

포항가속기연구소 전자석전원장치 출력 전류 정밀 측정

김성철*, 안석호
포항가속기연구소

Precision Current Measurement of Magnet Power Supply at the PLS-II

Sung-chul Kim*, Suk-Ho An
Pohang Accelerator Laboratory

ABSTRACT

The accurate measurement of magnet power supplies (MPS) output currents is essential to delivering stable and repeatable currents to magnets in particle accelerators. An essential element in guaranteeing and evaluating the required performance is the current measurement device and method. In this paper, we discuss instrument and methods for precision current measurement and performance of the PLS-II MPS.

1. 서 론

가속기의 전자빔은 전자석의 자기장에 의하여 궤도가 편향 또는 집속되며, 이 전자석에 구동하기 위해 고정밀도의 전원장치가 사용된다. 전자석 전원장치는 안정된 빔 운전을 위해서 외부요인의 변화 시에도 안정된 출력전류를 공급하기 위한 시스템의 안정도가 매우 중요하며, 이러한 전자석 전원장치의 출력 전류 안정도를 평가하기 위해서는 전류 측정 장치와 방법에 대한 정밀도와 안정도에 대한 평가가 선행되어야 한다. 본 논문에서는 PPM (Parts Per Million) 단위의 출력전류 안정도를 평가하기 위한 전류 측정 장치와 방법에 대해서 논하고 이에 대한 평가 결과와 함께 이를 통해서 측정된 PLS-II의 Bipolar MPS의 출력전류 안정도 측정결과를 보인다.

2. DCCT 고정밀 전류 측정

일반적으로 10PPM이하의 고안정도를 가지는 출력전류를 측정하기 위해서는 그림 1과 같이 DCCT (Direct Current Current Monitor)로 구성된 측정 시스템을 이용 한다.

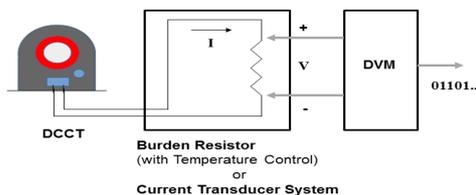


그림 1 DCCT 고정밀 전류 측정 시스템
Fig. 1 DCCT Current Measurement System

표 1 전류 Transducer 시스템 사양 비교 결과
Table 1 Current Transducer System Specifications

Current Transducer System	Linearity Error	Stability (Vs. Temp.)	Stability (Vs. Time)	Noise (DC 10Hz) (DC 10kHz) (DC 50kHz)
Danfysik Ultrastab Saturn	< 3ppm	≤ 2ppm/°C	≤ 2ppm/month	< 0.1ppm < 2ppm < 4ppm
Hitec MACC Plus	< 50ppm	≤ 5ppm/°C	≤ 5ppm/month	- < 3ppm -

이러한 측정 시스템에서 DCCT의 선택은 전체 측정시스템의 고정밀의 측정 안정도를 달성하기 위해서 중요하며, 일반적으로 전압 측정 장치 (DVM, Digital Voltage Meter)가 전류 측정 장치에 비해 더욱 정확한 측정성을 가짐으로써, DCCT에 Burden 저항의 TCR 등의 외부 오차 요인으로부터 측정 오차를 보상하기 위해 Transducer 시스템을 이용하여 전압을 출력하고 이를 고정밀 DVM을 통해 측정한다. 표 1은 고정밀 전류 Transducer 시스템의 사양을 나타낸다.

3. DVM 성능 측정 비교 시험

본 논문에서는 그림 1의 전류 측정 시스템에서 전체 측정 시스템의 정밀도와 안정도를 결정하는 DVM의 성능을 비교하기 위해 정밀 전류측정에 대표적으로 사용되는 Keithley 2000, Keithley 2010, Agilent 34401, Fluke 8508A, HP 3458A의 시험을 통한 비교를 진행하였다. 표 2는 적용된 DVM의 데이터시트상의 사양을 나타낸다. 각 DVM의 최소 측정범위에서의 24시간의 시간과 온도에 대한 안정도 비교 결과를 나타낸다.

표 2 DVM 사양 비교 결과
Table 2 DVM Specifications

	Digit(Resolution)	24Hour Stability	Temp. Coefficient
Keithley 2000	6 1/2(100nV)	30+30ppm	2+6ppm
Keithley 2010	7 1/2(10nV)	10+9ppm	2+6ppm
Agilent 34401A	6 1/2(100nV)	30+30ppm	5+5ppm
Fluke 8508A	7 1/2(10nV)	0.7+0.5ppm	0.4+0.3ppm
HP 3458A	7 1/2(10nV)	2.5+3ppm	0.15+1ppm

표 3 Calibrator(CA150) 사양

Table 3 Calibrator(Ca150) Specification

Resolution	Accuracy	Temperature coefficient
1uA	$\pm(0.025\%+3\mu A)$	Accuracy $\times 1/10\times^{\circ}C$

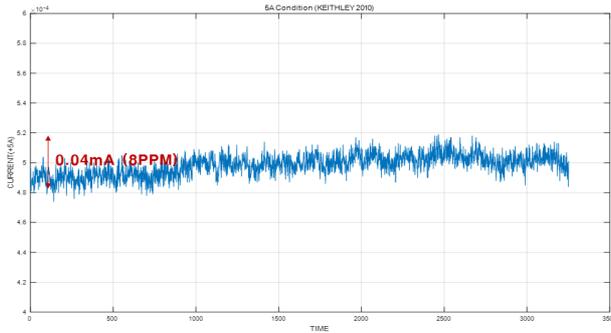


그림 2 DVM-Calibrator 24시간 5A 전류 측정시험 결과그래프 (Keithley 2010)

Fig. 2 DVM-Calibrator Measurement Test Result at 5A Condition During 24 Hours (Keithley 2010)

표 4 DVM-Calibrator 24시간 5A, -5A 전류 측정시험 결과

Table 4 DVM-Calibrator Measurement Test Result at 5A, -5A Condition During 24 Hours (Keithley 2010)

DVM Model	Current	Keithley 2000	Keithley 2010	Agilent 34401A	Fluke 8508A	HP 3458A
Value (P-P)	5A	0.05mA (10ppm)	0.04mA (8ppm)	0.04mA (8ppm)	0.04mA (8ppm)	0.04mA (8ppm)
	-5A	0.05mA (10ppm)	0.04mA (8ppm)	0.04mA (8ppm)	0.02mA (4ppm)	0.03mA (6ppm)

DVM에 대해서 성능 평가를 위해서 Yokogawa사의 고정밀 Calibrator인 CA150을 이용해 5A, -5A를 출력하고 24시간동안 DVM 측정 데이터를 비교하였다. 측정에 사용된 Calibrator의 사양은 표 3과 같으며, 그림 2는 Keithley 2010의 측정 결과 그래프를 나타낸다. 표 4는 각각 5A, -5A에 대하여 측정 안정도를 측정한 결과이다. 결과에 따라, Calibrator의 안정도를 감안하여 5종류의 DVM 모두 10PPM이하의 측정 안정도를 가짐으로써 고정밀 전류측정시스템에 적용 가능함을 확인하였다.

4. MPS 출력 전류 정밀 측정

앞서 평가된 고정밀 전류측정 시스템을 통해 PLS-II의 전자석전원장치의 출력전류 안정도를 측정하였으며, 그 결과 그래프는 그림 3, 4와 같다. 그림 3은 Danfysik사의 Ultrastab Satum 전류 Transducer와 Keithley 2010의 DVM으로 구성된 전류 측정 시스템으로, PLS-II의 Bipolar 전자석전원장치로 5A 출력하면서 24시간동안의 출력 전류와 외기 온도를 측정된 결과를 나타낸다. 그림 4는 Hitec사의 MACC Plus 전류 Transducer와 Keithley 2010의 DVM으로 같은 조건에서 시험한 결과를 나타낸다.

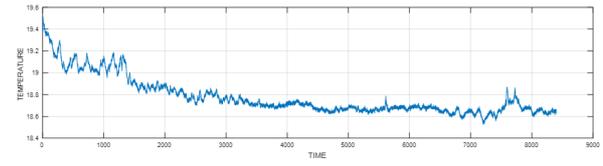
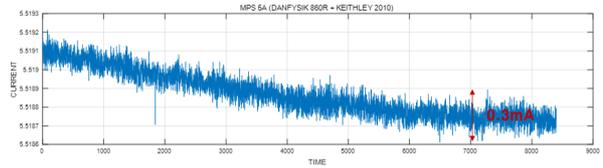


그림 3 MPS 5A 출력 전류 정밀 측정시험 결과그래프 (Danfysik+Keithley 2010)

Fig. 3 MPS 5A Output Current Measurement Test Result (Danfysik+Keithley 2010)

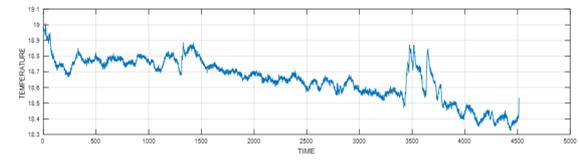
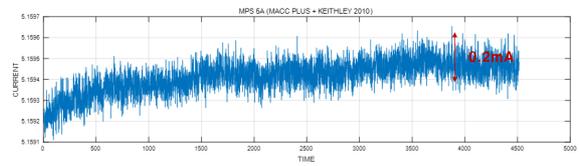


그림 3 MPS 5A 출력 전류 정밀 측정시험 결과그래프 (HITEC+Keithley 2010)

Fig. 3 MPS 5A Output Current Measurement Test Result (HITEC+Keithley 2010)

3. 결론

본 논문에서는 고정밀 MPS의 성능평가를 위한 출력 전류의 정밀 측정 방법에 대해서 소개하고 정밀 측정 시스템에 대한 시험평가 결과를 기술하였다. 또한 구성된 정밀 전류측정 시스템을 통해서 포항가속기연구소의 PLS-II에 적용된 20A Bipolar MPS의 안정도에 대한 평가를 진행하였다.

시험 결과를 통해 PLS-II에 적용된 20A Bipolar MPS가 10ppm이하의 고정밀 전류안정도를 가짐을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] Thomas Fors & Rob keane, Argonne national laboratory, "Unipolar Magnet PS and Precision Current Measurement R&D for the APS Upgrade", November 4, 2015
- [2] Miguel Cergueira Bastos, CERN, "High Precision Current Measurement in Power Converters", May, 2014