

슬림형 전원을 위한 고효율 2-변압기 LLC 공진형 컨버터

이주영, 구현수, 이창민, 한상규[†]
국민대학교 POESLA

High Efficiency 2-Transformer LLC Resonant Converter for Slim Power Supplies

Ju Young Lee, Hyun Su Gu, Chang Min Lee, Sang Kyoo Han[†]
Power Electronics System Laboratory, Kookmin University

ABSTRACT

본 논문에서는 슬림화 및 고밀도 전원을 위한 고효율 2 변압기 LLC 공진형 컨버터를 제안한다. 제안된 컨버터는 기존 단일 변압기 LLC 공진형 컨버터에 비해 슬림화에 유리하고 누설 인덕터 확보가 용이할 뿐만 아니라 트랜스포머 1, 2차 권선의 근접효과를 최소화 할 수 있어 도통손실 저감의 장점을 갖는다. 최종적으로 제안된 컨버터의 타당성 검증을 위해 이론적 동작분석을 비롯하여 240W급 모의실험 결과를 제시한다.

1. 서론

최근 전자기기의 소형화 추세에 따라 전원회로 또한 슬림화 및 고밀도화 추세에 있다. 기존 단일 변압기 LLC 컨버터는 절연형 컨버터로써 1차측과 2차측으로 구성되어 있다. 단일 변압기에서 공진 인덕터를 확보하는 방법으로는 외부에 보조 인덕터를 사용하거나, 1, 2차측 권선을 Section 보빈으로 분리시켜 누설 인덕터를 확보하는 방안이 있다. 전자의 경우 추가적인 인덕터가 소요되며 1차측 전류가 인덕터에 동일하게 흘러 추가 손실이 발생한다. 후자의 경우 1, 2차측 근접효과가 심각하여 도통 손실 증가로 권선의 발열이 심각해지는 문제가 야기된다. 게다가 슬림화를 위해 변압기의 높이를 축소시키면 변압기의 너비가 증가함과 동시에 권선의 총 길이와 층수가 과도하게 증가하여, 변압기의 물리적인 크기뿐만 아니라 권선의 DC 등가저항(R_{DC}) 및 AC 등가저항(R_{AC})이 증가하여 고효율 및 고밀도화에 어려움이 존재하였다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 논문에서는 1, 2차측 및 제3권선으로 구성된 2 변압기 LLC 공진형 컨버터를 제안한다.

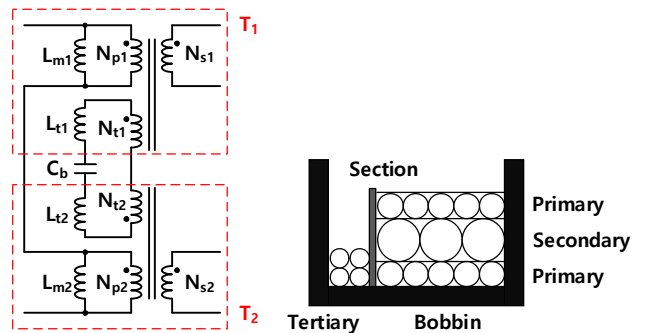
2. 2-변압기 LLC 공진형 컨버터

2.1 제안 회로의 구성

제안회로의 변압기는 그림 1 (a)와 같이 1, 2차측 및 제3권선으로 구성된다. 2개의 변압기의 1차측은 직렬로, 2차측은 기존 센터 탭 방식의 한쪽 레그(leg)만을 구성하며, 두 개의 변압기의 제3권선은 직류 차단 캐패시터(C_b)와 직렬로 연결된다.

2개의 동일한 변압기가 직렬연결 되어있으므로 변압기 양단 전압은 기존의 절반이다. 따라서 변압기의 턴 비 또한 기존의 절반이 된다. 즉, 1, 2차측 권선 수는 기존 단일 변압기 대비 절반이 된다. 또한 각 변압기에서 전력을 전달하는 양도 절반

이므로 작은 사이즈의 변압기를 사용할 수 있다. 따라서 2개 변압기 사용을 고려하면 권선 수는 같으나, 작은 변압기의 사용으로 MLT(Mean Length per Turn)가 감소하여 1, 2차측 직류저항성분 및 도통손실을 저감할 수 있다. 또한 그림 1 (b)와 같이 1, 2차 권선은 샌드위치 권선법을 적용하여 주파수가 올라갈수록 증가하는 근접효과와 영향을 원천적으로 줄여 교류저항성분에 대한 도통손실을 최소화하였다. 제3권선은 Section 보빈 사용으로 1, 2차측과 분리되어 각각의 변압기에서 큰 누설 인덕턴스(L_{L1} , L_{L2})를 갖게 된다. 이로 인해 공진 인덕턴스에 관여하는 $L_r(L_r=L_{L1}+L_{L2})$ 확보에 유리하다. 제3권선의 추가로 인한 도통 손실 저감을 위하여 C_b 를 추가하였다. Charge Balance Law에 의해 제3권선에 흐르는 전류의 윗셋을 0으로 만들어 rms전류 및 도통손실을 현저히 줄일 수 있다.



(a) 제안 2-변압기 구조 (b) 제안된 변압기 단면 권선 구조
그림 1 제안 2-변압기 구조 및 단면 권선 구조
Fig. 1 Proposed 2-Transformer LLC structure and cross section winding structure.

2.2 제안 회로의 동작 원리

그림 2 (a)와 (b)는 제안 회로의 모드별 동작을 나타내며 (c)는 주요 동작 과정을 나타낸다. 모드 1은 M_1 이 켜진 상태로 변압기 T_1 을 통해 전력이 전달되므로, L_{m1} 은 자화 인덕터로써 식 (1)과 같은 자화 인덕턴스를 갖으며, 전류는 $(N_{p1}/N_{s1}) \cdot V_o/L_{m1}$ 의 기울기로 상승한다. 이때, 전력을 전달하지 않는 T_2 변압기의 L_{m2} 와 제3권선에 의한 L_r 가 병렬로 연결되어 공진 인덕터를 구성하며 식 (2)와 같다. 공진 주파수는 공진 캐패시터(C_r)와 함께 식 (3)과 같다.^[1] 모드 2는 M_2 가 켜진 상태로 모드 1과 반대로 동작한다.

$$L_p = L_m \quad (1)$$

$$L_r = L_m / ((N_s/N_t)^2 L_t) = \frac{L_m \times (N_s/N_t)^2 L_t}{L_m + (N_s/N_t)^2 L_t} \quad (2)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_r C_r}} \quad (3)$$

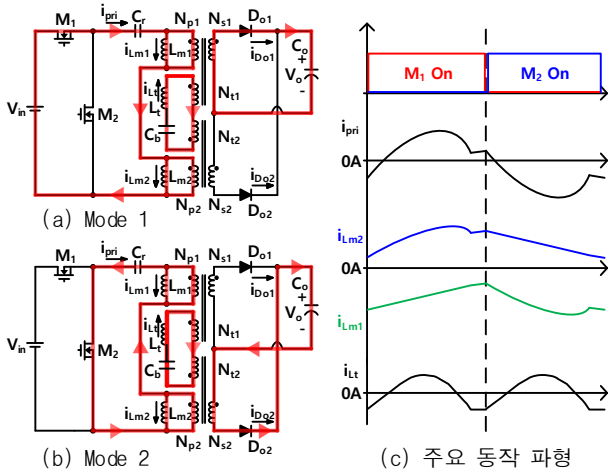


그림 2 제안 2-변압기 LLC 공진형 컨버터 동작 및 주요 파형
Fig. 2 Proposed 2-Transformer LLC resonant converter operation and main wave

2.3 제안 회로와 단일 변압기 비교

표 1은 기존 단일 변압기 LLC 컨버터와 제안 2 변압기 LLC 컨버터의 1:2:3차의 $R_{DC} \cdot R_{AC}$, 1:2:3차의 rms전류·AC전류, 전체 DC 손실 및 AC 손실을 비교한 표이다. LLC 컨버터의 사양은 $V_{in}=390V$, $V_{out}=19.5V$, $P_{out}=240W$, $C_r=47n$, $L_{m1}=L_{m2}=572.5\mu H$, $L_r=55.6\mu H$, $f_{sw}=100kHz$, $N_{p1}(=N_{p2}):N_{s1}(=N_{s2}):N_{t1}(=N_{t2})=40:4:44$ 이다. 제안 2 변압기는 단일 변압기 대비 작은 코어(PQ4025 → PQ3520)를 사용하여 MLT가 감소하고, 권선수 또한 절반으로 저감되어 R_{DC} 값이 줄어들게 된다. 또한 앞서 설명한 바와 같이 샌드위치 권선법을 적용하여 R_{AC} 또한 크게 줄였다. 제3권선의 직류 차단 캐패시터 적용 효과로 인해 rms전류 및 AC 전류가 크게 감소되었다. 이 결과 변압기 및 보조 인덕터의 도통손실은 단일 변압기 대비 약 56.5% 절감 효과를 보인다.^[2] 아래 표의 단일 변압기의 '3차'는 보조 인덕터를 의미한다.

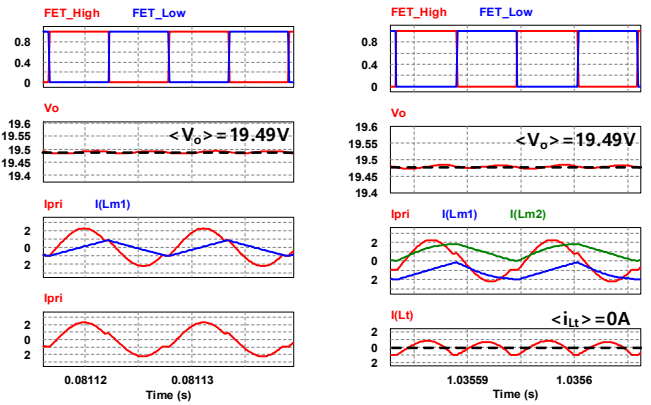
표 1 제안 2-변압기와 단일 변압기 특성 비교
Table 1 Comparison of proposed two transformer versus single transformer.

	단일 변압기(PQ4025)	제안 2 변압기(PQ3520)
$R_{DC}(1차,2차,3차)$	163, 12, 179 [mΩ]	143, 9, 595 [mΩ]
$R_{AC}(1차,2차,3차)$	1632, 12, 333 [mΩ]	961, 10, 609 [mΩ]
$I_{rms}(1차,2차,3차)$	1.54, 14.35, 1.54[A _{rms}]	1.54, 14.38, 0.61 [A _{rms}]
$I_{AC}(1차,2차,3차)$	1.44, 5.51, 1.44 [A _{AC}]	1.07, 7.16, 0.59 [A _{AC}]
Total R_{DC} Loss	3.20 [W]	2.48 [W]
Total R_{AC} Loss	4.42 [W]	1.83 [W]

3. 제안회로 시뮬레이션 결과

제안회로의 타당성 검증을 위하여 기존 단일 변압기 LLC 컨버터 및 제안 2 변압기 LLC 공진형 컨버터의 PSIM 시뮬레

이션을 진행하였다. 모의실험에 사용된 사양 및 소자 파라미터는 2.3절에 제시한 바와 같으며 시뮬레이션 결과 파형은 그림 3과 같다. 시뮬레이션 결과 기준과 제안회로 모두 출력전압을 정확히 제어하는 것을 알 수 있으며, 1차측 전류 또한 동일하게 동작함을 알 수 있다. C_b 적용 효과로 인해 i_{Lr} 의 유효를 0이 됨을 확인 할 수 있어 rms 전류가 감소된다.



(a) 단일 변압기 주요 파형 (b) 2-변압기 주요 파형
그림 3 단일 변압기 및 제안 2-변압기 시뮬레이션 주요 파형
Fig. 3 Main waveform of Single transformer and proposed 2-transformer simulation

4. 결론

본 논문에서는 슬림형 전원을 위한 2 변압기 LLC 공진형 컨버터를 제안하였다. 기존 단일 변압기 LLC 공진형 컨버터는 높이 저감에 여러 제약 조건이 있다. 이러한 제약 조건을 해결하며 높이 절감을 위하여 기존 단일 변압기를 제3권선이 적용된 2 변압기로 대체 적용하였다. 이를 통해 각 변압기의 사이즈 및 권선수를 줄여 권선의 총 길이 및 층수를 감소시켜 R_{DC} , R_{AC} 저감을 이루었다. 또한 누설 인덕터 확보에 유리한 section 형태의 제3권선을 적용함으로써 별도의 보조 인덕터가 필요 없으며, 제3권선의 손실은 직류 차단 캐패시터의 추가를 통해 크게 저감시켜 주었다. 이론적인 분석 및 제안 회로의 타당성을 검증하기 위하여 240W급 시뮬레이션을 진행하였으며 앞서 제시한 바를 모두 증명하고 있다. 따라서 본 논문에서 제안하는 2 변압기 LLC 공진형 컨버터는 슬림화 및 고효율을 요구하는 어댑터 전원회로에 매우 적합하다.

본 논문은 한국항공우주연구원의 정지제도복합위성 개발 사업(2011 0030431) 지원에 의하여 연구되었음을 밝힙니다.

참고 문헌

[1] Yang, B.; Lee, F.C.; Zhang, A.J.; Guisong Huang, "LLC resonant converter for front end DC/DC conversion," in APEC 2002. Seventeenth Annual IEEE, vol.2, no., pp.1108 1112 vol.2, 2002
[2] C. R. Sullivan and R. Y. Zhang, "Simplified design method for litz wire", in APEC 2014, Twenty Ninth Annual IEEE, pp. 2667 2674.