

풀-브릿지 4단 병렬운전을 채택한 고정밀, 고안정 스위칭 전자석 전원장치

김 성철, 하 기만, 황 정연, 최 진혁
 포항공과대학교 포항가속기연구소

High Accruacy and High Stability Switching Magnet Power Supply by 4-Stage Parallel Operation of Full-Bridge

S. C. Kim, K. M. Ha, J. Y. Huang, J. Y. Choi
 Pohang Acecelerator Laboratory(PAL)/POSTECH

ABSTRACT

포항가속기 연구소의 선형가속기와 빔 전송선에는 22개의 슬레노이드 전자석, 38개의 사극전자석 그리고 전자빔의 궤도 조절을 위한 29개의 2극 전자석이 있다. 전자빔의 정밀 제어를 위한 전자석 전원장치는 고정밀, 고안정도 출력 특성을 가져야 한다. 이를 위하여 풀-브릿지 4-상한 DC-DC 컨버터 토폴로지의 4단 병렬운전을 채택하였다. 전원장치의 입력전압은 직류 40V이고, 최대 출력전류는 직류 50A이며 그리고 스위칭 주파수는 50 kHz이다. 고정밀, 고안정도 출력전류를 얻기 위하여 입력단의 전원 노이즈 및 전력변환부의 스위칭 노이즈를 제거하여야 한다. 이를 위하여 채택된 low-pass 필터의 cut-off 주파수는 입력과 출력단 각각 26 Hz와 45 kHz 이다. 출력전류에서 전원장치로부터 발생하는 주파수 성분을 완벽하게 제거하였다. 출력전류의 분해능은 1mA 이하이며, 안정도는 10시간 이상 장시간의 경우 +/-15 ppm 이하이고 1시간 이하 단시간의 경우 +/-10ppm 이하이다. 본 논문에서는 풀-브릿지 4-상한 DC-DC 컨버터 토폴로지의 4단 병렬운전을 채택한 전자석 전원장치의 구성, 특성 그리고 실험결과에 대하여 기술하였다.

1. 서 론

포항가속기는 2.5GeV 3세대 방사광 가속기이다. 선형가속기는 전자총으로부터의 전자빔을 2.5GeV까지 에너지를 올리며, 빔 전송선은 선형가속기의 2.5GeV 전자빔을 저장링으로 전달하는 역할을 한다. 전자빔의 궤도조절을 위하여 여러 형태의 전자석이 필요하다. 22개의 슬레노이드 전자석, 38개의 사극전자석 그리고 전자빔의 궤도 조절을 위한 29개의 2극 전자석이 있다.[1] 전자석전원장치의 성능은 전자빔의 정밀한 제어와 직접적인 영향을 준다. 50A 이하의 소용량 전자석전원장치는 SCR 위상제어 정류기에 트랜지스트를 사용한 리니어 레귤레이터 방식의 전원장치를 사용하였다. 이 방식의 장치가 단순하나 입력 변압기, 인덕터 그리고 캐패시터 등의 무게와 부피로 인하여 전원장치의 부피가 크고 무거우며 전력변환효율도 나쁘다. 전원장치의 원격 통합제어를 위한 제어기는 4개의 전원장치를 하나의 제어기로 통합하고 직렬통신(RS422) 방식으로 전체 제어시스템과 연결되어 있다. 이러한 전원방식과 원격 제어 방법은 출력전류의 제어 분해능과 출력전류의 장시간 안정도가

떨어지게 된다. 전자빔의 궤도조절의 정밀성 및 안정적인 입사를 위하여, 4-상한 운전이 가능한 풀-브릿지 DC-DC 컨버터 토폴로지를 적용한 스위칭 타입 전자석 전원장치를 개발하였다. 개발된 전원장치는 주회로의 간단한 구성 변화에 따라서 양방향 전원장치와 단방향 전원장치로 겸용으로 사용할 수 있게 개발되었다. 본 논문에서는 포항가속기연구소의 선형가속에 적용하기 위하여 개발된 풀-브릿지 4상한 DC-DC 컨버터 방식을 채택한 고정밀, 고안정도 전자석전원장치의 구성, 특성 및 실험결과에 대하여 기술 하고자 한다.

2. 풀-브릿지 4상한 DC/DC 컨버터를 이용한 전자석 전원장치

2.1 전자석 전원장치를 위한 기본회로

그림 1은 풀-브릿지로 구성된 4상한 DC/DC 컨버터의 기본 회로이다.[2] 이 회로에서 양방향 전원장치로 동작은 스위치 Q1과 Q4 동시에 온 하고, Q2와 Q3를 오프 할 경우 부하로 흐르는 전류는 정(i_o)의 방향으로 흐르게 된다. 이것을 반대로 하면 부하로 흐르는 전류는 역($-i_o$)으로 흐른다. 단방향 전원장치의 경우에는 풀-브릿지 회로의 Q1과 Q4가 온일 경우에만 부하에는 정(i_o) 방향으로 전류가 흐른다. 동일한 회로를 이용하여 두 배의 부하전류를 얻고자 할 때는, 그림1의 회로에서 부하의 연결을 그림2와 같이 하면 된다.

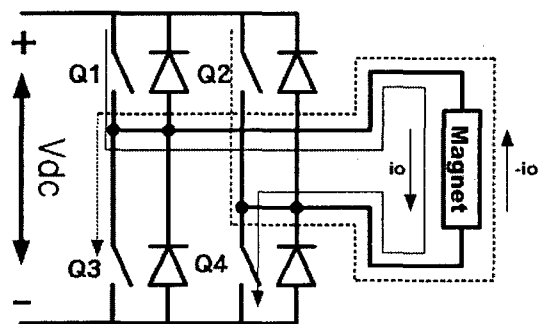


그림 1 풀-브릿지 4-상한 DC/DC 컨버터 양방향 전원회로
 Fig. 1 Full-Bridge 4-quadrant DC/DC converter Bipolar Power Supply

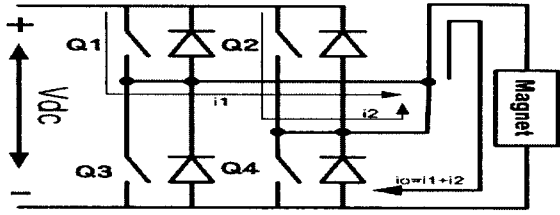


그림 2 풀-브릿지 4상한 DC/DC 컨버터에서 2배 단 방향 출력 전류를 얻기 위한 회로 ($i_o = i_1 + i_2$)

Fig. 2 full-bridge 4 quadrant DC/DC converter circuit for double output current ($i_o = i_1 + i_2$)

2.2 풀-브릿지 4상한 DC/DC 컨버터의 4단 병렬 운전에 의한 단방향 전자석 전원장치 회로

그림 2는 회로는 Q1과 Q2의 병렬 운전에 의하여 부하에서는 그림1의 회로와 비교하여 2배의 출력전류를 얻을 수 있다. 이러한 원리로 그림2의 회로를 그림 3과 같이 구성하여 4단 병렬 운전을 하면 부하에서는 4배의 출력 전류를 얻을 수 있다.

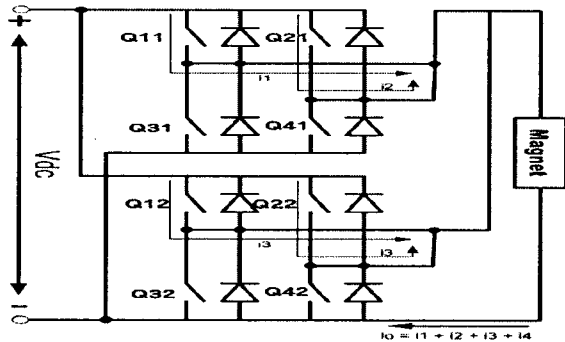


그림 3 풀-브릿지 4 상한 DC/DC 컨버터의 4단 병렬 운전회로
Fig. 3 4-stage parallel operation circuit of full-bridge 4 quadrant Dc/DC converter

3. 풀-브릿지 4상한 DC/DC 컨버터를 이용한 고정밀, 고안정도 단방향 전자석 전원장치

그림 3의 원리를 이용하여 포항가속기연구소의 선형 가속기를 위한 단방향 전자석 전원장치를 개발하였다. 표 1은 단방향 전원장치의 개발 사양이다.

표 1 단방향 전자석 전원장치 개발 사양
Fig. 1 Specifications of unipolar magnet power supply

항목	사양
size	435(W)x178(H)x450(D), mm
input voltage	3 ϕ 25V
output	50V/50A _{nominal} (80A _{maximum}) DC
output current stability for full scale(50A)	short term(<1hour): < ± 10 ppm long term(>10hours): < ± 15 ppm
output current resolution	16 bit
topology	FB 4-Q 4-stage parallel
switching frequency	50 kHz
filter cut-off frequency	input filter: < 60 Hz output filter: < 5 kHz

3.1 4단 병렬운전에 의한 단방향 전자석 전원장치 개발회로

그림 4는 표 1의 전자석 전원장치의 회로 구성이다. 회로에서 입력은 3상 25V이고 출력전류는 최대 80A이다. 입력부에는 3상 정류 후 발생하는 저주파수의 고조파 성분을 제거하기 위하여 L-C 필터를 적용하였다. 스위칭 토폴로지는 풀-브릿지 4상한 DC/DC 컨버터의 4단 병렬 운전을 채택하였다. 스위칭 주파수는 약 50 kHz이다. 출력부에는 스위칭 시 발생하는 고조파 성분을 제거하기 위하여 L-C-L-C 2단 low pass 필터와 R-C 댐핑 필터를 적용하였다. 출력 전류를 제어는 DCCT (Danfysik Untrastab-867)에서 검출한 전류를 I/V 변환 후 CPU의 기준값과 PI 제어를 하여 PWM controller와 FET 드라이버에서 FET 스위치를 구동한다.

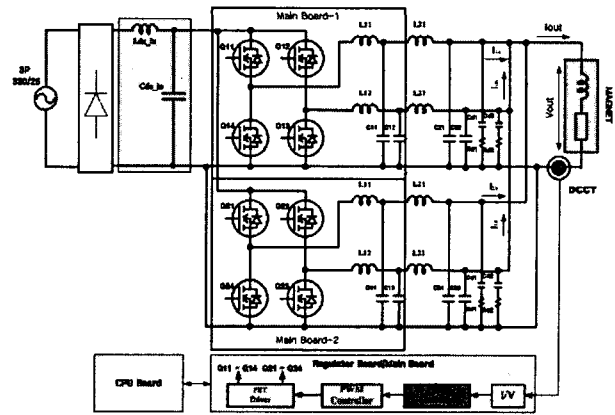


그림 4 선형가속기 단방향 전자석 전원장치를 위한 제안회로
Fig. 4 Proposed circuit for unipolar magnet power supply of Linear Accelerator

3.2 단방향 전원장치의 case 구성

그림 5는 단방향 전자석 전원장치의 case 구성도이다. 주요 board는 가로 250mm, 세로 135mm로 규격화 하여 back plan board의 해당 콘넥타에 접속하여 구성이 되도록 하였다.

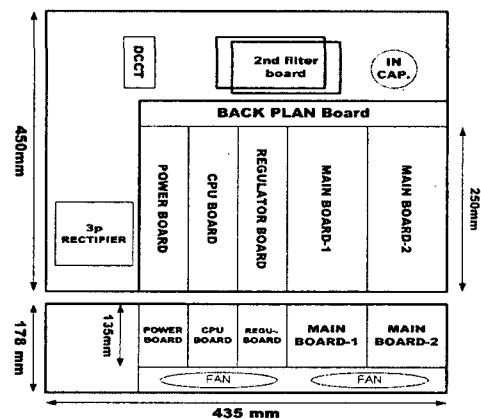


그림 5 단방향 전원장치 case 구성도
Fig. 5 Case configuration diagram of unipolar magnet power supply

여기에서 DC bus 전원을 만들기 위한 3상 정류기, 입력필터, 출력필터의 2번째 L-C 필터와 damping

capacitor 그리고 출력전류 검출을 위한 DCCT는 back plan board의 외부에 배치하였다.

3.3 규격화 PCB board

- CPU Board는 Coldfire Ver-2(MCF5282) CPU module을 적용 하였다. 이 CPU module은 자체 100 Mbps ethernet과 serial 통신이 가능하며 16 MB RAM, 16 bit ADC와 DAC가 지원된다.
- Regulator board는 DCCT로부터 검출한 출력전류와 CPU board의 기준값을 가지고 PI 제어를 하며, 필터 시그널을 감지하여 인터록을 발생한다.
- Main board에는 MOSFET으로 풀-브릿지가 구성되어 있으며 여기에 FET 구동회로 및 1단 L-C 필터가 포함되어 있다.

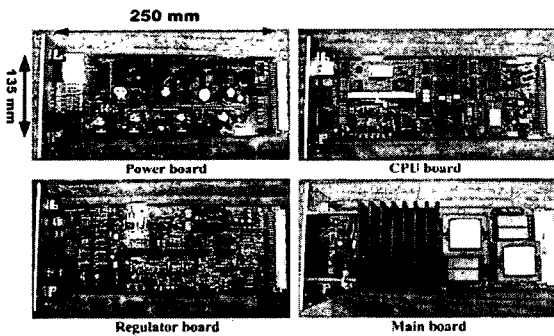


그림 6 power, CPU, Regulator, main 보드의 사진
Fig. 6 photo of power, CPU, Regulator and Main board

3.4 출력필터

출력전류에 main회로의 스위칭시 발생하는 스위칭 주파수와 이와 관련한 고조파 성분을 제거하기 위한 출력 필터는 L-C-L-C 2단으로 구성되었다.[3] 출력필터를 위한 인덕터는 EE type 페라이트 코어와 0.2mm 동판을 이용하여 개발하였다. 인덕터의 최대 허용전류 20 A이고, 부피는 83 mm^3 (4.3 x 4.3 x 4.5 (cm)) 이다. 필터의 특성 측정은 SR780(Dynamic Signal Analyzer, Stanford research)을 사용하였다. cut-off 주파수는 1 kHz 이며 40 kHz 이상에서 약 -70dB의 감쇄특성을 가진다. 따라서 출력전류에는 전원장치에서 발생하는 주파수 성분은 존재하지 않는다. 그림 7 (a)는 출력필터의 특성이고 (b)는 출력전류에서 측정된 주파수 성분이다.

3.5 출력전류 안정도 및 정밀도 측정결과

출력전류의 정밀도 및 안정도의 측정은 전자석에 19 시간동안 전류를 흘리면서 측정용 CT의 출력을 Keithley 2700 정밀 멀티메타(6.5 digit)를 사용하여 측정하였다. 측정결과 19시간이상 장시간 안정도는 $\pm 9\text{ppm}$ ($\pm 425 \mu\text{A}$) 이하이고 1시간 단시간 안정도는 $\pm 5\text{ppm}$ ($\pm 250 \mu\text{A}$) 이었다. 그림8과 9는 출력전류의 장시간 및 단시간 안정도 측정결과이다. 출력전류의 분해능은 1 mA 이하로 측정되었다.

4. 결론

포항가속기연구소의 선형가속기의 전자석전원장치를 위한 풀-브릿지 4상한 DC/DC 컨버터를 토폴로지화한 저전류 모듈

의 4단 병렬운전에 의한 고정밀, 고안정도 단방향 전자석전원 장치를 개발하였다. 개발된 전원장치의 최대 출력전류는 80A이다. 이 전원장치는 유지보수의 편리함을 위하여 모듈화 된 보드를 전면에서 back plan의 connector에 삽입하여 운전하도록 구성되었다. 출력부에는 특수하게 설계 개발된 필터를 적용하여 출력전류에는 전원장치로부터 발생하는 주파수성분이 존재하지 않게 하였다. 출력전류의 장시간 및 단시간 안정도는 각각 $\pm 9\text{ppm}$ ($\pm 425 \mu\text{A}$)과 $\pm 5\text{ppm}$ ($\pm 250 \mu\text{A}$)로 측정되었다.

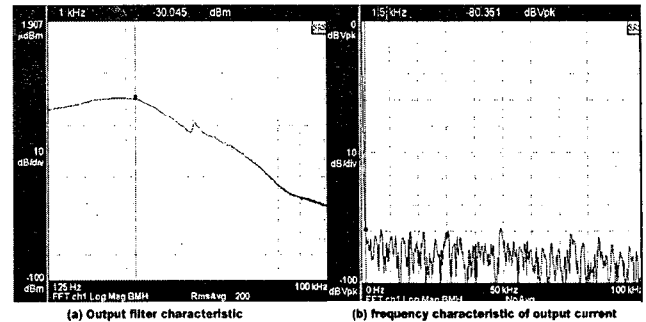


그림 7 출력필터의 특성 및 출력전류에서 측정된 주파수 성분
Fig. 7 Output filter characteristic and measured frequency characteristic at output current

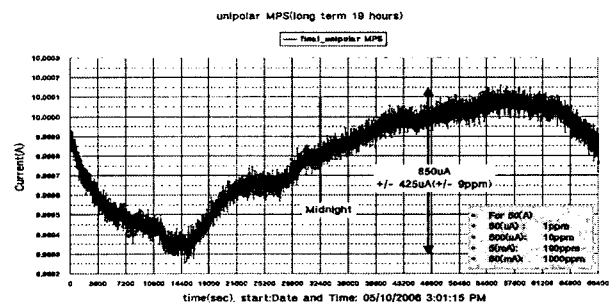


그림 8 출력전류의 장시간 안정도
Fig. 8 Long term stability of output current

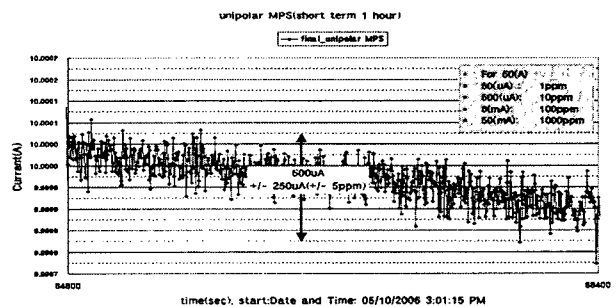


그림 9 출력전류의 단시간 안정도
Fig. 9 Short term stability of output current

참고 문헌

- [1] Pohang Light Source Concept Design Report.
- [2] Ned Mohan, Power Electronics: Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., pp. 188-194.
- [3] Raymond B. Ridley, "Secondary LC Filter Analysis and Design Techniques for Current-mode-controlled Converters", IEEE transactions on power electronics. vol.3. no.4. Oct. 1988. pp. 499-507.