

전 디지털제어 전원장치

하 기만⁺, 김 윤식⁺⁺, 이 성근⁺⁺⁺

Fully Digital Controlled Power Supply for PLS*

Kimhan Ha⁺, Y.S Kim⁺⁺ and S.K Lee⁺⁺⁺

Abstract : Fully digital controlled 20-bit magnet power supplies have been developed and successfully tested for closed orbit correction of PLS(Pohang Light Source). The new digital power supply has used fiber optics for 25kHz switching of IGBT drivers, and implemented DSP, ADC, Interlock, DCCT cards in a compact 3U-sized 19" chassis. Input/Output low-pass filters suppress harmonics of 60Hz line frequency and switching frequency noise effectively. Overall performance of the power supplies have been demonstrated as +/- 2ppm short-term stability(<1 min), and +/- 10ppm long-term stability(<36 hours). All the existing 12-bit 70 power supplies for vertical correction magnets will be replaced with new digital power supplies during 2005 summer shutdown period. In this paper, we will describe the hardware structure and control method of the digital power supply and the experimental results will be shown.

Key words : PS: Power Supply, DSP :Digital Signal Processor, DCCT : Direct Current Current Transducer, ADC :Analog to Digital Converter, IGBT : Insulated Gait Bipolar Transistor

1. 서 론

포항가속기연구소(PLS) 저장링의 직류전원장치(DC Power Supply)는 저장링 내의 Tune 변화와 빔의 안정도 유지 및 빔의 궤도 교정을 위해 고안정도를 요구하고 있다. 고안정도의 전원장치는 외국의 여러 가속기 연구소(SLS, SPEAR3, DIAMOND)에서 빔 안정성과 기술적인 우위를 확보 및 증대시키기 위해 많은 연구와 개발을 하고 있다[2]. 특히 최근에 가속장치를 위한 고안정도 DC 전원장치의 전류제어 기법이 전통적인 Analog 방식에서 Digital 방식으로 전환되어 디지털의 여러 장점들을 활용하여 빔 운전을 극대화시키는 경향을 보이고 있다. 포항가속기연구소의 DC전원장치는 1994년 시운전 이후 11년째 운전에 적용되

고 있다. 삽입장치 빔라인 증설과 빔 사용자들의 요구가 계속 높아지기 때문에 운전 중 Orbit 궤도의 되먹임은 필수적이다. 처음 가속기연구소의 교정용전원장치는 12bit의 분해능을 가진 Hystercics 제어 기법을 사용하였다[1]. 3세대 저장링의 빔 궤도를 원하는 위치에 교정시키기 위해서는 교정용 PS의 고 신뢰성(high confidence)과 안정성(stability)이 확보되어야한다. 특히 고정도 전류제어 기능과 전류공급 재현성(reproducibility) 그리고 짧은 시간과 긴 시간 전류안정도는 빔 궤도 되먹임장치를 위해 적용하기 위해서 중요하다. 현재의 저장링 교정용 PS는 빔 궤도 되먹임을 하기에는 전류제어분해능이 12bit 이기 때문에 Orbit feedback용으로는 부적합 하므로, 새로운 형태의 저장링 양방향 교정전자석 전원장치의 도입이 요구 되었다. 가속기연구소에서는 빔 안정화

*This work is supported by MOST, KOREA

+ 하 기만(국립한국해양대학교 대학원 전기전자공학부/포항가속기연구소),E-mail:hkm@postech.ac.kr, Tel: 054)279-1435 011)524-9701

++ 김 윤식(국립한국해양대학교 전기전자공학부),E-mail:benkys@mail.hhu.ac.kr

+++이 성근(국립한국해양대학교 전기전자공학부),E-mail:glee@mail.hhu.ac.kr

와 빔 궤도 되먹임을 위해 저장링의 수평용 PS를 위한 새로운 개념의 PLS 저장링 교정용 PS는 SLS(Swiss Light Source)의 최신 디지털제어 기술을 기반으로 PLS 운전조건을 만족하는 고성능의 양방향전원장치 개발을 완료하였다. 새로 개발된 DC전원장치는 전 디지털제어 기술을 사용하여 전류 제어와 Input/Output 신호 관리가 이루어지며 20V/110A 용량, 2ppm의 step resolution, +/-2ppm short-term stability 그리고 +/-10ppm의 긴시간 안정성(long term stability)을 가지고 있다. 본 논문에서는 포항가속기연구소에 저장링 Orbit feedback으로 사용할 새로운 개념의 디지털 PS의 하드웨어 및 제어기 구성과 시험 결과에 대해 논하고자 한다.

2. 디지털전원장치 하드웨어 구성

2.1 H-Bridge 4상한 양방향 전원장치

그림 1은 포항가속기(PLS) 교정용전자석 전원장치를 위한 제안된 디지털 전원장치의 하드웨어의 구성도를 보여주고 있다. Δ/Y 결선의 3상 다운트랜스포머를 거친 AC전압(208V, 21V)은 Diode와 인덕터를 거쳐 고용량의 커패시터에 충전되게 된다. 충전된 DC 전압은 PWM 방식으로 IGBT 스위치를 개폐하여 출력필터를 통해 (+) 방향과 (-)방향으로 전류가 마그네트 부하로 흐르게 된다. IGBT(600V/300A EUPAC사)를 스위칭 하기 위해 사용한 PWM 주파수는 25kHz 이다. 출력 필터는 4kHz의 차단(cut-off) 주파수를 갖도록 하였다. 출력전류의 제어하기 위해 사용한 feedback 점은 출력부하 전류와 DC-link전압이다. 전압되먹임은 빠르게 변화되는 라인전압에 따른 출력전류를 보상하기 위해 사용되었고, 전류되먹임은 출력전류를 안정화시키기 위해 PI제어로 이루어진다. 전압과 전류신호는 ADC card로 연결되고 고정밀도의 ADC의 오버샘플과 평균화(Averaging) 과정을 거쳐 18bit 이상의 분해능을 갖는 디지털 신호로 바꾸어 출력전류를 제어한다.

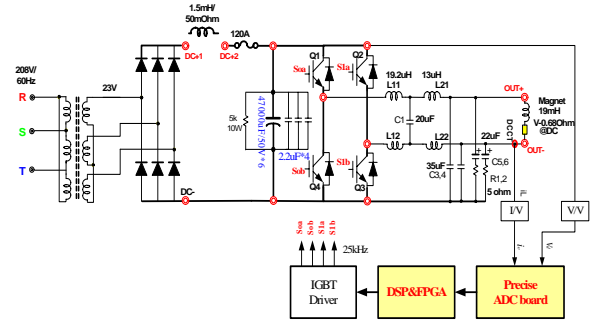


Fig. 1 The H-bridge four quadrant power supply

2.1.1 하드웨어 사양

표 1은 디지털 전원장치의 하드웨어 사양을 보여 주고 있다. 가속장치를 위한 디지털 전원장치의 특성으로는 출력전류 step 분해능이 전 전류 영역에서 20bit이상을 요구하며 또 짧은 구간과 긴 구간에서의 전류 안정도를 +/-10ppm 이하를 요구하고 있다. 스위칭 주파수는 스위치소자의 종류에 따라 달리 결정할 수 있다. 디지털전원장치로 사용한 파워소자는 고속 IGBT를 사용하여 110A 25kHz 에서 사용하고 있다.

Table 1. The Specifications of Digital PS

Parameters	Specifications
Output Voltage/Current	21V, +/-110A
Load inductance	16mH @1kHz
Operating quadrant	4Q
Stability(0s to 60sec)	+/-2.5ppm
Stability(>12hours)	+/-10ppm
Resolution of output current	>20bit
Reproducibility	+/-5ppm
Filter Cut-off frequency	4.5kHz
Switching frequency	25kHz PWM

2.1.2 PWM 발생기

그림 2는 H-bridge 의 4상한 스위칭을 하기 위해 사용되는 PWM 신호를 보여주고 있다. PWM 주기는 25kHz로 선택하였으며, 파워소자의 특성에 따라 100kHz까지 주파수를 올릴 수 있도록 되어 있다. 먼저 U_REF의 레벨에 의해 주 삼각파와 캐리어 주파수와 비교되어 PWM의 width가 조절되게 된다. 4상한 제어에서는 Unipolar 스위칭을 하기 때문에 출력부하 측

에서는 주파수가 2배로 되어 응답특성과 출력과형이 좋아진다[3].

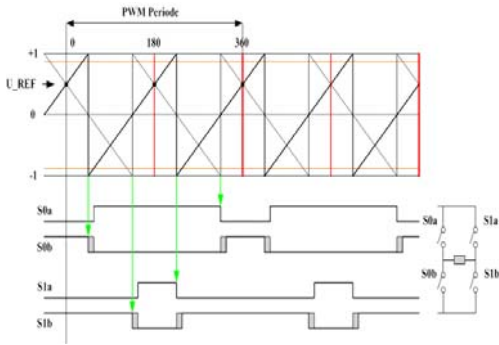
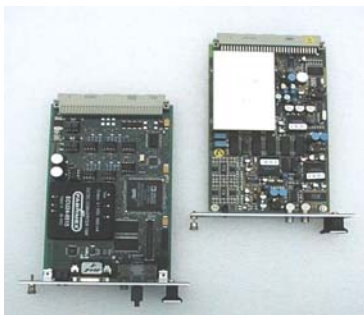


Fig. 2 PWM for 4 quadrant power supply

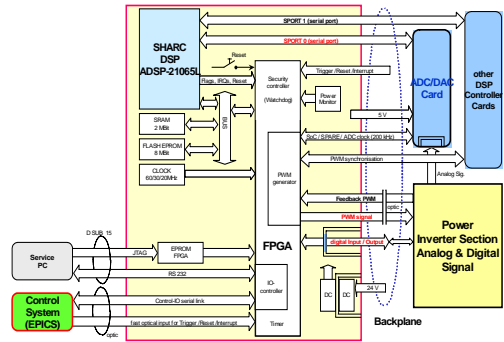
3. 제어기 구성

3.1 디지털 제어기

그림 3의 (a)는 디지털 제어계를 구성하기 위한 3U size의 DSP card와 ADC card를 보여주고 있다. 그림 (b)는 DSP card의 내부 기능별 구성도와 ADC 그리고 Inverter 모듈과의 연결을 보여주고 있다. DSP 와 FPGA가 결합되어 제어계가 구성 되었으며, FPGA는 5Mbps의 광통신 포트와 115.2kbps의 직렬 통신, 6개의 PWM, 16개의 디지털 입력 그리고 8개의 디지털 출력을 지원한다. 5Mbps의 광 포트는 VME 제어시스템과 연결되어 고속으로 하드웨어를 원격에서 실시간 제어를 하기 위해 사용하고, 시리얼은 컴퓨터의 RS232 포트에 연결하여 하드웨어를 진단하거나 테스트하기 위한 용도로 사용되어진다.



(a) Digital card(left: DSP card, right: ADC card)



(b) Control hardware internal structure
Fig. 3 Digital control cards and configuration

3.1.1 DSP card

DSP는 Analog Device사의 32bit 60MHz로 구동되는 ADSP-21065L을 사용하였다. DSP는 매 20us 이내로 제어루프를 계산하여 전류 안정화를 위한 새로운 PWM duty값을 만들어 낸다. 그리고 I/O 신호를 관리하며 각종 필요한 제어를 하게 된다. 그림 4는 DSP 내부에서 수행하는 디지털 제어루프를 보여주고 있다. 주 제어알고리즘은 PI제어와 DC-link의 전압변화를 보상하기 위한 Feed-forward 루프로 구성되어 있다.

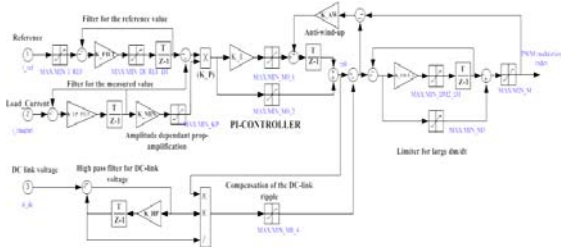
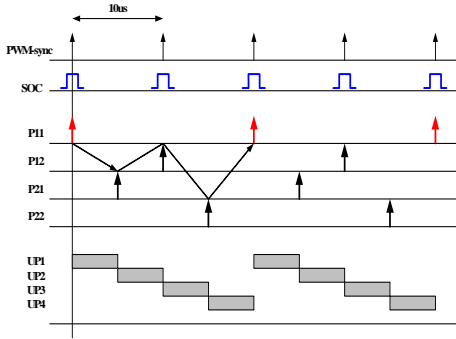


Fig. 4 Digital control loops for current regulation

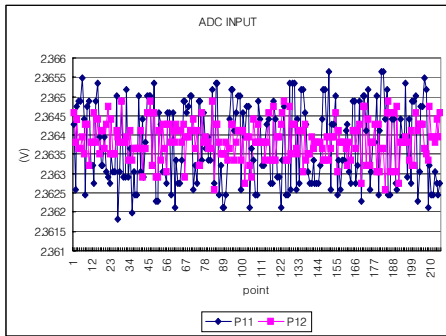
3.1.2 ADC Card

그림 5의 (a)는 ADC 입력 신호를 샘플링하기 위한 시간도를 보여 주고 있다. 디지털 전원장치의 출력전류의 분해능은 아날로그 전류신호를 디지털로 변환할 때 정밀도에 따라 좌우된다. ADC card에는 16bit, 8개의 아날로그 입력 채널이 있다. 그중 4개는 병렬로 연결되어 200kHz로 오버 샘플링 하여 평균치를 취하여 전류측정용으로 사용되고 나머지 4개는 DC-link 전압과 부하의 전압을 측정하는데 사용된다. 그림 5

의(b)는 실제로 부하에 흐르는 전류가 ADC를 거쳐서 디지털로 변환된 값을 보여주고 있다.



(a) ADC sampling timing



(b) ADC input for load current signal(every 100ms sampling)

Fig. 5 ADC data measurements

4. 시험 결과

4.1 하드웨어 시험 결과

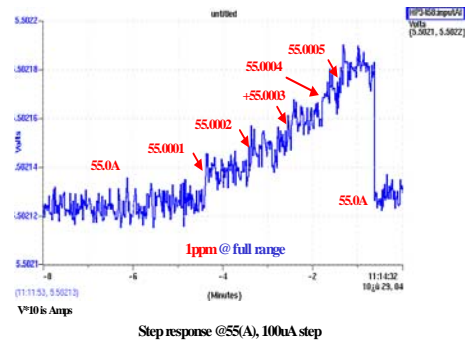
디지털 전원장치의 시험을 위해서 사용한 계측기는 안정된 출력전류 측정을 위해 HP3458A 8과 1/2 Digital multimeter와 주파수 특성 측정을 위해 SR780 Dynamic Signal Analyzer를 사용하였다. 그림 5는 제작된 4U size의 디지털전원장치의 실물을 보여주고 있다. 본 논문에서는 전자석전원장치의 성능을 판단하는 중요한 특성인 출력전류 분해능, 안정성 그리고 주파수 특성에 대해 측정하였다.



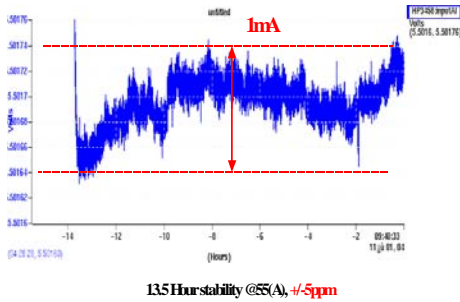
Fig. 6 Completed of Digital PS

4.1.1 전류 안정성(Current Stability)

마그네트를 위한 직류전원장치의 특성은 전류에 의해 마그네트의 필드를 변화시키기 때문에 짧은 시간과 긴 시간에 변화되는 전류의 안정성이 매우 중요하다. 정밀 전원장치의 경우 수 ppm의 분해능과 10ppm 이하의 안정도를 요구 하고 있다. 그림 7의 (a)는 1ppm 단위로 전류를 제어 하였을 때 출력 전류의 반응을 보여주고 있다. 그림 (b)는 13시간동안의 전류 안정도가 10ppm 이내로 유지되고 있음을 보여주고 있다.



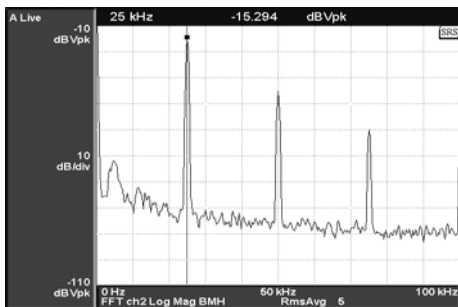
(a) Step response(200uA/Div)



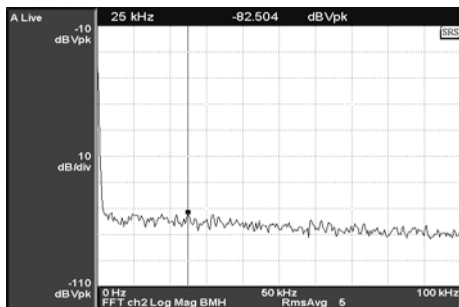
(b) Long term stability(13 hours, 200uA/Div)
Fig. 7 Output current measurement

4.1.2 출력 필터(Output Filter)

그림 8의 (a)(b)는 디지털 전원장치의 출력 전류에 대한 주파수 특성을 보여주고 있다. (a)에서는 필터 전단의 주파수 특성을 보여주고 있다. 이 주파수 특성은 스위치 주파수에 해당되는 25kHz 와 그 배수인 50kHz 그리고 75kHz에서 커케 분포됨을 알 수 있다. 그림 (b)는 필터를 거친 후의 출력전류 주파수 성분을 보여주고 있다. 이 결과 스위칭 주파수에 관계된 주파수 성분이 필터에 의해 -60dB 정도로 감쇄되어 있음을 알 수 있다.



(a) Before filter(25, 50, 75kHz)



(b) After filter

Fig. 8 Filter frequency response @ 25A

4. 결 론

본 논문에서는 전 디지털 제어 기법을 사용하여 4상한 제어의 고 기능의 전자식 전원장치를 개발하여 저장장에 설치하여 성공적으로 운전해 적용한 내용에 대해 소개 하였다. DSP와 FPGA 그리고 ADC를 사용한 디지털 제어를 통해 10ppm의 긴 시간 안정도와 2ppm 급의 출력전류를 제어할 수 있는 전원장치의 성능을 시험을 통해 확인하였다. 그리고 4.5kHz의 차단 주파수를 갖는 출력 필터를 개발 하였으며 5kHz 이상에서 -60dB 의 감쇄를 확인 할 수 있었고 앞으로 새로운 모델의 디지털 전원장치를 개발할 수 있는 계기가 될 것으로 기대한다.

후 기

기술적으로는 PS와 부하 그리고 제어계를 모델링 및 모의시험 하여 새로운 제어 알고리즘을 개발하여 최적의 디지털 전원장치를 개발 하는 것이다. DPS에 적용된 제어기술은 여러 디지털 제어계에 응용할 수 있으며 앞으로 하드웨어와 소프트웨어 등에 대한 많은 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1]Kiman Ha, J Choi, PAL-INT 2004-3 "The PLS Corrector Power Supply status and control experimental using DPS "
- [2]F. Jenni, L. Tanner, M. Horvat, "A Novel Control Concept for Highest Precision Accelerator Power Supplies"
- [3]Ned Mohan, Tore M, William P, "Power Electronics Converters, Applications, and Design", pp192-194, JOHN WILEY & SONS, INC. 1995