

## 백-컨버터의 위상천이 병렬운전 방식을 적용한 고정밀, 고안정 단방향 전자석전원장치

김성철\*, 문 철\*\*, 성치원\*

포항공과대학교 포항가속기연구소\*, 부산대학교\*\*

### High Accuracy and Stability Unipolar Magnet Power Supply by Phase-Shifted Parallel Operation of the Buck-Converter

Sung-Chul Kim\*, Cheol Moon\*\*, Chi-Woon Sung\*

Pohang Accelerator Laboratory/POSTECH\*, Pusan National University\*\*

**Abstract** - 포항가속기 연구소 PLS-II 저장링은 빔에너지 3.0 GeV, 빔전류 400 mA 그리고 5.8 mm-rad로 성능을 향상 하였다. 저장링 전체의 이극, 사극, 육극 및 셉텀 전자석의 구동을 위하여 디지털 제어를 적용한 독립된 강압형 buck-converter를 인터리버 방식으로 응용한 고정밀 단방향 전자석전원장치를 개발 하였다. 이들 전자석전원장치의 출력전류 안정도는 +/-10 ppm 이하이다. 본 논문에서는 PLS-II 저장링의 단방향 전자석전원장치의 설계 및 성능에 대하여 논하고자 한다.

#### 1. 서 론

포항가속기연구소 저장링에서는 전자빔의 궤도 유지 및 교정 위하여 전자석을 이용한다. 이러한 전자석의 제어를 위한 전원장치는 +/- 10 ppm 이하의 안정도를 유지하여야 한다. PLS-II [1][2]는 저장링의 전자석 전원장치(magnet power supply : MPS)는 크게 두 가지로 구분된다. 저장링 전체의 전자석을 동시에 구동하는 대용량 단방향(unipolar) 전원장치와 각 셀에 분산되어 있는 빔케도 교정을 위한 고정용 전자석을 구동하는 양방향(bipolar) 전자석 전원장치로 구분한다. 이들 전자석 전원장치는 PLS-II에서 요구되는 MPS의 사양에 따라 새롭게 디자인 하였다. 본 논문에서는 1000 A 급 단방향 전자석전원장치의 설계 및 출력 성능을 검증하였으며 주요 마그넷에 대해서도 동일한 방식으로 성능을 평가하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 유니폴라 방식을 사용하는 저장링 마그넷 종류

이극전자석(bending : BD), 주-사극 전자석(main-quadrupole : MQ), 육극 전자석 (sextupole : ST), 그리고 셉텀 전자석(septum : SP) 위한 고 전류를 필요로 하는 단방향 전자석전원장치는 백 컨버터 타입의 독립된 유닛 스택 전원 장치를 병렬 운전 방식으로 개발하였다. 단방향 전자석전원장치에서 유닛 스택 전원장치는 스위칭 주파수는 10 kHz 이며, 최대용량은 250 A 이다. 저장링에 적용되는 단방향 전자석 전원장치는 전자석에서 요구되는 전류에 따라 병렬로 개수를 조정하도록 하는 방식을 채택하였다. 이극 및 주-사극 전자석용 전원장치는 4개의 스택 전원장치를 각각 90도 위상 천이 병렬 운전하여 최대 출력전류는 1000 A 이다. 육극전자석용 전원장치는 2개의 스택 전원장치를 180도 위상 천이 병렬 운전하여 최대출력전류는 500 A 이다. 셉텀 전자석용 전원장치는 단일 스택으로 최대출력전류는 250 A 이다. 표 1은 시뮬레이션 및 실험에서 사용할 디자인 파라미터를 보여준다. 전류 안정도는 +/- 10 ppm 이하를 목표로 한다.

<표 1> 디자인 파라미터

Design Parameters	Values
Load Current	1000 [A]
DC Voltage	Different from Magnet
Magnet Load	BD, MQ1, MQ2, MQ3, MQ4
Switching Frequency	10 kHz
Maximum	0.9
Phase number	4

##### 2.2 유니폴라 마그넷 전원 장치

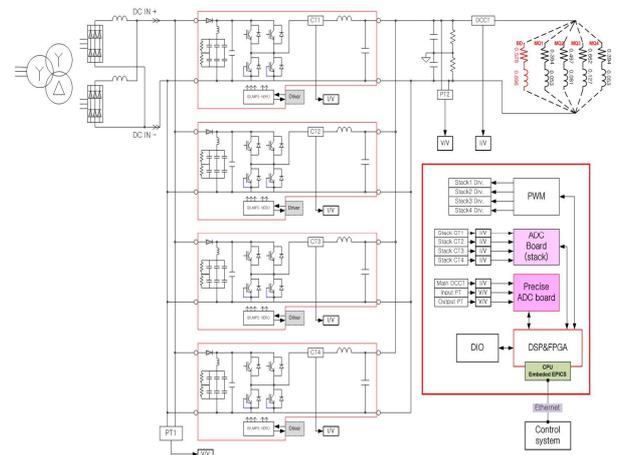
이극, 주-사극 그리고 육극 전자석은 저장링 전체의 동일한 전자석 직렬로 연결하고 각각을 전원장치 1대로 구동한다. 이극 및 주-사극 전자석용 전원장치는 최대 1000 A 출력으로, 육극 전자석용 전원장치는 최대 500 A 출력으로 그리고 셉텀 전자석용 전원장치는 최대 250 A 출력으로 개발하였다. 표 2은 단방향 전자석전원장치의 사양을 보여준다.

다.

<표 2> 유니폴라 마그넷 전원장치의 사양

MPS	Mag. [A] max	MPS [V] min	24 Magnet L[mH]/R [mΩ]	Tau = L/r
BD	928	508	696.0/528.0	1.3182
MQ1	898	384	52.6/393.6	0.1336
MQ2	914	483	81.1/496.8	0.1632
MQ3	840	588	127.4/662.4	0.1923
MQ4	898	384	52.6/393.6	0.1336
ST1	456	404	52.1/818.4	0.0637
ST2	455	461	72.0/945.6	0.0761
ST3	455	461	72.0/945.6	0.0761
ST4	455	461	72.0/945.6	0.0761
SP	230	24	/112.9	

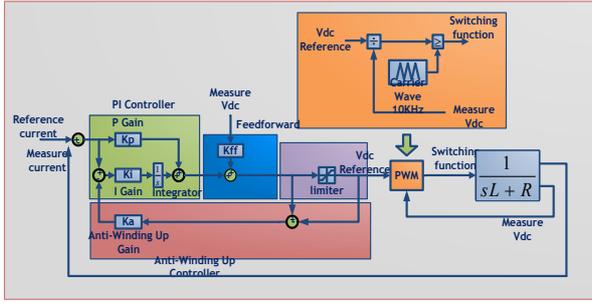
PLS-II 저장링에서, 단방향 전자석전원장치의 출력전류 안정도는 +/- 10 ppm 이하가 요구된다. 이를 만족하기 위하여 1000 A 급 전원장치는 250 A 급 단위 전원장치 4개를 90도 위상천이 병렬운전 그리고 500 A 급은 2개를 180도 위상천이 병렬운전하여 개발하였다. 이 방식은 전체 용량을 단일 전원장치로 하는 경우와 비교하여 장치를 소형화 할 수 있으며, 부하전류의 리플을 감소시켜 안정도를 향상시킬 수 있다. 이와 같은 리플 전류 감소는 입/출력 커패시터와 인덕터의 크기를 줄일 수 있어 컨버터의 전력 밀도를 증가시키는 효과가 있다 [4]. 그림 1은 제안한 위상천이 병렬운전을 하는 백 컨버터를 가지는 1000 A 급 유니폴라 MPS를 보여준다. MPS는 AC 정류기, 입력 필터, 하프 브리지, 출력 필터, DCCT 그리고 디지털 제어로 구성한다. 입력전압은 Y/Y/Δ 3권선 변압기 출력을 정류하였다. 정류한 전압은 전압의 안정화를 위하여 LC필터와 노치 필터를 걸쳐 커패시터에 충전된다. 충전된 DC 전압은 IGBT 스위치를 이용한 단방향 백 컨버터를 통해 전자석 부하로 흐르게 된다. 입력 필터는 60.528kHz, 노치필터는 720 Hz, 그리고 출력 필터는 5.93kHz로 각각 설계하였다. 노치필터는 정류 주파수 360 Hz 고조파 감쇄를 위해 입력에 설계하였다.



<그림 1> 이극 및 주-사극 전자석용 1000 A 급 전원장치 회로 다이어그램

## 2.2 마그넷 전원장치의 성능

제안된 위상천이 병렬운전 벽 컨버터의 유용성을 확인하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. PI 전류 제어기(CC)를 이용한 전체 구동 시스템의 모델은 그림 2과 같다. PI 전류 제어기에서 적분 제어기의 포화(integral windup) 문제 방지하기 위해 역 계산 방법(back calculation method)에 의한 Anti-Windup 제어기를 사용하였다.



〈그림 2〉 PI 전류 제어기가 포함된 전체 구동시스템의 모델

안티-와인드 업을 고려한 PI 전류 제어기의 수식은 다음과 같다.

$$\text{전류 오차} : e_i(t) = i_o^*(t) - i_o(t) \quad (1)$$

$$\text{안티-와인드 업 오차} : e_{ai}(t) = v_{dci}^*(t) - v_{dci}(t) \quad (2)$$

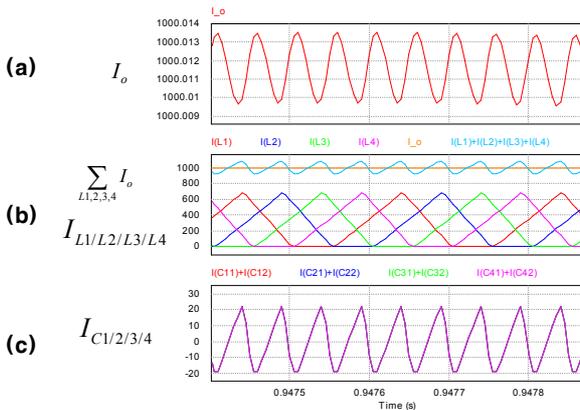
$$\text{피드포워드 제어기} : v_{dcff}(t) = v_{dcffb}^*(t) + K_{ff} \times v_{dc}^*(t) \quad (3)$$

$$\text{PI 제어기} : v_{dcffb}^*(t) = K_{ps} e_i(t) + K_{is} \int (e_i(t) - K_a e_{ai}(t)) dt \quad (4)$$

제어기의 샘플링 시간을  $T_s$  라 하면 이산 형태로 표현한 제어기 수식은 다음과 같다.

$$v_{dcffb}^* = v_{dcffb}^* - 1 + (K_{ps} + K_{is} T_s) e_{in} + K_{ps} e_{in-1} - K_{is} K_a T_s e_{ain} \quad (5)$$

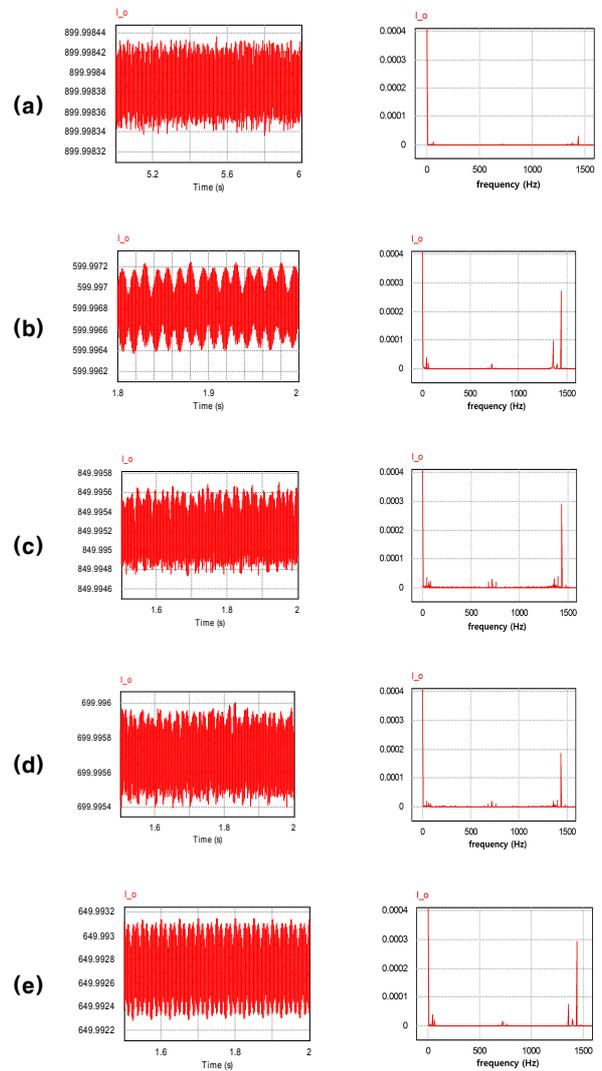
표 1에서 보는 것과 같이 큰 전류와 낮은 시정수를 가지는 MQ2는 가장 주요하게 고려해야 할 사항이다. 그림 3는 지령치 전류 1000 A를 가지는 멀티 페이저 인터리브드 벽 컨버터의 출력, 인덕터 그리고 커패시터 전류를 확인하였다. 정상상태에서 모듈 A,B,C 그리고 D의 동작 파형을 나타낸다. 이 들 결과 파형으로부터 제안된 회로의 동작이 이론적인 분석과 일치함을 알 수 있다. 특히 출력 전류의 리플은 13mA(+/- 6.5 ppm) 이내로 매우 작은 전류 리플을 확인 할 수 있다.



〈그림 3〉 인터리브드 벽 컨버터 출력, 인덕터 그리고 커패시터 전류

앞서 설명한 벽 컨버터 병렬운전 방식을 이용한 단방향 전자석전원 장치의 동작과 유용성을 증명하기 위하여 BD, MQ1, MQ2, MQ3, 그리고 MQ4에 대하여 시뮬레이션을 하였다. BM의 지령치는 900 A, MQ1의 지령치는 600 A, MQ2는 850 A, MQ3의 지령치는 700 A, 그리고 MQ4의 지령치는 650 A이다. 그림 4는 출력 전류 안정도 및 FFT 분석한 결과이다. 왼쪽그림은 출력전류를 나타내는 것으로 BD의 리플은 92 uA, MQ1는 800 uA, MQ2는 950 uA, MQ3는 600 uA, MQ4는 800 uA이다. BD를 포함한 전체 전류 리플은 1ppm 이하이다. 오른쪽 그림은 주파수 특성을 분석한 것으로 주파수의 특성은 입력 3상 전압 정류 주파수 720 Hz와 스위칭 주파수 10 kHz의 분포가 확연하게 감쇄됨을 알 수 있다. BD를 포함한 출력 특성이 설계 조건을 만족하는 것을 알 수

있다.



〈그림 3〉 BD 그리고 MQ 안정도 분석  
(a) BD, (b) MQ1, (c) MQ2, (d) MQ3, (e) MQ4

## 3. 결 론

포항 가속기 연구소의 PLS-II는 새로운 스펙에 맞추어 저장링의 단 방향 전자석전원장치는 벽 컨버터를 위상천이 병렬운전 방식으로 설계 하였다. 각각의 BD, MQ들, ST 그리고 SP에 적합한 출력을 위하여 병렬로 4개, 병렬로 2개, 그리고 싱글 타입으로 벽 컨버터를 구성하였다. 설계 조건에 맞는 출력을 확인하였으며 특히 출력 전류의 안정성은 +/- 10 ppm 이하로 설계 조건을 만족하였다.

## [참 고 문 헌]

- [1] S. Nam, "Major Upgrade Activity of the PLS in PAL PLS-II", proceedings of Particle Accelerator conference, Vancouver, Canada, 4 May 2009.
- [2] Y. K. Son, S. C. Kim and S. H. N, " PLS-II 전자석 직류 전원 전력변환장치", 2010년도 대한전기학회 하계 학술대회, 14-16, July. 2010.
- [3] S. H. Nam, "Magnet power supplies of PLS 2 GeV storage ring," 1996.
- [4] N. Y. Kim and H. C. Choi, "Novel Zero-Voltage-Transition Synchronous Buck Converter for Portable System," Trans. Korean Institute of Power Elec., Vol. 17, No. 4, pp. 330-336, Aug. 2012.