

300 W급 평면 변압기의 설계 및 분석

이해연*, 허정섭, 김현식, 김종령**, 오영우
(주)매트론 기술연구소*, 경남대학교**

Design and Properties of the 300 W Planar Transformer

Hae-Yon Lee*, Jeong-Seob, Hyun-Sik Kim, Jong-Ryung Kim, Young-Woo Oh**
Matron Co., Ltd. R&D Center*, Kyungnam University**

Abstract

전원장치의 소형·경량화 및 고효율화를 위한 핵심 기술인 변압기를 설계 및 제조하기 위해 넓은 유효 단면적을 가진 평면 자성체와 편편하고 넓은 도체를 이용하여 고주파 손실을 감소시켜 고주파 대역용 전원장치에 채용 가능한 입력 220 V, 출력 15V, 300 W급 포워드(Forward) 평면 변압기를 설계 및 제조하고 전자기적 특성과 입출력 신호 특성을 측정하였다.

1차 코일과 2차 코일의 권선수는 각각 15회와 2회 그리고 여자(demagnetizing) 권선은 15회로 설계하였으며, 변압기의 총 발열은 44.78℃로 설계 및 제작하였다. 스위칭 주파수 100 kHz에서 1.65 mH의 인덕턴스 값을 얻었으며, 100 V의 입력전압에 대하여 13 V의 안정한 구형 출력파형을 얻었다. 따라서 스위칭 듀티(duty)가 최고 0.4로 설계되었기 때문에 설계 목표한 15 V 출력에 유사한 전압을 나타내어 평면 변압기의 설계 방법을 확립하였으며, 평면 변압기의 응용 가능성을 확인할 수 있었다.

Key Words : 평면 변압기, 소형화, 경량화, 평면 자성체, 산업자동화 기기

1. 서 론

현재 전자통신기기 및 산업자동화기기에 있어서 시스템 부분은 반도체 집적회로의 발전에 수반하여 소형·경량화 및 고효율화가 이루어지고 있는 반면 전원 부분은 에너지 축적 또는 변환용 소자인 변압기 및 커패시터 때문에 소형·경량화에 한계를 드러내고 있다. 전원장치의 크기를 줄이고 효율을 극대화하기 위해서 넓은 유효 단면적을 가진 평면 코어와 편편하고 넓은 도체를 이용한 평면 변압기를 채용하여 고주파 손실을 감소시키고 소형화와 고효율화를 동시에 이룰 수 있다[1,2].

따라서 본 연구에서는 전원장치의 소형, 고성능화를 이루기 위한 핵심 기술인 변압기를 소형화하기 위해 300 W급 포워드 평면 변압기를 설계 및 제조하였으며 입출력 전압 파형과 전·자기적인 특성을 조사하였다.

2. 평면 변압기의 설계

2.1 설계 사양

표 1과 같은 사양으로 300 W급의 평면 변압기를 설계 및 제조하였으며, 그림 1에 설계 및 제조 공정을 나타냈다.

표 1. 평면 변압기 설계 사양

항 목	사 양
Topology	Forward
용 량	300 W
입 력 전 압	220 V
출 력 전 압	15 V
듀티 사이클	0.4
스위칭 주파수	300 kHz
주 위 온 도	25 ℃
허용상승온도	50 ℃

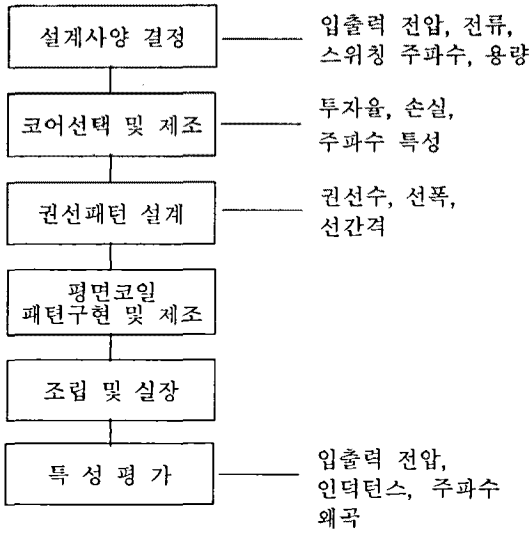


그림 1. 평면 변압기 제조 공정

2.2 코어선택

코어 손실과 권선 손실을 고려하여 포함되지 않으면서 Volt-Second를 제공할 수 있는 코어를 선택해야 한다. 이는 여러 가지 시도에 따른 반복적 과정에 의해 성취될 수 있지만 식(1)과 식(2)는 코어 면적(Porduc A_p)의 추정 값을 제공할 수 있다. 식(1)은 ΔB 가 포화에 의해 제한될 때 적용되고, 식(2)는 코어 손실에 의해 제한될 때 적용한다. 적용 시 가장 큰 A_p 값을 사용하며, 계산 값보다 큰 A_p 값을 갖는 코어를 선택한다. 본 연구에서는 Philips E43-3F3 코어를 사용하였으며, 표 2에 기본 특성을 나타냈다.

$$A_p = \left[\frac{11.1 P_{in}}{K_A B f t} \right]^{1.31} \text{ cm}^4 \quad (1)$$

$$A_p = \left[\frac{P_{in} 10^4}{120 K_2 f t} \right]^{1.58} \cdot (K_{HF} + K_{EF} f^2)^{0.66} \text{ cm}^4 \quad (2)$$

여기서 P_{in} = 용량/효율, f = 스위칭 주파수, K_H = 히스테리시스 계수, K_E = 와전류 손실계수이다.

2.3 권선설계

변압기의 전체 손실 중에서 코어의 손실이 50% 이상이며 변압기의 온도상승을 발생시키고 효율을 저하시키는 중요한 요인으로 작용한다. 따라서 본 연구에서 목표한 변압기 허용 상승온도 50°C에서의 최대 코어 손실과 자속 밀도를 식(3)과

(4)로 각각 산출하였으며 P_{core} 는 376 mW/cm³, B_{peak} 는 156 mT의 값을 얻었다.

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

$$B_{peak} = \left[\frac{P_{core}}{A \cdot f^X} \right] \quad (4)$$

여기서 3F3의 재료상수 A, X, Y는 2.5×10^{-4} , 1.63, 0.41이다[3].

표 2. E43-3F3 코어 특성

기호	조건	특성	단위
μ_i	25°C; ≤10 kHz; 0.1 mT	2000±20%	-
μ_a	100°C; ≤25 kHz; 200 mT	≈ 4000	-
B	25°C; ≤10 kHz; 250 A/m	≥ 400	mT
	100°C; ≤10 kHz; 250 A/m	≥ 330	
P _v	100°C; ≤100 kHz; 100 mT	≥ 80	kW/m ³
	100°C; ≤400 kHz; 50 mT	≥ 150	
A _e	-	2.26	cm ²
A _w	-	1.44	cm ²

코일의 권선수는 자속(Φ)이 $\Phi \sin \omega t$ 로 변할 때 유효되는 기전력을 통해 산출되며, 자속이 전압과 시간에 대한 전류의 변화이므로 식(5)와 (6)을 적용하여 1, 2차 권선수를 산출하였다.

$$N_1 = \frac{U_{in} \cdot \delta}{2 \cdot f \cdot B_{peak} \cdot A_e} \quad (5)$$

$$N_2 = \frac{N_1 \cdot U_o}{U_{in} \cdot \delta} \quad (6)$$

여기서 U_{in} 은 입력전압, U_o 는 출력전압, δ 는 듀티 사이클 그리고 A_e 는 코어의 실효 단면적이다.

산출된 1,2차 권선수는 각각 12.5회, 1.7회이며 권선수의 정수화를 위해서 설계 값의 1,2차 권선비를 기준으로 1차 권선수와 여자 코일 그리고 2차 권선수를 각각 15회, 15회, 2회로 변화시켰다. 또한 1차 코일의 자기 인덕턴스는 식(7)에 의해서 약 1.6 mH의 설계 값을 얻었고 이때 진폭 투자율(μ_a)은 1500으로 적용하였다.

$$L_{Prime} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_a \cdot N_2 \cdot A_e}{l_e} \quad (7)$$

평면 코일에 전압, 전류가 인가되면 권선의 온도

가 상승하게 되므로 평면 구리 박판의 두께는 전류-상승온도를 고려하였고, 식(8)의 표피효과에 의해 전류가 침투할 수 있는 표면으로부터의 깊이 D_{skin} 에 의해 $2D_{skin} = 257.5 \mu\text{m}$ 이하가 될 수 있도록 1차 코일은 $50 \mu\text{m}$, 2차 코일은 대전류에 의한 온도상승이 지배적이기 때문에 표피효과에 의한 손실을 감수하고 $300 \mu\text{m}$ 를 사용하였다.

$$D_{skin} = \frac{2230}{\sqrt{f [kHz]}} [\mu\text{m}] \quad (8)$$

근접효과와 50°C 의 변압기 허용 상승온도를 고려하여 1차 15회 권선은 5개의 3회 권선층을 직렬 연결하였으며, 2차 2회의 권선은 2개의 1회 권선층을 직렬연결 하여 변압기를 구성하였다. 표3에 설계결과를 나타냈고, 각 층에 대한 패턴 설계 결과를 그림2에 나타냈다[3,4].

표 3. 평면 변압기 설계 결과

항 목	사 양
1,2차 권선 두께	50, 300 μm
1,2차 권선 폭	2.3, 10 mm
1차 권선수	15 회
2차 권선수	2 회
여자 권선수	15 회
1차 코일 인덕턴스	1.6 mH

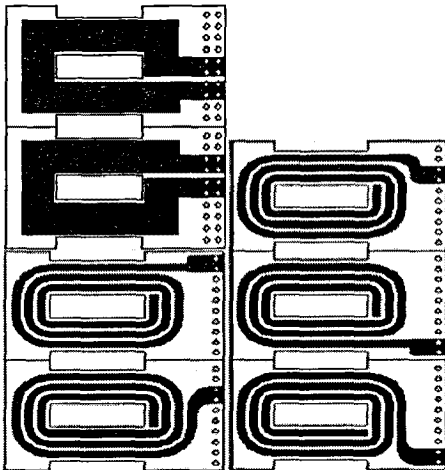


그림 2. 평면 변압기 권선 설계

3. 결과 및 고찰

그림 3은 1차 코일 자기인덕턴스(L_{Prime})를 나타낸 것이다. 본 연구의 설계 스위칭 주파수인 300 kHz에서 약 1.592 mH의 값을 얻었으며 이것은 식(7)에 의해 산출된 이론치 1.6 mH와 거의 같으며 손실된 부분은 두 개의 E-코어 사이에서 미세한 공극에 의해 자속이 차단되었기 때문인 것으로 생각된다. 자기 인덕턴스는 코일에서 유도 기전력의 유도능력을 나타내는 것으로써 일정한 외부 에너지에서 자성체의 형상과 재질에 의한 자속의 발생과 코일에서의 에너지유도에 대한 해석이므로 정확한 설계가 중요하다.

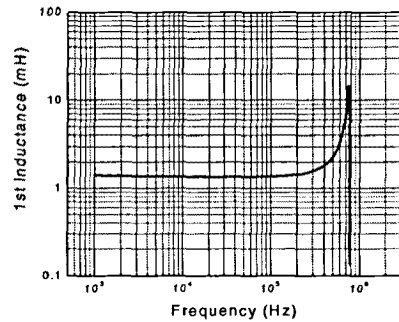


그림 3. 1차 코일의 자기 인덕턴스

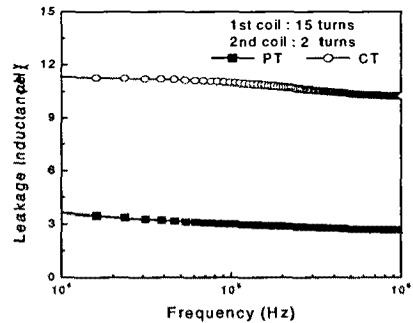


그림 4. 평면 변압기와 일반 변압기의 누설 인덕턴스 특성

그림 4는 평면 변압기와 일반 변압기의 누설 인덕턴스를 측정된 결과이다. 누설 인덕턴스는 1차 코일에서 발생하는 자속이 2차 코일에 완전히 여기되지 못하고 일부가 누설되는 것으로써 2차 코일을 연결시킨 상태에서 1차 코일의 인덕턴스를

측정하였고 전체적으로 평면 변압기가 일반 변압기보다 약 3배 이상 낮은 누설 인덕턴스 값을 나타냈다. 스위칭 주파수 300 kHz에서 약 2.7 μH의 값을 나타냈으며, 이는 1차 코일 자기 인덕턴스의 0.16 %로써 아주 작은 값을 얻었다.

그림 5는 식(9)와 (10)에 의해 산출된 변압기 결합인자(k)의 주파수 특성을 나타낸 것으로써 300 kHz까지는 비교적 일정하게 유지되어 스위칭 주파수 300 kHz에서 0.928의 아주 높은 값을 나타냈고, 그 이상의 주파수 대역에서는 L_{Prime} , $L_{Secondary}$ 의 급격한 증가로 인하여 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 그림 4의 결과와 일치하는 것으로써 누설 인덕턴스가 아주 낮기 때문에 전체적인 결합도가 높은 것으로 판단되며 전체적인 변압기 효율이 증가될 것으로 사료된다.

$$M = \frac{L_{p+s} + L_{p-s}}{4} \quad (9)$$

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_p L_s}} \quad (10)$$

여기서 L_{p+s} 는와 L_{p-s} 는 각각 극성이 같은 방향과 반대 방향으로 1, 2차 코일을 연결하여 측정된 인덕턴스 값이고, M은 상호 인덕턴스이다[4].

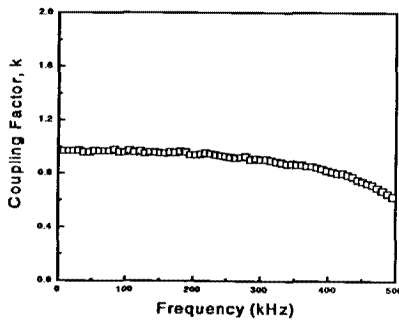


그림 5. 평면 변압기의 결합계수

그림 6은 스위칭 주파수 300 kHz에서 입력 전압과 출력 전압 파형을 나타낸 것으로써 141 V 입력 전압에 대하여 19.4 V의 안정한 구형파의 출력파형을 얻을 수 있었고, 이는 최소 입력전압 280 V에서 출력측 다이오드 전압강하와 듀티 사이클을 고려했을 때 본 연구의 설계 목표인 15 V의 출력 전압과 일치한다는 것을 알 수 있었다.

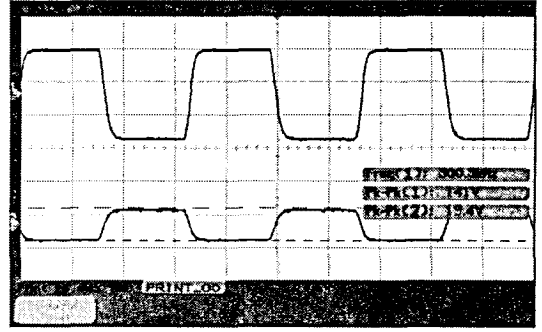


그림 6. 평면 변압기의 입출력 전압 파형

4. 결론

300 W급 파워드 평면 변압기를 설계 및 제조하여 입출력 전압 파형과 전·자기적 특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 1, 2차 코일의 권선수를 각각 15회, 2회, 선폭을 2.3, 10 mm 그리고 코일 두께를 50, 300 μm 하여 변압기 상승온도가 44.78 °C인 300 W급 평면 변압기를 설계 및 제조하였다.

2. 스위칭 주파수 300 kHz에서 1.592 mH의 1차 코일 인덕턴스를 얻었으며, 일반 변압기에 비해서 3배 이상 낮은 약 2.7 μH의 아주 낮은 누설 인덕턴스 값을 얻었다.

3. 결합계수 k는 300 kHz까지는 큰 변화없이 일정한 값을 나타냈으며 300 kHz에서 0.928의 아주 높은 값을 얻었다. 또한 안정한 구형파의 출력 파형을 나타내어 평면 변압기의 설계방법을 확립 하였으며 응용 가능성을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] 김현식, 이해연, 김종령, 오영우, "평면 변압기의 설계와 전자기적 특성", 한국자기학회지, Vol. 12, No. 3, p. 109, 2002
- [2] Conor Quinn, Karl Rinne, "A review of Planar Magnetic Techniques and Technologies", 2001 IEEE
- [3] Ferroxcube, "Design of Planar Power Transformer", 2000
- [4] 윤희중, 정명희, "저전력, 고주파, 고효율 자성 박막 변압기 설계 및 제작에 대한 연구", 대한전기학회지, Vol. 50C, No. 11, p555, 2001