

트랜스포머 Cantilever 모델을 이용한 LLC 공진형 컨버터 설계

김민중, 유승희, 김동희, 이병국*
성균관대학교 정보통신대학

Design of LLC Resonant Converters using Transformer Cantilever Model

Min Jung Kim, Seung Hee Ryu, Dong Hee Kim, and Byoung Kuk Lee*
College of Information & Communication Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문에서는 LLC 공진형 컨버터의 트랜스포머를 Cantilever 모델로 증가화하여 공진 네트워크를 설계하기 위한 과정을 제시한다. 트랜스포머의 결합계수를 고려하여 누설 인덕턴스와 자화인덕턴스의 크기를 계산한다. 그 결과로 얻어진 파라미터를 이용하여 기본파 분석 (First Harmonic Approximation, FHA)을 통해 LLC 공진형 컨버터의 전압 이득관계를 분석한다. 제시한 설계방법을 적용하여 500W급 LLC 공진형 컨버터를 제작 구현함으로써 설계과정의 타당성을 검증한다.

1. 서 론

최근에 LLC 공진형 컨버터는 구조가 간단하며, 높은 전력밀도와 고효율 특성을 만족 시킬 수 있기 때문에 디스플레이와 전기자동차 충전기 등에서 많이 사용되고 있다. 그림 1은 하프 브리지구조를 가지는 LLC 공진형 컨버터를 나타낸다. LLC 공진형 컨버터는 공진탱크 파라미터 값 (L_r , L_m , C_r)과 스위칭 주파수, 부하 조건에 따라 전압 전달비가 바뀌기 때문에 넓은 입출력 전압 조건에 대응하기 위해서는 트랜스포머의 자화인덕턴스 (L_m), 누설인덕턴스 (L_r)를 적절한 값을 가지도록 설계할 필요가 있다.

본 논문에서는 트랜스포머의 L_m 과 L_r 를 유추하기 위해 트랜스포머 증가회로인 Cantilever 모델을 적용하여 하프브리지 및 센터 탭 구조를 가지는 LLC 공진형 컨버터를 설계하는 방법을 제시한다. 제시한 방법을 적용하여 넓은 입출력 전압범위를 가지는 500W급 LLC 공진형 컨버터를 제작하여 본 논문에서 제시한 설계 방법의 타당성을 검증한다.

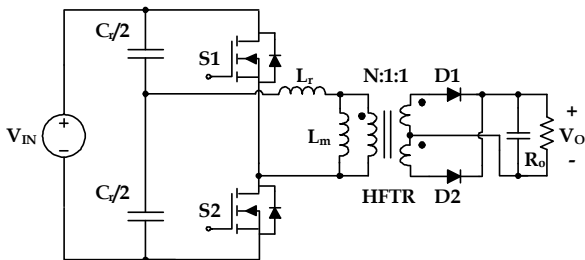


그림 1. LLC 공진형 컨버터 회로.
Fig. 1. LLC resonant converter circuit.

2. LLC 공진형 컨버터의 해석 및 설계

LLC 공진형 컨버터를 트랜스포머의 턴 비를 고려한 기본파 분석을 통해 증가회로로 나타내면 그림 2와 같이 표현할 수 있다.

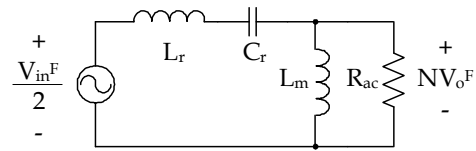


그림 2. LLC 공진형 컨버터 증가회로.
Fig. 2. Equivalent circuit of LLC resonant converter.

R_{ac} 는 2차측 저항 R_o 를 1차측으로 환원한 등가저항으로 식 (1)로 표현되며, 입출력 전압 전달비 (M)는 식 (2)로 나타낼 수 있다. 공진주파수 (f_o)로 정규화된 스위칭 주파수 (f_n), 자화인덕턴스와 누설인덕턴스 비 (L_n)와 Q factor (Q)는 각각 식 (3), (4), (5)로 나타낼 수 있다^[1].

$$R_{ac} = \frac{8R_o}{\pi^2 N^2} \quad (1)$$

$$M = \left| \frac{L_n \times f_n^2}{[(L_n + 1) \times f_n^2 - 1] + j[(f_n^2 - 1) \times f_n \times Q \times L_n]} \right| \quad (2)$$

$$f_n = \frac{f_{sw}}{f_o} = 2\pi f_{sw} \sqrt{L_r C_r} \quad (3)$$

$$L_n = L_m / L_r \quad (4)$$

$$Q = \frac{\sqrt{L_r / C_r}}{R_{ac}} \quad (5)$$

LLC 공진형 컨버터의 트랜스포머는 입출력 조건에 따라 L_m , L_r 값을 계산하여 설계한다. 설계자가 설계한 트랜스포머에서 측정할 수 있는 인덕턴스 값은 아래와 같다.

- L_{1o} : 2차 측 양 단 측정 값 (1차 측 개방)
- L_{2o} : 1차 측 양 단 측정 값 (2차 측 개방)
- L_{1s} : 2차 측 양 단 측정 값 (1차 측 단락)
- L_{2s} : 1차 측 양 단 측정 값 (2차 측 단락)

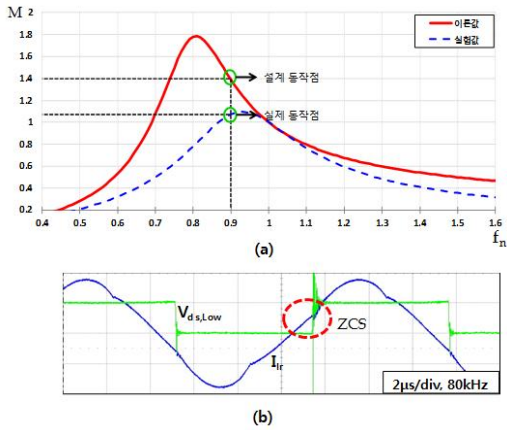


그림 3. LLC 공진형 컨버터 설계 문제점.
Fig. 3. Design problem of LLC resonant converter design.

기준에는 $L_m=L_{2o}$, L_{2s} , $L_r=L_{2s}$ 를 통해 트랜스포머의 L_m 과 L_r 의 값을 유추하였다. 2차측 고전류 응용분야의 트랜스포머 2차측과 같이 권선을 부스바로 제작을 하게 되면, 1차측과 2차측의 권선이 분리되기 때문에 상대적으로 낮은 결합계수를 갖게 되며 실제 L_m 과 L_r 과 오차가 발생하게된다. 그림 3(a)는 설계 동작점과 실제 동작점의 차이를 나타낸다. (b)는 입력전압이 50V일 때의 동작파형을 나타내며, 입력전압이 커지면 다이오드 역회복전류에 의해 스위치가 소손되는 문제가 발생한다. 트랜스포머 특성값 계산의 오차를 줄이기 위해 LLC 공진형 컨버터 트랜스포머에 Cantilever 등가 모델을 적용하여 트랜스포머의 결합계수 (k), 실제 L_m 과 L_r , 유효 턴수비 (N_e)를 계산할 수 있으며, 이는 식 (6)~(8)로 나타낼 수 있다^[2]

$$k = \sqrt{1 - \frac{L_{2s}}{L_{2o}}} \quad (6)$$

$$L_r = L_{2o}(1 - k^2), \quad L_m = L_{2o} - L_r \quad (7)$$

$$N_e = k\sqrt{\frac{L_{2o}}{L_{1o}}} \quad (8)$$

식 (6)~(8)을 식 (1)~(5)에 적용하면 트랜스포머 결합계수를 고려한 입출력 전압 전달식을 계산하여 LLC 공진형 컨버터의 파라미터 값을 계산할 수 있다. 결합계수 및 트랜스포머 인덕턴스 측정값은 트랜스포머에 감는 권선 수, 권선방법, 공극의 길이의 함수이다.

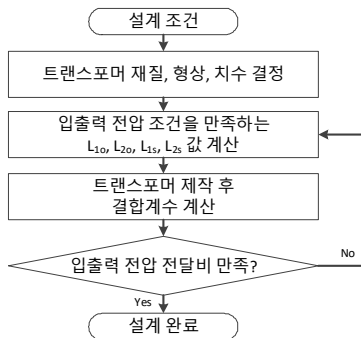


그림 4. LLC 컨버터 트랜스포머 설계 순서도.
Fig. 4. Design flow chart of LLC converter transformer.

표 1 LLC 공진형 컨버터 특성값
Table 1 Parameters of LLC resonant converter

Parameter	Value	Parameter	Value
V_{in}	220-430 [V]	V_o	8-15.5 [V]
N_1	19 [턴]	N_2	1 [턴]
L_{1o}	578 [nH]	N_e	10.24
L_{1s}	336 [nH]	k	0.68
L_{2o}	107.3 [μ H]	L_r	73.05 [μ H]
L_{2s}	24.5 [μ H]	L_m	66.39 [μ H]

그림 4는 트랜스포머의 결합계수를 고려한 LLC 공진형 컨버터 트랜스포머 설계 순서를 나타내며, 트랜스포머의 측정값을 토대로 LLC 공진형 컨버터의 운전영역을 예측할 수 있다. 표 1은 트랜스포머 2차측이 부스바로 제작된 500W LLC 공진형 컨버터의 특성값이다. 그림 5(a)는 $Q=1$ 일 때 LLC 공진형 컨버터의 전압이득 곡선의 이론값과 6개의 동작점에서 측정된 값을 토대로 예측한 곡선을 나타내며, (b)는 동작파형을 나타낸다. 실제 설계값과 설계한 값이 약 5%의 오차의 차이를 가지며 일치하는 것을 확인할 수 있다.

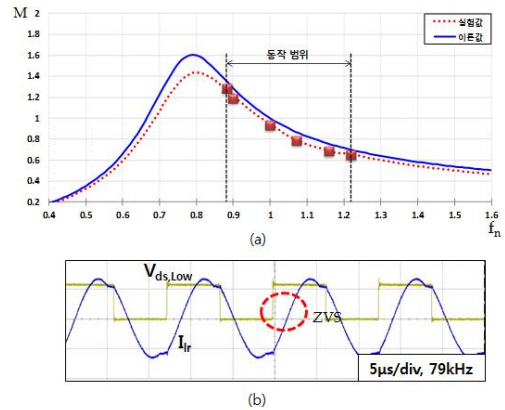


그림 5. LLC 공진형 컨버터 전압이득 곡선 (@ Q=1.1).
Fig. 5. Voltage gain curves of LLC resonant converter (@ Q=1.1).

3. 결론

본 논문에서는 LLC 공진형 컨버터의 트랜스포머를 Cantilever 모델로 등가화하여 설계하는 방법을 제시하였다. 제한한 방법을 토대로 500W LLC 공진형 컨버터를 설계하였고, 실험값과 설계한 전압이득을 비교함으로써 제한한 설계방법의 타당성을 증명하였다.

본 논문은 (주)LG전자의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

[1] H. Huang, "Designing an LLC resonant half bridge power converter," Texas Instruments 2010-2011 Power Supply Design Seminar, SEM1900, 2011.
[2] Bryce Hesterman, "Analysis and Modeling of Magnetic Coupling," Denver Chapter, IEEE Power Electronics Society, 2007, pp.15~19