

고정밀, 고안정 스위칭 전자석 전원장치를 위한 고효율 출력필터의 설계 및 응용

김 성철, 하기만, 황정연, 최진혁
포항가속기연구소/포항공과대학교

High Efficiency Output Filter Design and Application for High Accuracy and High Stable Switching Type MPS

S. C. Kim, K. M. Ha, J. Y. Huang, and J. H. Choi
Pohang Accelerator Laboratory/POSTECH

Abstract - 포항가속기 연구소의 선형가속기에는 22개의 솔레노이드 전자석, 16개의 사극전자석 그리고 전자빔의 궤도 조절을 위한 16개의 2극 전자석이 있다. 선형가속기의 빔을 저장링으로 공급해주는 빔 전송선에는 22개의 사극전자석과 13개의 빔 궤도 조절용 이극 전자석이 있다. 전자빔의 정밀 제어를 위하여 전자석의 전원장치는 출력전류 분해능은 16bit 이상이고 출력전류의 안정도는 최대출력에 대하여 $\pm 50\text{ppm}$ 이하의 고정밀 고안정도가 요구된다. 이를 위하여 폴-브릿지 4상한 DC/DC 컨버터를 이용한 전자석전원장치를 개발하였다. 전원장치의 입력전압 직류 40V이고 출력전류는 단방향 전원장치는 최대 50A/50V 이고 양방향 전원장치는 $\pm 20\text{A}/20\text{V}$ 이다. 스위칭 주파수는 50 kHz이다. 전원장치의 출력부에 필터가 없으면 출력전류에는 스위칭과 관련된 주파수 성분이 포함 되고 전자빔은 이들 주파수 성분에 대하여 영향을 받게 된다. 이러한 이유로 출력 필터의 cut-off 주파수는 5 kHz 이하가 되어야 한다. 본 논문에서는 고정밀 고안정 스위칭 전자석전원장치를 위한 출력필터의 설계, 제작 그리고 이를 적용한 전자석전원장치에 대하여 논의 하고자 한다.

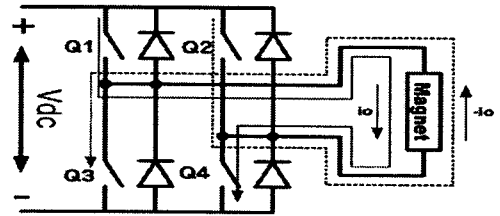
1. 서 론

포항가속기는 2.5GeV 3세대형 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 솔레노이드 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 제어 시스템과 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 폴-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 선형가속기에 적용하기 위하여 개발된 폴-브릿지 4상한 DC-DC 컨버터 방식을 채택한 고정밀, 고안정도 전자석전원장치를 위한 출력필터의 설계 그리고 이를 적용한 전의장치의 특성을 기술 하고자 한다.

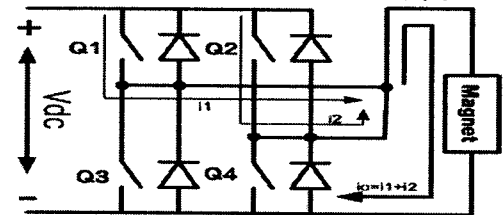
2. 폴-브릿지 4상한 DC/DC 컨버터를 이용한 전자석 전원장치

2.1 기본회로

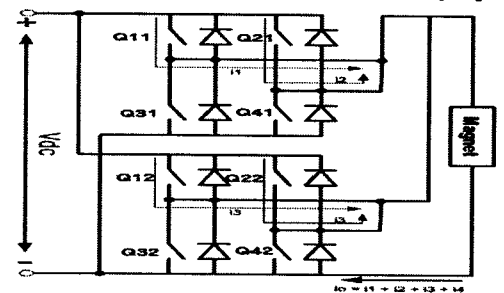
그림 1은 폴-브릿지로 구성된 4상한 DC/DC 컨버터의 기본회로이다.[2] 이 회로에서 양방향 전원장치로 동작은 스위치 Q1과 Q4 동시에 온 하고, Q2와 Q3를 오프 할 경우 부하에 전류는 정(i_o)의 방향으로 흐르게 된다. 이것을 반대로 하면 부하로 흐르는 전류는 역($-i_o$)으로 흐른다. 단방향 전원장치의 경우에는 폴-브릿지 회로의 Q1과 Q4가 온일 경우에만 부하에는 정(i_o) 방향으로 전류가 흐른다. 동일한 회로를 이용하여 두 배의 부하전류를 얻고자 할 때는, 그림1의 회로에서 부하의 연결을 그림2와 같이 하면 된다.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



<그림 1> 폴-브릿지 4-상한 DC/DC 컨버터



<그림 2> 폴-브릿지 4상한 DC/DC 컨버터에서 단 방향 출력 전류를 얻기 위한 회로 ($i_1 + i_2$)



<그림 3> 폴-브릿지 4 상한 DC/DC 컨버터의 4단 병렬 운전회로

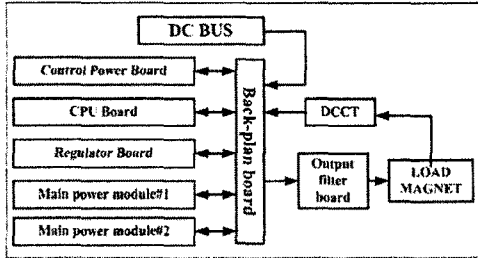
2.2 전원장치의 구성

선형가속기를 위한 양방향 전원장치는 그림 1의 회로를 적용 하였고 단방향 전원장치는 그림3의 회로를 적용하였다. 전원장치는 다음의 구성으로 되어있다.

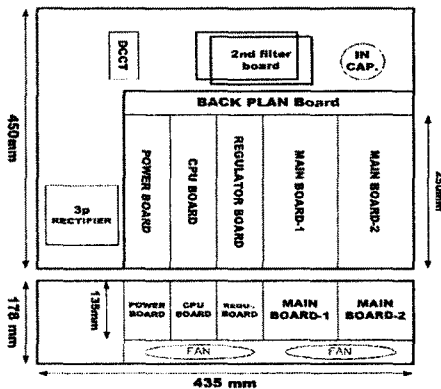
- DC BUS - input power
- CONTROL POWER BOARD - CPU, regulator, main power board의 제어전원: $\pm 15\text{V}$, $\pm 12\text{V}$, $\pm 5\text{V}$
 - size: 13.5cm(3U) × 25cm
- CPU BOARD - 전자석 전원장치의 원격제어
 - CPU: Coldfire Ver2, MCF5282
 - Ethernet 100Mbps
 - Serial communication
 - 16bit ADC, 16bit DAC
 - size: 13.5cm(3U) × 25cm
- REGULATOR BOARD - main power board의 PWM control, interlock
 - size: 13.5cm(3U) × 25cm
- MAN POWER BOARD - 폴-브릿지 4상한 DC/DC 컨버터(1차 출력필터포함)
 - Bipolar MPS: 1 main power board
 - Unipolar MPS: 2 main power board에의한 4단 병렬운전
 - size: 13.5cm(3U) × 25cm
- BACK-PLAN BOARD - BACKPLAN에 CONTROL POWER, CPU, REGULATOR, MAIN POWER Board 연결

- OUTPUT FILTER BOARD - 2차 출력필터 및 댐핑 필터
- DCCT - 부하로부터 출력전류의 검출
- Bipolar MPS: LA-55P(LEM)
- Unipolar MPS: Untrastab-867(Danfysik)

그림 4는 단/양방향 전자석 전원장치의 구성도이다. 단방향 전자석 전원장치에서는 2개의 main power module을 사용한다. 그림5는 단방향 전자석 전원장치의 case 구성도이다. 양방향 전자석 전원장치의 case는 높이가 135 mm이다.

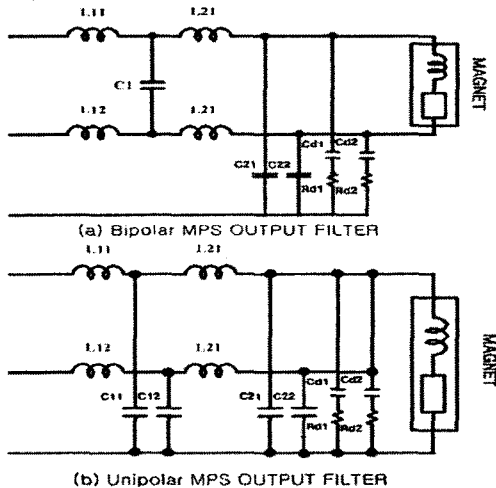


<그림 4> 양/단방향 전자석 전원장치 구성도



<그림 5> 단방향 전자석 전원장치 case 구성도

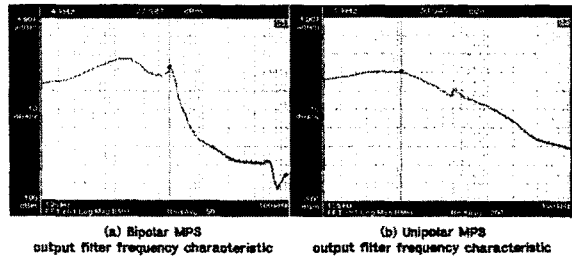
2.3 출력필터



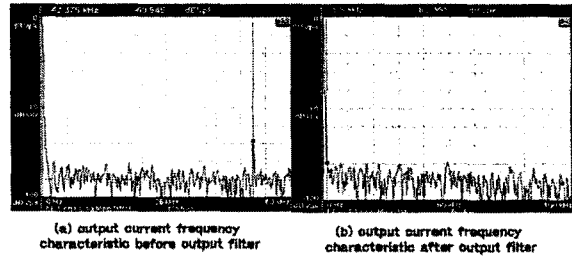
<그림 6> 양/단방향 전자석전원장치의 출력필터

그림 6은 did/단방향 전자석 전원장치의 출력 필터의 구성도이다. 출력필터는 L-C-L-C 2단으로 구성하였고 저주파 댐핑을 위한 R-C 필터를 포함한다. 가속기 전자빔이 전자석 전원장치 출력전류 주파수 성분에 대한 영향을 받지 않도록 하기 위하여 필터의 cut-off 주파수는 5 kHz 이하가 되어야 한다. 1차 L-C 필터 및 2차 L-C 필터(댐핑 필터 포함)를 main power module과 필터보드의 PCB에 장착을 하여야 한다. 따라서 L 및 C는 최소의 부피로 최대의 값이 되어야 한다. 이를 위한 인덕터는 Magnetics사의 EE 형태의 페라이트코어 R-4402EC코어와 0.2mm 두께의 동판을 사용하여 제작을 하였다. 1차 인덕터의 값은 128 μ H이고 2차 인덕터의 값은 68 μ H이다. 각 인덕터의 최대 허용전류 20 A이고, 부피는 83 cm^3 (4.3 x 4.3 x 4.5 (cm)) 이다. 1차 캐패시터는 30 μ F이고 2차 캐패시터는 45 μ F이다. 필터의 특성 측정은 SR780(Dynamic Signal Analyzer, Stanford Research)를 이용하여 white noise를 입력으로 하고 출력 단에서 감쇄특성을 측정하였다. 그림 7은 양/단방향 전자석전원장치 출력필터

의 주파수 감쇄특성이다. 필터의 cut-off 주파수는 1.5 kHz이며 50 kHz에서 -40dB이상의 감쇄특성을 가진다. 그림8은 출력필터 전/후에서 출력전류의 주파수 특성이다.

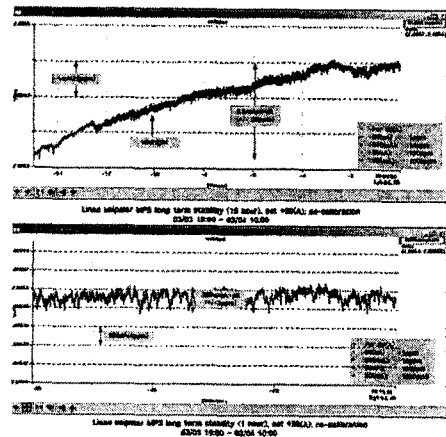


<그림 7> 양/단방향 전자석전원장치 출력필터 주파수의 주파수 감쇄특성



<그림 8> 출력필터 전/후의 출력전류의 주파수 특성

풀-브릿지 4상한 DC/DC 컨버터를 이용한 전자석전원장치에 위의 출력필터를 적용한 결과 출력전류의 안정도는 양방향전원장치에서는 long term ± 75 ppm(short term ± 20 ppm) 그리고 단방향 전원장치에서는 long term ± 25 ppm(short term ± 3 ppm)으로 측정되었다. 그리고 출력전류의 분해능은 500 μ A 이하로 측정되었다. 그림 9는 단방향 전원장치의 출력전류 안정도 측정결과이다.



<그림 9> 단방향 전원장치 출력전류 안정도

3. 결 론

풀-브릿지 4상한 DC/DC 컨버터를 이용한 고정밀 고안정도 전자석전원장치를 개발하였다. 이 전원장치에 전원장치로부터 발생하는 주파수성분을 제거하기 위한 L-C-L-C 2단으로 된 출력필터를 개발하여 적용 하였다. 출력전류에서 주파수 성분은 완벽하게 제거 되었다. 출력전류의 안정도는 양방향전원장치에서는 long term ± 75 ppm(short term ± 20 ppm) 그리고 단방향전원장치에서는 long term ± 25 ppm(short term ± 3 ppm)으로 측정되었다. 그리고 출력전류의 분해능은 500 μ A 이하로 측정되었다.

[참 고 문 헌]

- [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