

능동 클램프 포워드 컨버터 변압기 주요 매개변수 설계 및 검증

김지수, 김철민, 김종수[†]
 대전대학교 전기공학과

Design and Verification of Key Parameters for an Active Clamp Forward Converter Transformer

Ji-Su Kim, Chul-Min Kim, Jong-Soo Kim[†]
 Department of Electrical Engineering, Daejin University

ABSTRACT

본 논문에서는 Maxwell 시뮬레이션을 활용하여 설계된 변압기의 주요 매개변수 설계 및 검증을 진행한다. 설계된 컨버터의 파라미터를 바탕으로 WaAc값을 도출하여 소프트 스위칭 조건과 연관된 변압기를 설계 및 제작하고 Maxwell 시뮬레이션을 통해 도출된 값을 비교하여 최적 설계에 대해 검증한다.

1. 서론

최근 국내를 포함하여 전 세계적으로 탄소 중립을 실현하기 위해 화석연료 사용량은 줄이고 전기차와 같은 친환경 차량의 보급률이 증가하고 있으며 전기차의 한정적인 공간에 고효율의 전력변환장치들을 적용시키기 위한 연구 및 개발이 지속적으로 증가하고 있다. 전기차 전력변환장치 중 LDC(Low Voltage DC-DC Converter)는 400-800[V]의 높은 입력전압을 전기차 전장부품의 정격전압인 12[V]로 변환해주는 장치로 입출력 전압전달비가 높고 출력 대전류 특성을 가지고 있다. LDC의 효율 상승을 위해 소프트 스위칭이 가능한 토폴로지 적용이 필수적이고 전력밀도 측면에서 유리한 Planar 변압기가 적용된 LDC가 개발되는 추세이다.

따라서 넓은 입력전압 범위에서 높은 효율을 만족시키는 LDC를 설계하기 위해 소프트 스위칭을 위한 주요 매개변수인 자화 인덕턴스와 누설 인덕턴스의 최적 설계가 요구되므로 정확한 Planar 변압기의 설계가 이루어져야 한다. 본 논문에서는 ACF(Active Clamp Forward) 컨버터를 적용한 LDC 시스템의 변압기 설계를 위해 주요 파라미터를 도출하고 WaAc값을 계산하여 Planar 변압기 최적 설계를 진행한다. 설계된 변압기에 대한 검증은 Maxwell 시뮬레이션을 통해 확인된 매개변수와 설계된 매개변수를 비교 검증한다.

2. 시스템 사양 및 Planar 변압기 설계

2.1 Active Clamp Forward 설계

ACF는 자화 인덕턴스, 누설 인덕턴스와 1차측 2개의 스위치 기생 커패시턴스와 공진으로 영전압 스위칭을 한다. 안정적인 영전압 스위칭 조건들에는 변압기 인덕턴스 성분이 포함되어 있으므로 컨버터 설계에서 주요 매개변수가 된다.

영전압 스위칭 조건들은 자화 전류와 누설 인덕턴스에 저장

표 1 시스템 사양

Table 1 System parameters

Parameter	Value	Parameter	Value
V_{in}	250-420V	C_{oss}	115pF
V_{out}	17V	L_m	122uH
I_{out}	41.67A	L_k	10uH
P_{out}	500W	C_c	2.2uF
F_{sw}	200kHz	L_o	11.6uH
N_1/N_2	9	C_o	11uF

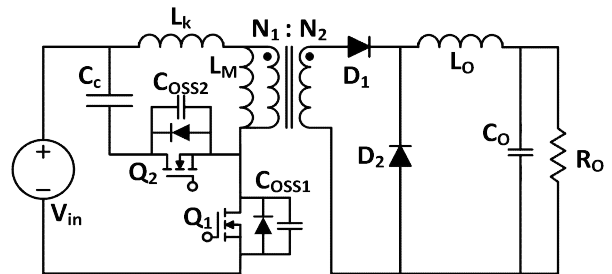


그림 1 능동 클램프 포워드 컨버터 회로도

Fig. 1 Active Clamp Forward Converter Circuit

되는 에너지로 표현할 수 있다. i_m 은 자화 전류, I_{out} 은 출력전류, n 은 턴비, L_k 는 누설 인덕턴스, C_{oss} 는 스위치 기생 커패시턴스, V_{DS} 는 스위치 드레인-소스 전압이며 첫 번째 조건은 식(1)과 같이 자화 전류가 2차 측에서 유도되는 출력 전류보다 커야하며 두 번째 조건으로 식(2)와 같이 누설 에너지가 2개의 스위치 기생 커패시턴스 에너지보다 커야 영전압 스위칭을 달성하게 되며, 따라서 변압기 설계가 매우 중요하다.

$$i_m > \frac{I_{out}}{n} \tag{1}$$

$$\frac{1}{2} L_k i_m^2 > \frac{4}{3} C_{oss} V_{DS}^2 \tag{2}$$

2.2 Planar 변압기 설계

WaAc는 코어의 전력 처리 용량으로 창면적과 단면적을 곱하여 표현할 수 있으며 WaAc값 도출을 위해 식(3)에 D_{cma} 값은 전류밀도를 의미하며 750[cir.mils/A]로 적용하고 f 는 동작 주파수로 200[kHz], K_f 는 토폴로지 상수로 0.0005 그리고 최대 자속밀도 B_{max} 는 일반적으로 적용하는 3000[Gauss]로 설계를

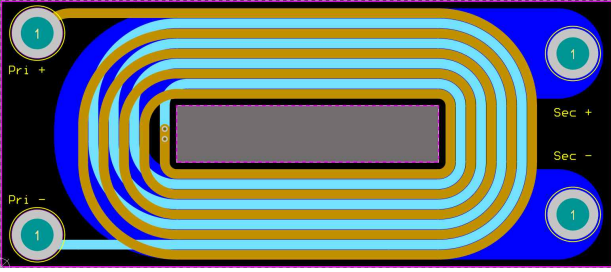


그림 2 PCB 단면 회로도
Fig. 2 PCB Cross-sectional Ciucuit Diagram

진행하였다. 도출된 WaAc값으로 PCB 패턴 및 코어의 방열, 전력밀도, 코어 수급을 고려하여 PEE 6418로 선정하였고 IEC 60950에서 1, 2차 권선간의 절연을 위해 FR-4 소재를 사용하는 경우 요구되는 수직 이격거리는 400[um]이다.^[1] 따라서 1차측 변압기 최대 전압은 670[V]이기 때문에 수직거리 0.32[mm]로 설계하였다. 허용 전류의 경우 IPC-2221A를 적용하여 1차측 전류 4.67[A], 2차측 전류 41.67[A]로 두께는 3[oz], 너비는 각각 2[mm], 18[mm]로 설계하고 턴 수의 경우 Winding Area가 21.7[mm]로 2차측 1턴으로 적용하였다. Planar 변압기에서 권선의 역할을 하는 PCB 패턴은 일반적인 평판형 커패시터와 구조가 동일하기 때문에 LDC의 경우 출력 대전류 특징으로 2차측 패턴이 1차측 패턴의 대부분과 겹쳐지게 되면서 패턴과 패턴 사이에서 발생하는 기생 커패시턴스가 발생하게 된다.^[2] 패턴의 경우 그림 2에서 볼 수 있듯이 2차측 패턴은 1차측과 다르게 PCB의 1층과 4층을 활용하여 대전류 특성에 적합하도록 하였고 Maxwell 시뮬레이션을 진행함에 있어서 실제 제작품과 비교 검증을 위해 제작한 PCB 보드를 기반으로 3D 모델링을 최대한 유사하게 진행했다.

$$W_a A_c = \frac{P_{out} D_{ema}}{K_t B_{max} f} \quad (3)$$

2.3 시뮬레이션 결과

코어의 AL Value를 반영하여 설계된 자화 인덕턴스를 적용하면 턴 수가 도출되지만 2차측 전류 용량에 의해 턴 수가 1턴으로 고정되어 턴 수 조절이 불가능하며 누설 인덕턴스의 값을 조절하기 어렵다. 자화 인덕턴스의 경우에는 턴 수가 9턴으로 고정되어 있지만 공극을 이용하여 설계값에 만족이 가능하였다. 따라서 제작한 PCB 패턴을 시뮬레이션 상에 그대로 반영하고 코어의 공극만 조절하여 Maxwell 시뮬레이션을 진행한 결과 코어의 결합계수는 0.98962로 도출되었고 자화 인덕턴스 L_m 는 턴 비와 상호 인덕턴스 M 의 곱이며 식(4)로 환산이 가능하고 누설 인덕턴스는 식(5)으로 코어의 결합계수 k 와 1차측 자기 인덕턴스 L_1 와의 관계식으로 표현이 가능하다. 식(4), (5)을 활용하여 도출한 시뮬레이션 결과와 제작품의 오차는 누설 인덕턴스 7.84%, 자화 인덕턴스 1.62% 정도로 오차가 발생했다.

$$L_m = nM \quad (4)$$

$$L_k = (1 - k^2)L_1 \quad (5)$$

$$L_m = \frac{N_2}{N_1} \sqrt{(LO1 - LS1) \times LO2} \quad (6)$$

$$L_k = LO1 - L_m \quad (7)$$

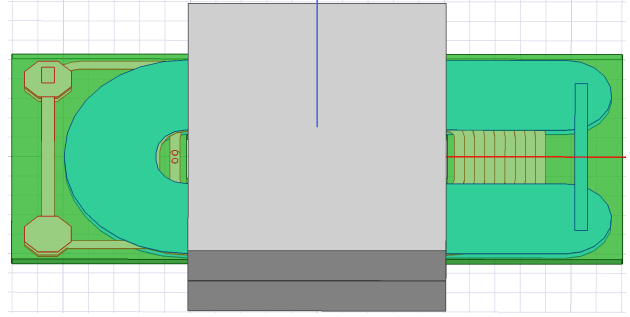


그림 3 시뮬레이션 3D 모델
Fig. 3 Simulation 3D Model

표 2 시뮬레이션 결과값 비교
Table 2 Comparison of Simulation Results

Simulation		Product	
Lm	121.752[uH]	Lm	125.77[uH]
Lk	2.68[uH]	Lk	2.29[uH]
Air gap	0.22[mm]	Air gap	0.22[mm]

3. 비교 검증

제작한 변압기 인덕턴스 성분을 측정할 때 LCR 미터를 이용하여 1차측 인덕턴스 성분들을 $LO1$ 과 $LS1$, 2차측 인덕턴스 성분들 $LO2$, $LS2$ 측정하였으며 식(6)을 통하여 자화 인덕턴스값으로 환산이 가능하고 식(7)로 환산된 자화 인덕턴스값을 활용하여 누설 인덕턴스 값을 도출하였다. Maxwell 시뮬레이션 상에서 변압기 코어 공극을 0.22[mm]을 적용하여 도출된 변압기 매개변수와 이론을 바탕으로 설계된 변압기의 매개변수가 유사하게 나타나는 것을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 소프트 스위칭 달성을 위해 정확한 변압기 주요 매개변수 설계를 진행했다. Planar 변압기의 누설 인덕턴스 증가 또는 감소를 위해서는 PCB 패턴의 형태와 관련이 있음을 확인하였으며 변압기 설계는 Maxwell 시뮬레이션을 통하여 유사한 결과를 도출하였고 제작한 변압기가 최적 설계임을 검증하였다. 추후 연구를 통해 Planar 변압기의 패턴의 형태에 따른 누설 인덕턴스의 변화에 대한 연구를 지속하고자 한다.

이 연구는 2023년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관 리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(K_G012002434801)

참고 문헌

- [1] 김선기, 이홍학, and 이성욱, "350W급 Active Clamp Forward Converter에 적용된 Planar Transformer 설계에 관한 연구," in 대한전자공학회 학술대회, 2022, pp. 1761-1764
- [2] 안상준. "전기자동차용 탑재형 충전기의 고전력밀도 달성을 위한 수동소자 최적 설계." 국내박사학위논문 성균관대학교 일반대학원, 2022. 서울