

플라나 변압기를 적용한 다중 출력 DC-DC 컨버터 설계

이기철, 김권훈, 박서진, 조영훈[†]
 건국대학교 전력전자연구소

Design of Multi-Output DC-DC Converter with Planar Transformer

Ki Cheol Lee, Kwonhoon Kim, Seojin Park, Younghoon Cho[†]
 Power Electronics Lab. Konkuk Univ.

ABSTRACT

본 논문은 고 전력밀도 달성을 위해 Planar core를 사용한 변압기를 적용한 DC-DC 컨버터의 설계를 제안하고, 제안하는 플라나 변압기의 설계 방법을 제안하며, 설계한 DC-DC 컨버터의 성능을 PSIM 시뮬레이션 및 실험을 통해 검증한다.

1. 서 론

최근 충전기 등의 중소용량의 DC-DC 컨버터가 사용되는 응용 분야에서 효율 및 전력밀도 향상을 위한 연구가 활발히 진행 중이다. 전력밀도 및 효율의 개선을 위한 방법으로 SiC 및 GaN과 같은 WBG(Wide Band Gap) 반도체 소자를 통한 고속 스위칭 연구가 진행되었다. 하지만 수동소자의 개선이 더 이상 어려운 상태가 되어 추가적인 전력밀도의 향상을 위하여 일반권선 고주파 변압기 대신 플라나 변압기를 적용하는 연구가 수행중이다.

다양한 형태의 플라나 변압기 중에서도 인쇄회로기판(PCB)으로 만들어진 플라나 변압기는 권선을 사용하는 일반 보빈형 권선 변압기에 비하여 더 높은 정밀도와 매개변수의 정확도로 변압기를 제조할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 25W급 인쇄회로기판 유형의 플라나 변압기의 설계 방법에 대하여 제안하고 이를 적용한 단순성과 효율성이 좋은 Active Clamp Flyback(ACF) 컨버터를 설계한다. 중소용량의 플라나 변압기를 대상으로 전력밀도, 효율, 발열을 고려한 설계 내용에 대하여 타당성을 검증하기 위하여 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

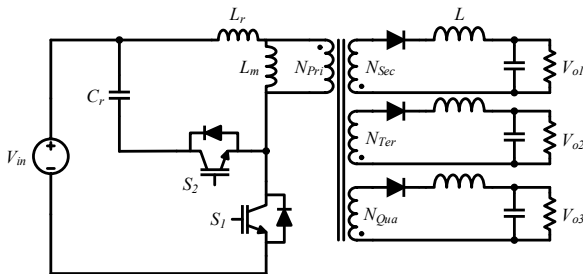


그림 1 다중 출력 ACF 컨버터
 Fig. 1 Multi-Output ACF Converter

2. Active Clamp Flyback 컨버터 설계

2.1 플라나 변압기 설계

플라나 변압기의 설계 절차는 일반 권선 변압기의 설계 절차와 유사한 형태로 진행된다. 전력변환 시스템의 전압 전달비에 따라서 권선비가 결정되고 적용되는 토폴로지에 따라 자화 인덕턴스 및 누설 인덕턴스가 설계된다. Active Clamp Flyback 컨버터의 경우 공진 회로에 의한 공진 전류의 극성 전환으로 인하여 변압기에 0 전압이 걸리는 구간이 추가적으로 발생한다 이를 듀티 손실 D_{loss} 로 표현한다. D_{loss} 의 경우 출력 전압에 직접적인 영향을 주기 때문에 변압기 턴 비 선정 시 반드시 고려해야 한다, 또한 2차 측 다이오드의 순방향 전압 V_F 의 영향도 같이 고려되어야 하며 이 때 출력전압은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_o = V_{in} \frac{N_s}{N_p} D_{eff} = V_{in} \frac{N_s}{N_p} (D - D_{loss}) - V_F \quad (1)$$

D_{loss} 는 듀티 손실, N_p 는 송신측 턴 수, N_s 는 수신측 턴 수, V_o 는 출력전압을 나타낸다. D_{loss} 는 누설 인덕턴스 L_{lk} , 입력전압 V_{in} , 출력전류 I_o 및 스위칭 주파수 f_{sw} 의 관계에 따라 다음 수식으로 나타낼 수 있다.

$$D_{loss} = 2I_o \frac{N_s}{N_p} \frac{L_{lk}}{V_{in}} f_{sw} \quad (2)$$

누설 인덕터 L_{lk} 의 경우 스위치 기생 커패시턴스 C_{sw} 와 공진을 고려하여 수식 (3)에 따라 누설 에너지 E_{lk} 와 스위치 기생 커패시터의 저장에너지 $E_{C,sw}$ 안정적인 ZVS 동작이 가능하도록 설계하여야 한다.

$$E_{lk} > E_{C,sw} \quad (3)$$

턴 비가 정해지면 변압기의 코어 및 권선에 대한 설계가 필요하다. 설계된 턴 비를 바탕으로 초기 턴 수를 설정하고 정격 동작조건에서 변압기의 최대 자속 밀도 B_{max} 를 다음과 같이 수식 (4)를 이용하여 계산한다.

$$B_{max} = \frac{V_{in} D_{eff}}{4N_p A_c f_{sw}} \quad (4)$$

선정된 코어의 자속밀도에 따른 동손 데이터를 활용하여 동작 주파수에서 발생하는 동손을 수식 (5)를 활용하여 계산하고

코어의 턴 당 평균 길이 MLT(Mean Lenth per Turn Length), 송신측 전류 I_{prms} , 수신측 전류 I_{srms} , 권선의 단면적 A 및 도선률 ρ 를 고려하여 수식 (6)과 같이 동손 P_W 을 구할 수 있으며, 기타 손실 P_{etc} 까지 고려하여 변압기 전체 손실 P_T 를 수식 (7)과 같이 나타낼 수 있다. 해당 내용을 바탕으로 선정된 코어의 크기와 발열의 관계에 따라서 최종 턴 수가 선정된다.

$$P_c = P_{cv} \times V_e \quad (5)$$

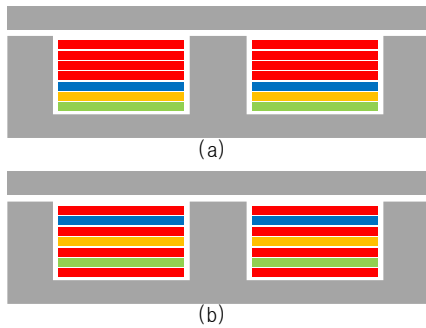
$$P_W = I_{prms}^2 \rho \frac{N_p \times MLT}{A} + 2 I_{srms}^2 \rho \frac{N_s \times MLT}{A} \quad (6)$$

$$P_T = P_C + P_W + P_{etc} \quad (7)$$

플라나 변압기는 일반적으로 층간 권선을 연결하고 접합하기 위해 비아, 스루홀 또는 핀 연결 방식을 사용한다.

그림 2(a)는 권선 인터리빙을 하지 않은 경우이며, 그림 2(b)는 권선 인터리빙을 한 권선 배치이다. 그림 2(b)와 같이 1차측 권선과 2,3,4차 측 권선을 교차하여 배치할 경우, 권선의 MMF(Magnetomotive Force)가 상쇄되어 권선의 근접효과가 감소하여 권선 AC 저항이 감소하게 되어 도통 손실이 감소한다.

앞서 언급한 내용을 바탕으로 플라나 변압기를 설계 하였다. 변압기의 코어 사양에 대한 정보는 표 1에 나타내었다.



■ : Primary ■ : Secondary ■ : Tertiary ■ : Quaternary

그림 2 플라나 변압기 권선 구조. (a) 기본 구조, (b) 인터리빙 구조

Fig. 2 Transformer winding structure. (a) non-interleaving case, (b) interleaving case.

표 1 변압기 코어 사양

Table 1 Transformer Core Specification

Core	PEH 3825A-040	Value
W × H × D	38 × 8.2 × 25.4	mm
AL Value	220	(nH/n ²) ± 12%
Core Effective Area	1.906	cm ²
Core Path Length	4.35	cm

표 2 컨버터 주요 사양

Table 2 Active Clamp Flyback converter parameter

Parameter	Value	Unit
Input Voltage (V_{in})	141~198	V
Output Voltage (V_{o1}, V_{o2}, V_{o3})	5, 15, 15	V
Output Current (I_o)	5	A
OutPut Ripple Voltage ($\Delta V_{out}/V_{out}$)	0.25	%
Output Ripple Current ($\Delta I_{out}/I_{out}$)	10	%
Switching Frequency (f_{sw})	200	kHz
Rated Output Power (P_{out})	25	W

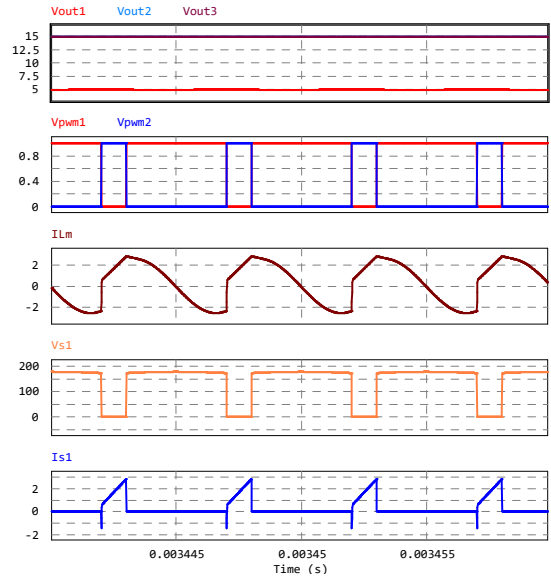


그림 3 ACF 컨버터 시뮬레이션 결과

Fig. 3 Simulation results for ACF converter

3. 시뮬레이션

ACF 컨버터의 주요 사양은 표 2에 정리되어있다. 시뮬레이션 결과는 그림 3에 나타나있으며, 위에서부터 각상 출력전압, PWM, 자화 인덕터 전류, 스위치 전압, 스위치 전류를 의미한다. 자화 인덕터 전류와 스위치 전압 파형을 통해 ZVS 동작이 이루어짐을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 플라나 변압기 설계 방법 및 ACF 컨버터 설계를 소개하였으며, 시뮬레이션을 통해 설계 방법을 검증하였다. 일반권선 변압기에 비해 고 전력밀도 및 높은 매개변수의 정확도를 가지는 플라나 변압기를 적용하여 향후 보조전원용 ACF 컨버터를 제작하여 효율 측정 및 검증 실험을 진행할 예정이다.

이 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원(20212020800020, 통합형 최적설계 플랫폼 기반 초고효율 전력변환시스템 개발)과 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20210501010020)

참 고 문 헌

[1] J. Hu, B. Wen, R. Burgos and Y. Kang, "Design of a Wide-Input-Voltage PCB-Embedded Transformer Based Active-Clamp Flyback Converter Considering Permeability Degradation," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 36, no. 9, pp. 10355-10365,

[2] 백중욱. "고효율 유사 공진형 플라이백 컨버터를 위한 새로운 액티브 클램프 회로 및 제어 방법에 관한 연구." 국내 박사학위논문 청주대학교, 2018. 충청북도