

2차 측 대전류 시스템에 적용된 평면 변압기의 설계 및 기생 커패시턴스 분석

윤현수, 김철민, 김종수*
 대진대학교 전기공학과

Design and parasitic capacitance analysis of a planar transformer applied to a high-current secondary system

Hyun-Soo Yoon, Chul-Min Kim, Jong-Soo Kim
 Department of Electrical Engineering, Daejin University

ABSTRACT

본 논문은 2차 측 대전류 특성을 가지는 시스템에 적용된 평면 변압기의 설계 및 기생 커패시턴스 분석에 대해 다룬다. LD C(Low Voltage DC-DC Converter) 용 ACF 컨버터의 평면 변압기의 설계와 대전류 특성으로 인한 기생 커패시턴스에 대해 Ansys Maxwell 모의실험 프로그램을 기반으로 분석을 진행하였으며, 실험 결과를 통해 2차 측 대전류 특성의 시스템에 적용되는 평면 변압기의 기생 커패시턴스 특성을 확인하였다.

1. 서 론

최근 탄소 배출 규제 강화와 같은 환경 규제에 의한 시장 수요 증가와 기술 발전으로 전기자동차(xEV)에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그중 저전압을 필요로 하는 차량의 전장부품에 전원을 공급해 주기 위해 고전압을 입력받아 12V의 저전압 전원을 공급해주는 전력변환장치인 LDC를 전력전자 시장에서 가장 중요한 목표인 소형화, 경량화, 고효율화하기 위해 다양한 연구가 진행되고 있다.^[1] 특히 제한적인 공간을 효율적으로 사용할 수 있게 해주는 컴팩트한 설계가 가능하며 우수한 열관리 특성으로 고효율, 고전력밀도 화에 유리한 평면 변압기를 적용하는 경우가 많다. 본 논문에서는 2개의 전력반도체 스위치를 사용하여 PSFB 컨버터보다 간단한 회로 구성, 낮은 도통 손실 특성과 Active Clamp 방식을 적용하여 유효 듀티 증가, 넓은 전압 전달비 및 변압기 부피를 감소시키는 등 기존의 Forward 컨버터가 지닌 단점을 보완한 ACF 컨버터 기반 2차 측 대전류 시스템에 적용된 평면 변압기의 설계 및 기생 커패시턴스 특성을 분석하였다.

2. 평면 변압기 설계

2.1 LDC 용 평면 변압기 설계

차량용 전장 부하에 12V 저전압을 입력해 주기 위한 2.5kW W LDC 시스템의 축소 스케일 H/W 제작을 위한 LDC 용 500W급 ACF 컨버터의 평면 변압기 설계를 진행하였다.

$$WaAc = \frac{P_o D_{cma}}{K_t B_{max} f_{sw}} \quad (1)$$

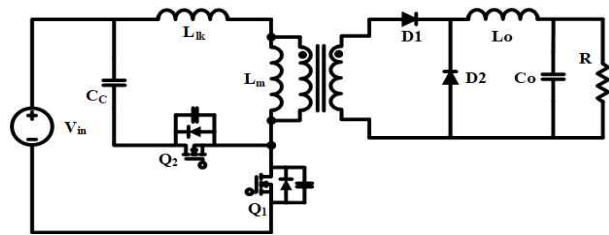


그림 1 능동 클램프 포워드 컨버터 회로도
 Fig. 1 Active Clamp Forward Converter Circuit

평면 변압기의 코어는 식(1)과 같이 코어의 창 면적과 단면적의 곱 연산 혹은 시스템의 출력 P_o , 전류밀도 D_{cma} , 토폴로지 상수 K_t , 최대자속밀도 B_{max} , 스위칭 주파수 f_{sw} 를 통해 코어의 전력 처리 용량을 도출할 수 있다. 전력 처리 용량 도출 후 LDC 시스템의 변압기 2차 측 대전류 특성으로 패턴에서 발생하는 발열을 고려한 패턴 폭을 도출하였다. 이후 수식을 통해 도출된 패턴 폭을 수용할 수 있는 창 면적의 크기를 가진 평면 코어를 선정하여 최종적으로 PEE 6418 평면 코어가 선정되었다. 여기서 D_{cma} 는 전류밀도를 나타내며 일반적으로 500~750 [cir.mils/A] 사이의 값을 사용하며, 그 값이 작을수록 높은 전류밀도를 의미하고 토폴로지 상수 K_t 는 포워드 컨버터의 토폴로지 상수인 0.0005를 사용하게 된다.

2.2 기생 커패시턴스를 고려한 패턴 설계

권선용 PCB의 패턴 설계는 방열판을 통해 열관리가 가능한 코어와 다르게 공기 중으로의 자연적인 방열만이 가능한 패턴

표 1 기생 커패시턴스 분석 모의실험 조건
 Table 1 Parasitic capacitance analysis simulation conditions

Parameter	Value	
	Case 1	Case 2
Secondary pattern position	Top, Bottom	Mid-Layer 2, Bottom
pattern width [mm]	Primary	2
	Secondary	18
Core	PEE 6418	

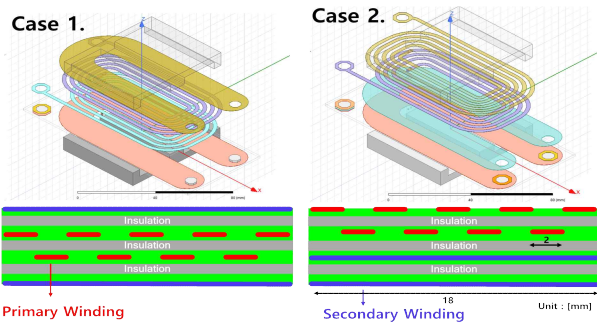


그림 2 평면 변압기 PCB 패턴 적층 방법
Fig. 2 Planar transformer PCB pattern lamination method

용 PCB의 방열 특성을 고려하여 그림2와 같이 넓은 패턴 폭을 가지는 2차 측 패턴을 Outer Layer(Top, Bottom Layer)로, 상대적으로 적은 전류가 흐르는 1차 측 패턴을 Inner Layer(Mid-Layer 2, 3)로 구성하였다. 이때 1차 측 패턴과 2차 측 패턴 사이에 존재하는 기생 커패시턴스를 식(2)과 같이 패턴의 면적 S 와 1, 2차 권선 간 거리 d , 공기와 PCB의 유전율 값 ϵ_0, ϵ_r 을 통해 계산할 수 있다. 또한 1차 측 패턴 간 기생 커패시턴스와 프린팅 효과로 인한 발열을 최소화하기 위해 그림2처럼 샌드위치 권선 방법을 적용하였으며 모든 PCB 패턴의 폭은 IP C-2221에 기반으로 패턴의 발열을 고려하여 선정하였다.

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d} \quad (2)$$

3. 모의실험

2차 측 대전류 특성으로 인한 넓은 패턴 폭으로 증가한 기생 커패시턴스의 분석을 위해 Ansys Maxwell Tool을 활용하여 그림3과 같은 3D 모델을 기반으로 2차 측 대전류 시스템 평면 변압기의 기생 커패시턴스 분석 모의실험을 진행하였다. 모의실험 조건은 표1과 같다. 모의실험은 표1과 같이, 발열을 고려하여 병렬로 구성된 2차 측 패턴이 Outer Layer(Top, Bottom Layer)에 위치하도록 설계된 Case 1 PCB와 발열을 고려하지 않고 설계된 Case 2 PCB에서 서로 다른 패턴 순서를 가지는 두 가지 경우에 대해 1차 측 패턴과 2차 측 패턴 사이에 존재하는 기생 커패시턴스 성분을 분석하였다. LDC 용 ACF 컨버터에 적용된 평면 변압기의 PCB 패턴으로 인한 기생 커패시턴스 분석 모의실험을 진행한 결과는 표2에 나타내었다. 그림2에서 발열을 고려하여 2차 측 패턴을 Outer layer로 위치하도록 설계한 Case 1 PCB는, 1차 측 권선과 2차 측 권선 간 기생 커패시턴스가 581.5pF, 발열을 고려하지 않고 설계한 Case 2 PCB는 287.74pF의 기생 커패시턴스를 확인하였다. 이러한 결과는 식(2)를 통해 계산된 1차 측과 2차 측 패턴 간 기생 커패시턴스와 유사한 값을 확인하였으며, 1차 측 패턴과 2차 측 패턴이 교차하는 면적의 변화에 따라 기생 커패시턴스가 변화하는 것을 확인하였다. 이러한 모의실험 결과를 통해 2차 측 대전류 특성을 가지는 시스템의 평면 변압기 PCB 패턴의 기생 커패시턴스는 수pF ~ 수십pF 수준의 기생 커패시턴스를 가지는 일반적인 시스템에 적용되는 평면 변압기와 다르게 매우 큰 수준의 기생 커패시턴스 성분이 나타나는 것을 확인하였다.

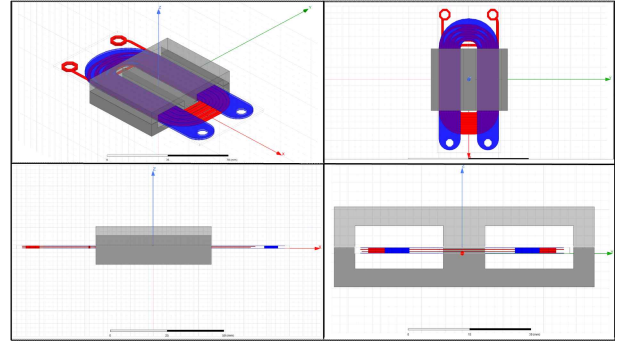


그림 3 평면 변압기 모의실험 모델
Fig. 3 Planar transformer simulation model

표 2 모의실험 결과

Table 2 Simulation result

Parameter		Case 1	Case 2
E Filed[V/M]			
Parastic Capacitance[pF]	Calculated	624.94	312.47
	Measured	581.5	287.74

4. 결론

본 논문은 2차 측 대전류 시스템의 평면 변압기 설계 및 기생 커패시턴스 분석을 진행하였다. 기생 커패시턴스 분석은 Ansys Maxwell Tool을 활용하여 진행하였으며 4층 PCB 기판에서 2차 측 패턴의 위치에 따른 평면 변압기의 기생 커패시턴스 성분을 분석하였다. 모의실험 결과 대전류 특성으로 넓은 패턴 폭을 가지는 평면 변압기의 기생 커패시턴스는 1, 2차 측 패턴 간 교차되는 부분에 따라 287.7pF ~ 581.5pF 정도로 매우 크게 나타나는 것을 확인하였다. 이러한 모의실험 결과를 토대로 2차 측 대전류 특성의 평면 변압기의 PCB 패턴으로 인한 기생 커패시턴스가 설계시 고려되어야 하는 중요한 설계 요소 중 하나이며 기생 커패시턴스를 고려한 설계가 되어야 안정적인 신뢰도 높은 시스템 설계가 가능할 것으로 판단된다. 이러한 결론을 통해 추후 실제 H/W 제작 및 기생 커패시턴스에 의한 영향을 분석하는 연구를 진행할 예정이다.

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

참고 문헌

- [1] 석채영, 김상진, 라마단, 최세완, 유병우, 박상훈 "SiC 기반의 전기자동차용 3kW급 고주파·고밀도 LDC 개발", 2020년도 전력전자학회 학술대회 논문집, 257-258
- [2] 안상준. (2022). 전기자동차용 탑재형 충전기의 고전력밀도 달성을 위한 수동소자 최적 설계 [박사학위논문, 성균관대학교]