

## 고정밀 전자석 전원 장치 개발

박기현\*, 정성훈\*, 김명호\*\*  
 포항가속기연구소\*, 풍력특성화대학원\*\*

### Development of High Stability Magnet Power Supply

Ki-Hyeon Park\*, Seong-Hun Jeong\*, Myoung-Ho Kim\*\*  
 Pohang Accelerator Laboratory\*, Graduate School of Wind Energy\*\*

**Abstract** - 이 논문은 가속기에 사용되는 전자석용 전원장치 개발에 대해서 기술하였다. 이 전원장치는 DSP TMS320F2808과 ADCs, FPGA를 이용한 디지털 신호처리 기술을 적용하여 5ppm 이하의 출력 전류 안정도를 가진다. 여기서는 전원장치의 입력 및 출력 필터, 비례적 분 보상기 등에 대한 설계, 전원장치 모의실험 결과 및 제작 후 출력 전류의 안정도, 시스템의 주파수 특성 등 여러 성능의 측정 결과에 대하여 기술하였다.

#### 1. 서 론

가속장치는 전자빔을 집속하거나 편향시키기 위하여 전자석과 함께 고정밀도의 전원장치가 사용된다. 이 전원 장치는 안정된 빔 운전을 위해서 높은 출력 전류 정밀도와 안정도를 가져야 한다.

1990년대에 이 전원장치들은 SCR 스위칭 소자와 연산증폭기를 이용한 아날로그 제어기를 사용하였다. 현재는 고성능의 DSP와 IGBT, FET 등의 반도체를 사용하여 디지털 제어기술을 적용한 스위칭 모드 전원장치가 개발되고 있다[1].

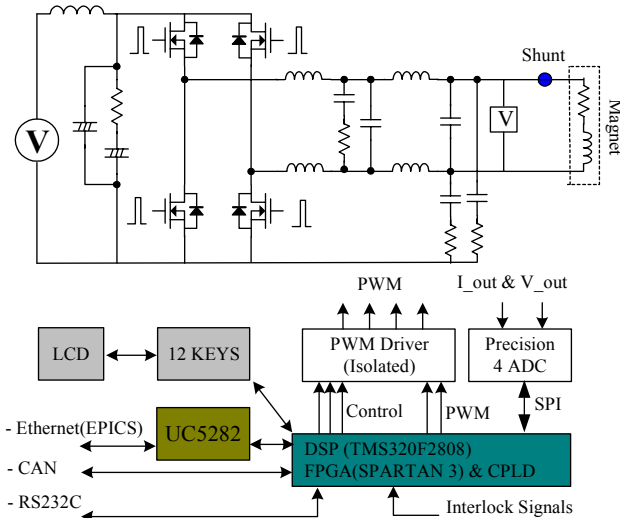
Texas Instrument 사의 TMS320F2808 DSP를 이용하여 전류제어형 양방향 스위치모드 전원장치(SMPS)를 개발하였다. 이 전원장치는 DSP의 고 분해능 PWM 기능을 사용하여 수 ppm의 전류 안정도를 가진다. 검출되는 출력 전류와 전압은 FPGA에서 전 처리되어 DSP로 보내지며, 이러한 처리 방법을 통하여 DSP에서 발생하는 연산 지연 시간을 최소화 하였다. 이 전원장치는 RS232C, 이더넷 또는 CAN 통신이 가능하도록 설계하여 원격제어 또는 감시가 용이하도록 하였다. 또한 전면이 Key pads와 디스플레이 관벌을 설치하여 사용이 편리하도록 하였다.

이 논문의 본문에서는 전원장치의 구성, 입력필터, 출력필터, 제어기 등의 설계와 모의실험 결과 등을 기술하였으며, 주파수 특성, 출력 안정도 등의 여러 성능 측정 결과에 대하여 설명하였다

#### 2. 본 론

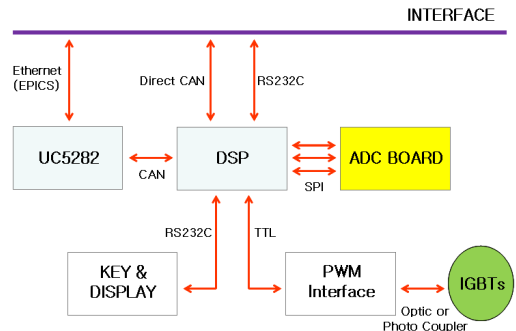
##### 2.1 전원 장치 구성

전원 장치 구성은 그림 1과 같다. DSP는 TMS320F2808을 사용하였으며 이 DSP의 micro-edge positioning technology[2]를 사용하여 고 분해능으로 펄스폭을 결정한다.



<그림 1> 전원 장치의 구성도

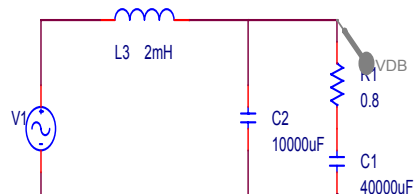
Switching 소자는 IRF540 FET를 사용하였으며 주파수는 25KHz 이다. 따라서 매 40 $\mu$ s 마다 PWM의 펄스폭이 update 된다. ADC는 Analog device사의 AD977을 사용하였으며, 이 ADC는 16-bit 분해능, 200KHz throughput, 자체 기준전압 및 SPI 인터페이스를 가진다. ADC의 SOC 신호는 FPGA에서 200KHz 마다 발생하며, 디지털로 변환된 신호들은 FPGA에서 전 처리되어 SPI를 통해서 DSP로 보내진다. FPGA는 Xilinx사의 Spartan6를 사용하였다. DSP는 Arcturus Networks사의 UC5282 보드를 통해서 이더넷(EPICS 포함) 통신이 가능하다. UC5282 보드와 DSP는 CAN 방식으로 통신하며 baudrate 250KHz 이다. 이 전원장치는 외부기와 RS232C, CAN 통신도 가능하도록 설계하였다. Key 스캔과 LCD 디스플레이 제어는 8051 CPU를 사용하여 개발하였으며 DSP와는 내부적으로 RS232C로 통신한다. DSP는 매 100ms 마다 출력전류, 인터록 상태 등을 이 디스플레이에 모듈에 송신한다. 아래의 그림 2는 전원장치 내부의 모듈간 인터페이스를 보여주고 있다. 과전류, 과전압 또는 Over-Heat 등의 Interlock 신호가 활성화 되면 출력 전류는 Hardware 적으로 차단되게 설계하였으며, 이 Interlock 상태는 CPLD에서 Latch되어 Interlock 소스를 쉽게 찾도록 하였다.



<그림 2> 전원장치에 있어서 Sub-모듈간 신호연결

##### 2.2 입력필터

정류된 입력전압은 전원주파수의 고조파 성분을 가지며 전원장치의 높은 안정도를 얻기 위해서는 이 성분들을 어느 정도 감쇄를 시켜야 한다. 따라서 그림3과 같은 병렬 댐핑 회로를 가진 입력 필터의 설계가 필요하다. 이 필터는 L-C 필터와 R-C damper를 가진다. R1은 차단 주파수 응답 특성에서 나타나는 공진 특성을 완화하는 역할을 한다. 주어진 그림에서 차단 주파수는 40Hz이고 5dB 정도의 peak 이득을 가진다. C1은 입력전압의 DC 성분을 차단하여 R1에서의 전력소모를 최소화 하도록 한다.

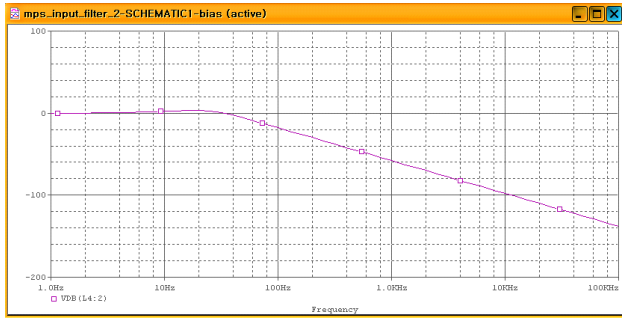


<그림 3> 병렬 감쇄 회로를 가지는 입력 필터

그림 3의 전달 함수는 아래의 수식과 같이 주어진다.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1 + sC_1R_1}{s^3L_3C_2C_1R_1 + s^2L_3R_1(C_2 + C_1) + sC_1R_1 + 1}$$

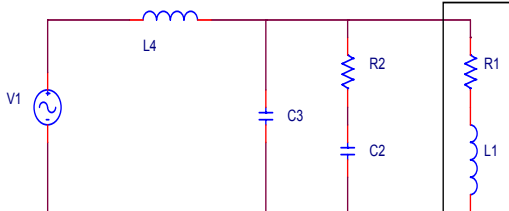
필터의 전달함수가 약간 언더 감쇄 특성을 가지도록  $C_1 = 4C_2$ 의 조건으로 커패시터 값을 선정한다[3]. 그림 4는 PSPICE로 입력 필터의 주파수 응답을 모의 실험한 것으로 차단 주파수는 ~40Hz에 있으며 약간 언더 감쇄된 것을 볼 수 있다.



〈그림 4〉 입력 필터의 주파수 응답 특성

### 2.3 출력필터와 전자석 모델링

출력필터 설계는 스위칭 주파수 성분 감쇄비와 시스템 전체 응답 특성을 고려해서 설계하였다. 감쇄비가 크면 고주파 성분이 줄지만 주파수 응답 특성이 나빠져 오히려 성능이 저하될 수 있다. 출력 필터의 차단주파수는 스위칭 주파수의 1/3에서 1/10 사이에서 정해진다. 출력 필터는 고주파 성분을 보다 많이 제거하기 위하여 2단으로 설계되며 2번째 필터의 차단주파수는 1/2 스위칭 주파수 이상에 있도록 설계된다. 출력 필터 역시 입력필터와 같이 병렬 감쇄회로를 가지도록 설계되며 그림 5에서  $C_2 = 4C_3$  조건을 만족하도록 설계한다. 출력필터와 부하 전자석을 포함한 모델은 그림 5와 같다. L1과 R1은 전자석의 등가회로이다. 여기서 2번째 필터는 연산을 간단하게 하기 위하여 생략하였다.



〈그림 5〉 출력 필터와 전자석 모델링

그림 5에서 입력 전압에 대한 출력 전류의 전달함수는 아래의 수식과 같다.

$$\frac{I_{out}}{V_{in}} = \frac{1 + sC_2R_2}{a_4s^4 + a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0}$$

여기서  $a_4 = L_1L_4R_1C_2C_3$ ,  $a_3 = L_1L_4C_2 + L_4R_1R_2C_2C_3 + L_1L_4C_3$

$a_2 = C_2L_4R_2 + C_2L_4R_1 + L_4C_3R_1 + C_2R_1R_2$ ,  $a_1 = R_1$ 이다

### 2.4 제어기 설계

전원장치의 제어기는 그림 6과 같이 2개의 PI 제어기가 cascade로 연결된다. 안쪽 제어기는 출력전압을, 바깥쪽 제어기는 출력 전류를 각각 제어한다. 전압제어기는 전류제어기에 비교하여 작은 시정수를 가지도록 설계한다. 아래의 수식은 전원 장치 제어기의 전달 함수이다.

$$H(s) = \frac{I_{out}(s)}{I_{ref}(s)} = \frac{G_c(s)G_{in}(s)S_I(s)}{1 + G_c(s)G_{in}(s)S_I(s)}$$

여기서  $G_{in}(s) = G_p(s)G_V(s)/(1 + G_p(s)G_V(s))$ 은 전압제어기의 등가 전달함수이며,  $G_c(s)$ 는 PI 제어기,  $S_I(s)$  쿼환 이득이다.

PI 제어기는 아래의 수식과 같이 쓸 수 있다.

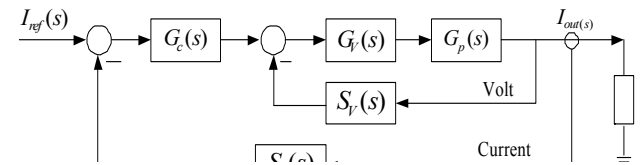
$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt$$

여기서  $e(t)$ 는 설정 값과 출력 값과의 오차이고,  $K_P$ 와  $K_I$  비례와 적분 이득 값이며, 이 값들은 시스템 모델링 후 연산에 의해서 구한다. 이 수식을 이산 식으로 표시하면 아래와 같으며,  $I(k)$ 는 적분기,  $P(k)$  비례기 출력이다.

$$I(k) = (E(k) + E(k-1)) * K_I T_s / 2 + I(k-1)$$

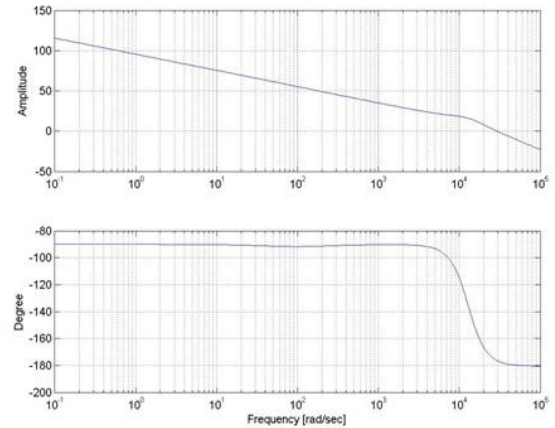
$$P(k) = K_P * E(k)$$

이 PI 제어기는 적분기 windup이 방지되어 있다.



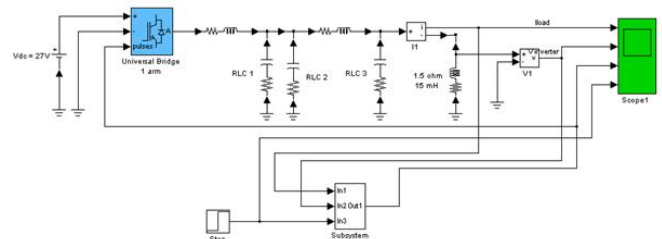
〈그림 6〉 전원 장치의 제어기 블록도

PI 제어기와 시스템을 통합하여 개 루프 응답 특성을 MATLAB을 사용하여 모의 실험한 결과는 그림 7과 같다. Cross over 주파수는 5 KHz 정도에 있으며 이때 phase는 약간의 마진을 가진다.

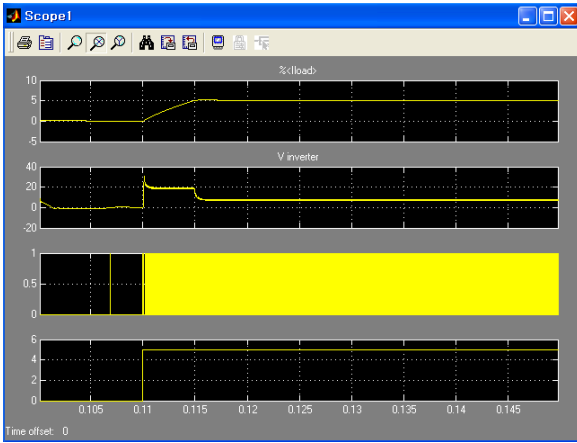


〈그림 7〉 전원장치의 개 루프 주파수 응답 특성

전원장치를 Simulink를 이용하여 계단입력에 대한 출력 특성을 모의 실험 하였다. 24V link 입력 전압, 2 단의 출력 필터 및 전자석을 모델링 하여 아래의 그림 8과 같이 구성하였다. 부하 측의 전압과 전류를 모두 픽업하여 cascaded PI 제어기에 입력하였다. 모의 실험결과는 그림 9와 같으며, 그림의 하단으로부터, 계단 전류 설정 명령, PWM 파형, DC 출력 전압, 출력 전류이다. 계단 입력 후 5msec 후에 출력 전류가 안정 상태에 도달하는 것을 볼 수 있다. 또한 약간의 Overshot을 가지는 것을 볼 수 있어 전원장치가 안정하게 동작하는 것을 확인할 수 있다.



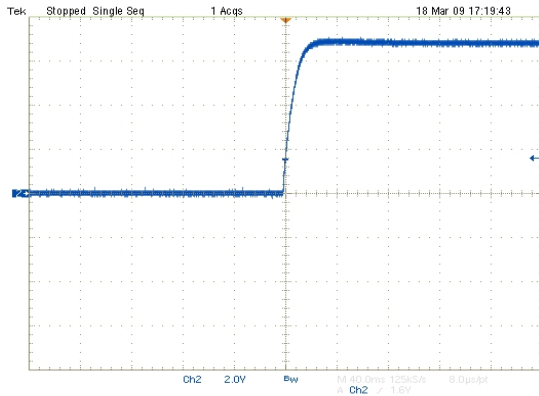
〈그림 8〉 전원장치를 Simulink로 모델링 한 그림



<그림 9> Simulink 모의시험 결과

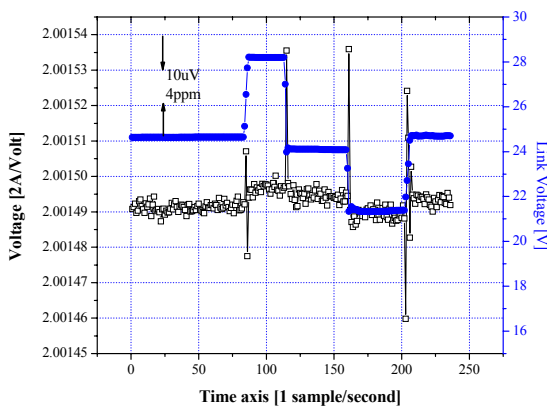
2.5 실험 결과

아래의 그림 11 은 전원장치에 계단 입력 명령을 주었을 때의 출력 응답특성이다. 출력이 진동 없이 임계 감쇄하는 것을 볼 수 있으며, 이결과는 Simulink로 모의실험 한 그림 9 의 결과와 거의 일치하는 것을 볼 수 있다.



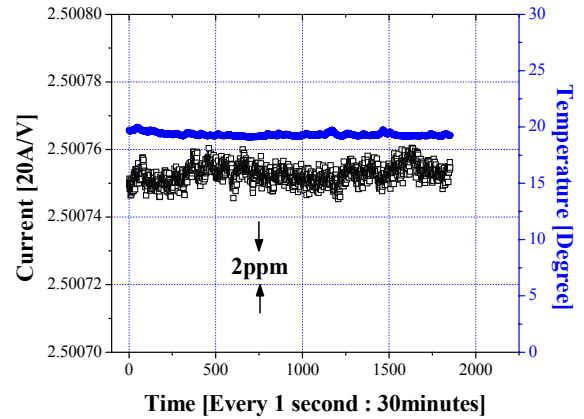
<그림 11> 0에서 바로 5A로 계단 입력을 가했을 때의 출력 응답특성

아래의 그림 12 는 Link 전압을 임의로 바꾸었을 때 출력 응답이 얼마나 잘 적응하는지를 측정한 그림으로 응답특성이 양호한 것을 볼 수 있다 또한 Link 전압이 7V 이상 바뀌어도 전류 안정도는 4ppm 이내인 것을 알 수 있으며, 전압이 바뀌는 순간 20ppm 이내의 출력 전류 과도 응답이 나타나는 것을 볼 수 있다.



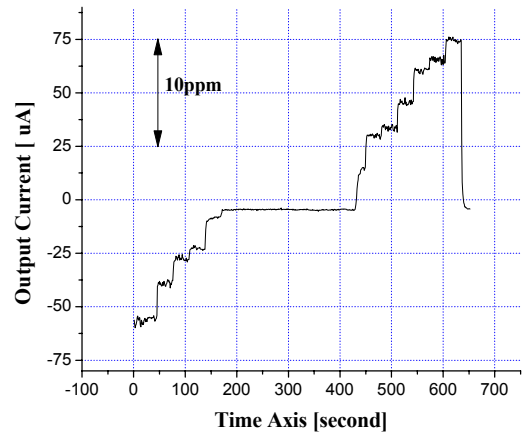
<그림 12> Link 전압변동에 따른 출력 응답 특성 측정

아래의 그림 13 은 단시간 출력 안정도를 측정한 그림으로 30분 동안 출력의 변동이 3ppm 이하로 매우 양호한 것을 볼 수 있다.



<그림 13> 출력 안정도 측정 결과. 30분 동안 3ppm 이내의 출력 전류 안정도를 보인다

아래의 그림 14 는 양방향 전원장치에서 출력 전류가 0 점을 지나는 때의 출력전류 응답특성을 측정한 그림으로 10ppm 이하의 양호한 성능을 보이는 것을 볼 수 있다.



<그림 14> 양방향 전원 장치에서 출력 전류의 부호가 바뀔 때의 전원 장치의 응답 특성

3. 결 론

DSP, FPGA 및 ADC 등의 디지털 기술을 이용하여 고정밀 전자식 전원장치를 개발하였다. 이 전원장치는 5ppm이하의 출력 안정도를 가지며, 주파수 응답특성, 선형성 등이 양호하였다. 계단 입력에 대한 출력의 응답 특성은 simulation 결과와 잘 일치하였다. Link 전압 변동시 전원장치의 응답특성도 4ppm 이내의 우수한 성능을 보인다. 또한 양방향 전원장치에서 전류의 방향이 0 점을 지날 때의 성능도 10ppm 이내인 것을 확인하였다. 이 전원장치는 이더넷(EPICS 포함), RS232C, CAN 통신이 가능하다. 여기서 개발한 디지털 제어기는 단방향, 양방향 및 병렬 운전에 의한 대 전류 까지 제어가 가능하여 고정밀 전자식 전원장치에 사용될 수 있다.

[참 고 문 헌]

[1] Shyh-Shin Liang, "DSP control of a resonant switching high-voltage power supply for X-ray generators," PEDS' 01, Indonesia, VOL. 2, p. 522.  
 [2] Texas Instruments Co., www.ti.com  
 [3] Walter F. Praeg, "A High Current Low-Pass Filter for Magnet Power Supply," IEEE Transaction on Industrial and Control Instrumentation, Vol. IECI-17, NO. 1, page 16-22, 1970