

유한 요소법을 이용한 평면 변압기 전자기 해석

장두원, 주형길
한국산업기술대학교

Electromagnetic Analysis for a Planar Transformer Using Finite Element Method

Doo-Won Chang, Hyeong-Gil Joo
Korea Polytechnic University

ABSTRACT

최근 전원부의 소형화 경향에 따라 에너지 변환 소자인 변압기의 소형 경량화 요구가 가속화 되고 있다. 전원부의 고효율 소형화를 위해서 평면 변압기가 대두되고 있다.

이에 따라 본 논문에서는 8[W]급 플라이-백(Flyback) 평면 변압기의 PCB(Printed Circuit Board) 패턴을 FERROXCUBE사의 평면 변압기 설계 방법을 따라 개념 설계를 하였다. 120[kHz]의 스위칭 주파수에서 동작하는 평면 변압기의 자계 분포(magnetic intensity), 와전류(eddy current), 전계 분포(electric intensity)를 유한 요소법(Finite Element Method)을 이용하여 분석하였다.

1. 서론

최근 전기전자분야 전반에 걸쳐 전력변환의 필요가 증대되고 고효율, 고성능, 소형화, 경량화가 꾸준히 실현되고 있다. 반면 전원 부분에서는 변압기나 인덕터 또는 커패시터의 크기로 인한 소형 경량화가 이루어지지 못하고 있다. 소형화의 요구가 증대함에 따라 소형화 요구에 발맞춰서 스위칭 방식이 실현되어 어느 정도 소형화가 가능해졌다.

전원부의 가장 큰 부피를 차지하는 변압기의 소형화도 스위칭 주파수를 증가시킴으로 가능해졌다. 하지만 소형화에 따른 방열 면적의 감소로 인한 손실과 고주파 스위칭으로 인한 손실이 증가하게 된다. 손실은 스위칭 주파수의 증가에 따라 비례적으로 늘어난다. 회로의 고주파화로 인한 소형화에도 불구하고 자성체가 갖는 고유의 손실 특성은 소형화 고효율화의 중대한 제한 요소로 작용한다. 수백 kHz 이상의 고주파 스위칭 분야에서는 표피효과(Skin effect)와 근접효과(Proximity effect)로 인한 손실 증가로 전원 장치에 응용하기 어렵다.

하지만 넓은 도체와 평면 코어를 이용하는 평면변압기(Planar Transformer)는 고주파 스위칭으로 인한 표피효과나 근접효과로 인한 손실을 감소시킬 수 있으므로 고주파대역용 전원장치에의 응용이 가능하고 소형화 고효율화가 가능해진다. 이에 따라 많은 연구가 진행되고 관심이 집중되고 있다^{[1]-[3]}.

따라서 본 논문에서는 고주파용 평면 변압기의 개념 설계를 통해 8[W]급 플라이-백 평면 변압기를 설계하고 유한 요소법을 이용해 전자기적 기초 특성을 분석하였다.

2. 본론

2.1 평면 변압기 구조 특성

평면변압기의 구조는 코어와 권선부분으로 크게 구분된다. 그림 1과 같이 평면변압기의 권선 부분은 일반 변압기의 구리 선재와 달리 구리 박막을 사용하여 적층한 형태를 가지며 PCB 패턴과 형태가 같다. 평면 변압기의 코어는 일반적인 코어에 비해 높이가 낮으며 평면화로 인한 유효면적의 증가로 보다 높은 전력 밀도를 나타내고 또한 누설 인덕턴스도 작다^[4].

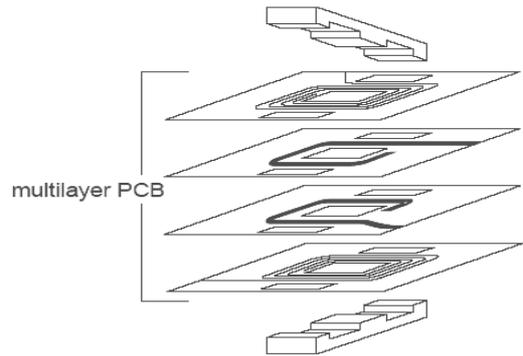


그림 1 평면 변압기 구조^[2]

2.2 평면 변압기 개념 설계

본 설계 사례는 FERROXCUBE사의 설계 방법을 참고하여 설계 하였으며 표 1과 같은 설계사양의 8[W]급 플라이-백 평면 변압기를 설계하였다.

표 1 플라이-백 설계 사양

parameter	symbol	value
minimum input voltage	U_{imin}	70V
output voltage	U_o	8.2V
extra primary output	U_{pic}	8V
primary duty cycle	d_{prim}	0.48/0.5
secondary duty cycle	d_{sec}	0.48/0.5
switching frequency	f	120kHz
output power	P_{max}	8 W
ambient temperature	T	60°C
allowed temperature rise	ΔT	35°C

먼저 120[kHz]의 스위칭 주파수와 코어 손실을 고려하여 FERROXCUBE사의 E-PLT18/4/10-3C90 코어를 선택하였다. 코어손실은 식(1)을 통하여 430[mW/cm³] 나타났으며 식(2)에 의해서 120[kHz] 주파수에서 자속 밀도 피크값은 160[mT]가 산출되었다.

$$P_{core} = \frac{12 \cdot \Delta T}{\sqrt{V_e (cm^3)}} \quad (1)$$

여기서 P_{core} = 코어 손실, ΔT = 허용 온도 상승,
 V_e = 코어의 유효 부피

$$B_{peak} = \left[\frac{P_{core}}{C_m \cdot C_T \cdot f^X} \right]^{1/Y} \quad (2)$$

여기서 C_m, Y, C_T, X 는 코어의 재료 상수

두 번째로 1, 2차 권선수와 입출력 전류와 인덕턴스를 나타내면 표2와 같다.

마지막으로 선간격과 선폭의 설계시 선간격은 근접효과를 최소화하는 조건으로 설계해야 하며 이를 위해 일반적으로 사용 생산되는 구리선의 두께가 35μm 일 때 150μm 이상, 70μm 일 때 200μm 이상의 간격이 각각 필요하다. 여기서는 70μm를 기준으로 설계한다.

선폭 또한 표피효과를 무시할 수 있는 조건으로 설계하기 위해서 표피효과에 의한 침투깊이 δ를 식(3)로 산출하며 2δ보다 작게 설계한다.

1, 2차 권선의 PCB 패턴 폭은 식(4)에 의해서 산출한다. 1차 권선의 경우 고주파 스위칭에 영향을 주는 요소를 적절히 제거하기 위한 선폭과 선간을 확보하기 위해서는 권선의 적층이 불가피하다. 따라서 선택된 코어의 권선창 크기를 고려하여 1차 권선을 4개의 레이어(layer)로 나눈다.

$$\delta = \frac{66}{\sqrt{f [kHz]}} [mm] \quad (3)$$

$$W_t = \frac{[b_w - (N_1 + 1) \cdot s]}{N_1} \quad (4)$$

여기서 b_w = 코어 창 폭, $N_1, N_2 = 1, 2$ 차 턴수 s = 선간격

주절연은 IEC 950 안전 규격에 따라 400μm로 하고 주절연이 아닌 경우는 200μm로 설계하여 표 3에 PCB 레이어 설계를 정리 하였다.

표 2

Uimin [V]	Uo [V]	N ₁	N ₂	N _{IC}	L _{prim} [μH]	I _{p,rms} [mA]	I _{o,rms} [mA]
70	8.2	23	2.7	2.7	638	186	1593

표 3 레이어 설계

Layers	Turns	Thickness
solder mask		50μm
primary	6	70μm
insulation		200μm
primary	6	70μm
insulation		200μm
primary IC	3	70μm
insulation		400μm
secondary	3	70μm
insulation		400μm
primary	6	70μm
insulation		200μm
primary	6	70μm
solder mask		50μm
Total		1920μm

2.3 수치해석 결과

그림 2, 3과 같이 모델링 하여 분석하였다.

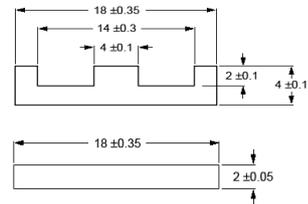


그림 2 평면 코어 구조 (mm)

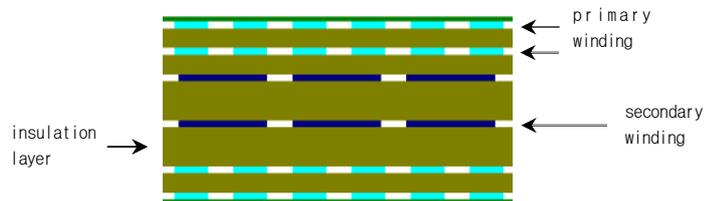


그림 3 평면 변압기 권선 패턴

2.3.1 자 계(The magnetic intensity)

120[kHz]의 스위칭 주파수에서 동작하는 평면 변압기의 자속의 분포를 그림 4, 5에 나타내고 있다.

그림 4, 5는 자계(magnetic intensity)를 보여주며 1차 권선의 자계가 더 큰 것을 알 수 있고 바깥쪽 권선에서의 자계가 더 크게 나타남을 알 수 있다. 그리고 각 1, 2 차권선 레이어 쌍의 자속의 분포가 대칭적으로 같게 나타남을 알 수 있다.

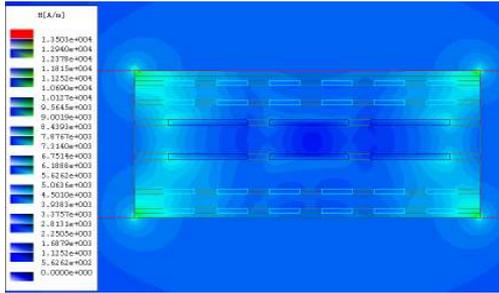


그림 4 평면 변압기 자계 분포

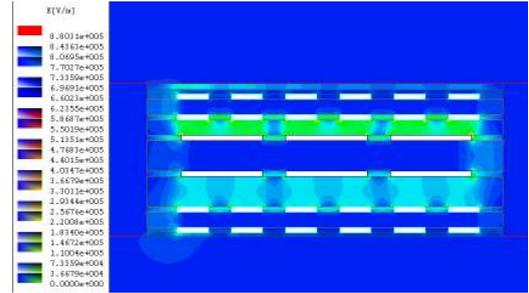


그림 7 권선의 전계 분포

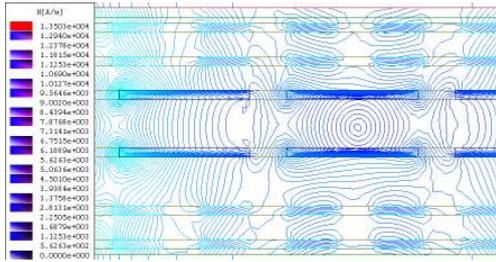


그림 5 평면 변압기의 등자계 분포

3. 결론

본 논문에서는 최근 주목받고 있는 평면변압기의 개념 설계를 통해 120[kHz] 스위칭 주파수를 갖는 8[W]급 플라이-백 평면 변압기를 설계 하였으며 유한 요소법을 이용한 전자기적 분석을 통해 고주파 스위칭에 의한 포피효과와 근접효과를 줄일 수 있는 권선폭과 선간격을 개념 설계를 하였으며 전류밀도분포 등의 기초적인 전자기적 특성을 통해 고주파 스위칭에 의한 변압기의 손실을 평면 변압기가 상당부분 줄일 수 있음을 알 수 있었다.

이 논문은 대한전력연구센터 육성지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구 되었습니다.

2.3.2 와전류(The eddy current)

일반 변압기와 달리 고주파 스위칭을 사용하는 변압기의 경우 포피효과와 근접효과가 손실을 결정하는 주된 요소이다. 이런 효과들을 일으키는 원인은 와전류(eddy current)이다. 와전류의 주된 발생원인은 누설 인덕턴스와 고주파 스위칭 동작이다. 120[kHz]의 주파수에서 동작할 때 와전류의 분포는 그림 6에서처럼 전류 밀도를 통해 알 수 있다. 그림 6의 전류 밀도를 통해 1차 권선에 와전류와 근접효과로 인한 급격한 전류밀도 분포가 없으므로 선간격의 설계가 적절하였음을 알 수 있다.

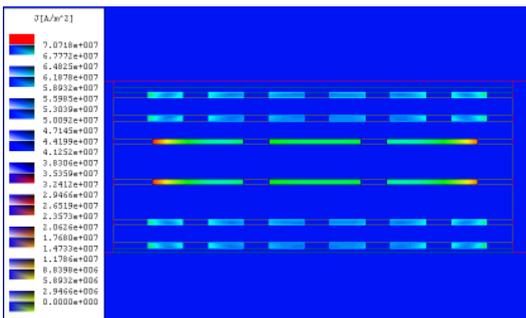


그림 6 각 권선의 전류 밀도 분포

참고 문헌

- [1] Connor Quinn, Karl Rinne, "A review of Planer Magnetic Techniques and Technologies", 2001 IEEE.
- [2] Ferroxcube Component technical note, "Design of Planar Power Transformer", 9398 083 39011.
- [3] 김현식, 허정섭, 김종령, 민복기 " 초소형 고효율 평면변압기의 기술동향", 전력전자학회지 제6권 제5호, 2001/10.
- [4] N. Dai, A. W. Lotfi, G Skutt, W. Tabisz, F. C. Lee, "A comparative study of high frequency low profile planar transformer technologies. Applied Power Electronics Conference(APEC), vol. 1, pp.226-232, 1994

2.3.3 전 계(The electric-field intensity)

본 논문에서 구성한 1차, 2차 권선의 형태는 그림 3과 같이 1차-2차-1차의 형태로 구성되어 있다. 각각의 권선 레이어 간의 배치는 권선의 절연 관계를 고려하여 설계 하였다. 권선 간의 절연특성은 그림 7의 전계 분포를 통해 알 수 있으며 1차, 2차권선 간의 적절한 절연이 이루어진 설계임을 알 수 있다.