

Flat Transformer를 이용한 100W급 On-Board Power Supply

황치면*, 송두익*, 조정구*, 정창용*, 홍승대**, 하태복**

*(주)그린파워, **(주)아남 인스트루먼트

100W On-Board Power Supply Using Flat Transformer

C. M. Hwang*, D. I. Song*, J. G. Cho*, C. Y. Jeung*, S. D. Hong**, T. B. Ha**

*Green Power Technology Co. Ltd., **ANAM Instrument Co. Ltd.

Abstract

High power density on-board power supply is implemented by using flat transformer.

In the high frequency switching converters, large leakage inductance increases the switching stress and duty cycle loss, which sometimes limits maximum switching frequency. The flat transformer is designed by using special core structure, which has very low profile and low temperature rise since the thermal loading is spread evenly over a larger area.

100W, 3.3V output on board supply is built and tested and 50.7W/inch³ power density is achieved.

1. 서론

전원회로의 동작주파수를 고주파화하면 자기소자 및 필터커패시터의 크기를 줄일 수 있으므로 원가절감 및 높은 전력밀도를 얻을 수 있으나 트랜스포머의 온도상승과 누설인덕턴스 성분이 가장 중요한 문제로 대두 되어 트랜스포머의 과열 및 트랜스포머의 누설인덕턴스 성분과 고주파 스위칭에 의해 효율이 감소되고 EMI 노이즈가 발생한다.

이상적인 트랜스포머에서는 손실이나 누설이 없이 완전히 커플링되어 1차와 2차권선의 자속이 모두 쇄교한다. 그러나 실제로는 2차권선은 1차 권선에서 발생한 모든 자속과 쇄교하지 않는다. 동선과 도체의 커플되지 않는 부분은 자체의 인덕턴스를 가지고 있으며 이러한 인덕터에 저장된 에너지는 주 전원회로에 결합되지 않는다. 이러한 인덕턴스를 누설인덕턴

스로 간주한다.

스위치가 턴오프하여 트랜스포머에 있던 에너지가 방출되며 누설인덕턴스에 저장되어 있던 에너지도 방출되며 노이즈로서 나타난다. 이러한 노이즈는 고주파의 ringing에 따라 높은 오버슈트로 나타나며 이것의 크기는 누설인덕턴스와 전류의 시간변화율과의 곱에 비례한다.

$$V_{spike} = L_{leakage} \frac{di}{dt} \quad (1)$$

트랜스포머의 또 다른 문제는 권선 상호간의 커패시턴스 성분이다. 트랜스포머의 권선이 다층으로 되어 있을 때 가장 밑에 있는 층과 맨위층 사이에는 상당한 전위차가 존재하여 두 층 사이에는 커패시터가 형성된다. 고주파에서 동작할 때 커패시터는 빠른 시간 클로 층·방전을 하며 이것은 손실로 나타나며 스위칭 주파수가 높을수록 층간의 커패시터에 의한 손실은 더욱 증가하게 된다.

도체내에서 자속이 변화할 때 기자력이 발생하여 도체내에는 와류전류가 흐르고 도체의 내부에는 ac저항이 크게 나타나 와류전류에 의해 도체의 내부로 전류가 흐르지 못하고 결국 전류가 표면에 모이는 표피효과가 나타난다.

표피효과는 도체에 흐르는 전류의 분배에 적용되므로 여러개의 도체가 근접해 있는 경우 각 도체의 전류분포에 영향을 주게된다. 이러한 영향을 근접효과라 한다. 이것은 하나이상의 도체에 대한 실질적인 표피효과이다. 다중권선 및 다층권선에서 이 효과는 더욱더 현저하게 나타난다.

기존의 트랜스포머를 이용하여 높은 입출력비를 갖는 컨버터를 사용하는 경우 1차측 권선이 다층으로 구성되어 누설인덕턴스, 표피효과, 근접효과, 권선 상호간의 커패시턴스 등이 커지는 단점들을 가진다. 그

리고 코아의 중심부에 hot-spot를 가지게 되어 전력 밀도를 높이코자 할 때 제한사항이 된다.

그러나, flat 트랜스포머는 1, 2차측 턴수비를 상당히 작게 할수 있기 때문에 누설인덕턴스가 상당히 줄어들고 컵플링도 높일 수 있다. 그러므로 누설 인덕턴스와 스위칭에 의한 손실이 기존의 트랜스포머와 비교하였을 때 상당히 줄어들고 발열 경로가 매우 짧아 발생하는 열은 넓은 면적으로 골고루 퍼지기 때문에 온도상승은 크게 줄어들어 전원회로의 고주파화와 전력밀도의 증가시키는데 상당한 이점이 있다.

2. Flat 트랜스포머

기존의 트랜스포머는 싱글코아에 다중권선으로 설계되어 있다. 이러한 권선법은 누설 인덕턴스가 커져서 상대적으로 손실이 커진다.

○ 종래의 트랜스포머(그림 1)

- 싱글코아를 사용한다.
- 다중 1차권선이다.
- 누설인덕턴스 크다.
- 고주파 응답에 느리다.
- 크기가 크며, 패키징화 하는데 어렵다.

이에 반해 flat 트랜스포머는 새로운 접근방법을 제시한다. 싱글코아에 다중권선을 사용하는 대신, flat 트랜스포머는 다중 코아에 싱글권선을 사용한다.

flat트랜스포머의 2차권선은 한 쌍의 금속판으로 구성되어 있으며 사각페라이트 코아의 내부 표면에 부착되어 있다(그림 3-a). 1차권선이 코아를 통과할 때 1차와 2차권선 사이의 컵플링은 매우 높아져 누설인덕턴스가 작아진다. 보통 턴당 4nH정도의 값이 생긴다.

그리고 flat 트랜스포머를 모듈로 구성하면 기존의 트랜스포머의 설계에서 구성할 수 없었던 조합으로 작은 외형 및 높은 전력밀도와 크게 향상된 열 특성을 얻을 수 있다(그림 3-b).

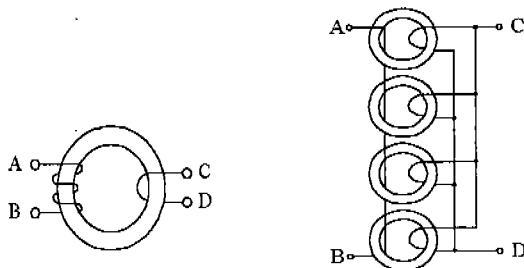


그림 1. 기존의 트랜스포머

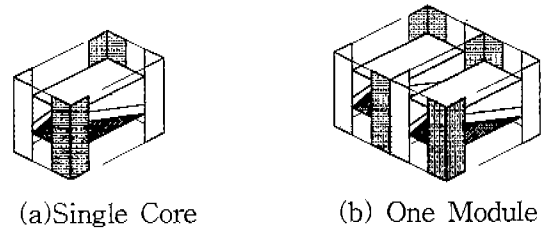


그림 3. Flat 트랜스포머의 외관

위 그림 3-(b)와 같이 하나의 flat 트랜스포머는 두 개의 4각형모형을 가지는 2차권선이 내장되어있는 페라이트 코아로 구성되어 있다. 각각의 코아를 통과하는 2차권선은 코아의 반대편 끝이 같은 권선의 끝을 가지는 한쌍의 동으로 구성되어 있다. 두 개의 코아가 연결되었을 때 2차권선은 두 개의 코아를 연속적으로 통과하게 된다. 2차권선은 페라이트 코아의 내부 표면에 부착되어 있으며, 2차권선에 의해 발생하는 열은 4각형의 페라이트 코아의 얇은 벽을 통하여 외부로 발열할 수 있어 기존의 트랜스포머에서 발생하는 hot spot를 없애주며 고주파에서도 높은 전류밀도로도 동작가능하다. Flat 트랜스포머의 턴수비(M×N : 1)는 모듈의 수(M)와 모듈을 통과하는 1차측 턴수(N)를 곱하여 결정되므로 1차측 턴수와 모듈의 수를 변화시켜 턴수비를 변화시킬수 있다. 그러나 flat 트랜스포머를 적용한 출력전압은 2차권선의 중간탭의 턴수에 의해 제한된다.

Flat 트랜스포머의 이점

1. 균등 전류분배

Flat 트랜스포머는 1턴으로 되어있는 2차권선이 병렬로 구성되어 있어 다른 소자를 사용하지 않아도 동등하게 전류가 분배된다. 이런 특징은 병렬로 구성되는 전원장치에 더욱 효과적으로 사용할 수 있는 이점이 있다.

2. 고전력밀도

소자의 크기가 작고, 뛰어난 열 발산을 가지는 flat 트랜스포머에 스위칭 소자 및 인덕터와 밀접하게 패키징화시킬수 있어 고밀도가 가능하게 된다.

3. 저가격

전체적인 트랜스포머 모듈은 비교적 저렴한 부품으로 구성되어 있으며, 하나의 부품으로 되어있어 설계가 단순하여 원가를 줄일 수 있다.

4. 높은 전류밀도

Flat 트랜스포머는 상당히 뛰어난 열 특성을 가지고 있기 때문에 매우 작은 패키지에서 높은 전류밀도를 얻을 수 있다.

5. 고효율

누설인덕턴스를 작게할수 있으므로 더 적은 손실을 스위칭 주파수를 높일 수 있어서 높은 효율을 얻을 수 있다. 이 flat 트랜스포머는 일반적으로 1차와 2차 권선 턴수비를 기존의 트랜스포머에 비해 더욱 적게 할수 있기 때문에 더 적은 권선손실이 발생되며, 코아의 기하학적인 형태도 코아의 손실을 줄일수 있다.

6. 주변소자의 원가절감

누설인덕턴스와 스위칭 손실이 작으므로 주위 소자에 가해지는 스트레스는 감소되어 더 작은 정격을 가진 소자를 사용할 수 있다.

7. 뛰어난 열 발산

Flat 트랜스포머는 체적에 비해 표면적이 크고 매우 짧은 열 통로를 가지고 있으며, 코아의 독특한 형태로 코아 손실이 적고 열 발산이 뛰어나 더 높은 자속밀도를 얻을수 있다.

8. 적은 누설 인덕턴스

권선간의 높은 커플링과 양 권선에 다중권선이 없고 주변소자와의 연결은 매우 짧게 유지할 수 있어 누설인덕턴스를 최소로 할 수 있다.

9. 단순한 구조

최소 권선으로 적은 부품을 사용하여, 전체적인 모듈은 하나의 부품으로 가능하다.

10. 뛰어난 고주파 특성

고주파 동작에 의한 단점은 스위칭 손실과 트랜스포머의 과열을 증가시킨다는 것이다. 그러나 flat 트랜스포머의 사용으로 이러한 문제들을 해결하며 고주파 트랜스포머의 설계에 경제적인 모듈을 제공한다.

11. 작은 외형

Flat 트랜스포머에서 사용되는 코아는 매우 작고 평평한 면으로 배열될 수 있다. 크기는 8mm에서 25mm까지 된다.

12. 높은 절연

Flat 트랜스포머는 동작에 아무런 영향을 주지 않고, 절연에 관계된 법령을 만족시키기 위해 필요로 하는 절연 무게와 층으로 절연되어져 있다.

$$L_{leakage} = \frac{0.4\pi N^2 A_e \mu}{L_e} \quad (2)$$

N = 턴수

Ae = Cross sectional core area(cm²)

u = Permeability of core in air

Le = Magnetic path length(cm)

위 식에서 코아를 통과하는 턴수 N은 지수항이다. 그래서 턴수에 비례하여 누설인덕턴스는 감소한다.

만약 두 개의 모듈이 연결되면, 턴수는 절반으로 줄어들게 된다. 예를들어 두 개의 모듈이 사용되면 누설인덕턴스는 1/2로 줄어들게 된다.

3. 실험 및 고찰

Flat 트랜스포머를 이용하여 제작, 실험한 100W급 on-board power supply의 사양은 다음과 같다.

- 입력전압 = 36~72Vdc
- 주파수 = 250kHz
- 출력전압 = 3.3V
- 출력전류 = 25A
- Full Size(mm³)=57.9×61×12.7

아래의 그림은 Flat 트랜스포머를 이용한 push-pull회로를 나타내고 있으며 기존의 push-pull 회로와는 출력필터의 위치가 (-)쪽에 있다는 것을 제외하고는 차이가 거의 없다.

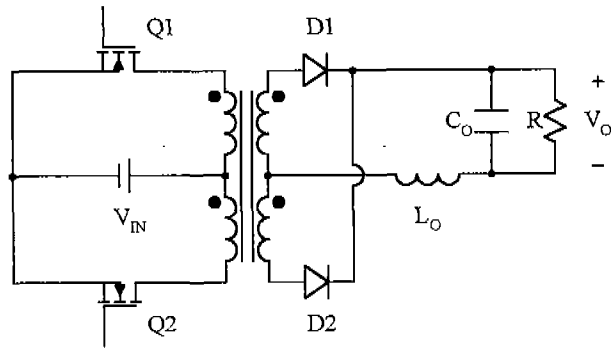


그림 4. 푸시-풀 컨버터

Flat 트랜스포머의 해석

Flat 트랜스포머를 이용한 턴수비는 트랜스포머를 통과하는 턴수와 사용되는 모듈의 수를 곱한값이 되므로 턴수비(n) = 6(6×1) : 1이 된다.

Flat트랜스포머의 1차측 인덕턴스=500uH, 2차측 인덕턴스=10uH의 값을 갖는다.

트랜스포머의 1차권선에 흐르는 전류는 효율을 80%정도로 하면 1차측 정격은 103W이므로 입력용량을 110W로 하면 1차측에 흐르는 최대전류는 3.05A가 된다. 종래의 트랜스포머에서는 1A당 500circular mils의 크기가 사용되지만, Flat 트랜스포머에서는 1A당 50circular mils정도면 되므로 최소 150circular mils가 필요하지만 이의 2배인 300circular mils를 사용하였다.

누설인덕턴스

누설인덕턴스는 모듈당 $4nH/turn^2$ 로 계산하면, 1차측에 6턴이 사용되었기 때문에 누설인덕턴스는 $6^2 \times 4 = 144nH$ 가 되지만 실제로는 $1.15\mu H$ 가 나왔다.

출력필터의 인덕터

인덕터에 필요로 하는 최소 인덕터는 식 (3)과 같다.

$$L_{min} = \frac{R_{max} T(1-D_L)}{2} \quad (3)$$

실제사용한 인덕터의 인덕턴스값은 $1.4\mu H$ 이다.

출력커패시터

출력리플전압은 다음과 같이 나타난다.

$$C = \frac{V_o T^2(1-D_L)}{8L\Delta V_o} = \frac{T^2(1-D_L)}{8L} \cdot \frac{V_o}{\Delta V_o} \quad (4)$$

리플전압을 $1mV$ 이하로 제한하고자 한다면 C의 최소값은 $854\mu F$ 가 된다. ESR등을 고려하여 $1200\mu F$ 를 사용하였다. 아래의 파형은 스위치 양단 전압과 전류 파형을 나타내고 있다.

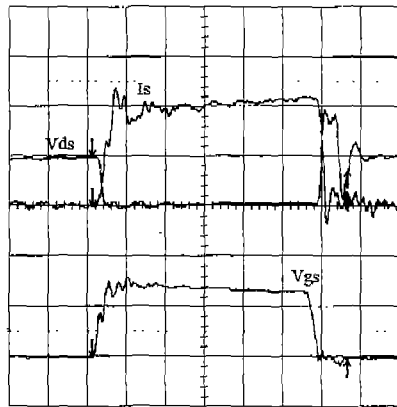


그림 5. 정격입력 중부할일때의 스위치 파형 (Vds=50V/div, Is=2A/div)

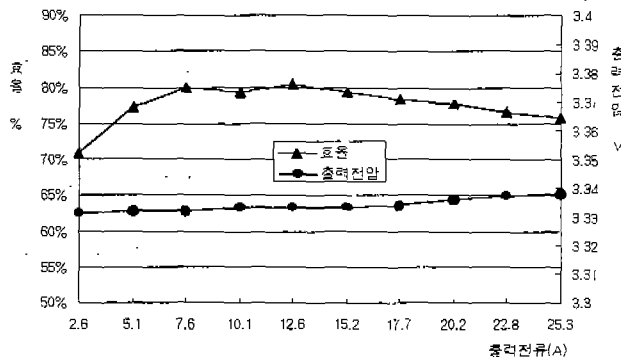


그림 6. 부하전류에 대한 효율과 출력전압

6. 결론

Flat 트랜스포머를 이용한 $100W$ 급 on-board supply를 설계, 제작, 실험하였다.

Flat 트랜스포머를 사용함으로써 트랜스포머의 1차측 턴수가 작아 근접효과가 크게 줄어들었으며, 권선공간이 문제되지 않아 절연의 문제도 두드러지지 않았다. 그리고 열 발산이 모듈 전체로 분산되어 온도 상승이 적었다(전부하에서 트랜스포머의 온도 $\approx 75^\circ C$). 누설인덕턴스도 상당히 작음을 알았으며 고주파 응용에 매우 적합함을 알아보았다. 제작된 on-board supply의 전력밀도는 $50.7 W/inch^3$ 로 선진국의 Lamda나 Vikor사의 제품과 거의 성능이 비슷하게 나왔다.

Flat 트랜스포머는 모듈로 구성되어 있기 때문에 모듈로 구성되는 전원에는 적합하다. 이 flat 트랜스포머의 주된 특징은 첫째 모듈화가 가능하며, 둘째 전류밀도가 높으며, 셋째 크기가 작으며, 넷째 분산된 열발산이다.

참고 문헌

- [1] J.L Lau, K.K Sum, "Flat Transformer Power Converter for Low Voltage, High Current Application",
- [2] J. L. Lau, E. Herbert, "Techniques For Overcoming Leakage Inductance And Heat Dissipation In High Frequency Transformer Design In Today's Power Converters", Power Conversion, June 1997 Proceedings.
- [3] E. Herbert, "Design and Application of Matrix Transformers and Symmetrical Converters", Fifth International High Frequency Power Conversion Conference '90 Santa Clara, California, MAY 11, 1990.
- [4] J. Lau, K. K. Sum, K. Baker, "Transformer-Inductor Module For Half Bridge, Full Bridge and Push Pull Circuits", Flat Transformer Technology Corp. Application Note AN01.