

코어 없는 PCB 변압기를 이용한 DC-DC 컨버터

황 선 민(黃善敏)[§], 안 태 영(安泰榮)[§], 최 병 조(崔柄朝)^{*}

[§]:충주대학교 첨단공학부, ^{*}:경북대학교 전자·전기공학부

전화 : 0431-229-8439

DC-DC Converter Using a Coreless Printed Circuit Board (PCB) Transformer

Sun Min Hwang[§], Tae Young Ahn[§], Byung Cho Choi^{*}

[§]:Chongju University, ^{*}:Kyungpook National Univ.

E-mail : smhwang@chongju.ac.kr

Abstract

This paper describes the modeling and experimental results of coreless printed circuit board (PCB) based transformer that can be used for power conversion at high frequency operation. The principle of using coreless PCB based transformer in 2MHz, 10W class ZVS Flyback DC-DC converter has been successfully demonstrated. The maximum power conversion efficiency is 79%. Even for high operating frequency, an efficiency greater than 70% can be obtained with under 1% regulation error.

I. 서 론

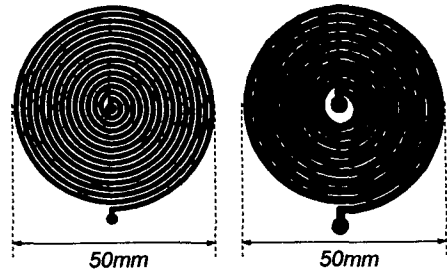
최근 휴대형 통신 기기 및 관련 기기의 급속한 발전과 함께 안정된 전원을 공급하는 스위칭 전원장치에서도 시장 규모가 점차 확대되고 있으며, 동시에 제품의 소형화, 경량화가 강하게 요구되고 있다. 특히 전원장치의 핵심이 되고 있는 DC-DC 컨버터는 소형·경량화와 함께 온-보드형 전원장치 등에서 요구되고 있는 극박화(ultra low profile)는 전체 시스템의 밀도를 향상시키기 때문에 중요한 설계 목표 중의 하나가 되고 있다. 그러나 DC-DC 컨버터에서는 에너지를 변환시키는 과정에서 변압기 및 인덕터와 같은 코어를 사용한

권선형 소자를 필수적으로 이용하고 있기 때문에 장치의 높이가 제한되고, 제품의 원가에 많은 영향을 미친다. 현재, 이러한 문제점들에 대한 해결 방법은 크게 두 가지가 있다. 첫째는 소용량인 경우, 집적회로의 박막(thin film) 공정을 이용하여 전력변환회로 구성에서 필요한 인덕터 및 변압기 등을 기타 소자와 함께 한 개의 IC에 집적하는 것이다[1, 2]. 이 경우, 인덕터와 변압기에서 필요한 권선의 선 폭과 두께, 사용할 수 있는 코어의 재질이 한정되기 때문에 적용시킬 수 있는 회로의 용량이 극히 한정된다는 단점이 있다. 둘째로는 인쇄회로기판(PCB)의 패턴 등을 이용하여 권선을 하고, 권선 주위에 홀을 구성한 후, 기판의 양쪽에서 한 쌍의 페라이트 코어로 홀에 끼워서 인덕터와 변압기를 구성하는 것이다[3]. 이 경우에서도 페라이트 코어를 사용하기 때문에 제품의 두께가 코어에 의해 제약 받는 단점이 있다. 한편 문헌[4] 등에서는 코어를 사용하지 않는 PCB 변압기를 이용하여 MOSFET 및 IGBT용 게이트 드라이버에 적용시킨 예가 있었으나, 스위칭 전원장치와 같은 전력변환 장치의 변압기에 적용한 예는 아직 보고된 바 없다.

본 논문은 한정된 용도에서만 적용되었던 기존의 PCB 변압기를 고주파 스위칭 전원장치에 적용시키고, 그 실험 결과에 대해 보고한 것이다. 회로방식은 비교적 회로구성이 간단하고, 고주파 스위칭 동작에 적합한 영전압 스위칭(ZVS) Flyback DC-DC 컨버터로 구성하였으며, 스위칭 주파수 및 용량은 2MHz, 10W이다.

II. 코어 없는 PCB 변압기

그림 1에는 본 논문에서 사용한 양면의 인쇄회로기판(PCB)에 패턴을 이용하여 1차와 2차의 권선을 갖는 시제품 PCB 변압기의 구조를 보여주고 있다. 1차 측 권선은 양면 기판의 윗면에, 2차 측은 기판의 아래 면에 구성하였다. 권선 구조는 지름이 50mm인 나선형(spiral)이며, 권선비는 14:10, 사용된 PCB의 두께 및 동박 두께는 각각 1.6mm, 70 μ m (2.0oz/ft²) 이다.



(a) Primary side (top) (b) Secondary side (bottom)

그림 1의 PCB 변압기를 효과적으로 이용하고 분석하기 위해서 본 논문에서는 그림 2와 같은 PCB 변압기의 등가회로를 사용하였고, 측정된 소자의 값을 병행하여 표기하였다. 여기서 R_1, R_2 는 1차 및 2차 권선 저항을 나타내고 있으며, L_1, L_2 는 자화 인덕턴스를, Ll_1, Ll_2 는 누설 인덕턴스를 나타내고 있다. 그림 2의 등가회로 및 측정값으로부터, 코어를 사용하지 않는 PCB 변압기의 권선저항은 제한된 동박의 두께 때문에 기존의 권선형 변압기에 비해 크다는 것을 알 수 있고, 투자율이 낮기 때문에 자화 인덕턴스의 절대 크기가 작으며, 누설 인덕턴스가 커서 결합율이 낮다는 특징이 있다. 이러한 PCB 변압기는 기존의 전원용 회로방식의 변압기에서 요구하는 높은 자화 인덕턴스, 낮은 누설 인덕턴스의 특성과 일치하지 않는다. 또한 자화 인덕턴스가 매우 작기 때문에 동작 주파수를 높이지 않으면, 권선에 흐르는 전류의 실효값이 커지게 되고, 따라서 권선 손실이 증가하여 효율적인 동작이 어렵게 된다.

그림 1. 시제품 PCB 변압기의 구조

Fig. 1 Structure of prototype PCB transformer

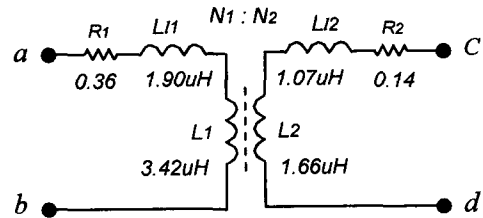


그림 2. PCB 변압기의 등가회로

Fig. 2 Equivalent circuit of PCB transformer

본 논문에서는 PCB 변압기를 효율적으로 이용하기 위해서 높은 스위칭 주파수에서도 동작이 가능한 ZVS (Zero voltage switching) Flyback 컨버터를 기본 회로 방식으로 채택하였다. 이 회로는 절연형 DC-DC 컨버터의 기본회로 중, 회로구성 소자 수가 가장 적고, 한 개의 변압기(또는 공유 인덕터) 만을 사용하기 때문에 회로 구성이 간단해지는 특징이 있다. 또한 변압기의 누설 인덕턴스와 스위치의 기생 커패시턴스를 공진 요소에 포함시킬 수 있기 때문에 고주파 스위칭 동작에 적합한 회로로 알려져 있다.

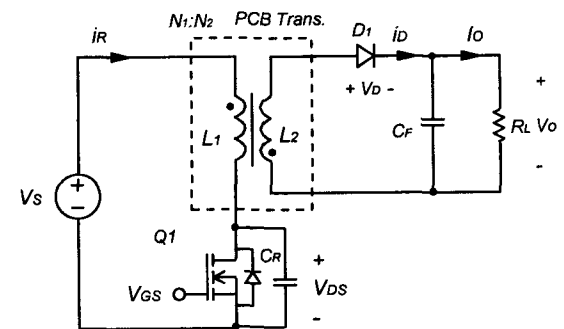


그림 3. PCB 변압기를 이용한 ZVS Flyback 컨버터

Fig. 3 ZVS Flyback converter using a PCB Transformer

그림 3에 PCB 변압기를 이용한 ZVS Flyback DC-DC 컨버터의 기본회로가 나타나 있다. 그림의 회로에서 변압기는 PCB 변압기를 사용하였고, ZVS를 위한 공진 소자 중, 공진 인덕터는 외부에 별도로 추가하지 않고, 변압기 내부의 누설 인덕터만으로 구성하였다.

III. 실험결과

그림 3의 ZVS Flyback 컨버터의 제어는 공진형 컨버터에서 일반적으로 이용하고 있는 스위칭 주파수 가변 방식을 채택하였다. 이때 스위칭 주파수는 최대 2MHz, 입력전압 범위는 22-26V, 출력전압은 10V, 최대전류는

1A, 최대출력을 10W급으로 설계하였다. 우선 그림 2에서 얻어진 PCB 변압기의 등가회로에 대한 타당성을 검토하기 위해서 등가모델을 이용한 DC-DC 컨버터의 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 4에 시뮬레이션 결과 파형을 나타내었다. 파형의 위에서부터, 스위치 전압, 게이트 전압, 변압기의 1차 측 전류를 나타내고 있다. 그림 4의 전압과 전류의 파형으로부터 회로의 주요 파형이 전형적인 영전압 스위칭 파형과 일치하고 있고, 또한 영전압 스위칭에 의한 스위칭 손실이 저감된다는 것을 알 수 있다.

그림 5에는 PCB 변압기를 이용한 컨버터의 실험 파형이 나타나 있다. 그림 4에서 언급한 바와 같이, 그림 5의 파형은 영전압 스위칭 특성을 잘 나타내고 있을 뿐만 아니라, 시뮬레이션 파형과 잘 일치한다는 것을 알 수 있으며, 따라서 그림 2에서 얻어진 PCB 변압기의 등가회로 및 측정값이 타당하다는 것을 알 수 있다. 한편 변압기 1차 측의 자화 인덕턴스가 상당히 작기 때문에 전류의 파형이 기존의 회로에서 알려져 있던 것과 달리, 스위치가 턴 오프 되어 있는 상태에서 일정하게 유지되지 않고, 계속 증가하고 있는 것을 알 수 있다.

그림 6에는 컨버터의 출력전압이 10V로 일정한 상태에서, 부하전류에 대한 스위치의 전압 스트레스를 측정하여 나타내었다. 그림으로부터 부하전류와 전압스트레스가 비례하고 있음을 알 수 있고, 입력전압이 높을수록 높아진다는 것을 알 수 있다. 특히 스위치의 전압 스트레스가 기존의 ZVS 방식에 비해서, 다소 높다는 것을 알 수 있으며, 이것은 위에서 언급한 것과 같이 변압기의 자화 인덕턴스가 작기 때문에 1차 측 전류가 증가하여, 전류의 최대 값이 커지기 때문이다.

그림 7에는 출력전압이 일정한 상태에서 부하전류에 대한 스위칭 주파수를 나타낸 것이다. 그림에서 점선은 각 입력전압에 대한 실험 값이며, 사선의 실선은 같은 조건에서 동작시킨 기존의 권선형 변압기를 이용한 ZVS Flyback 컨버터에 대한 이론 값이다. 또한 영전압 스위칭이 가능한 동작영역을 실선으로 나타내었다. 그림 7로부터 실험회로의 스위칭 주파수는 0.7MHz에서 최대 1.7MHz로 제어되고 있다는 것과, PCB 변압기를 이용한 컨버터가 기존의 컨버터에 비해 스위칭 주파수의 변화 폭은 유사하지만, 영전압 스위칭이 가능한 동작영역이 확대된다는 것을 알 수 있다. 끝으로 실험회로에 대한 전력변환 효율을 그림 8에 나타내었다. 그림으로부터 전력변환 효율은 정상동작

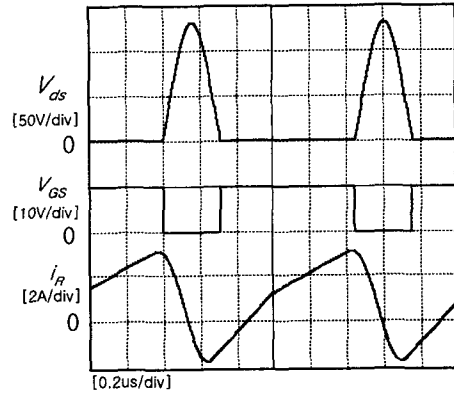


그림 4. 시뮬레이션 파형 ($V_i=24V$, $V_o=10V$, $I_o=1A$)
Fig. 4 Simulation waveforms

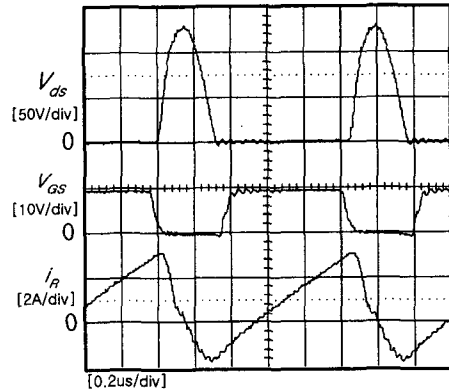


그림 5. 실험 파형 ($V_i=24V$, $V_o=10V$, $I_o=1A$)
Fig. 5 Experimental waveforms

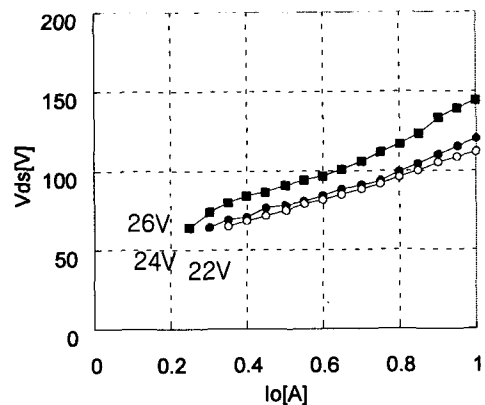


그림 6. 스위치의 전압 스트레스
Fig. 6 Voltage stress of switch

범위 내에서 70% 이상, 최대 79%로 측정되었고, 이때 출력전압은 부하변동에 대해 약 1% 이내로 안정되었다. 일반적으로 최대효율은 최대 부하전류에서 얻어지지만, 실험회로에서는 최대 부하전류에서 효율이 다소 낮아진다는 것을 알 수 있다. 이것은, 본 논문의 실험 회로에서 사용된 PCB 변압기의 권선저항이 크고, 따라서 부하전류가 증가하면, 1차 측 전류의 실효값이 비례하여 커지기 때문이라고 판단된다.

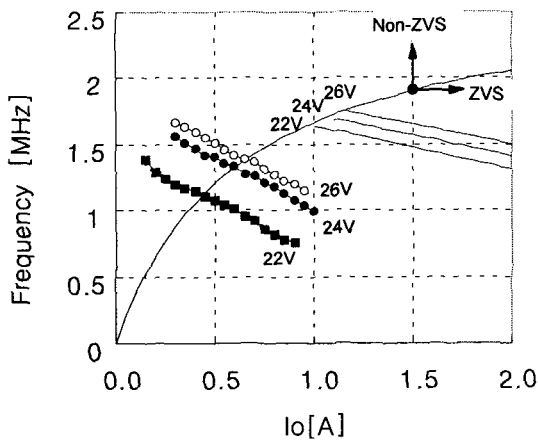


그림 7. 부하전류와 스위칭 주파수
Fig. 7 Load current and switching frequency

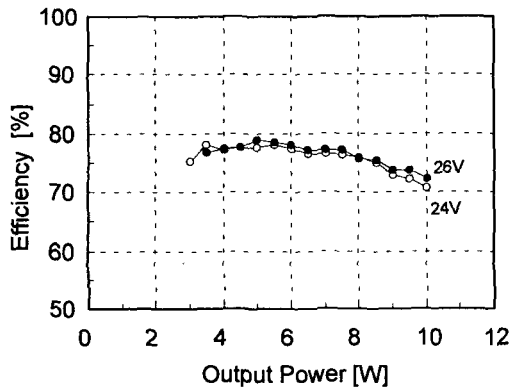


그림 8. 전력변환효율
Fig. 8 Power conversion efficiency

IV. 결 론

본 논문에서는 한정된 용도에서만 적용되었던 기존의 PCB 변압기를 고주파 스위칭 전원장치에 적용시키고,

그 실험 결과에 대해 보고한 것이다. 회로방식은 비교적 회로구성이 간단하고, 고주파 스위칭 동작에 적합한 ZVS Flyback DC-DC 컨버터로 구성하였으며, 스위칭 주파수 및 용량은 2MHz, 10W이었다. 본 논문에서는 우선, PCB 변압기의 등가회로를 이용하여 시뮬레이션을 하였고, 그 결과 실험 파형과 잘 일치한다는 것을 알 수 있었으며, 따라서 등가회로 및 측정값이 타당하다는 것을 밝혔다. 또한 실험 결과, 본 논문의 회로가 기존의 회로에 비해 전압 스트레스는 증가하였지만, 영전압 동작 범위는 확대된다는 것을 알 수 있었다. 끝으로, 본 논문의 회로에서 측정된 전력변환 효율은 70% 이상, 최대 79%를 나타내었다. 이상의 결과로부터 본 논문에서 검토한 코어 없는 PCB 변압기가 절연형 전원장치 등의 기본회로에 적용될 수 있다는 것을 실험결과를 통해 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] A. M. Niknejad, etc., "Analysis, design, and optimization of spiral inductors and transformers for Si RF IC's", IEEE Journal of Solid-state circuits, vol. 33, no. 10., pp. 1470-1481, October. 1998.
- [2] H. J. Ryu, etc., "Characteristics of twin spiral type thin film inductor with Fe-based nano crystalline core", IEEE Trans. Magnetics, vol. 35, no. 5., pp. 3568-3570, September. 1999.
- [3] J. M. Lopera, etc., "Design of integrated magnetic elements using thick-film technology", IEEE Trans. Power electron., vol. 14, no. 3., pp. 408-413, May. 1999.
- [4] S. C. Tang, etc., "Coreless printed circuit board (PCB) transformers with multiple secondary windings for complementary gate drive circuits", IEEE Trans. Power electron., vol. 14, no. 3., pp. 431-437, May. 1999.

본 연구는 과학기술부·한국과학재단 지정 청주대학교 정보통신연구센터의 지원에 의한 것입니다.