N60
출력전류 다이오드(D3~D6)	MBRF20100CT
적용된 제어 IC	L6559

표 2. 제안된 평면변압기 측정 파라메터

1차측 자기인덕턴스	314.1uH
2차측 자기인덕턴스	3.8426uH
1차측 누설인덕턴스	36.44uH
2차측 누설인덕턴스	0.413uH
자화인덕턴스	277.7uH
등가누설인덕턴스	63.38uH
턴수비(N2/N1)	8.5(17/2)

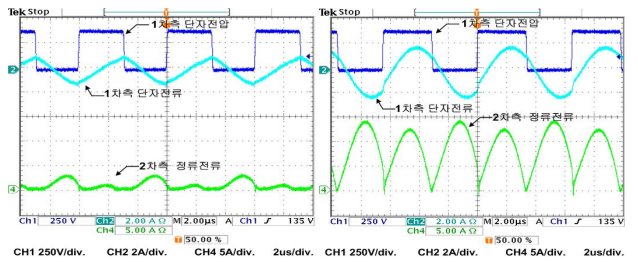
그림 6과 그림 7은 그림 2의 제안된 평면변압기 적용 LLC 공진컨버터 실험파형으로 입력전압(V_{in}) 360Vdc, 출력전압(V_o) 24Vdc에 대하여 20W와 200W일 때 1차측 단자전압(V_{ab})과 전류(I_T)를 측정된 파형이다. 그림 7은 입력전압(V_{in}) 390Vdc, 출

력전압(V_o) 24Vdc에 대하여 20W와 200W일 때 1차측 단자전압(V_{ab})과 전류(I_T)를 측정된 파형이다.



(a) 24Vdc/0.8A (b) 24Vdc/8.3A

그림 6. 입력전압(V_{in}) 360V일 때 실험파형



(a) 24Vdc/0.8A (b) 24Vdc/8.3A

그림 7. 입력전압(V_{in}) 390V일 때 실험파형

5. 결론

본 논문에서는 제안된 변압기를 적용하여 LLC 공진컨버터를 구성하여 실험하였다. 새로운 형상을 가지는 변압기에 대해 이론적인 해석을 하였으며 실제 변압기를 측정하여 수식의 타당성을 검증하였고, 제안된 변압기 사용시 고려사항을 제시하여 대량 생산 때 불량률을 감소시킬 수 있는 방법을 제안하였고 이러한 고려사항에 따라 제작된 변압기를 실험하여 전압이득 특성 수식과 비교하여 수식의 타당성을 검증하였고 실제 적용이 가능함을 보였다.

이 논문은 LG이노텍(주) 산학협력연구과제로 수행된 과제임

참고 문헌

- [1] W.Chen, G. Hua, D. Sable and F.C. Lee, "Design of high efficiency, low profile, low voltage converter with intergrated magnetics", IEEE APEC'97,pp.911 917,1997
- [2] Ionel Jitaru, "High Power Planar Transformer", Rompower Inc., Patent No : US6,211,767 B1, 2001. 4. 3
- [3] 김은수, "평면변압기", 전주대학교, LG이노텍(주) 공동출원, 특허출원번호 10 2010 0042526, 2010. 5. 6
- [4] 김은수, 정봉근, "평면변압기", 전주대학교, LG이노텍(주) 공동출원, 특허출원번호 10 2010 0052949, 2010. 6. 4
- [5] 강성인, 윤광호, 김은수, 박준호, 허동영 "LLC직렬공진 컨버터 동작 특성" 전력전자학회논문지 제 12권 제 6호, pp472~482