

제안된 평면변압기를 적용 LLC 공진컨버터

메아스사란¹, 품쏘피악¹, 노영재¹, 이승민¹, 김은수¹⁺, 이영수²
 전주대학교¹, LG이노텍(주)²

LLC Resonant Converter Using Proposed Planar Transformer

S. Meas¹, S. Phum¹, Y.J Noh¹, S.M Lee¹, E.S Kim¹⁺, Y.S Lee²
 JeonJu University¹, LG Innoteck²

1. 서론

최근 전원장치의 고효율과 고집적화를 위해 손실이 적은 컨버터와 가전기기의 슬림화에 맞춰 이에 대응할 수 있는 고집적 전원장치 개발이 요구되고 있다. 특히 회로의 집적화와 스위칭 손실을 줄이기 위해 모든 부하 범위 내에서 영전압 스위칭(ZVS:Zero Voltage Switching) 동작하며, 높은 효율을 가지는 LLC 공진컨버터가 널리 사용되고 있다. 하지만 한 개의 변압기로 LLC 공진 컨버터를 설계할 경우 권선의 굵기 및 제한된 창면적에 따라서 슬림화하기에는 코어 및 보빈 개발에 한계성을 가지게 된다. 따라서 변압기의 권선 및 열적 스트레스를 반으로 줄이기 위하여 변압기를 두 대로 나누어 1차 측을 직렬 연결하고, 2차측을 병렬로 연결하는 해결점을 찾고 있지만, 일반적인 코어를 사용하여 슬림화하기에는 권선의 굵기 및 제한된 창 면적에 따라서 한계성을 가지게 된다.

이러한 문제점을 개선하기 위해 최근에는 주파수 특성이 좋은 Planar 코어를 적용하여 사용하고 있다. 하지만 Planar 코어는 1차측과 2차측의 커플링계수가 높기 때문에 이득특성에 많은 영향을 미치는 1차측 누설인덕턴스가 거의 존재하지 않는다. 이 문제점을 해결하기 위해 1차측 단자에 보조 공진인덕터를 추가로 적용함으로써 단자 상승 등 문제점이 있었다.^[1,2,3]

본 논문에서는 별도의 외부에 인덕터를 추가하지 않고, 코어의 형상에 따라 누설인덕턴스를 증가시킬 수 있는 새로운 코어 형상에 대해서 제안하고자 한다.^[4]

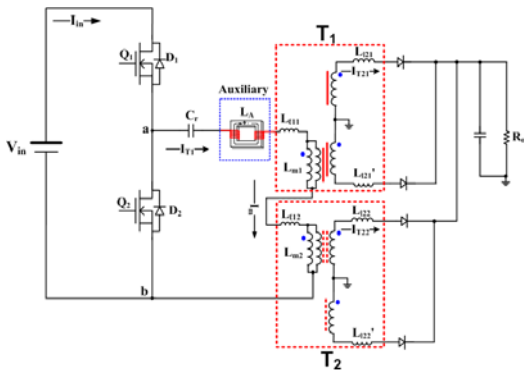


그림 1. 기존 보조공진인덕터와 평면변압기 적용 LLC 공진컨버터

2. 새로운 코어 형상을 갖는 제안된 평면변압기

본 논문에서는 변압기의 창 면적 확보 및 열적 스트레스를 줄이고, 변압기 누설인덕턴스를 증가시키기 위하여 그림 2와 그림 3에 나타난 코어 형상과 권선방법을 갖는 변압기를 제안하였으며 제안된 변압기(TR)는 하나의 코어 형상에서 변압기

1차권선과 2차 권선이 상호 쇄교 및 커플링 되어있는 두 부분이 변압기1(TR1)과 변압기2(TR2)의 역할을 하며, 변압기 1차 권선만 감겨있고 2차권선은 쇄교되지 않은 코어 부분은 누설자속이 통과하는 경로가 되어 변압기 누설인덕턴스 값을 증대시킴으로써 두 대 직렬 LLT (Inductor Inductor Transformer) 고집적 변압기를 구성하게 된다. 즉, 제안된 코어형상 중간부분 코어의 길이(l_w), 공극(Gap : l_h) 등을 조절하여 누설인덕턴스 및 자화 인덕턴스 값을 조정할 수 있기 때문에 LLC 공진컨버터의 입력력 이득특성에 따라 원하는 공진인덕턴스 값을 얻을 수 있다.

또한 그림 3에 나타난 제안된 평면변압기 권선방법에서 1차 권선은 전체 코어에 하나의 권선으로 연결되어 있어 각 변압기1(TR1)과 변압기2(TR2)가 직렬로 연결 구성되어 있고, 각 변압기(TR1, TR2) 2차 측은 각각 병렬로 연결되어 있는 구조이다. 그러므로 제안된 코어의 형상에서 커플링 되어있는 두 대의 변압기1(TR1)과 변압기2(TR2)는 각각 변압기 1차권선이 직렬 연결되어 있어 전류 불평형을 최소화 할 수 있다.

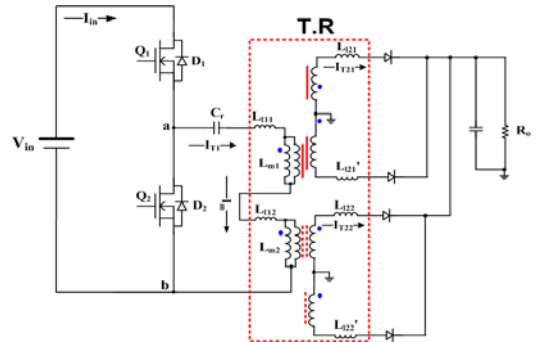


그림 2. 제안된 평면변압기 적용 LLC 공진컨버터

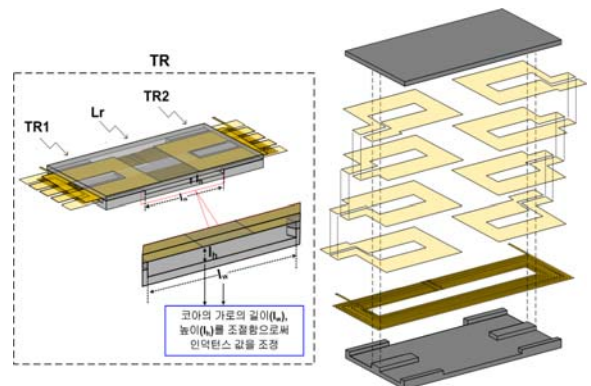


그림 3. 제안된 평면변압기 분해도 및 형상

3. 두 대 평면변압기적용 LLC 공진컨버터

본 논문에서 적용된 코어 구조는 두 개의 변압기가 직렬로 연결되어 하나의 단자로 되어 있고, 2차 측은 두 개의 변압기가 병렬로 연결되어 각각 2개의 단자로 연결되어 있다. 따라서 공진 요소로 사용되는 변압기의 누설 인덕턴스는 각 변압기의 등가 누설 인덕턴스의 합과 같기 때문에 각각의 변압기 파라미터를 추출하면 회로의 공진 주파수를 결정하는 등가 누설 인덕턴스(L_{eq})를 구할 수 있게 된다. 변압기는 그림 4(a)과 같이 간단한 등가회로로 나타낼 수 있고, 그림 4(b)는 변압기의 2차 측의 각 파라미터를 1차 측으로 반영하여 1차 측에서 바라본 등가 모델이다. AC 해석을 이용하여 스위칭 동작에 의해 1차 측 a, b 단자에 인가되는 전압을 구형파로 등가화를 시켰으며 3, 5, 7 고조파 성분은 무시하고 기본파(FHA) 성분만을 고려하였다. 그리고 C_r , L_{111} , L_{112} 및 N^2L_{221} , N^2L_{222} 그리고 L_{m1} , L_{m2} 는 LLC 공진컨버터의 1차 측 직렬커패시터와 각 변압기의 1차 측 누설인덕턴스 및 2차 측 누설인덕턴스 그리고 자화인덕턴스를 나타낸 것이다. 또한 N^2R_{ac1} 과 N^2R_{ac2} 는 그림 2의 부하저항, 정류 다이오드 그리고 필터 커패시터를 그림 4(b)처럼 등가화하여 1차 측으로 반영된 등가 부하저항($R_{ac} = 8R_L/\pi^2$)이다.

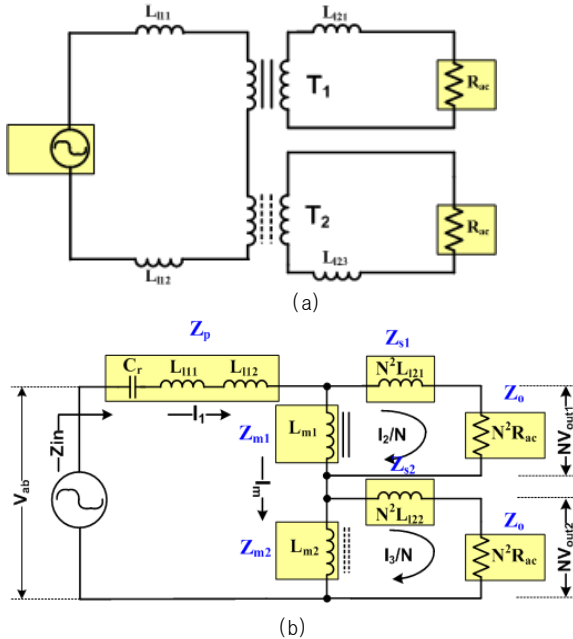


그림 4. 제안된 평면변압기 적용 LLC 공진컨버터 등가회로

그림 4의 등가회로로부터 얻어진 단자전압(V_{ab}) 대 변압기 1의 출력전압(NV_{out1})에 대한 전압이득(G_V) 수식은 식 (1)과 같고, 분모항(Denominator)의 실수부(D_{real})와, 허수부($D_{imaginary}$)로 나누어 표현하였다. 그리고 이때 정규화 된 값들을 식 (2)부터 식 (7)에 나타내었다.

$$G_V = \frac{NV_{out1}}{V_{ab}} = \frac{Z_o I_2/N}{Z_{in} I_1} = \left| \frac{1}{D_{real} + D_{imaginary}} \right| \quad (1)$$

$$D_{real} = \left\{ 1 + \frac{L_{m2}}{L_{m1}} \delta + A_1 + \frac{L_{112}}{L_{m1}} + \left(\frac{\omega_r}{\omega} \right)^2 \alpha + \frac{L_{m2}}{L_{m1}} \beta \right\} \quad (2)$$

$$D_{imaginary} = j \left(\frac{1+B_1}{N^2 R_{ac}} \right) \left\{ \omega L_{eq} + \omega L_{eq} \gamma \left(\frac{L_{m2}}{L_{m1}} \right)^2 \delta - \omega L_{m2} \beta \left[1 + \left(\frac{L_{m2}}{L_{m1}} \right)^2 \gamma \delta \right] - \frac{1}{\omega C_r} \right\} \quad (3)$$

$$\alpha = A_1 + \frac{B_1}{1+B_1}, \quad \beta = A_2 + \frac{B_2}{1+B_2} \quad (4)$$

$$\gamma = \frac{A_2 + A_2 B_2 + B_2}{A_1 + A_1 B_1 + B_1}, \quad \delta = \frac{j\omega L_{m1} + N^2 j\omega L_{221} + N^2 R_{ac}}{j\omega L_{m2} + N^2 j\omega L_{222} + N^2 R_{ac}} \quad (5)$$

$$A_1 = \frac{L_{111}}{L_{m1}}, \quad B_1 = \frac{N^2 L_{221}}{L_{m1}}, \quad A_2 = \frac{L_{112}}{L_{m2}}, \quad B_2 = \frac{N^2 L_{222}}{L_{m2}} \quad (6)$$

$$Z_{in} = \frac{1}{j\omega C_r} + j\omega L_{111} + \frac{j\omega L_{m1} (N^2 j\omega L_{221} + N^2 R_{ac})}{j\omega L_{m1} + N^2 j\omega L_{221} + N^2 R_{ac}} + j\omega L_{112} + \frac{j\omega L_{m2} (N^2 j\omega L_{222} + N^2 R_{ac})}{j\omega L_{m2} + N^2 j\omega L_{222} + N^2 R_{ac}} \quad (7)$$

식 (1) ~ (7)로부터 두 대의 변압기 각각의 1차 측과 2차 측 누설 인덕턴스(L_{11} , L_{111} , L_{112} , N^2L_{21} , N^2L_{221} , N^2L_{222}) 및 자화 인덕턴스(L_m , L_{m1} , L_{m2}) 등의 파라미터가 같다고 가정한다면 식 (8)과 같이 간단하게 표현할 수 있다.

$$G_V = \left| \frac{1}{2 \times \left[\left(1 + \frac{L_{11}}{L_m} - \frac{1}{\omega^2 L_m C_r} \right) + j \times Q \times \left(1 + \frac{N^2 L_{22}}{L_m} \right) \times \left(\frac{\omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega} \right) \right]} \right| \quad (8)$$

$$Q = \frac{\omega_r L_{eq}}{N^2 R_{ac}} \quad (9)$$

$$L_{eq} = L_{11} + \frac{N^2 L_{221} L_{m1}}{N^2 L_{221} + L_{m1}} = L_{112} + \frac{N^2 L_{222} L_{m2}}{N^2 L_{222} + L_{m2}} \quad (10)$$

$$= L_{m1} \left(A_1 + \frac{B_1}{1+B_1} \right) = L_{m2} \left(A_2 + \frac{B_2}{1+B_2} \right)$$

여기서 $A = A_1 = A_2$, $B = B_1 = B_2$ 라면 식 (11)과 같다.

$$L_{eq} = L_m \left(A + \frac{B}{1+B} \right) \quad (11)$$

여기서 A, B비율과 Q변화에 따른 전압이득 특성 변화를 확인하기 위하여 다시 A, B 비율과 Q에 관한 수식으로 전개하면 식 (12)과 같이 표현할 수 있다.

$$G_V = \left| \frac{1}{2 \times \left[1 + A - \left(\frac{1}{\omega_n} \right)^2 \times \left(A + \frac{B}{1+B} \right) + jQ \times (1+B) \times \left(\frac{\omega}{\omega_n} - \frac{1}{\omega_n} \right) \right]} \right| \quad (12)$$

$$\omega_n = \frac{\omega}{\omega_r} \quad (13)$$

표 1. 제안된 평면변압기 측정 파라미터

	Transformer1 24V 출력단	Transformer2 24V 출력단
1차측 자기 인덕턴스(L_p)	137.4uH	
등가 누설 인덕턴스(L_{eq})	90.39uH	91.48uH
2차측 자기 인덕턴스(L_s)	3.17uH	3.1uH
1차측 누설 인덕턴스(L_{11})	2.319uH	2.319uH
2차측 누설 인덕턴스(N^2L_{12})	28.75uH	28.15uH
자화 인덕턴스(L_m)	67.14uH	65.62uH
A(L_{lp}/L_m)	0.035	0.035
B(N^2L_{12}/L_m)	0.428	0.429
턴수 비($N=N1/N2$)	(11/2)	(11/2)
직렬 커패시터(C_r)	12nF	
여자전류(ΔI_m)	3.23A	
공극(lg)	0.08mm(사이드 갭)	

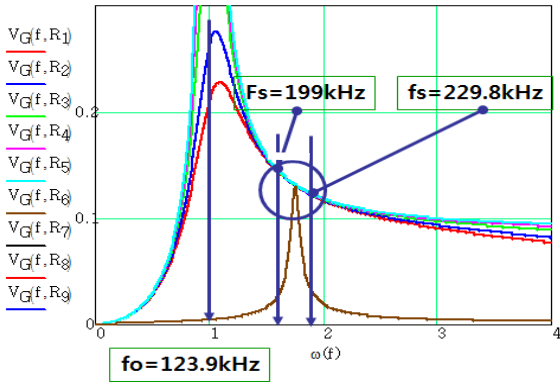


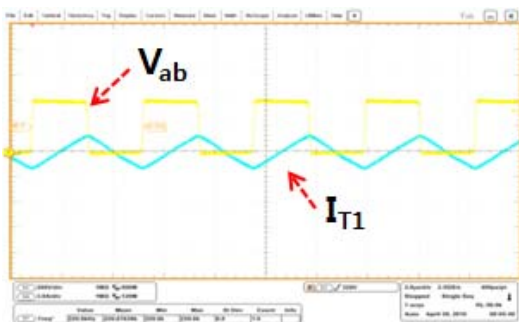
그림 5. 제안된 평면변압기 적용 LLC 공진컨버터 이득특성

4. 실험결과

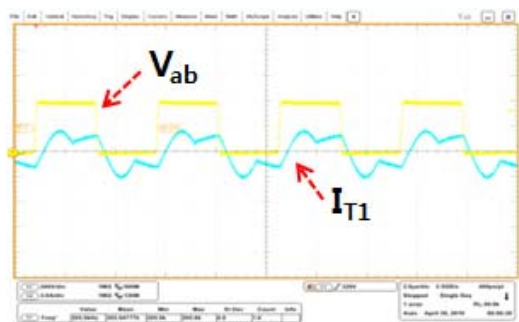
본 논문에서는 300W 정격출력용량을 갖는 LLC 공진컨버터에 제안된 평면변압기를 적용하여 입력전압 360Vdc~400Vdc 조건에서 최대정격 출력용량 24V/10.5A, 12V/4A에 대해 각각 실험하였다. 실험조건과 주요정격에 대해 표 2에 나타내었다. 그림 6(a)과 그림 6(b)은 그림 3의 제안된 평면변압기의 실험 파형으로 입력전압(V_{in} :360V)에 대하여 출력전압 24V,12V 출력용량 3W, 300W 일 때 1차측 단자전압(V_{ab})과 전류(I_{T1})를 측정 한 파형이다. 실험결과 그림 5의 전압이득특성(G_V)과 비교하여 전압이득특성 및 경부하에서 중부하로 부하 변화 시 동작스위칭주파수범위(199kHz~229.8kHz)가 일치하는 것을 확인하였다.

또한 모든 부하 조건에서 단자전류(I_{T1})는 단자전압(V_{ab})에 대해 항상 지상 전류가 흐르기 때문에 항상 ZVS(Zero Voltage Switching)동작됨을 확인 할 수 있었다.

그림 7은 제안된 평면변압기 시제품사진과 300W동작조건에서 1시간 30분정도 박스 밀봉상태에서 동작된 제안된 평면변압기 온도특성을 보여주고 있다.



(a) 24Vdc/0.1A, 12Vdc/0.01A



(b) 24Vdc/10.5A, 12Vdc/4A

그림 6. 입력전압(V_{in}) 390V일 때 실험파형 (200V/div., 3A/div., 2us/div.)

표 2. 제안된 평면변압기 주요 정격

입력 전압(V_{in})	360Vdc~400Vdc
출력전압(V_O) 및 전류(I_O)	24V/10.5A, 12V/4A
출력 용량(P_O)	300W
스위칭주파수(f_s) 범위	199kHz~230kHz
스위칭 소자(Q_1, Q_2)	SD20N60
출력전류 다이오드	MBRF20100CT
적용된 제어 IC	L6559

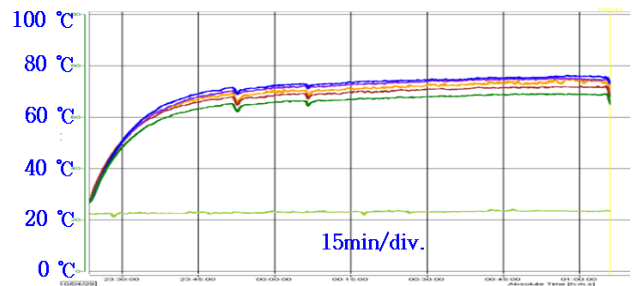
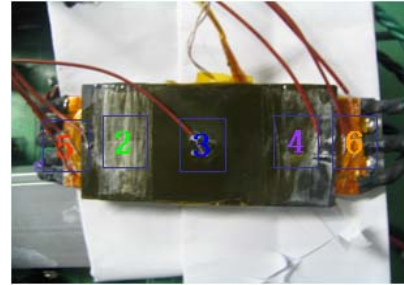


그림 7. 제안된 평면변압기 시제품사진 및 온도특성

5. 결론

본 논문에서는 제안된 평면변압기를 적용하여 LLC 공진컨버터를 구성하여 실험하였다. 새로운 코어 형상을 가지는 평면변압기에 대해 이론적인 해석을 하였으며 제작된 변압기를 실험하여 전압이득 특성 수식과 비교하여 수식의 타당성을 검증하였고 실제 적용이 가능함을 보였다.

이 논문은 LG이노텍(주) 산학협력연구과제로 수행된 과제임

참 고 문 헌

- [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] 강성인, 김주훈, 김은수, 박준호, 허동영, 정용재, "두대의 LLT 변압기 적용 LLC공진 컨버터" 전력전자학회논문지 제 14권 제 6호 pp 431~439
- [4] 김은수, "평면변압기", 전주대학교, LG이노텍(주) 공동출원, 특허등록번호 10 1105481, 2012. 1. 5