

조명 제어용 170W급 LLC 공진형 하프브리지 컨버터의 효율 특성

임성진[†], 김성완[†], 김창선[†], 유진호^{*}, 천승환^{*}
 목포대학교 전기공학과, (주)도울정보기술

The efficiency Characteristics of LLC Half-Bridge Resonant Converter for Universal Lighting control system

LIM Seongjin[†], KIM Sungwan[†], KIM Changsun[†], You Jinho^{*}, Cheon Seunghwan^{*}
 Dept. of Electrical Engineering, Mokpo National University[†], DouL Infotech^{*}

ABSTRACT

In this paper, the 170W LLC half bridge DC DC converter is designed for the lighting management system. The power conversion circuit consists of PFC and isolated LLC resonant converter. The topology of LLC half bridge resonant converter provides ZVS characteristic. And the stresses of voltage and current is smaller than that of the general resonant converters. So we can expect the higher efficiency. The optimal conditions for high efficiency were investigated through by experiment.

1. 서론

본 논문에서 설계한 170W급 절연형 DC/DC 컨버터는 조명 감시제어 단말노드 확장이 용이한 Universal 조명 감시 제어 장치용 전원 공급 장치로써 저전압 전원을 공급한다. 이 전력변환에는 PFC 부분과 절연형 컨버터의 2단 스테이지로 구성된다. 또한 절연이 반드시 필요하기 때문에 고주파 변압기를 사용한 절연형 DC/DC 컨버터가 일반적으로 사용된다. 따라서 ZVS 동작이 가능한 LLC 공진형 하프브리지 방식의 컨버터를 선정하였다. 또한 공진형 컨버터는 입력전압에 따라 높은 전압 스트레스를 일으켜 스위치의 손실을 증가 시킨다. LLC 하프 브리지 공진형 컨버터는 영전압 스위칭(ZVS) 동작을 하여 일반적인 공진형 컨버터보다 낮은 전압 스트레스를 받는다. 그래서 더 높은 효율을 기대할 수 있다. 본 논문에서는 컨버터 효율의 특성과 높은 효율성을 위한 조건을 분석하였다.

2. LLC 하프 브리지 공진형 컨버터의 동작 특성

그림 1은 LLC 하프브리지 공진형 컨버터 기본회로를 그림 2는 기본동작 파형을 나타낸다. 1차측 회로는 두 개의 스위치 Q_1 , Q_2 와 공진소자 C_r , L_k , L_m 으로 구성된다. C_r 은 L_k , L_m 과 직렬로 연결되며 부하는 L_m 과 병렬로 연결된다. 스위치 Q_1 , Q_2 는 MOSFET 와 내부 다이오드로 구성되며, 구형파 전압으로 구동된다. 구형파 신호 V_{gs} 는 스위치 Q_1 과 Q_2 의 구동파형으로 V_{gs1} 과 V_{gs2} 로 나타내고, 두 스위치 Q_1 , Q_2 를 교대로 턴 온, 턴 오프 시킨다. 트랜스포머의 2차 측은 중간 탭 정류기 D_1 , D_2 로 구성되었다.

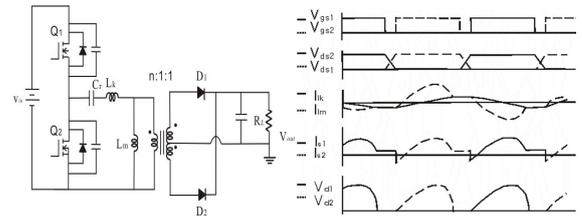


그림 1. LLC 하프 브리지 공진형 컨버터 및 주요 파형
 Fig. 1. LLC Half-bridge resonant converter & key waveform

그 한 주기 동안 D_{b1} (body diode) Q_1 (점선) D_{b2} (body diode) Q_2 (실선)의 순서로 도통된다. 스위치 Q_2 가 턴 오프 되면 V_{DS2} 는 증가하고 V_{DS1} 은 감소한다. V_{DS1} 가 감소되어 0.7V에 도달되면 D_{b1} 이 도통되어 전류는 Q_2 에서 D_{b1} 으로 흐른다. 이 조건에서 스위치 Q_1 이 턴 온 되고 전류는 반대방향으로 흐른다. 높은 입력전압에 비해 내부 다이오드 양단에 걸리는 전압 약 1V는 거의 무시되므로 턴 온 스위칭 손실은 없는 높은 효율을 기대할 수 있는 영 전압상태에서 턴 온 된다고 볼 수 있다. 또한 정류다이오드 전류는 불연속모드로 동작하게 된다.

3. LLC 공진형 컨버터의 ZVS&ZCS 경계조건

그림 1은 LC직렬 하프 브리지 공진형 컨버터의 기본회로를 이용하여 몇가지 파라미터들을 정리하면 아래와 같다.

$$1) \text{ 코너 주파수 } \omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{(L_1+L_2)C}} \quad (1)$$

$$2) \text{ 임피던스 } Z_o = \sqrt{\frac{L}{C}} = \omega_o L = \frac{1}{\omega_o C} \quad (2)$$

$$3) \text{ Loaded quality } Q_L = \frac{Z_o}{R} = \frac{\omega_o L}{R} = \frac{1}{\omega_o CR} = \frac{\sqrt{L}}{R} \quad (3)$$

$$4) \text{ Unloaded quality } Q_o = \frac{Z_o}{r} = \frac{\omega_o L}{r} = \frac{1}{\omega_o C_r} \quad (4)$$

여기서 r은 FET, L, C의 직렬 등가 저항이다.

$$A = \frac{L_1}{L_2}, \quad L = L_1 + L_2 = L_2(1+A) = L_1(1 + \frac{1}{A}) \quad (5)$$

ZVS와 ZCS 경계조건은 ω_r 에 의하여 결정되기 때문에 입력 임피던스를 아래와 같이 전개할 수 있다.

$$Z = j\omega AL_2 + \frac{1}{j\omega C} + \frac{R_i \cdot j\omega L_2}{R_i + j\omega L_2}$$

$$= \frac{\left(AR_i + R_i - \frac{R_i}{-\omega^2 L_2 C} \right) + \left(j\omega AL_2 - j \frac{1}{\omega C} \right)}{\left(1 - j \frac{R_i}{\omega L_2} \right)} \quad (6)$$

$$\frac{Z}{Z_o} = Q_L \sqrt{\frac{(1+A)^2 \left[1 - \left(\frac{\omega_o}{\omega} \right)^2 \right]^2 + \frac{1}{Q_L^2} \left[\frac{\omega}{\omega_o} \frac{A}{1+A} - \frac{\omega_o}{\omega} \right]^2}{1 + \left[Q_L(1+A) \frac{\omega_o}{\omega} \right]^2}} \quad (7)$$

DC입력 전압은 제어칩과 스위치에 의하여 구형파를 생성하고 구형파는 공진회로를 통하여 사인파를 생성한다. 공진부분에서의 전달함수를 M_{Vr} 을 정의하면

$$M_{Vr} = \frac{1}{\sqrt{(1+A)^2 \left[1 - \left(\frac{\omega_o}{\omega} \right)^2 \right]^2 + \frac{1}{Q_L^2} \left(\frac{\omega}{\omega_o} \frac{A}{1+A} - \frac{\omega_o}{\omega} \right)^2}} \quad (8)$$

L_1 과 C 가 공진할 때 $xL_1 + xC = 0$ 이고 M_{Vr} 값은 1이다. V_{dc} 에서 V_{ac} 까지의 전체 전달함수를 $[M_{VI}]$ 라고 정의하면

$$M_{VI} = \frac{\sqrt{2}}{\pi \sqrt{(1+A)^2 \left[1 - \left(\frac{\omega_o}{\omega_{rs}} \right)^2 \right]^2 + \left[\frac{1}{Q_L} \left(\frac{\omega}{\omega_o} \frac{A}{A+1} - \frac{\omega_o}{\omega} \right) \right]^2}} \quad (9)$$

컨버터의 효율을 식(10)과 같이 표현할 수 있다.

$$\eta_I = \frac{P_{Rb}}{P_{Rb} + P_r} = \frac{1}{1 + \frac{P_r}{P_{Rb}}} \quad (10)$$

$$\eta_I = \frac{1}{1 + \frac{r}{R_i} \left\{ 1 + \left[Q_L \left(\frac{\omega_o}{\omega} \right) (1+A) \right]^2 \right\}} \quad (11)$$

$$\eta_I = \frac{1}{1 + \frac{r}{Q_L Z_o} \left[1 + \frac{Q_L}{K} (1+A) \right]^2}$$

$$= \frac{1}{1 + \frac{r}{Q_L Z_o} \left[1 + \left(\frac{Q_L}{K} \right)^2 (1+A)^2 + \frac{2Q_L}{K} (1+A) \right]}$$

$$= \frac{1}{1 + \frac{r}{Z_o} \left[\frac{1}{Q_L} + \frac{Q_L}{K^2} (1+A)^2 + \frac{2}{K} (1+A) \right]}$$

위 식으로부터 아래와 같은 최대 효율의 조건을 알 수 있다.

$$Q_L = \frac{K}{1+A} = \frac{\omega}{\omega_o} \quad (12)$$

M_{Vr} 은 출력전압의 변화율로서 A값이 작을수록 M_{Vr} 은 주파수 ω 의 영향을 적게 받으며 Q_L 값이 클수록 M_{Vr} 이 커진다는 것을 알 수 있다. M_{Vr} 값이 1좌우가 되도록 파라미터들을 선정하였다.

4. 실험 및 고찰

위 식(10)~(12)를 바탕으로 효율 조건을 선정하였고, 그 결과

값은 표 1에 나타내었다. 그림 (a)는 V_{gs} 및 I_{LK} 파형, 그림 (b)는 공진커패시터 파형, 그림 (c)는 Low side V_{gs} 및 Low side 정류다이오드 전류파형을 나타낸다. 그림 (a)로부터 주파수는 약 80KHz임을 알 수 있고 그림 (b)로부터 최대값은 약 340V까지 달함을 알 수 있다. 즉 공진커패시터를 선정함에 있어서 주파수특성 및 전압 값에 유의하여야 한다. 그림 (c)는 Low side정류다이오드의 전류파형을 표시한 것이다. Low side FET가 턴 온 되었을 때, Low side다이오드 역시 도통된다. 그림 3은 실험으로부터 얻은 효율 특성과 효율 그래프를 나타낸다.

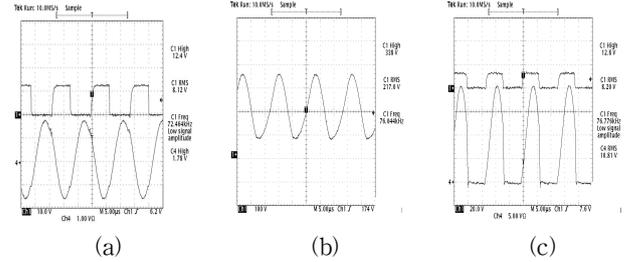


그림 2. LLC 하프 브리지 공진형 컨버터의 실험 파형
Fig. 2. experiment waveform of LLC Half-bridge resonant converter

V_{in}	I_{in}	V_{out}	I_{out}	효율
220	0.24	24.19	0.7	64.44
220	0.32	24.19	1	69.75
220	0.56	24.19	2	78.68
220	0.77	24.18	3	85.82
220	1.1	24.17	4	83.36
220	1.31	24.17	5	84.46
220	1.56	24.16	6	84.81
220	1.8	24.15	7	85.9

그림 3. 효율 특성 및 효율 그래프
Fig. 3. Efficiency characteristic & Efficiency graph

5. 결론

컨버터에 있어서 입력전압이 높으면 높은 전압스트레스로 인해 스위치의 손실이 증가하게 된다. 또한 넓은 입력전압 범위의 입력전압을 가질 때 컨버터의 시비율의 변화범위도 커지면서 전압 스트레스 문제, 변압기 포화 등 여러 문제가 야기된다. 따라서 본 논문에서는 각종 분석을 통해 A값, Q값, 및 L_r , C_r 을 적절하게 선정함으로써 LLC 컨버터가 정확한 ZVS 영역에서 동작을 할 수 있도록 프로토타입의 컨버터를 설계 및 제작하여 실험을 하였으며 조명 제어용 LLC 하프브리지 공진형 컨버터 회로의 타당성을 입증하였다.

참고 문헌

- [1] Guichao Hua, F.C.Lee, "Soft Switching Techniques in PWM Converters," IEEE IECON, pp.637-643, 1993.
- [2] 이재득, 이달우, 안태영, "120W급 Half Bridge 공진형 DC DC 컨버터에 관한 연구", 전력전자학회 2004년도 전력전자학술대회 논문집(II) pp. 747~751, 2004.7