

정전류 기능이 부가된 고전력 밀도의 통신기용 개방형 전원장치

연제선, 안태영
청주대학교 정보통신공학부

Open Frame type Power Module for Telecommunication of High Power Density

Je-Sun Yon, Tae-Young Ahn
School of Information and Communication Engineering, Cheongju University

Abstract - This is a thesis that 100W class open frame type power module of a quarter-brick size appropriate for telecommunication is reported. The input voltage is established between 36 and 75 in range in order for power module to be utilized for the telecommunication, and output were set at 3.3V and 30A. A number of parts used for transformer, inductor, and hit sink are composed of PCB in order for DC-DC converter to be lowered below 8 mm. A constant current control circuit was annexed to the system as well as basic protection prototypes such as over-voltage, over-current, and over-temperature were well considered to enhance more credibility, and were tested. As a result, high circuit performance and credibility turned out to be significant.

1. 서 론

스위칭 전원장치는 고효율이면서 소형화가 가능하기 때문에 산업 전반에 널리 사용되고 있는 추세이다. 또한 전원장치의 전력 변환 효율은 회로의 내부 손실과 밀접한 관계가 있고, 손실이 증가함에 따라서 전원장치의 발열량이 비례하기 때문에 방열 설계에서 중요한 평가기준이 되기도 한다. 따라서 전원장치의 효율을 높이게 되면, 장치의 신뢰성이 높아지고, 운전 수명이 길어지며, 방열을 효율적으로 운용할 수 있기 때문에 제품의 외형을 소형화 시킬 수 있다.[1-3]

본 논문에서는 100W급 동기정류 방식의 온보드형 능동 클램프형 포워드 DC-DC 컨버터의 개방형 전원 장치를 실험 회로로 구성하였고, 실험 회로의 특성과 효율에 관한 연구를 수행하였다. 전원장치는 통신기용으로 사용하기 위해서 입력전압을 36~75V 범위로 설계하였으며 출력은 3.3V, 100W급으로 하였다. 또한 전력용 반도체의 스위칭 시 발생하는 스위칭 손실과 출력 노이즈를 저감시키기 위해 현재 전원장치 분야에서 활발히 연구가 진행되고 있는 소프트 스위칭 방식을 채택하였으며, 실험 회로의 소형화(Quarter-Brick Size)와 모듈의 높이를 8mm 이하로 낮추기 위해서 변압기, 인더터, 방열판 등 큰 소자는 PCB를 이용하여 회로에 일체시킨 형태로 구성하였다. 실험 회로의 성능과 신뢰성을 고려하여 과전압, 과전류, 과온도 등의 기본적인 보호회로 외에도 실험 회로의 신뢰성을 더욱 향상시키기 위하여 정전류 보호 회로를 추가, 구성하였다.

2. 능동 클램프형 포워드 컨버터

그림 1은 동기 정류기를 갖는 능동 클램프형 포워드 DC-DC 컨버터의 기본 회로를 나타내었다.[4, 5] 그림 1의 기본회로가 일정한 스위칭 주파수 f_s 와 일정한 시비

율 D에서 동작하며, 각 소자가 이상적인 특성을 갖는다고 가정하면, 그림 2와 같은 등가회로를 구성할 수 있다. 그림 2의 등가회로가 정상상태에서 동작하는 경우, 각 스위치 Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 의 동작 상태에 따른 상태별 등가회로를 그림 3에 나타내었다. 그림 4에서는 각 상태에 대한 이상적인 동작 과정을 나타내었다. 그림 3의 등가회로와 그림 4의 이론 과정으로부터 회로의 동작은 두 가지 상태로 다음과 같이 간단하게 설명된다.

그림 3 (a)의 등가회로에서 주 스위치 Q_1 이 제어 신호에 의해서 도통되면 변압기 1차 측 전압은 입력 전압 V_{IN} 과 같아지고, 변압기 권선비 N에 의해서 2차 측 전압이 유기되면서 Q_3 의 게이트-소스에 (+)의 전압이 인가되므로 Q_3 는 ON 상태가 되고, Q_4 는 역 바이어스 이므로 OFF 상태가 된다. 그림 3 (b)의 등가회로에서 보조 스위치 Q_2 가 제어 신호에 의해서 턴 온 되고, 변압기 1차 측 전압이 클램프 전압 V_{CL} 과 같아지면서 변압기 권선비 N에 의해서 동기 정류기 Q_4 는 ON 상태가 되고, Q_3 는 OFF 상태가 된다.

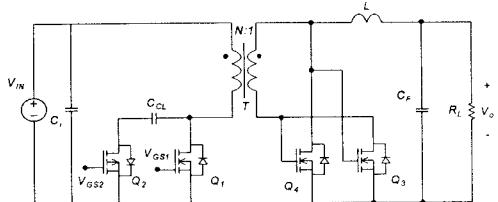


그림 1. 능동 클램프 포워드 DC-DC 컨버터의 기본 회로

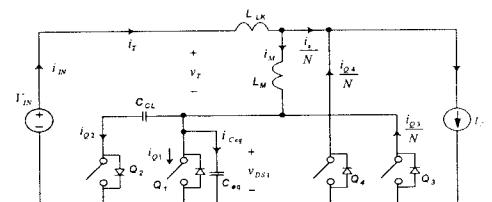
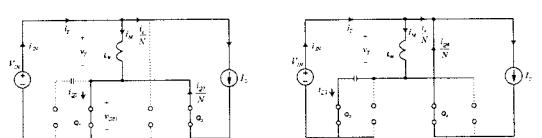


그림 2. 등가 회로



a) Q1, ON 상태

b) Q2, ON 상태

그림 3. 상태별 등가 회로

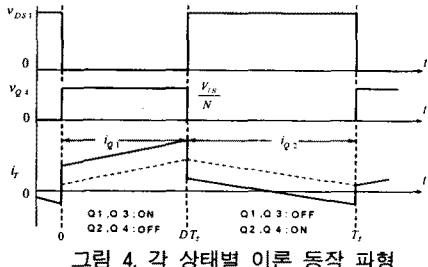


그림 4. 각 상태별 이론 동작 파형

3. 고전력 밀도를 갖는 컨버터의 설계

본 논문에서는 통신기용 전원장치에 적합한 쿼터 브릭(Quarter-brick) 사이즈의 100W급 개방형 온보드 전원장치를 구성하였다. DC-DC 컨버터 모듈의 높이를 0.315inch(8mm) 이하로 최소화하기 위해서 변압기, 인덕터, 방열판 등의 부피가 큰 소자는 8층의 다층 인쇄회로에 일체화 시키는, 소위 다층 PCB로 제작하여 회로에 일체시킨 형태로 구성하였다. 고효율, 소형, 경량, 초박형의 전원장치를 구현하기 위해서는 저손실의 다층 PCB 제조 기술을 이용해야하며, 본 논문에서는 PCB의 외부를 2oz, 내부는 3oz의 다층 PCB 공정을 이용, 최적의 전류밀도를 낼 수 있는 변압기와 인덕터를 설계하여 고효율 전원회로를 구현하였다.

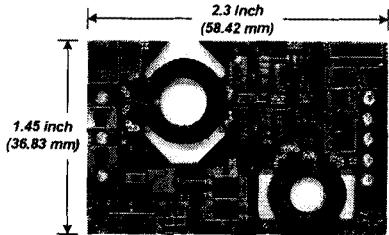


그림 5. PCB의 외형 규격

그림 5는 본 논문의 시제품 제작에서 사용된 PCB의 외형 규격을 나타낸 것이다. PCB의 내부에 변압기와 인덕터를 구성하기 위한 홀을 미리 만들어두게 하였으며 제품 구성 시에 코어를 끼워서 간단히 구성 할 수 있도록 하였다. 그림 6은 Orcad을 이용한 다층 PCB의 Layout 도면을 나타낸 그림이다. 변압기와 인덕터의 권선은 큰 자화 인덕턴스를 얻을 수 있는 나선형 권선 방법 중에 원형 패턴을 이용하였으며, 최대 전류가 흐를 때 PCB 권선에 흐르는 전류의 밀도를 계산하여 최적의 전류밀도를 낼 수 있는 변압기와 인덕터로 구성하였다.



그림 6. 다층 PCB Layout 도면

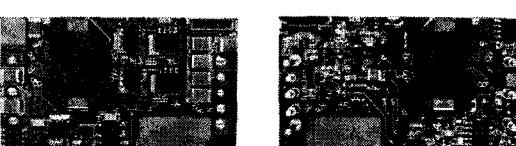


그림 7. 능동 클램프 포워드 DC-DC 컨버터

본 논문에서는 정해진 전원장치의 체적에서 일정한 전력손실을 감당해야하기 때문에 일정한 신뢰성을 확보하기 위해서는 효율적인 열처리가 매우 중요하다. 효과적인 방열효과를 얻기 위해서 외층과 내층은 여러 개의 비아를 통하여 연결되어 있으며, 전력손실이 집중되는 반도체 스위치는 PCB의 랜드 사이즈를 극대화 시켜서 방열효과를 얻을 수 있도록 하였다. 입력과 출력 단자는 지그로 구성하였는데 이는 컨버터의 원활한 테스트와 다른 기기의 시스템 보드에 직접 실장 할 수 있는 장점이 있다. 또한 회로에 적용 될 각 소자의 용량 및 내압의 선정을 위해 참고 문헌의 능동 클램프 포워드 컨버터의 기본 설계 식을 이용하였다. 그림 7은 100W급 초박형 능동 클램프 포워드 DC-DC 컨버터의 실험을 위해 제작된 쿼터 브릭(Quarter-brick) 사이즈의 완성된 컨버터의 외형을 나타내었다.

4. 정전류 제어

그림 8에서는 본 논문에서 설계한 정전류 보호 기능이 추가된 능동 클램프형 포워드 DC-DC 컨버터의 구성을 볼록 다이어그램으로 표현한 것이다. 일반적으로 통신기 기용 전원장치는 높은 신뢰성을 유지하기 위해서 기본적으로 요구되는 특성이 존재하는데 그 중에서도 비정상적으로 운전되는 경우 전원장치와 부하를 보호하기 위한 보호회로가 필요하다. 그림에서는 저 입력전압 및 과 입력전압 보호회로, 과온도 보호회로, 과전류 보호회로 그리고 외부 스위치의 신호에 의해 전원장치의 기능을 제어하는 리모트 제어회로 등으로 구성 되어있다. 또한 출력 측에는 과전압 보호회로, 정전류 보호회로 그리고 단락 보호회로 등이 구성 되어있다. 보호회로의 동작 상태는 크게 시스템이 단락되는 동작, 시스템이 온/오프를 반복하는 Hiccup 동작 그리고 전류를 제한하는 정진류 동작 상태 등 세 가지로 구분된다. 이러한 다양한 보호회로를 추가함으로서 본 논문에서 설계된 전원장치의 신뢰성을 향상시키는 역할을 한다.

본 논문에서 설계된 통신기기용 전원장치는 출력전압이 3.3V, 출력전류가 30A, 100W급의 대표적인 저전압 대전류용 전원중의 하나이다. 일반적으로 정밀한 정전류 특성을 갖는 전원장치를 설계하기 위해서는 출력전류를 정확하게 검출할 수 있는 전류검출회로가 필요하며 가격과 높이 등을 고려해 일반적으로 낮은 값의 저항이 이용되고 있다. 본 논문에서 검토하고 있는 대전류용 전원인 경우에는 저항을 사용하는 경우 저항에서 전력손실이 과도하게 발생되고 효율이 저하되는 문제가 있다.

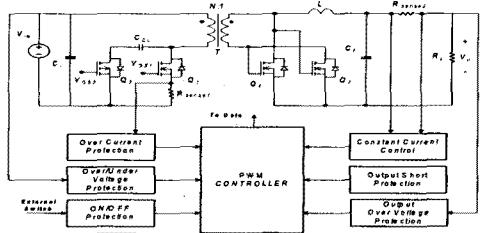


그림 8. 정전류 기능을 부가한 컨버터의 구성

저 손실을 갖는 정밀한 전류검출 기능을 컨버터가 수행하기 위해서는 검출 저항 값의 결정이 매우 중요하며, 정밀한 정전류 검출을 위해서는 수 mΩ 이하의 매우 작은 값의 전류 검출 저항이 요구된다. 본 논문에서는 PCB 패턴을 이용하여 전원의 출력 단에 전류검출용 저항을 구성하였다. PCB를 이용한 전류검출용 저항은 정밀한 계산이 가능하고 박형의 제조가 가능하며, 다층을 사용하는 경우 내층에 설치 할 수 있다는 장점이 있다. 전류검출용 저항은 그림 9와 같이 PCB 동학의 면적을 계산하여 만-

들 수가 있고 계산식은 크게 세 가지로 나뉜다.

첫 번째는 동판의 저항 값의 계산이며, 식은 다음과 같다.

$$P_s(T) = \frac{P[1 + \alpha(T_A + T_{RISE} - 20)]}{h} \text{ (m}\Omega/\text{mils}^2\text{)} \quad (1)$$

식 (1)에서 $P_s(T)$ 는 상승하는 온도에서 동판의 저항 값 ($\text{m}\Omega/\square$)이고, P 는 20°C 의 온도에서 동박의 고유저항 ($\Omega \cdot \mu\text{m}$)이다. 그리고 α 는 동박 고유저항의 온도 계수 (per $^\circ\text{C}$), T_A 는 주변 온도 ($^\circ\text{C}$), T_{RISE} 는 허용 온도 상승 ($^\circ\text{C}$), h 는 동박의 두께 (μm)이다.

두 번째는 동박의 세로 길이를 계산하는 것이며, 세 번째는 동박의 가로 길이를 계산 하는 것이다. 동박의 세로와 가로의 길이를 구하는 식은 다음과 같다.

$$W = \frac{1000 \times I_{MAX}}{\sqrt{T_{RISE} \div \theta_{SA}}} \text{ (mils)} \quad (2)$$

$$l = \frac{W \times R}{P_s(T)} \text{ (mils)} \quad (3)$$

식 (2)에서 W 는 전류검출 저항의 세로 길이 값(mils)이고, θ_{SA} 는 동박의 면적에 대한 온도 저항이다. 식 (3)에서 l 은 저항의 가로 길이(mils)이고, R 은 만들고자 하는 회로 저항 값(Ω)이다.

그림 9는 PCB를 이용한 전류 검출용 저항의 도면을 나타낸 그림이며, 이는 위에서 제안한 식(1), (2) 그리고 식(3)을 적용하여 전류 검출용 저항을 PCB로 설계할 수 있다.

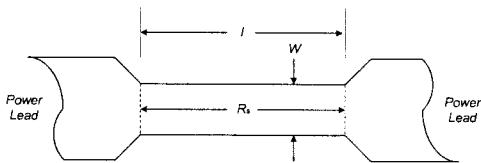


그림 9. PCB를 이용한 전류 검출용 저항

5. 실험 결과

본 논문에 대한 평가를 위해서 100W급 동기 정류 방식의 능동 클램프형 포워드 컨버터를 실험 회로를 구성하였고, 표 1에서는 실험용 컨버터의 설계 사양을 나타내었다.

표 1. 실험 회로의 사양

Parameters	Name	Value	Unit
Input voltage range	V_i	36-75	V
Output voltage	V_o	3.3	V
Output current	I_o	30	A
Maximum output power	P_o	100	W
Switching frequency	f_s	320	kHz

본 논문에서 제작된 회로의 입력 전압은 통신용 전원

장치에 적합한 36-48-75V 범위로 설계하였으며 출력은 3.3V, 30A로 하였다. 회로에서 주 스위치는 200V, 4A의 정격인 Vishay Siliconix사의 Si4490DY를 사용하였고, 보조 스위치는 150V, 2.2A의 정격인 IRF6618을 사용하였다. 동기 정류기는 30V, 23A의 정격인 Si4430DY 2개를 각각 병렬로 구성하였으며, 따라서 총 4개의 FET를 동기 정류용 소자로 사용하였다. 또한 변압기는 TDK사의 PC40 재질의 RM8 코어를, 인덕터는 ISU사의 Ferrite 코어인 ER코어를 사용하였다. 변압기의 권선비 N은 6:1이었으며, 인덕터 권선수는 2턴으로 하였다. 실험 회로의 성능과 신뢰성을 고려하여 과전류, 과온도 등의 여러 가지 보호 회로를 추가 구성하였으며, 실험 회로의 신뢰성을 더욱 향상시키기 위하여 정전류 보호 회로를 추가, 구성하여 실험하였다. 그림 10은 정상 상태에서의 주스위치와 보조 스위치의 게이트-소스 와 드레인-소스 파형을 나타낸 것이며, 보조스위치로 P-채널 FET를 사용했기 때문에 주스위치와 보조스위치의 게이트 파형이 동상으로 나타

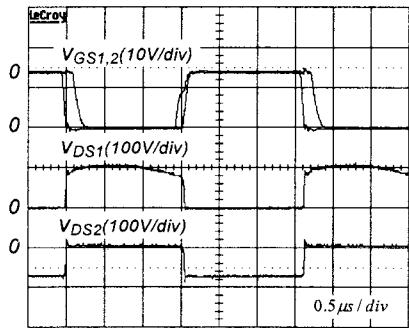


그림 10. 정상 상태에서의 스위치 파형

나는 것을 볼 수 있다. 또한 두 개의 스위치가 동시에 온 되는 것을 방지하고, 영 전압 스위칭이 가능하도록 데드타임이 설정 되어 있는 것을 볼 수 있다. 그림 11은 최대 출력 부하에서 변압기에 흐르는 전류 파형을 나타낸 그림이며, 주스위치의 드레인-소스 전압이 0으로 떨어진 후 변압기 1차 측에 흐르는 전류가 상승됨으로서 영 전압 스위칭이 되는 것을 확인 할 수가 있다. 그림 12는 정전류 기능이 동작했을 때 주스위치와 보조스위치의 게이트-소스와 드레인-소스 파형을 나타낸 것이며, 정전류 기능이 동작함으로서 스위치의 게이트-소스와 드레인-소스 파형의 시비율과 전압이 변화되는 것을 볼 수 있다. 그림 13은 컨버터가 0A와 25A에서 정상

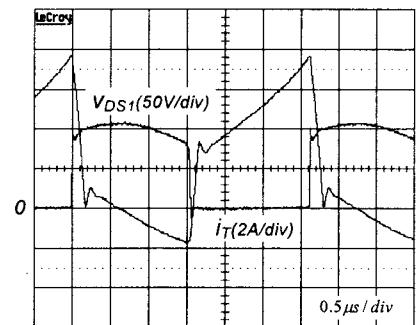


그림 11. 변압기의 전류 파형과 주스위치의 전압 파형

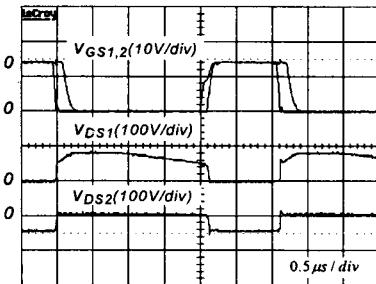
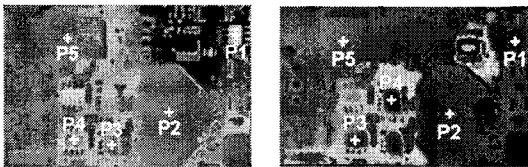


그림 12. 정전류 상태에서 동작 파형



Part Name	Point	Temp. (°C)	Part Name	Point	Temp. (°C)
IRF6618	P1	51.09	IRF6618	P1	61.99
Trans	P2	40.97	Trans	P2	57.98
Si4430	P3	40.10	Si4430	P3	89.83
Si4430	P4	40.01	Si4430	P4	92.85
Inductor	P5	35.74	Inductor	P5	53.77

(a) $V_{in}=48V$, $I_o=0A$ (b) $V_{in}=48V$, $I_o=25A$

그림 13. 컨버터의 온도 특성

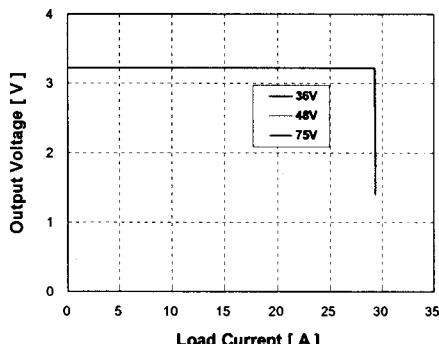


그림 14. 정전류 기능이 부가된 부하 특성 그래프

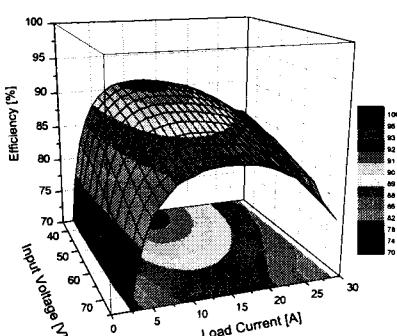


그림 15. 출력 전류에 따른 전력 변환 효율

동작 시 적외선 카메라를 이용하여 측정한 온도 특성을 나타낸 그림이다. 온도 특성을 측정하기 위한 적외선 카메라는 Abionics사의 TVS-700 기종을 이용하였다. 그림 14는 부하 전류에 따른 출력 전압의 변화를 나타낸 그림이며, 정전류 보호 기능이 동작하는 부하 전류 시점에서 출력 전압이 약 1.4V로 떨어지는 것을 볼 수 있다. 그림 15는 LabVIEW를 이용한 PC용 가상 계측 시스템을 구성하여 효율을 측정한 후 컨버터의 출력 전류에 따른 전력변환 효율을 3D 그래프로 나타낸 것이다. LabVIEW를 이용한 효율 측정용 가상계측 시스템은 전원장치 설계와 개발을 위해서 반복적으로 수행할 필요가 있는 효율 측정을 기존의 방법에 비해서 정확하게 할 수 있고, 반복 측정 오차를 현저하게 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 실시간 측정이 가능하며, 측정 시간도 절약할 수 있는 장점이 있다. 다층 PCB 변압기 및 인덕터를 사용한 결과 입력 전압이 48V일 때 최대 효율은 90.6%, 최대 부하에서는 84.5%의 효율을 얻었다.

5. 결 론

본 논문에서는 통신기용 전원장치에 적합한 쿼터 브릭(Quarter-brick) 사이즈(2.3inch × 1.45inch)의 100W급 개방형 온보드 전원장치를 구성하여 실험 결과를 보고한 것이다. 전원장치는 통신기용으로 사용하기 위해서 입력 전압을 36~75V 범위로 설계하였으며 출력은 3.3V, 30A로 하였다.

DC-DC 컨버터 모듈을 8mm 이하로 낮추고 고효율, 소형, 박형화의 컨버터를 구현하기 위해서 변압기, 인덕터, 방열판 등의 소자는 PCB를 이용하여 회로에 일체시킨 형태로 구성하였고 그 결과 컨버터의 전력 밀도를 95 watt/in³ 이상으로 높일 수 있었다. 실험 회로의 성능과 신뢰성을 높이기 위해서 과전압, 과전류, 과온도 등의 기본적인 보호회로 외에도 정전류 보호 회로를 추가, 구성하여 실험하였다. 한편 실험용 전원장치 모듈의 입력 전압이 48V일 때 최대 효율은 90.6%, 최대 부하에서는 84.5%의 효율을 얻을 수 있었다.

이 연구는 과학기술부·한국과학재단 지정 청주대학교 정보통신 연구센터의 지원에 의한 것입니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 안태영, 황선민, 조인호, “저전압 대전류용 개방형 DC-DC 컨버터 모듈에 관한 연구”, 전기학회논문지, 제52권 제4호, pp. 183-190, 2003년 4월.
- [2] Yuri Panov and Milan M. Jovanovic', "Design and Performance Evaluation of Low-Voltage / High Current DC-DC On Board Modules" IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 16, No. 1, January 2001.
- [3] Haruo Watanebe, Hirofumi Matsuo, Haruhiko Hatakeyama, "Design Oriented Analysis of a Novel Soft-Switching DC-DC Converter with 2V/20A DC Output" IEEE PESC 01, pp. 884-889, 2001.
- [4] Haruo Watanebe, Hirofumi Matsuo, Haruhiko Hatakeyama, "Analysis of the Novel Soft Switching DC-DC Converter with Low Output Voltage" IEEE PESC 00, pp. 1503-1509, 2000.
- [5] Laszlo Huber, Milan M. Jovanovic', "Forward - Flyback Converter with Current Doubler Rectifier: Analysis, Design, and Evaluation Results," IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 14, No. 1, pp.184-192 January 1999.