

DSP를 이용한 전자식 전원장치 개발

정 성 훈, 박 기 현, 강 흥 식, 최 진 혁, 김 동 언
포항가속기연구소

Magnet Power Supply Development by using DSP

Jeong S. H, Park K. H, Kang H, S, Choi J. H, Kim D. H
Pohang Accelerator Laboratory

Abstract - 전자빔은 전자석의 자기장에 의하여 궤도가 편향 또는 집속된다. 이 전자석에 사용되는 전원장치는 사용되는 부품들의 품질과 관련된 제어 기술의 발전으로 성능이 크게 향상되고 있다. 이 논문에서는 DSP를 이용하여 IGBT를 구동하는데 있어 phase-shifting 기법을 적용한 병렬 운전으로 출력 특성이 크게 개선된 전원장치에 대하여 설명하였다. 이 장치의 기본 사양은 ± 350 A, 2.5 Hz 계단형태의 출력전류를 전자석에 제공하는 것이다. 출력전류 피드백과 입력전압 피드-포워드 제어구조를 적용하여 출력전류의 안정도를 개선하였다. 모의실험과 실제 전자석 구동실험을 통하여 개발된 전원장치가 다양한 용도에 편리하게 적용될 수 있음을 보여준다.

1. 서 론

가속장치는 전자빔을 집속하거나 편향시키기 위하여 전자석과 함께 고정밀도의 전원장치가 사용된다. 1990년대에 이 전원장치들은 SCR 스위칭 소자와 연산증폭기를 이용한 아날로그 제어기를 사용하였다[1]. 아날로그제어기는 고성능의 연산 증폭기와 고 분해능의 DAC를 결합하여 높은 안정도의 SMPS를 구현할 수 있다. 하지만 복잡한 회로에 사용되는 많은 전자 부품들의 특성에 따라 제어기의 전체 성능이 저하될 수 있다. 또한 이 전원장치들은 낮은 스위칭 주파수로 인하여 출력 리플이 매우 크고, 아날로그 제어기의 성능이 주위 온도 변화의 영향을 많이 받는다.

현재는 반도체 집적 기술의 발전으로 대용량이면서 고속으로 동작하는 인버터용 스위칭 소자들이 개발되고 있으며, DSP는 제어 및 신호처리 분야에서 CPU를 대체하여 점점 더 많이 사용되고 있다. 또한 인버터 제어를 위한 전용의 DSP가 개발됨으로써 스위칭 전원장치의 개발이 보다 용이해지고 성능이 우수하면서 크기를 크게 줄일 수 있는 기술이 개발되고 있다[2].

Texas Instrument 사의 TMS320F2808 DSP를 이용하여 전류제어형 양방향 스위치모드 전원장치(SMPS)를 개발하였다. 이 전원장치는 내장된 프로그램에 따라 두 가지 모드로 운전될 수 있으며, 첫 번째는 임의의 다양한 형태의 전류파형을 출력할 수 있는 것이고 두 번째는 양방향 전류원이다. 각각의 모드에서 IGBT를 phase-shift 기법을 적용한 병렬운전을 함으로써, IGBT의 정격출력과 동작주파수를 2배로 증가시킬 수 있다[3].

이 논문은 DSP를 사용한 디지털 제어기와 phase-shifting 기법을 적용한 병렬 운전으로 시스템 성능이 크게 향상된 전원장치에 대하여 설명하였다.

2. 본 론

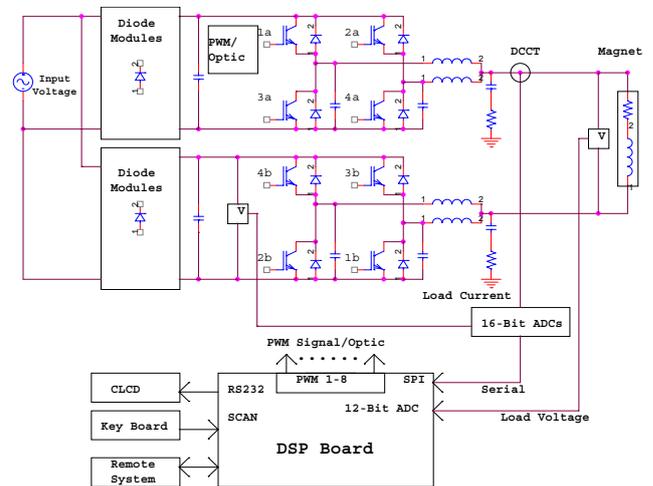
2.1 장치구성

LC 필터와 전자석으로 구성된 부하 부분과 제어기를 포함한 전원 장치의 구성은 그림 1과 같다. 이 전원장치는 3상 변압기의 Y-Δ상에 각각 연결된 2개의 3상 브릿지 다이오드와 전해콘덴서로 구성된 정류부분, 두개의 H-bridge 인버터로 구성된 출력부분과 시스템 제어를 위한 디지털 제어기로 구성되어있다. 이 장치는 스위칭 소자로 8개의 IGBT 모듈이 4개씩 2개의 pair로 나누어져 사용된다. 각각의 pair는 180°의 위상차를 가지고 병렬로 운전된다.

이 전원장치는 각각의 H-bridge 인버터가 200 A의 전류를 10 kHz의 스위칭주파수로 구동하면서 병렬로 운전되어 높은 부하전류를 구동하도록 하였다. 각각의 IGBT를 phase-shift 병렬운전 함으로써 운전주파수는 2배로 되어 20 kHz가 되며, 각 단의 IGBT는 전체부하전류를 1/2씩 부담하게 된다. Phase-shift 병렬운전의 다른 장점은 출력필터에 사용되는 인덕터의 크기가 H-bridge 한 개를 사용한 구조와 비교할 때 1/2로 줄어든다는 것이다.

이 전원장치는 출력전류 안정도를 개선하기 위하여 출력전류 피드백과 입력전압 피드포워드 제어구조를 적용하였다. 스위칭소자는 Eupec사

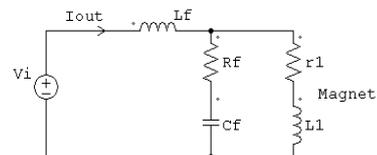
의 2단 구조의 IGBT FF400R12KF4 4개를 사용하였다. DSP에서 드라이버로의 연결은 접지와 외부의 전기적 잡음을 분리하기 위하여 Agilent사의 HFBR 시리즈의 광통신 소자를 사용하였다. 출력전류 측정은 Danfysik 사의 860R DCCT를 사용하였다. 이 DCCT의 출력전압은 두 개의 외부 16비트 ADC인 Analog Device사의 AD977A를 사용하여 디지털신호로 변환하였다. 기준전류와 평균 부하전류의 오차는 매 0.5 ms마다 계산되어, 전류오차를 가능한 한 작게 만들도록 PWM 변조비가 바뀌게 된다. 출력필터는 L-C-R필터로 구성되어있으며, R-C 감쇠 회로를 삽입하여 필터응답특성을 개선하였다.



〈그림 1〉 시스템 구성도

2.2 DSP 제어기 모델

필터의 구성 성분들이 부하인 전자석에 비해 매우 작기 때문에 그림 1에 나타난 필터와 전자석 부하부분은 그림 2와 같이 간략화 할 수 있다.



〈그림 2〉 디지털 제어를 위한 전자석 모델

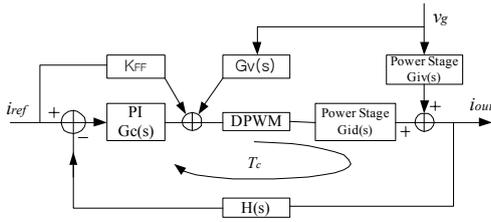
따라서 전달함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P(s) = \frac{1}{sL_1 + r_1} \quad (1)$$

전원장치에 사용된 PI 제어기는 다음과 같다.

$$Gc(s) = \frac{Kps + Ki}{s} \quad (2)$$

여기서 Ki 와 Kp 는 각각 적분상수와 비례이득 상수이다. PI 제어기의 계수들은 제어루프의 특성방정식으로부터 구하였으며, PSIM 시뮬레이터로부터 구한 값과 거의 일치하였다[4]. 적용된 값을 사용한 PI 제어루프는 매우 잘 동작하였다. 이 전원장치의 페 루프 제어시스템이 그림 3에 나타나 있다.



〈그림 3〉 전체 제어루프의 블록선도

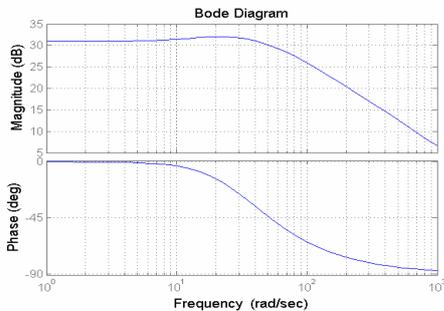
전원장치의 폐 루프 전달함수는 다음과 같이 주어진다.

$$i_{out}(s) = i_{ref}(s) \left(\frac{G_c G_{id}}{1 + T_c} + \frac{K_{FF} G_{id}}{1 + T_c} \right) + v_g(s) \left(\frac{G_v}{1 + T_c} + G_v \frac{G_{id}}{1 + T_c} \right) \quad (3)$$

전류루프이득 T_c 는 $T_c(s) = G_c(s) \cdot G_{id}(s) \cdot H(s)$ 로 주어진다. MATLAB을 이용하여 $K_i=30$ 과 $K_p=10$ 의 이득을 가질 때의 보드선도가 그림 4에 나타나있다. 보드선도의 형태는 전체적으로 간단해 보이지만 실제에서는 필터성분으로 인하여 좀 더 복잡하다. 검출된 링크전압은 IGBT의 듀티비를 연산하는데 사용되며, 듀티비는 다음과 같이 표현된다.

$$d_{update}(k) = d(k) + G_v \Delta d(k) \quad (4)$$

여기서 $\Delta d(k) = (V_{ref} - v_{\in}(k)) / V_{ref}$ 이며, G_v 는 피드-포워드 이득이다.



〈그림 4〉 전체 제어루프의 보드선도

2.2 제어기구 구성

8개의 IGBT는 DSP에 의해 만들어 지는 PWM 신호들에 의하여 구동된다. 8개의 IGBT 중에서 전류 방향에 따라 1a와 1b, 2a와 2b 4개가 구동되고, 나머지 3a와 3b, 4a와 4b는 꺼지며, 전류 방향이 바뀌면 IGBT의 구동은 반대가 된다.

그림 1의 4개의 IGBT 1a, 3a, 4b, 2b의 위상은 0이고 나머지 4개는 180의 위상차를 가진다. Phase-shift 병렬운전모드로 인하여, 각각의 IGBT의 PWM 듀티는 전체 듀티의 절반이 된다.

부하전류의 측정 오차를 줄이기 위하여, 출력전류는 제어루프사이에서 두개의 ADC로 각각 10번씩 디지털신호로 변환된다. 제어 프로그램은 이 변환된 값들의 평균을 연산하여 제어에 이용함으로써 출력전류의 안정도를 향상시켰다.

전자식 전원장치에서 출력 전류의 시간당 변화폭은 부하의 시정수에 의존적이다. 따라서 전원장치에서 임의의 전류파형을 출력하고자 할 때, 전류파형의 상승과 하강시간은 부하인 전자식의 시정수와 DC 입력전압에 종속된다.

그림 6의 전류파형에서 빠른 전류 응답 특성을 얻기 위하여 상승과 하강구간 약 20 ms 동안 전자식에는 링크전압이 PWM 제어 없이 바로 인가된다. 제어기는 출력전류가 목표로 하는 전류 값에 근접하면 제어루프가 동작하여 PWM 신호를 발생시켜 출력전류를 제어하게 된다. 출력전류의 파형이 계단형일 경우 빠른 출력응답과 고 정밀 출력 특성을 얻기 위하여 피드-포워드 보상을 하였다.

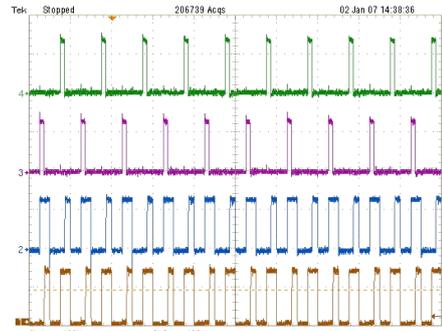
ADC 루틴과 PWM 듀티 제어는 각각의 인터럽트 루틴에서 실시간으로 처리된다. 키 스캔과 LCD 표시는 기본 루틴에서 수행하여 PWM 제어에는 영향을 주지 않는다.

프로그램 컴파일러는 Texas Instrument사의 CCS2000을 사용하였으며, 생성된 오브젝트 코드는 병렬포트를 통하여 제작된 보드에 프로그램된다.

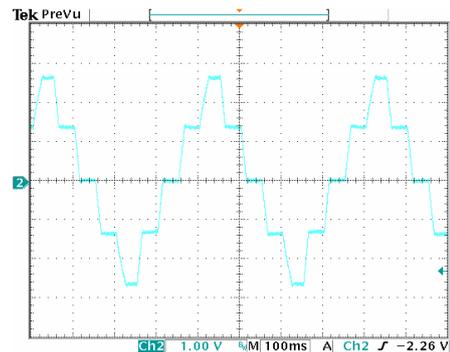
2.3 실험결과

부하시험은 가속기에 사용되는 4극전자석을 사용하였으며, 이 전자석은 21 mH의 인덕턴스와 25 mΩ의 저항 성분을 가진다. 그림 5는 각각

의 IGBT가 180° phase-shift된 PWM 신호파형을 보여준다. 이 그림에서 Ch3과 Ch4는 각각 PWM 1a과 PWM 2a의 인가 전압이며, Ch1과 Ch2는 PWM 1b와 PWM 2b의 전압으로 PWM 1a와 PWM 2b가 더해진 것을 볼 수 있다. 그림 6은 임의형태 파형의 시험결과이다. 이 그림은 계단파형을 보여주고 있는데 160V의 링크전압에서 ±200A의 전류가 2.5 Hz의 주파수로 동작함을 보여주고 있다. 또 다른 실험결과는 양방향 전원으로서의 실험인데, 160V의 링크 전압에서 ±350A의 출력전류를 측정하였다. 이 운전모드에서 측정된 출력전류의 안정도는 약 80 ppm이다. 두 가지 경우에서 phase-shift 병렬운전 모드는 잘 동작하였다. 최대 출력전류에서 병렬로 연결된 IGBT들의 전류차이는 1 A 이하로 양호하였다. 출력필터 코일의 저항성분으로 인하여 코어의 표면온도가 약 60 °C로 상승하였으며, 수냉식으로 냉각되는 IGBT와 브릿지 다이오드의 온도는 40 °C이하 이었다.



〈그림 5〉 IGBT PWM 전압파형 (Ch1: PWM1b, Ch2: PWM2b, Ch3: PWM 1a, Ch4: PWM 2b)



〈그림 6〉 부하전류 파형(±200A)

3. 결 론

이 논문은 DSP로 제어되는 phase-shift 병렬운전 전원장치를 다루었다. 이 전원장치는 전체 시스템이 DSP로 제어된다. 구현된 전원장치에서 실제로 출력되는 전류파형은 임의로 프로그램 된 전류파형과 매우 잘 일치됨을 보여주고 있다. 양방향모드에서 160V의 링크 전압에서 ±350 A 까지 출력할 수 있다. 병렬로 연결된 두개의 IGBT들 사이에서 나타나는 전류차이는 약 1 A 정도였다. 출력필터의 코어의 온도는 약 60 °C이며 수냉식으로 냉각되는 IGBT모듈과 브릿지 정류기의 온도는 약 40°C로 측정되었다. 이 전원장치의 안정도는 80 ppm보다 작지만 가까운 시일 내에 50 ppm정도로 개선할 것이다.

[참고 문헌]

- [1] Bong-Hwan Kwon, "Design of a highly stable electromagnet power supply," IEEE Trans, Industrial Electronics, Vol. 39, No. 2, p. 149, 1992
- [2] Shyh-Shin Liang, "DSP control of a resonant switching high-voltage power supply for X-ray generators," PEDS' 01, Indonesia, vol. 2, p. 522.
- [3] Cadirci, I, "Unity power factor boost converter with phase shifted parallel IGBT operation for medium power applications" IEE Proc.-Electr. Power Appl., vol. 149, No. 3, p. 237, 2002.
- [4] www.powersim.com POWERSIM, Powersim Inc. Andover, MA