

철도 차량 제어 보드용 모듈형 DC-DC 컨버터 개발

임원석, 김종현*, 류명호*
경북대학교 전자공학과, 한국전기연구원*

Development of modular DC-DC converter for application of train control board

Wonseok Lim, Jonghyun Kim*, and Myunghyo Ryu*
Kyungpook National University, Korea Electrotechnology Research Institute*

Abstract - In this paper, a modular dc-to-dc converter, in order to apply to the control board of train vehicles, is presented. Forward converter with active-clamp reset circuit and synchronous rectifier (SR) is employed to achieve high efficiency. To reduce the size and height of the converter, low profile magnetic components are used. The design and performance of the modular dc-to-dc converter with experiments on a 50W(5V/10A) prototype for the 60V~140V input voltage range are presented.

1. 서 론

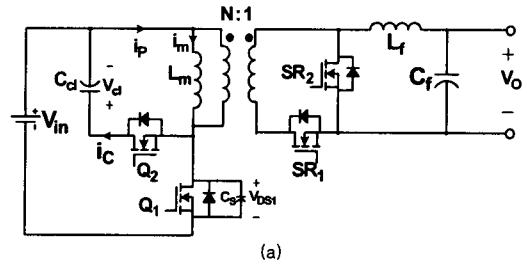
모듈형 DC-DC 컨버터는 특징상 크기와 높이가 제한이 되면서, 고효율/고신뢰성이 요구되기 때문에 회로 설계 및 제작이 어렵다. 모듈형 DC-DC 컨버터에 사용되는 회로 방식 중에서 능동 클램프 포워드 직류-직류 컨버터는 전원단의 스위치가 영전압으로 스위칭이 가능하고 2차측을 동기정류기를 사용할 수 있고, 출력측의 리플이 작아서 작은 출력 필터를 사용할 수 있다는 점 등 여러 가지 회로의 우수성과 실용성 때문에 다양한 분야에서 응용되고 있다. 특히 저전압/대전류/고속스위칭하는 제어 보드에 사용되는 온-보드 컨버터로 각광을 받고 있다.

본 논문에서는 철도 차량 제어 보드용 50 W급 모듈형 능동 클램프 포워드 직류-직류 컨버터를 고효율/초박형으로 개발한다. 컨버터의 효율은 회로의 내부 손실과 밀접한 관계가 있고, 따라서 발열량에 비례하기 때문에 모듈형 컨버터의 중요한 평가기준이 된다. 따라서 컨버터의 효율을 높이기 위해 전원단의 스위치를 영전압으로 스위칭하고, 2차측에 동기 정류기를 사용하였다. 또한 컨버터의 신뢰성을 높이고, 운전수명을 길게 하기 위해 발열을 고려하여 회로를 설계하고, 여러 가지 보호회로를 추가하였다. 그리고 컨버터를 소형으로 제작하기 위해 박형 코아를 사용하여 자기 소자를 사용하였다. 1 차와 2차측을 isolation시키기 위해 포토 커플러를 이용하였다.

2. 본 론

2.1 능동 클램프 포워드 컨버터의 기본 원리.

그림 1에 능동 클램프 포워드 직류-직류 컨버터의 전원단 회로도와 주요 파형을 도시하였다. 클램프 커페시터에 직렬로 연결된 보조 스위치를 도통시킴으로서 손실 없이 트랜스포머를 리셋 시킨다. 이와 같은 능동 클램프 회로는 트랜스포머를 리셋 시키기 위해 추가적인 권선이 필요없고, 에너지 손실이 없으면서 전원단의 스위치를 영전압으로 스위칭이 가능하기 때문에 컨버터의 높은



(a)

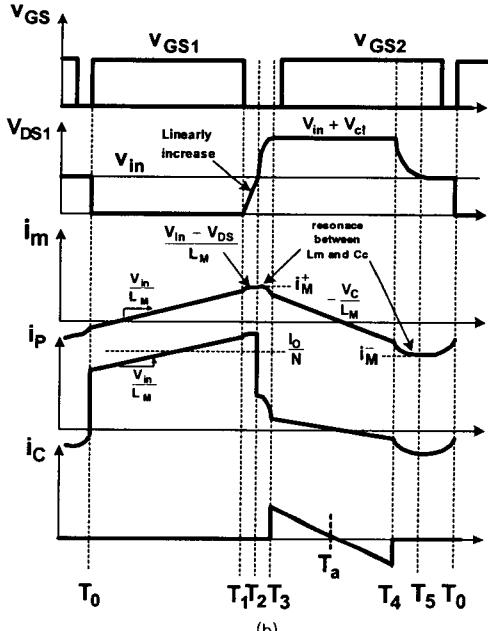


그림 1. 능동 클램프 포워드 컨버터 (a) 전원부 회로도 (b) 주요 파형

효율을 얻을 수 있다. 컨버터의 동작을 간략히 살펴보면 다음과 같다.

- [T₀-T₁] 구간에서는 주스위치 Q₁과 동기 정류기 스위치 SR₁을 도통 시킴으로써 입력에서 출력으로 에너지를 전달하게 된다. 이 때 자화 인덕터(L_m)에 흐르는 전류(i_m)는 V_{in}/L_m의 기울기를 가지면서 선형적으로 증가하게 된다.
- [T₁-T₂] 구간에서는 스위치 Q₁이 터-오프 되고 2차측에서 반사된 부하 전류(I_o/N)가 Q₁의 출력 커�佩시터 C_c에 충전되어 스위치 전압(V_{DSS1})이 선형적으로 증가하게 된다.
- 스위치 전압이 입력 전압(V_{in})에 도달하면 [T₂-T₃] 구

간에서는 트랜스포머의 자화 인더터와 커패시터 C_s 에 의해 스위치 전압이 공진하면서 증가하고 자화전류도 공진하게 된다.

- 스위치 Q_1 의 양단전압이 $V_{in}+V_{cl}$ 에 도달하면 Q_2 의 body 다이오드가 도통하며 i_c 가 흐르기 시작한다. 따라서 [T_3-T_a] 구간에서 Q_2 의 스위치 구동신호를 인가하면 Q_2 는 영전압으로 스위칭을 하게 된다. 이 구간에서는 자화 전류는 $-V_{cl}/L_m$ 의 가율기로 감소하게 되며 2차측의 SR2로 전류가 흐르게 된다.

- [T_4-T_5] 구간에서는 다시 C_s 와 L_m 의 공진현상으로 i_m 과 V_{DS1} 이 공진하는 패형을 보이게 된다.

Q_1 이 영전압으로 스위칭하기 위해서는 L_m 에 저장된 에너지가 C_s 에 저장된 에너지보다 커야한다. 그렇게 되면 [T_5-T_6] 구간에서 Q_1 의 body 다이오드가 먼저 도통되고, 그 다음에 Q_1 의 스위치 구동신호를 인가하면 Q_1 도 영전압 스위칭을 하게 된다.

2.2 컨버터 설계

주스위치 Q_1 , Q_2 에 걸리는 전압은 다음과 같다.

$$V_{DS1} = V_{DS2} = V_{in} + V_{cl} = \frac{NV_o}{D(1-D)} \quad (1)$$

전압 스트레스를 고려하여 주스위치는 infineon사의 12N50C3 (560V/13A)을 사용하였고 보조 스위치는 Fairchild사의 FQD2N50 (500V/1.3A)을 사용하였다. 식 (1)에서 알 수 있듯이 시비율(D)이 0.5일 때 스위치 양단에 걸리는 전압이 최소이다. 따라서 시비율을 0.5를 기준으로 설계하면(ex: $0.35 < D < 0.65$) 입력전압의 변화에도 스위치 전압이 최소로 변한다.

2차측의 동기 정류기의 스위치 양단에 걸리는 전압은 다음과 같다.

$$V_{SR1} = \frac{V_{cl}}{N}, \quad V_{SR2} = \frac{V_{in}}{N} \quad (2)$$

동기 정류기 스위치에는 비교적 큰 전류가 흐르기 때문에 발열문제로 고려하여 Toshiba사의 TPC8009H (30V/13A)를 병렬로 2개씩 사용하였다. 클램프 커패시터는 다음과 같은 식으로 내압과 용량을 결정할 수 있다.

$$V_{cl} = \frac{NV_o}{1-D} \quad (3)$$

$$C_{cl} = \frac{i_m(1-D)^2 T_S}{4 V_{in} D \Delta V_{cl} / V_{cl}} \quad (4)$$

ΔV_{cl} 은 클램프 커패시터의 리플전압의 크기이다. 따라서 클램프 커패시터의 리플을 줄이기 위해서는 용량이 큰 커패시터를 사용해야 하지만 동특성을 나빠지게 되므로 trade-off 하며 선정한다.

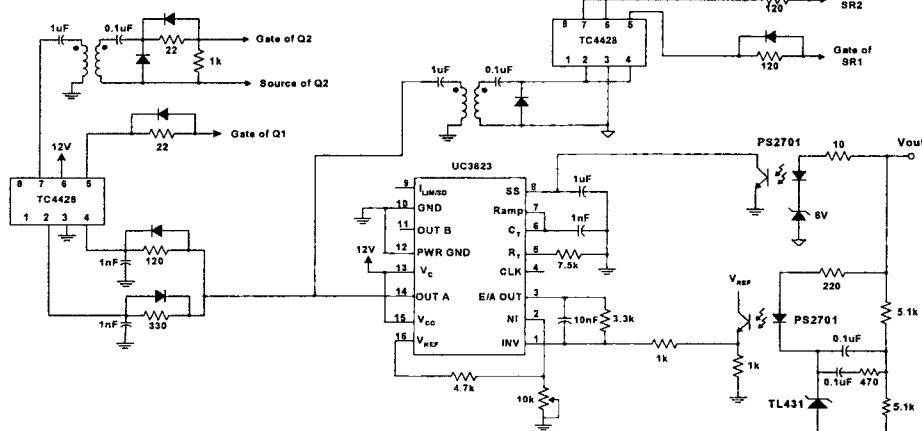


그림 2. 제어부 회로도

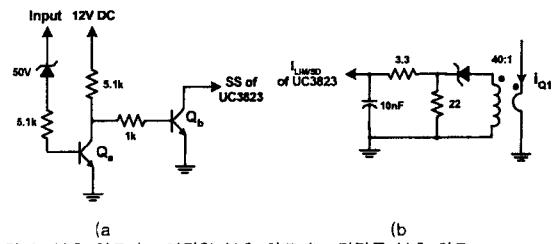


그림 3. 보호 회로 (a) 저전압 보호 회로 (b) 과전류 보호 회로

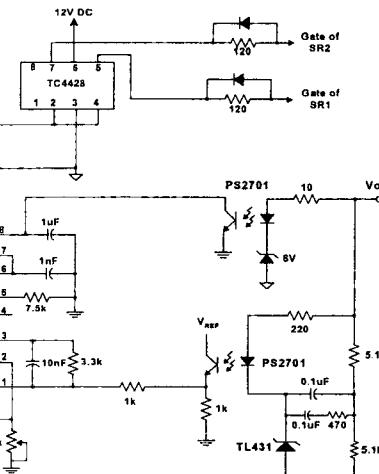
트랜스포머는 EPC1717을 사용하였고, 트랜스포머의 발열 원인인 코아 손실과 copper 손실을 고려하여, 1차측 턴수는 24턴, 2차측은 3턴으로 하였다. 인더터는 크기와 높이를 낮추기 위해 sumida사의 정격 전류의 최대치가 12.5A인 2R7MH($3.6\mu H$)를 사용하였다.

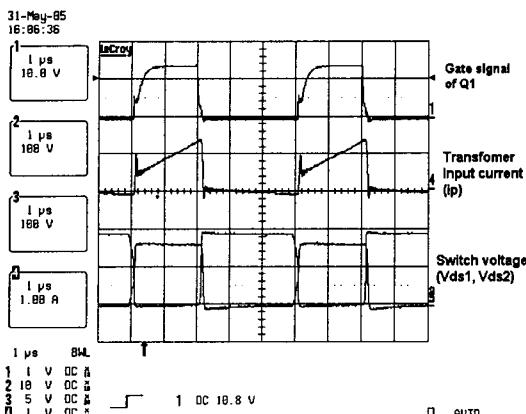
2.2 제어 회로 및 보호회로 설계

그림 2에 제어 회로부의 회로도를 나타내었다. 제어 IC는 Unitrode사의 UC3823을 사용하였고, isolation 및 전압 제어를 위해 NEC사의 PS2701 photo coupler를 사용하였다. 상보적인 스위치 구동신호를 만들기 위해 TC4428을 사용하였고, 출력 전압 제어와 정전압원을 만들기 위해 TL431을 사용하였다. 출력 전압이 갑자기 증가했을 때 PWM출력을 일시적으로 나오지 않게 하기 위해 과전압 보호 회로를 사용하였다. 그림 3(a)는 입력 전압이 작을 때 시비율이 커지므로 이를 방지하기 위한 저전압 보호회로이다. 입력전압이 50V보다 낮으면 Q_a 가 off되고 Q_b 가 on되어 제어 IC의 soft-start 단자의 전압을 0으로 떨어뜨린다. 그림 3(b)는 과전류 보호 회로이다. 스위치 전류를 감지하고 노이즈 필터를 지난 전압이 일정 전압에 이르면 시비율을 제한하거나 컨버터를 shutdown하게 만든다.

2.4 실험 결과

그림 4에 proto-type 모듈형 dc-to-dc 컨버터의 실험 파형을 나타내었다. 그림 4(a)에서 Q_1 은 영전압으로 스위칭하지 않는다. 그 이유는 영전압 스위칭 하기 위해서는 L_m 에 많은 에너지를 저장하기 위해 L_m 이 작아야 한다. 하지만 L_m 을 작게하면 자화 전류가 커져서 그 만큼 손실이 일어나게 된다. 따라서 영전압 스위칭과 자화 전류에 의한 손실의 상관 관계를 파악해야 한다. 그림 4(b)의 동기 정류기의 구동 신호가 서서히 올라가





(a)

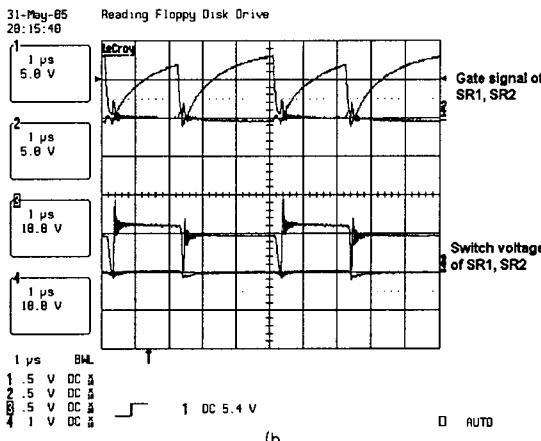


그림 4. 컨버터의 주요부 실험파형

는 이유는 SR의 body 다이오드를 먼저 도통 시킨 후 SR 스위치를 도통 시켜서 SR 스위치를 영전압으로 스위칭 하기 위해서이다. SR 스위치가 터-온 될 때 전압을 보면 0V보다 약간 더 떨어지는 구간이 보이는데 바로 이 구간이 body 다이오드가 도통되는 구간으로 SR 스위치가 영전압으로 스위칭 하고 있음을 확인할 수 있다.

그림 5에 부하 전류변화에 따른 컨버터의 효율을 도시하였다. 입력전압이 100V일 때 최대 효율은 87%였다 (보조전원회로 포함). 입력 전압이 60V일 때 부하전류가 증가함에 따라 효율이 떨어지는 것은 일차측에 흐르는 전류가 증가하여 일차측 손실이 커지기 때문이다.

그림 6에 50 W급 proto-type 모듈형 dc-to-dc 컨버터의 실제 사진을 나타내었다. 컨버터의 크기는 가로 7.5cm 세로 5.5cm이다.

3. 결 론

본 논문에서는 철도 차량 제어 보등용 모듈형 dc-to-dc 컨버터를 제작하고 실험하였다. 소형, 박형으로 제작하기 위해 박형 자기 소자를 사용하였고, 컨버터의 크기는 5.5cm × 7.5cm로 제작하였다. 신뢰성을 높이기 위해 발열문제를 고려하여 설계하였고, 여러 가지 보호 회로를 사용하였다. proto-type 컨버터의 최대 효율은 87%였다.

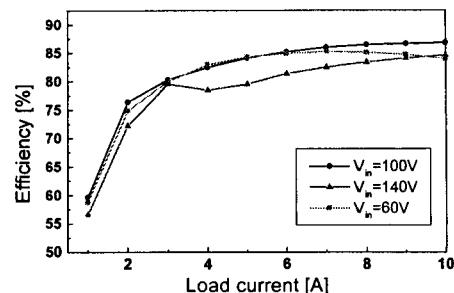


그림 5. 컨버터의 효율

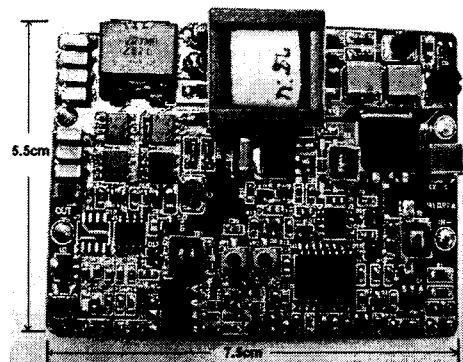


그림 6. Proto type 컨버터의 사진

[참 고 문 헌]

- [1] Milan M. Jovanovic, Micheal T. Zhang, and Fred C. Lee, "Evaluation of synchronous rectification efficiency improvement limits in forward converters," IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. 42, No. 4, pp. 387-395, Aug. 1995
- [2] B. Andreyak, "Active clamp and reset technique enhances forward converter performance." Unitrode power supply design seminar, SEM-1000, pp. 3-1-3-18, 1994
- [3] C. S. Leu, G. Hua, and F. C. Lee, "Comparison of forward topologies with various reset scheme," HFPC Conf. Proc., pp. 198-208, 1992
- [4] L. Huber, D. Sable, G. Hua, F. C. Lee, and N. LaPrade, "Design of a high-efficiency power converter for a satellite solid-state power amplifier," IEEE APEC Proc. 1994.