

PDP의 유지 전원을 위한 고효율 LLC 직렬 공진컨버터

이현관, 이기식, 강성인, 공영수, 김은수⁺, 임대호*, 허동영*, 장병철*
전주대학교⁺, LG이노텍*

A High Efficiency LLC Series Resonant Converter for PDP Sustaining Power Supply

Hyun-Kwan Lee, Gi-Sik Lee, Young-Su Kong, Eun-Soo Kim⁺
Dae-Ho Lim*, Dong-Young Huh*, Byoung-Chul Jang*
Jeon-Ju University, LG Innotek*

ABSTRACT

The LLC series resonant converter with a LLT (Inductor-Inductor-Transformer) transformer for PDP V sustaining power supply is presented. LLT transformer used to combine the inductor and transformer into one unit has the increased leakage inductance in the primary and secondary due to the winding method and the use of the gaped core. The increased leakage inductance in the primary and secondary of LLT transformer can be impacted on the DC voltage gain characteristics of LLC series resonant converter. In this paper, DC gain characteristics and the experimental results of the LLC series resonant converter with a LLT transformer are verified on the simulation based on the theoretical analysis and the 400W experimental prototype.

1. 서 론

최근 평면 디스플레이의 기술이 발전하면서 디스플레이 장치들이 대형화 되어가고 있는 추세에 있다. 특히 PDP(Plasma Display Panel) 컬러 TV의 경우 이러한 대형화 추세에 맞춰 제품의 크기 및 무게저감 그리고 높은 전력밀도와 효율 특성을 요구하고 있다. 이러한 요구조건을 만족하기 위해 많은 ZVS DC/DC 컨버터들이 연구되어왔고^[1-3], 최근에는 전력밀도 및 효율특성을 더욱 증가시키기 위해 LLC 직렬 공진컨버터가 적용되고 있는 추세이다. 이러한 LLC 직렬 공진컨버터는 인덕터와 변압기를 하나의 변압기로 일체화시킨 변압기를 사용하고 있다. 그러나 이러한 일체화된 변압기를 적용한 LLC 직렬 공진컨버터는 직렬 공진을 이루기 위한 1차측 누설인덕턴스가 작아 외부에 보조 인덕턴스가 필요하거나 1차측의 누설인덕턴스를 이용할 경우 스위칭 주파수가 높아지는 문제점이 발생하게 된다. 이러한 문제점을 개선하기 위해 본 논문에서는 공진에 필요한 누설인덕턴스를 증가시키는 방법으로 1차측 권선과 2차측 권선을 분리하고, 변압기 중간에 공극(Air-Gap)을 삽입한 LLT 변압기를 적용하였다. 그러나 적용된 LLT 변압기의 경우 1차측 누설인덕턴스만이 증가되는 것이 아니고 2차측의 누설인덕턴스 또한 증가되게 된다. 이러한 증가된 2차측 누설인덕턴스는 전압이득 특성곡선에 있어 기존 LLC 직렬 공

진컨버터에 적용한 변압기를 사용한 경우보다 전체적으로 높은 전압이득 특성을 가지게 된다. 이러한 전압이득 특성은 LLT 변압기 적용 LLC 직렬 공진컨버터 설계에 있어 많은 고려사항이 되어야만 된다. 따라서 본 논문에서는 2차측 누설인덕턴스를 고려한 LLT 변압기 적용 LLC 직렬 공진컨버터에 대해 이론적으로 해석하고 시뮬레이션 하였으며, 400W급 시제품을 제작하여 실험한 결과에 대해 서술하였다.

2. LLT 변압기 적용 LLC 직렬 공진컨버터

그림 1은 LLT 변압기의 형상과 1차측 권선과 2차측 권선이 각각 26턴과 22턴에서 공극이 0.22mm일 때의 자속분포를 나타내었다. LLC 직렬 공진컨버터에 필요한 공진요소인 누설인덕턴스를 증가시키고 플리징 효과(Fringing effect)에 따른 1차측 및 2차측 권선의 열적 스트레스를 줄이기 위해서 그림 1에서 볼 수 있는 것처럼 LLT 변압기 1차측 권선과 2차측 권선을 분리하는 권선 방법을 사용하였고, LLT 변압기 중간에 공극(Air-Gap)을 삽입하였다. 그러나 이러한 권선 방법은 1차측의 누설인덕턴스를 증가시키는 것뿐만 아니라 2차측의 누설인덕턴스 또한 증가시키게 된다. 그리고 본 논문에서 적용된 LLT 변압기처럼 2차측 누설인덕턴스가 증가된 경우 회로해석에 있어 무시할 수 없는 요소로 작용하게 된다. 그러나 기존 많은 LLC 직렬 공진컨버터에 관한 논문들은 2차측 누설인덕턴스를 고려하지 않고 1차측 누설인덕턴스와 자화인덕턴스의 비에 대해서 주로 설명되고 있다. 2차측 누설인덕턴스를 고려하지 않은 LLC 직렬 공진컨버터의 경우 규준화된 공진주파수(ω_p)가 1인 부분에서 모든 부하에 대해 전압이득이 1인 반면, 2차측 누설인덕턴스를 고려한 LLT 변압기 적용 LLC 직렬 공진컨버터의 경우는 규준화된 공진주파수(ω_p)가 1인 부분에서 모든 부하에 대해 전압이득이 1보다 크게 나타난다. 이와 같이 2차측 누설인덕턴스를 고려한 경우 전압이득 특성곡선에 있어 2차측 누설인덕턴스를 고려하지 않은 경우보다 전체적으로 높은 전압이득 특성을 가지게 되고 스위칭 주파수 제어범위도 좁아지게 되는 특성을 가지게 된다. 이러한 전압이득 특성은 LLT 변압기 적용 LLC 직렬 공진컨버터를 설계할 때 기존 LLC 직렬 공진컨버터의 설계 절차를 따를 경우 많은 문제점을 야기시킬 수 있기 때문에 충분히 고려되어야 할 사항이 된다. 그림 2(a)는 LLT 변압기 적용 LLC 직렬 공진컨버터에 대한 주 회로이고, 그림 2(b)는 그림 2(a)에 대한 등가회로를 나타낸 것이다. 그림 2(a)에서 C_s ,

L_1 및 L_2 그리고 L_m 은 LLT 변압기 적용 LLC 직렬 공진컨버터의 1차측 직렬커패시터와 누설인덕턴스 및 2차측 누설인덕턴스 그리고 자화인덕턴스를 나타낸 것이다. 그리고 그림 2(b)에서 R_{ac} 는 그림 2(a)의 부하저항, 다이오드 그리고 필터를 등가화한 등가부하 저항($R_{ac}=8R_L/\pi^2$)이고, 회로해석의 용이성을 위해 본 논문에서는 권선비를 1로 하였다.

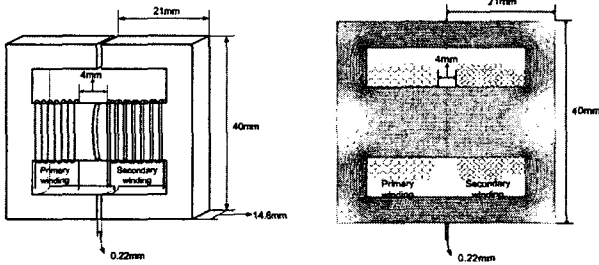


그림 1 LLT 변압기의 형상과 자속분포
Fig. 1 The configuration and flux distribution of LLT transformer

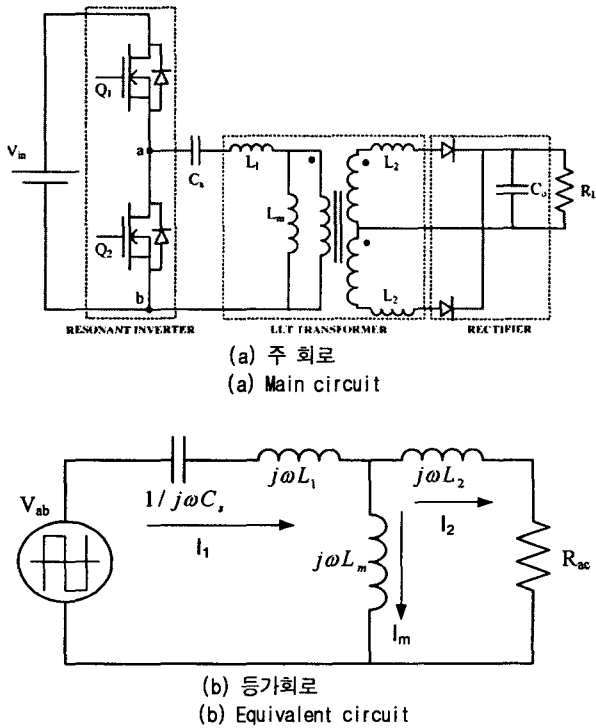


그림 2 LLT 변압기 적용 LLC 직렬 공진컨버터의 주 회로와 등가회로
Fig.2 The main circuit and its equivalent circuit of LLC series resonant converter with a LLT transformer

본 논문에서 적용한 공진주파수는 직렬커패시터와 등가누설인덕턴스(Equivalent leakage inductance)가 공진 할 때의 주파수로 공진주파수는 $\omega_r=1/\sqrt{L_{eq}C_s}$ 이다. 그리고 그림 2(b)의 등가회로부터 각각의 규준화된 값들을 아래 (1),(2),(3),(4)와 같이 정의하였다.

$$\omega_n = \omega / \omega_r \quad (1)$$

$$A = L_1 / L_m \quad (2)$$

$$B = L_2 / L_m \quad (3)$$

$$Q = \omega_r L_{eq} / R_{ac} \quad (4)$$

여기서 ω_n 는 스위칭주파수(ω_s)와 공진주파수(ω_r)의 비로써 규준화된 공진주파수를 나타낸 것이며, A 는 자화인덕턴스(L_m)와 1차측 누설인덕턴스(L_1)의 비율을 나타낸 것이고, B 는 자화인덕턴스(L_m)와 2차측 누설인덕턴스(L_2)의 비율을 나타낸 것이다. 그리고 Q 는 부하 Quality factor를 나타낸 것이다. 그림 2(b)의 등가회로와 식(1),(2),(3),(4)에 의해 얻은 전압이득(M) 특성 식은 (5)과 같다.

$$M = \left| \frac{1}{1 + A - \left(\frac{1}{\omega_n}\right)^2 \left(A + \frac{B}{1+B}\right) + jQ(1+B)\left(\omega_n - \frac{1}{\omega_n}\right)} \right| \quad (5)$$

식 (5)에서 2차측 누설인덕턴스가 매우 작아서 무시 할 수 있다면, $B=0$ 이 되며 식 (6)과 같이 2차측 누설인덕턴스를 고려하지 않은 LLC 직렬 공진컨버터의 전압이득 특성을 얻게 된다.

$$M = \left| \frac{1}{1 + A \left[1 - \left(\frac{1}{\omega_n}\right)^2\right] + jQ\left(\omega_n - \frac{1}{\omega_n}\right)} \right| \quad (6)$$

식(5)과 식(6)을 비교하여 볼 때 $\omega_n=1$ 일 때 2차측 누설인덕턴스를 고려한 식 (5)의 경우는

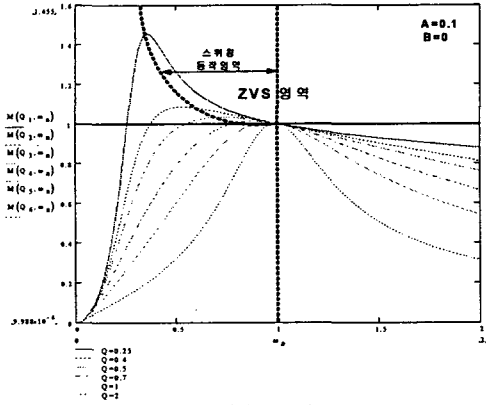
$$M = \left| \frac{1}{1 - \frac{B}{1+B}} \right| = \left| \frac{L_m + L_2}{L_m} \right| \quad (7)$$

이며, 2차측 누설인덕턴스를 고려하지 않은 식(6)의 경우

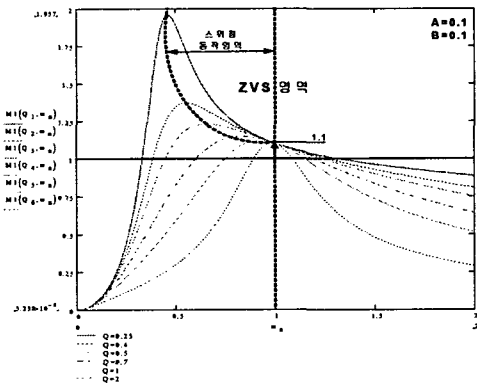
$$M = 1 \quad (8)$$

이 된다. 이와 같이 위의 식(7),(8)을 통해 2차측 누설인덕턴스가 전압이득 특성에 영향을 미치는 것을 쉽게 알 수 있다. 그림 3(a)의 시뮬레이션 결과는 $A=0.1, B=0$ 인 경우 즉 2차측 누설인덕턴스를 고려하지 않고, 규준화된 공진주파수(ω_r)와 Q변화에 대한 LLC 직렬 공진컨버터의 전압이득 특성곡선을 나타낸 것이고, 그림 3(b)의 시뮬레이션 결과는 2차측 누설인덕턴스와 자화인덕턴스 비(A, B)가 각각 0.1일 때, 규준화된 공진주파수와 Q 의 변화에 대한 LLT 변압기 적용 LLC 직렬 공진컨버터의 전압이득(M) 특성곡선을 나타낸 것이다. 그림 3(a),(b)의 규준화된 전압이득 특성곡선에서 볼 수 있는 것처럼 2차측 누설인덕턴스를 증가시킨 LLT 변압기 적용 LLC 직렬 공진컨버터는 기존 LLC 직렬 공진컨버터의 전압이득특성과 비교할 때 규준화된 공진주파수가 1인 부분에서의 전압이득특성이 1보다 크게 나타나고, Q 변화에 대해서도 전체적으로 높은 전압이득 특성이 나타나는 것을 볼 수 있다. 그리고 본 논문에서 적용

한 LLT 변압기 적용 LLC 직렬 공진컨버터의 스위칭 동작영역은 기존 LLC 직렬 공진컨버터의 스위칭 동작과 동일하기 때문에 모든 부하범위에 대해서 LLT 변압기 1차측에 지상 전류가 흘러 주 스위칭 소자는 항상 소프트 스위칭을 하며, LLT 변압기 2차측의 불연속 공진전류에 의해 정류다이오드의 역회복 특성에 따른 스위칭 손실을 개선하여 좋은 효율특성을 얻을 수 있다.



(a) B=0일 때



(b) B=0.1일 때

그림 3 LLT 변압기 적용 LLC 직렬 공진컨버터의 전압이득 특성
Fig.3 Voltage gain characteristics of LLC series resonant converter with a LLT transformer

3. 실험결과

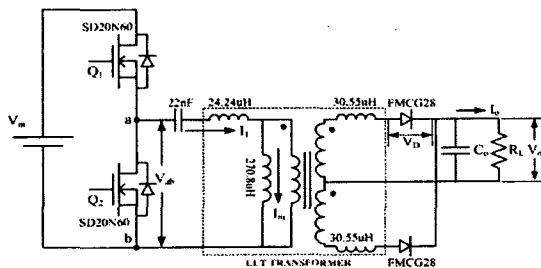


그림 4 LLT 변압기 적용 LLC 직렬 공진컨버터
Fig. 4 LLC series resonant converter with a LLT transformer

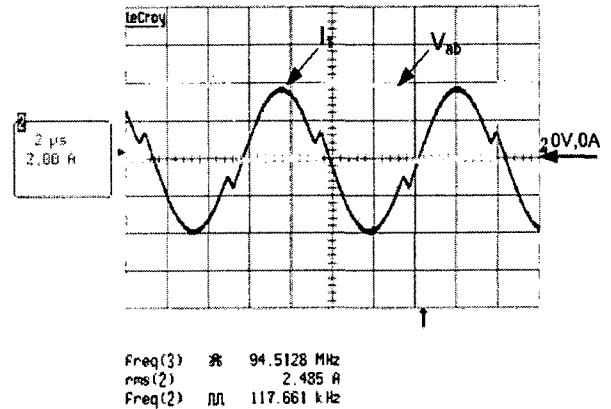
본 논문의 실험은 입력전압 380~400VDC 대한 출력전압 190VDC, 400W에 대하여 실험했다. 그리고 본 논문에 실험 적

용한 그림 4의 LLT 변압기 적용 LLC 직렬 공진컨버터에 대한 실험조건과 적용된 소자정격에 대해 표 1에 나타내었다.

표 1 LLT 변압기 적용 LLC 직렬 공진컨버터 주요정격
Table 1 The specifications of LLC series resonant converter with a LLT transformer

입력전압	380~400VDC
출력전압	190VDC
출력전류	2.1A
출력용량	400W
스위칭 주파수(fs)	115~275kHz
공진 주파수(fs)	150kHz
스위칭 소자	SD20N60, 650V, 20A
출력 정류다이오드	FMCG28, 800V, 3A

그림 5(a)과 그림 5(b)는 일정 출력전압 제어 상태에서 400W, 100W에 대한 실험파형을 나타낸 것이다. 그림 5(a)와 그림 5(b)을 통해 알 수 있는 것처럼 중 부하(400W)에서 경 부하(100W)까지 LLT 변압기 적용 LLC 직렬 공진컨버터의 단자 전류는 항상 지상전류가 흐르는 것을 볼 수 있다. 뿐만 아니라 전 부하 범위에 대해 스위칭 소자는 ZVS(Zero Voltage Switching)동작을 하기 때문에 본 논문에 실험 적용된 컨버터는 높은 효율특성을 얻을 수 있었다. 그림 6은 2차측 정류다이오드와 1차측 단자 전압 및 전류 대한 실험파형을 나타낸 것으로, LLT 변압기 2차측에 흐르는 전류가 크지 않기 때문에 2차측 누설인덕턴스(30.55uH)가 크다 할지라도 2차측 정류다이오드의 전압 스트레스에 많은 영향을 주지 않는 것을 볼 수 있다. 그리고 그림 7은 출력부하 변화에 대한 실험파형이다. 그림 7은 출력부하를 100W → 200W → 400W → 200W → 100W로 변화시키면서 측정된 출력 전류와 전압을 나타낸 것이다. 그림 7에서 볼 수 있는 것처럼 출력부하 변화 대해서도 일정 출력전압을 유지하는 것을 볼 수 있다. 그리고 그림 8은 부하 변화에 대한 효율 특성을 나타낸 것이다. 그림 8에서 볼 수 있는 것처럼 경 부하에서 중 부하에 이르기 까지 96%이상의 높은 효율 특성이 나타나는 것을 볼 수 있다. 또한 그림 9는 400W급 LLT 변압기 적용 LLC직렬 공진컨버터에 대한 시제품 사진이다.



(a) 400W

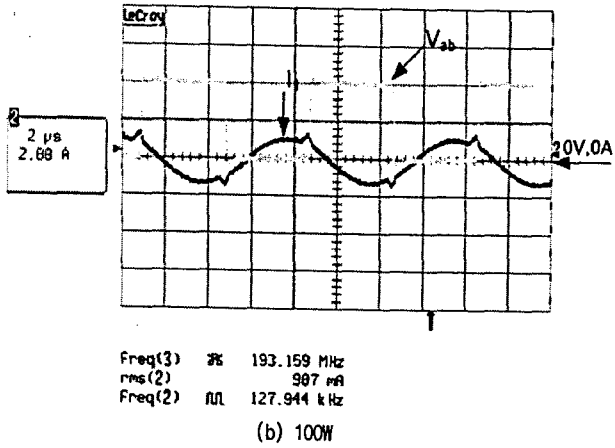


그림 5 LLC 직렬 공진컨버터의 1차측 단자 전압과 전류 실험파형 (200V/div., 2A/div., 2us/div)
Fig.5 The experimental waveforms of the terminal voltage(v_{ab}) and current(i_1) in the primary of the LLC series resonant converter (200V/div., 2A/div., 2us/div)

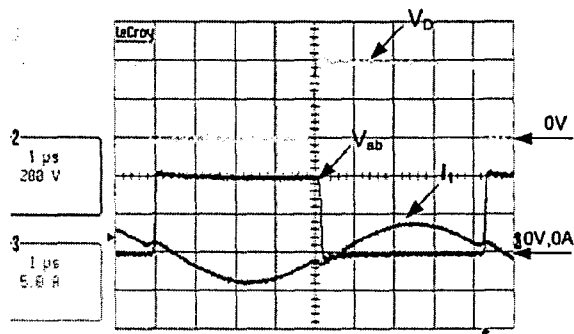


그림 6 LLC 직렬 공진컨버터의 2차측 정류다이오드 전압 및 1차측 전압과 전류 실험파형(200V/div., 5A/div., 1us/div)
Fig.6 The experimental waveforms of the rectifying diode voltage(v_D), the terminal voltage(v_{ab}) and current(i_1) in the primary and secondary of the LLC series resonant converter (200V/div., 5A/div., 1us/div)

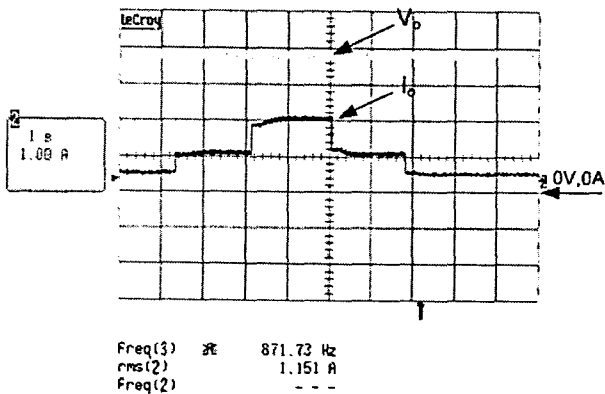


그림 7 부하변화 대한 출력 전압과 전류(50V/div., 1A/div., 1s/div)
Fig.7 The experimental waveforms of the output voltage(v_o) and current(i_o) for load variations (50V/div., 1A/div., 1s/div)

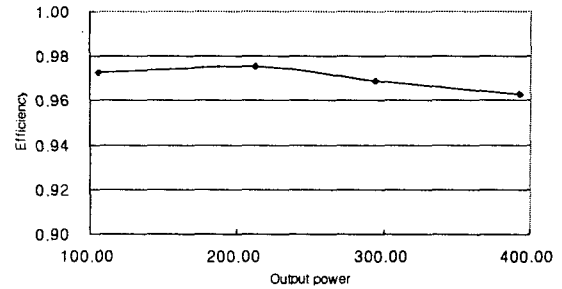


그림 8 효율특성
Fig. 8 Efficiency characteristics

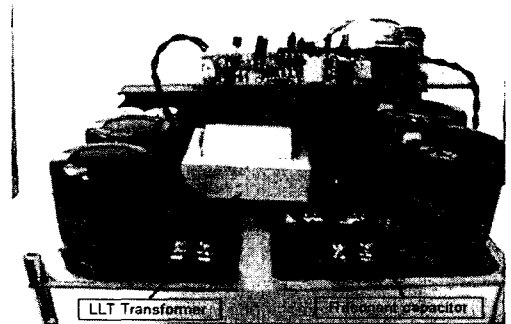


그림 9 400W LLT변압기 적용 LLC 직렬 공진컨버터의 시제품
Fig. 9 Prototype of 400W LLC resonant converter with a LLT transformer

4. 결 론

본 논문에서는 PDP의 유지 전원을 위한 400W급 LLT 변압기 적용 LLC 직렬 공진컨버터를 서술하였고, 전압이득 특성에 대해 이론적으로 해석하였으며, 이 해석을 기본으로 400W급의 시제품을 제작하여 실험한 결과에 대해서 나타내었다. 그리고 제안한 LLC 직렬 공진컨버터의 LLT 변압기처럼 2차측의 누설인덕턴스가 큰 경우 설계과정에 있어 많은 영향을 받는 것을 이론적 해석과 Mathcad 및 Pspice 시뮬레이션 결과를 통해 증명하였으며, LLT 변압기 적용 LLC 직렬 공진컨버터의 실험 결과에 대해 나타내었다. 실험결과 LLT 변압기 적용 LLC 직렬 공진컨버터는 모든 부하 범위에 대해 주 스위칭 소자 및 2차측 정류다이오드가 소프트 스위칭을 이룰 수 있었고, 출력 부하변화에 대해서 일정 출력 전압을 얻을 수 있었으며, 모든 부하범위에 대해 96%이상의 높은 효율을 얻을 수 있었다.

이 논문은 LG이노텍의 "V sustain Block 전원을 위한 공진컨버터" 개발 과제(2006. 1 ~ 2006. 3)의 지원에 의해서 연구 되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] Sang-Kyoo Han, Gun-Woo Moon, Myung-Joong Youn "A High Efficiency ZVS PWM Asymmetrical Half Bridge Converter for Plasma Display Panel Sustaining Power Module," IEEE PESC '04, Vol.1, pp.776-781, 2004. 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.