

대전류 출력형 Flat Transformer 설계 및 해석 기술

Design and Simulation Technologies of Flat Transformer with High Power Current

한세원, 조한구, 우병철

Han Se-Won, Cho Han-Goo, Woo Bung-Chul

Abstract

Leakage inductance and temperature rise are two of the more impotent problems facing the magnetic core technology of today's high frequency transformers. Excessive leakage inductance increases the stress on the switching transistors and limits the duty-cycle, and excessive temperature rise can lead the design limitation of high frequency transformer with high current. The flat transformer technology provides a very good solution to the problems of leakage inductance and thermal management for high frequency power. The critical magnetic components and windings are optimized and packaged within a completely assembled module. The turns ratio in a flat transformer is determined as the product of the number of elements or modules times the number of primary turns. The leakage inductance increase proportionately to the number of elements, but since it is reduced as the square of the turns, the net reduction can be very significant. The flat transformer modules use cores which have no gap. This eliminates fringing fluxes and stray flux outside of the core. The secondary windings are formed of flat metal and are bonded to the inside surface of the core. The secondary winding thus surrounds the primary winding, so nearly all of the flux is captured.

Key Words : Flat Transformer, Leakage Inductance, High Current Transformer, SMPS, Core Design

1. 서론

컴퓨터 및 정보화 산업 발전에 따라 적용 시스템의 크럭 주파수 증대에 따른 대전류(수십A급), 저전압(수V급), 고응답($2\mu\text{s}$ 이하), 집적화($30\sim 100\text{W}/\text{in}^3$) 및 고효율화된 고밀도형 전원은 컴퓨터, 통신, 가전기기 및 자동차 분야, 산업, 수송, 우주, 군사용 등의 전원 공급 장치의 핵심 부품으로 급격히 성장하고 있다. 이에 따라 전원장치의 고집적화, 고효율화 및 고기능화를 통한 소형화 기술의 수요가 꾸준히 증가하고 있고 선진 외국의 경우 Power Packaging 기술과 Low Profile Magnetic 설계 기술을 접목한 고밀도 전원용 고주파 Transformer 기술 개발이 핵심 기술로 부상되고 있다.

SMPS(Switching Mode Power Supply)의 구성 요소 중에서 가장 큰 부피를 차지하고 있는 것은 변압기이며, 이 SMPS의 소형화를 위해서는 변압기의 부피를 최소화하는 것이 급선무이다. 하지만 변압기의 소형화는 스위칭 주파수를 증가시킴으로 가능하지만, 소형화에 따른 방열 면적이 감소하여 손실이 증가하게 되며 이 손실량은 스위칭 주파수의 증가에 따라 비례적으로 증가하게 된다. 현재 상용화되고 있는 전원 장치의 전체 손실의 약 14%를 변압기가 차지하고 있는 것만으로도 그 손실 비중을 짐작할 수 있다. 한편 일반적인 권선형 변압기의 경우 100kHz 이상의 고주파 스위칭 주파수에서 동작하는 경우 동손, 코아손은 물론 표피 효과(skin effect)와 근접 효과(proximity effect) 등에 의한 손실 증가로 인해

수백 ㎜이상의 스위칭 주파수를 갖는 전원 장치에는 적용하기 어려운 기술적 한계를 가지고 있다.

최근 이러한 문제점을 개선하여 전원 장치에 평평하고 넓은 도체를 이용한 평면 변압기(Planar Transformer)는 고주파 손실을 감소시켜 고주파 대역용 전원 장치에 채용이 가능하기 때문에 최근 이에 대한 많은 관심과 기술개발에 집중되고 있다. 하지만 경량화, 낮은 누설 인덕턴스 및 고효율화가 가능하지만 권선 창(window) 내의 권선수의 제한성과 대전류에서 사용이 불가능한 한계로 인해 제한된 범위에서 적용이 가능하다. 따라서 최근에는 여러 개의 코어를 매트릭스(matrix) 방식으로 연결하여 각 코어에서 2차 전류를 인출하여 병렬 연결하는 대전류 구동용 FLAT Transformer가 개발되었다.

본 연구에서는 고주파용 대전류 출력형 Flat Transformer에 대한 국내·외 기술 동향을 소개하고 기존 코아형 변압기 기술과 차별화된 핵심적인 설계 요소를 설명하고자 한다.

2. Flat Transformer 기술

2.1 Flat Transformer 핵심기술

기존 변압기는 단일 코아(single core)를 사용하여 1차측 주권선 턴수가 많아 동손, 철손 및 큰 누설 인덕턴스를 가지게 된다. 또한 고주파 스위칭에 대한 응답 특성이 나쁘고 부피가 커지는 경향이 있다. 결국 이러한 특성은 변압기의 효율을 향상시키는데 한계를 갖는다. 최근에 기존 변압기의 개념과는 다른 다중 코어를 채용하여 몰드 절연하는 FLAT형 변압기가 개발되어 고밀도, 고효율, 저가의 AC/DC 컨버터 또는 DC/DC 컨버터에 적용할 수 있는 주 변압기로 주목받고 있다. FLAT 변압기는 복수 코어를 매트릭스로 설계되어 주권선의 권선 수를 줄여서 제작하기 때문에 매우 낮은 누설 인덕턴스를 가지게 되고 탁월한 고주파 응답특성을 나타낸다.

특히 기존 변압기의 낮은 열 분산성과 높은 누설 인덕턴스 그리고 불안정한 주파수 특성과 큰 부피로 인해 발생하는 HOT SPOT와 같은 문제점을 매트릭스 코아 방식 채택과 몰드 절연에 의한 고밀도 전원형의 low profile 디자인으로 해결할 수 있다. 이러한 특성은 구동 전압은 낮지만 높은 전류가 요구되는 각종 인버터용 주변압기 또는 인덕터 등에 적용하여 에너지 절감은 물론 가격 절감의 효과를 크게 기대할 수 있다.

기존기술 문제점	Flat TR 기술
누설 인덕턴스	최적 코어 소재 개발/메트릭스 설계
코어 손실	Thin wall 코아 설계 (Eddy current 손실감소, 저속밀도 향상)
동손	최소 권선 방식/최적 열확산 및 열연 필링 기술
낮은 주파수응답특성	최적 코어 소재/다중 코어 방식/몰드 절연 설계 (각종 손실 및 누설 인덕턴스 개선)
큰 부피	몰드 절연 방식/메트릭스 TR 설계 (기존 대비 1/2)
Hot Spot 현상	다중 코어 방식/2차 용드 권선 방식/1차 권선수 감소 설계(기존 대비 75%)
DC/DC 컨버터 고효율화 및 고집적화	고효율 Flat TR 적용/최적 구동 회로 방식 설계

표 1. Flat Transformer 핵심기술

2.2 Flat Transformer Module 형상

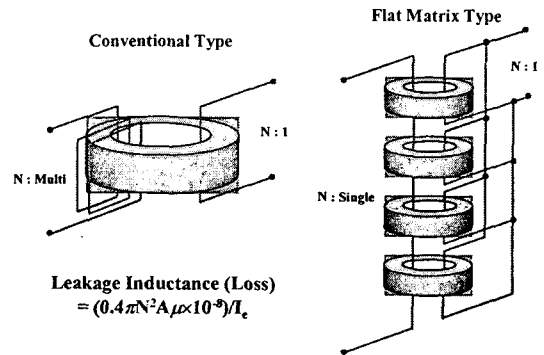


그림 1. Flat Transformer Module 구성요소

2.3 Matrix Core 설계

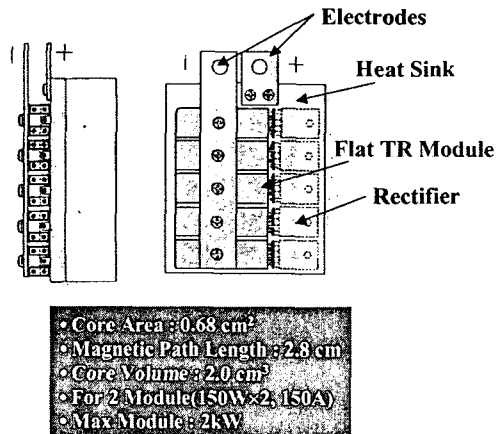


그림 2. 매트릭스 코아(Matrix Core) 배치

2.4 코어 소재

SMPS용 코어 소재에 요구되는 주요성능은 다음과 같다.

- 1) 저손실
- 2) 포화자속밀도 큰 것
- 3) 잔류자속밀도 작은 것
- 4) 큐리온도 큰 것
- 5) 코어손실의 동작온도 안정성
- 6) 투자율-DC 중첩특성 양호한 것

현재 가장 많이 사용되는 전원 변압기용 코어 소재는 페라이트(Soft Ferrite)로 고유저항이 크기 때문에 고주파 동작에 따른 와류손(Eddy current loss)이 작아 유리하다. 한편 최근 수백kHz 범위의 고주파 특성에서 손실 및 자성 특성이 우수한 Permalloy계(MPP, High Flux, Sendust) 코어 소재가 개발되어 각광을 받고 있다.

표 2. 주요 코어소재 특성 비교

Core Materials	Core Loss	Perm. vs DC Bias	Relative Cost	Frequency Range	Sat. Flux Density	Temp. Stability
MPP	Lowest	Better	High	1MHz	7,000G	Best
High Flux	Low	Best	Medium	1MHz	15,000G	Better
Sendust	Medium	Good	Low	2MHz	10,000G	Good
Iron	Highest	Poor	Lowest	100kHz	10,000G	Poor
Amorphous	Medium	Better	Highest	300kHz	6,500G	Poor
Ferrite	Lowest	Poor	Low	1MHz	4,500G	Poor

2.5 온도 상승과 절연 기술

설계적으로 전원용 컨버터용 변압기에서 발생하는 온도가 변압기의 출력특성을 결정한다. 기본적인 열관리 차원에서 보면 변압기의 손실량에 비례하여 온도는 상승한다. 변압기에 온도를 상승시키는 주요 요인은 코어손실(core loss)과 동손(winding loss)에 의한 것이다. 코어손실은 코어체적, 자속밀도 및 사용 주파수에 따라 결정되며, 동손은 권선저항과 전류에 따라 달라진다. 한편 변압기의 온도상승은 열전도(thermal conduction) 구조와 관계가 깊다. 적절한 heat sink가 적용되면 온도상승은 억제된다.

열전도는 변압기의 면적에 비례하여 증가하고, 두께에 비례하여 감소한다. 따라서 최근 평면형(planar) 변압기의 경우 이러한 특성을 반영하여 열전달 경로를 최소로 줄이고 대면적 권선구조의 정방형 형상(cubic geometric)으로 설계한 고주파형 변압기가 제작되고 있다.

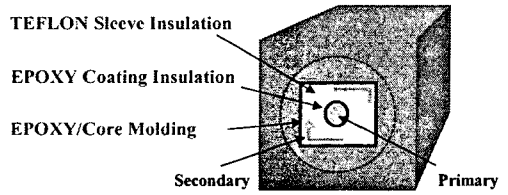


그림 3. Flat Transformer의 절연구조

2.6 고주파 동작 특성

PWM 컨버터는 스위칭 동작 파형에 급히 상승하는 edge를 가지게 되어 스위칭 회로에 변압기 권선의 누설 인덕턴스를 포함하는 경우 EMI를 발생시킨다. 고주파 스위칭 동작 시 발생하는 spikes 잡음은 누설 인덕턴스에 비례하여 증가하므로 가능하면 누설 인덕턴스를 줄이는 것이 필요하다. Flat Transformer의 경우 주권선 수를 최소화하는 메트릭스 코어 방식으로 설계되어 이러한 누설 인덕턴스 외에 표피효과(skin effect)와 근접효과(proximity effect)를 최소화하여 저손실 특성을 구현하게 된다.

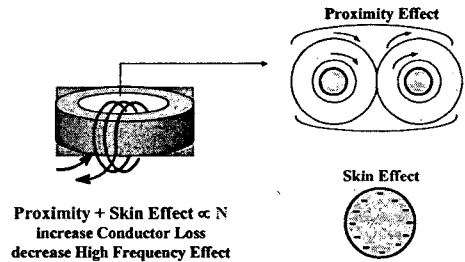


그림 4. 표피효과(skin effect)와 근접효과(proximity effect)

[참고문헌]

- [1] Flat Transformer Technology, L. L. James and K. K. Sum, internet materials, 2001
- [2] Flat Matrix Transformer, Edwrad Herbert, US Patent 4,665,357, 1987
- [3] SMPS 기술 현황, SMPS 기술 조사 위원회, 대한전기학회, 기술조사보고, 제11호, 1997
- [4] High Frequency Switching Power Supplier Theory and Design, George Chryssis, McGRAW HILL BOOK, 1984