

두 대의 LLT 변압기 적용 LLC 직렬공진 컨버터

강성인, 김주훈, 정봉근, 김은수[†], 박준호*, 허동영*
 전주대학교, LG 이노텍*

LLC Series Resonant Converter with Two LLT Transformers

S. I. Kang, J. H. Kim, B. G. Chung, E. S. Kim[†], J. H. Park*
 Jeonju University, LG Innotek*

ABSTRACT

최근 각종 전자기기의 슬림화 추세에 따라 PDP PSU(Power Supply Unit) 또한 슬림화가 진행되고 있다. 슬림화를 위해서는 방열판과 벌크(Bulk) 커패시터, 입력단의 필터와 인덕터류, 그리고 변압기의 높이를 줄이는 것이 중요하다. 그 중에서도 변압기의 높이를 줄이는 것이 가장 큰 관건이다. 하나의 변압기를 사용할 경우 슬림화의 한계성을 가지기 때문에 적용된 변압기는 두 개의 LLT 변압기로 구성 하였으며 1차측과 2차측의 결선 방법을 통해 두 LLT변압기간의 전류 불균형 문제를 최소화 할 수 있도록 하였다. 그리고 높이 35mm 시제품을 제작하여 50HD PDP 전원에 적용시켜 검증한 결과를 나타내었다.

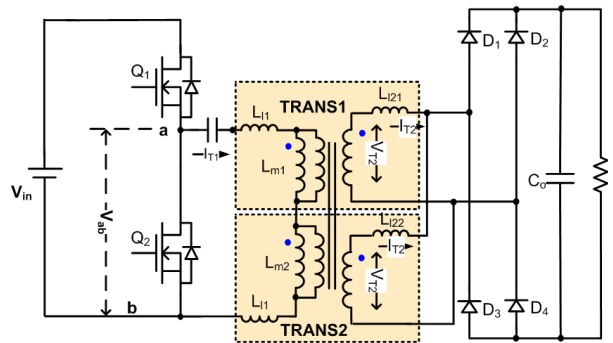
1. 서론

최근 기술의 발전으로 제품들 간의 기능적인 면에서는 평균화가 되고 있다. 이런 상황에서 기업들은 고객의 감성을 자극하고 새로운 니즈(Needs)를 만들어 내고자 디자인에 많은 투자를 하고 있다. 그러한 디자인 트렌드의 가장 큰 줄기는 소형화, 슬림화, 단순화라고 할 수 있다. 본 논문에서는 위의 세 가지 중 슬림화 대응 방안에 대하여 이야기 하고자 한다. 슬림화를 위해서는 방열판과 벌크(Bulk) 커패시터, 입력단의 필터와 인덕터류, 그리고 변압기의 높이를 줄여야만 한다. 그 중에서도 고주파 변압기의 높이를 줄이는 것이 가장 어렵고 여러 가지 제약이 따르게 된다. 기존 출시된 제품들은 높이의 제약성이 없었기 때문에 하나의 변압기를 적용하여 구성되어 있다. 그러나 하나의 변압기로 설계할 경우 슬림화의 한계성을 가지기 때문에 적용된 변압기는 두 개의 LLT 변압기로 구성 하였으며 1차측과 2차측의 결선 방법을 통해 두 LLT변압기간의 전류 불균형 문제를 최소화 할 수 있도록 각 변압기 1차측 권선은 직렬 연결하고, 2차측은 병렬 연결하여 적용하였다. 그리고 35mm 시제품을 제작하여 50HD PDP 전원에 적용시켜 검증한 결과를 나타내었다.

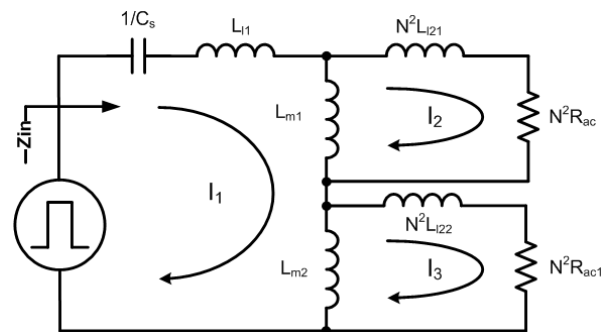
2. 주회로 구성

그림 1은 두 대의 LLT 변압기를 적용한 LLC 직렬공진 컨버터 주 회로이다. 적용된 주 회로는 하프-브리지(Half-Bridge)와 풀-브리지(Full-bridge) 정류 회로로 구성되어 있고, 변압기

의 1차측은 직렬로 결선하고, 2차측은 병렬로 결선하였다. 이와 같은 변압기 결선 방법은 두 대의 변압기 적용시 전류의 균형을 맞추기 위해 일반적으로 널리 적용되고 있는 방법이다.^[4] 1차측의 권선을 직렬로 결선을 할 경우 1차측에 흐르는 전류는 동일하므로 두 변압기간의 전류 균형을 맞출 수 있고, 권선의 굵기는 줄일 수 없으나 각 변압기 간에는 전압이 반으로 줄어들기 때문에 턴-수를 반으로 줄일 수 있다. 또한 2차측의 권선은 병렬 구조이기 때문에 전류 스트레스가 반으로 줄어들어 권선의 굵기를 1/2로 줄일 수 있으므로 보빈의 권선면적 감소에 의한 코어의 크기를 줄일 수 있는 조건을 만들 수 있다.



(a) 주회로



(b) 등가회로

그림 1. 두 대의 변압기 적용 LLC 직렬공진 컨버터 주회로와 등가회로

그림 1(b)는 두 대의 LLT 변압기를 적용한 LLC 직렬공진 컨버터의 등가회로도이다. AC 해석을 이용하여 스위칭 동작에

의해 1차측 단자에 인가되는 전압을 구형파로 등가화를 시켰으며 3, 5, 7 고조파 성분은 무시하고 기본파 성분만을 고려하였다. 그리고 C_s , L_{l1} 및 N^2L_{l2} , N^2L_{l3} 그리고 L_{m1} , L_{m2} 는 LLC 직렬 공진컨버터의 1차측 직렬커패시터와 1차측 누설인덕턴스 및 2차측 누설인덕턴스 그리고 자화인덕턴스를 나타낸 것이다. 그리고 그림 1(b)에서 R_{ac1} 과 R_{ac2} 는 그림 1(a)의 부하저항, 정류 다이오드 그리고 필터 커패시터를 등가화한 등가부하 저항 ($R_{ac}=8R_f/\pi^2$)이다.^[3] 그림 1(b)의 등가회로로부터 얻어진 부하 변화에 대한 전압이득 수식과 정규화 된 값들을 식 (1)부터 식 (5)에 나타내었다.

$$\beta = \frac{1}{(2\pi f)^2 L_{m2} C_s}, \quad Q_s = \frac{2\pi f L_{eq}}{R_{ac}} \quad (1)$$

$$K = \frac{j(2\pi f)L_{l22}}{R_{ac}} + \frac{L_{l1}}{L_{m2}} \quad (2)$$

$$D = \left\{ 1 + \frac{j(2\pi f)L_{l21}}{R_{ac}} \right\} \left\{ \frac{N^2 R_{ac} + j(2\pi f)(N^2 L_{l22} + L_{m2})}{N^2 R_{ac} + j(2\pi f)(N^2 L_{l21} + L_{m1})} \right\} \quad (3)$$

$$L_{eq} = L_{l1} + \frac{N^2 L_{l21} L_{m1}}{N^2 L_{l21} + L_{m1}} + \frac{N^2 L_{l22} L_{m2}}{N^2 L_{l22} + L_{m2}} \quad (4)$$

$$V_G = \frac{1}{N} \left| \frac{1}{1 + A - \beta + K + j \left(\frac{1}{N^2} + \frac{L_{l22}}{L_{m2}} \right) \left[Q_s \left(\left(\frac{L_{l1}}{L_{eq}} \frac{f}{f_s} \right) - \frac{f_s}{f} \right) \right] + \frac{L_{m1}}{L_{m2}} D} \right| \quad (5)$$

본 논문에서 적용된 등가 공진 주파수는 등가 누설 인덕턴스 (L_{eq})와 직렬 커패시터(C_s)가 공진할 때의 주파수로 $f_r = 1/2\pi \sqrt{L_{eq} C_s}$ 이다. 그러므로 직렬 커패시터는 식 (6)에 의해 얻어진다.

$$C_s = \frac{(1/2\pi f_r)^2}{L_{eq}} \quad (6)$$

표 1. LLC 직렬공진 컨버터의 요구된 입출력 설계사양

입력전압(V_{in})		320V _{DC} ~ 400V _{DC}
출력전압	V_{s_out}	195V _{DC} (185V _{DC} ~ 199V _{DC})
	V_{a_out}	60V _{DC}
	V_{18V_out}	18V _{DC}
출력전류	I_{s_out}	0.1A ~ 2A
	I_{a_out}	0.005A ~ 2.2A
	I_{18V_out}	0 ~ 2A
공진주파수(f_r)		130kHz

표 2. 측정된 두 대의 LLT 변압기 파라미터

	변압기 1	변압기 2
1차측 자기인덕턴스(L_p)	63.95uH	69.22uH
2차측 자기인덕턴스(L_s)	190.13uH	206.9uH
등가 누설인덕턴스(L_m)	10.99uH	10.54uH
$A(L_{l1}/L_m)$	0.011	0.026
$B(N^2L_{l2}/L_m)$	0.181	0.208
총 등가누설인덕턴스 (L_{eq_total})	21.5uH	
적용코어	EER4445*2	
$N(n_1/n_2)$	0.625 (10/16)	0.625 (10/16)

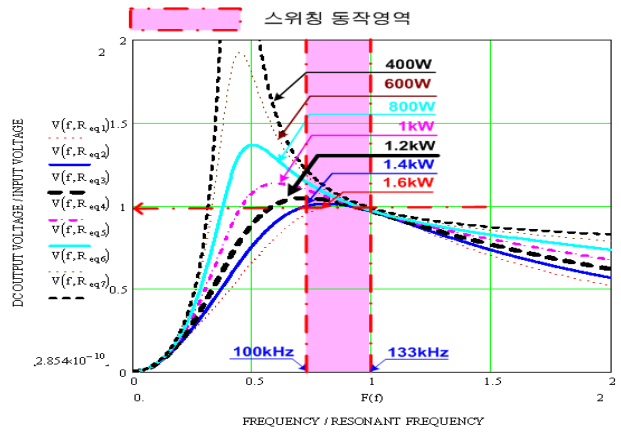
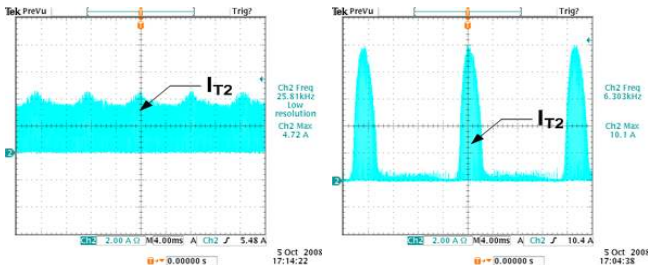


그림 2. 두 대의 LLT 변압기 적용 LLC 직렬공진 컨버터 전압이득 특성

식 (5)과 표 2에 나타낸 변압기 파라미터를 이용하여 그림 2와 같은 부하 변화에 대한 입출력 전압 이득 특성을 얻어냈다. 전압이득 특성 분석 결과 부하 동특성에 의한 최대 부하 조건인 다이내믹 부하(1.4kW, 60Hz)에서도 1차측 주 스위칭 소자의 ZVS 동작을 할 수 있는 마진(margin)을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 또한 전반적으로 완만한 이득 특성을 가지므로 출력을 제어하기 위한 주파수 영역이 100kHz ~ 133kHz로써 넓은 영역에서 스위칭 동작을 할 수 있다.

3. 실험결과

표 2의 변압기를 50인치 PDP 전원장치에 적용하여 실험하였다. 전자부하를 적용하여 검증하였으며, V_s 전원부의 부하 동특성을 고려하여 그림 3에서 보는바와 같이 V_s 전원부 출력이 고정 부하 조건(static max : 2A($I_{T2}=4.72A_{peak}$))과 다이내믹(Dynamic max : 2A($I_{T2}=10A_{peak}$)) 부하 조건일 때에도 1차측 주 스위칭 소자는 ZVS(Zero Voltage Switching) 동작을 만족해야 한다. 여기서 다이내믹 부하란 그림 3(b)와 같이 PDP 모듈의 부하특성과 비슷한 부하 조건을 만들어 주기 위해 전자부하 상에서 60Hz 에 한 번씩 1ms의 폭을 갖는 펄스형 정현파를 발생 시켜주는 부하이다. 그리고 이때 적용된 주요 정격에 대해서 표 3에 나타내었다.



(a) Static Max 2A(2A/div.) (b) Dynamic Max 2A(2A/div.)
 그림 3. 최대 부하 조건에서의 변압기 2차측 정류된 전류파형

표 3. LLC 직렬 공진컨버터 주요 성격

스위칭 주파수 범위(f_s)	100kHz ~ 133kHz
공진주파수(f_r)	130kHz
공진커패시터(C_s)	66nF
제어 IC	ST社 L6599D
주 스위칭 소자	STW20NK50Z (500V, 20A)
Vs 출력 정류다이오드	FCF10A40 (400V, 10A)

그림 4와 그림 5는 부하 변화 시 1차측 단자 전압과 전류 파형을 나타낸다. static 중부하(2A)에서 경부하(0.05A)까지 부하 변화 시 스위칭 주파수는 각각 110kHz에서 119.5kHz 사이에서 동작하는 것을 확인할 수 있었고, 다이내믹 부하에서는 중부하(2A)에서 경부하(0.05A)까지 부하 변동 시 스위칭 주파수는 각각 111kHz에서 124kHz 사이에서 동작하는 것을 확인하였다. 그리고 최대 부하 (static max:2A, dynamic max:2A ($I_{T2}=10A_{peak}$)) 조건에서 1차측의 주 스위칭 소자는 항상 ZVS 동작을 하는 것을 확인하였다. 실험결과를 통해서 그림 2에 나타난 두 대의 LLT 변압기 적용 LLC 공진 컨버터의 전압이득 특성 분석 결과와 스위칭 주파수 범위가 일치함을 알 수 있다.

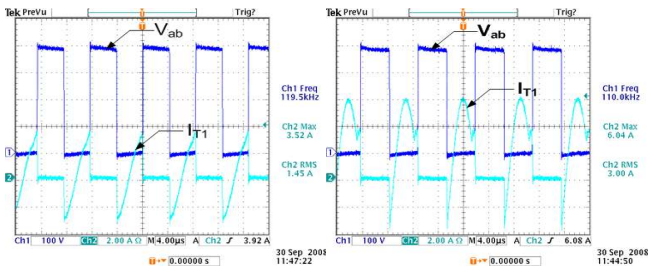


그림 4. Vs 전원부 부하 변화(static load) 시 1차측 단자 전압/전류 파형 (경부하:0.05A→중부하:2A)(CH1:100V/div., CH2:2A/div., 4us/div.)

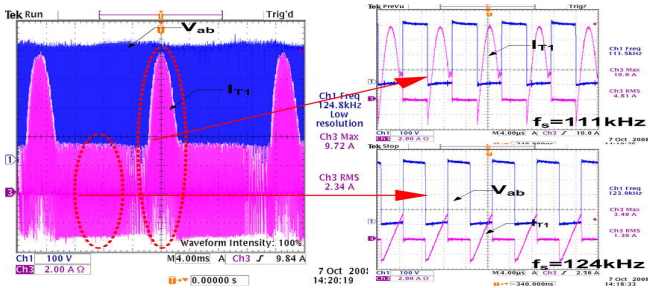


그림 5. Vs 전원부 부하 변화(dynamic load)시 1차측 단자 전압/전류 파형 (경부하:0.05A→중부하:2A)(CH1:100V/div., CH2:2A/div., 4us/div.)

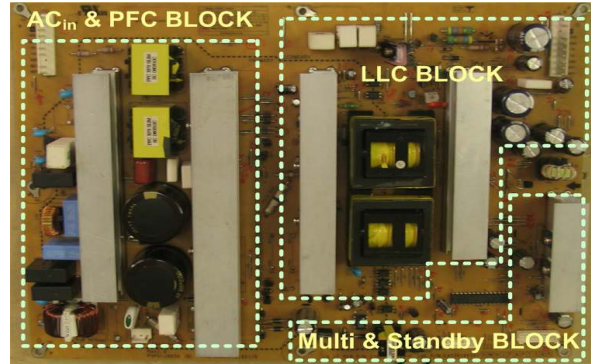


그림 6. 두 대의 LLT 변압기 적용 50HD용 PSU 시제품 사진

3. 결론

본 논문에서는 슬립화에 대응하기 위한 두 대의 LLT 변압기 적용 LLC 직렬공진 컨버터에 대하여 서술하였다. 적용된 두 대의 LLT 변압기는 1, 2차측 결선 관계를 통해 변압기간의 전류 불균형 문제를 최소화 하였고, 50인치 HD TV 전원장치에 적용하여 실험한 결과 가장 약조건에서도 ZVS 스위칭을 하면서 안정된 동작을 확인하였다. 그리고 MathCAD를 이용한 전압이득 특성 분석 결과와 실험 결과가 일치함을 확인하여 수식을 검증하였다. 따라서 두 대의 LLT 변압기로 구성된 LLC 직렬공진 컨버터가 PDP 전원에 적용 가능함을 실험을 통해 검증하였다.

이 논문은 LG 이노텍(주)-전주대 산학협력 연구과제의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

- [1] Lin, B.-R., Chen, J.-J. and Yang, C.-L., "Analysis and Implementation of Dual-Output LLC Resonant Converter," IEEE PESC '01, Vol.1, pp.243-247, 2001. 6.
- [2] Bo Yang, Fred C. Lee, Alpha J.Zhang and Guisong Huang, "LLC Resonant Converter for Front End DC/DC Conversion," IEEE APEC '02 Vol.2, pp. 1108-1112, 2002, 3.
- [3] Robert L. Steigerward, "A Comparison of half-Bridge Resonant Converter Topologies" IEEE Trans, Industrial Electronics, vol. 41, pp.118-124, 1994
- [4] Bor-Ren Lin, Chao-Hsien Tseng, "Analysis of parallel connected asymmetrical soft switching converter" IEEE Trans. Industrial Electronics. vol. 54, pp.1642-1653. 2007.6