

## KCCH 싸이클로트론 전자석용 정밀전원장치 개발

송인호\*, 신현석\*, 최창호\*, 채종서\*\*, 김유석\*\*, 이한석\*\*, 하장호\*\*

POSCON 기술연구소, KCCH(한국원자력병원)

### Development of Highly-stabilized Power Supply for KCCH Cyclotron Magnets

I, H Song, H, S Shin, C, H Choi, J, S Chai, U, S Kim, H, S Lee, J, H Ha

POSCON Corporation, Korea Cancer Center Hospital Cyclotron App. Lab.

#### Abstract

본 논문에서는 12펄스 위상제어 정류기 및 수동 필터와 능동필터로 구성된 KCCH 싸이클로트론 전자석용 고정밀, 고안정 전류 전원장치의 설계 및 개발에 대하여 기술하였다. 고정밀, 고안정 전류 전원장치를 위한 각 구성 부분의 제어 및 설계 특징은 다음과 같다. 12펄스 싸이리스터 컨버터의 출력전압 제어를 위하여 아날로그 phase-locked oscillator 점호방식과 함께 부하에 비해 빠른 동특성을 가지는 내부 전압제어 루프를 구성하여, 입력전원과 변압기의 불평형에 의해 발생하는 저차고조파를 줄여줄게 하였다. LC 수동필터와 MOSFET으로 구성된 능동필터를 직렬로 연결하여 출력전압 리플을 허용치 이하로 낮추었다. 12펄스 컨버터 출력전압 리플의 최대 peak-to-peak 값이 출력전압 값의 0.1% 이하가 되도록 수동필터 값을 설계하였으며 설계과정을 제시하였다. 16bit D/A와 A/D에 의해 디지털로 제어되는 pass bank MOSFET 레귤레이터는 출력리플의 slow drift 제어와 설정치 값의 정확한 제어를 가능하게 한다. 또한 MOSFET는 전압 구동형 소자이며 turn-on 전류 도통 시에 양의 저항계수를 갖기 때문에, 첫째 전류 구동소자에 비해 간단한 구동회로를 가지며, 둘째 소자의 병렬 연결이 용이하다는 이점을 갖는다. 본 논문에서는 전류 전원장치 각 부분의 설계에 대하여 상세한 설계결과를 제시하며, 실험결과를 통하여 제안된 설계방식의 우수한 정적 및 동적 특성을 입증한다.

#### 1. 서론

60kW 고정밀, 고안정 전원장치가 한국 원자력 병원 싸이클로트론 응용 연구실의 전자석 개발용 전원

으로 사용되기 위해서 설계, 제작되었으며, 현재 FAT (Factory Acceptance Test)를 진행중이다. 대부분의 실험들이 수십에서 수 ppm의 리플을 갖는 일정한 자장을 필요로 하며, magnet이 제한된 운전 수명을 가지고 있기 때문에 Magnet을 위한 전원장치가 반드시 갖추어야 하는 조건들로서는 고안정도 및 고신뢰성이 있으며, 이는 매우 중요하다. 위와 같은 요구사항들을 만족하기 위해 싸이리스터 컨버터의 펄스 수를 늘렸으며, 수동필터와 능동필터를 사용하였다. 싸이리스터 컨버터에서 필연적으로 발생하는 고차의 고조파는 수동필터를 사용하여 제거하였으며, 저차의 고조파는 MOSFET를 이용한 직렬 레귤레이터 방식으로 제거하였다. 능동필터의 구성에 있어서도 변압기를 이용한 리플제거 방식이 크기와 효율 측면에서 우수하지만 출력리플의 slow drift 제어와 설정치 값의 정확한 제어를 위하여 MOSFET을 이용한 직렬 레귤레이터 방식을 채택하였다. 고정밀, 고안정 전원장치는 현재 200ppm 이하의 단기간, 즉 전원 한 주기 동안의 전류 리플 및 노이즈 레벨을 나타내고 있으며, 12시간 이상의 장기간 안정도도 200ppm 이하를 나타내고 있다. 전원장치는 magnetic contactor와 강압형 삼권선 변압기, 두 대의 6펄스 싸이리스터 컨버터와 interphase 리액터, 수동필터와 능동필터로 구성되어 있다. 전원장치의 정격 전류는 600A이며 1분 1200A의 과부하 정격을 가지고 있다. 그러나 MOSFET 능동필터의 전류 정격 때문에 제한된다. 전류 검출용 DCCT의 정밀도는 5ppm 이하이다.

본 논문에서는 고정밀, 고안정 전원장치 각 부분의 상세한 설계 및, 설계상의 문제점과 해결책을 제시하며, 이러한 방식의 전원장치의 성능 향상을 위한 몇 가지 제안을 한다. 여러 가지 실험이 FAT 동안에 이루어졌으며, SAT(Site Acceptance Test)를 위한 코

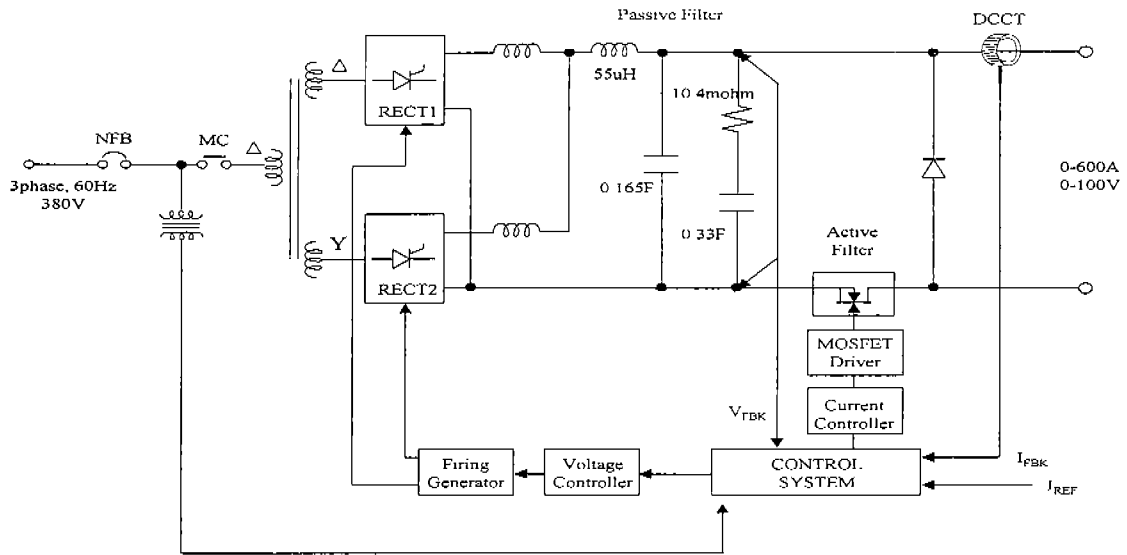


그림 1. 고정도, 고안정 전원장치 시스템 구성도

일이 준비중이다.

## 2. 사양

표 1에 목표로 하는 전원장치의 상세한 사양을 제시하였으며, 사용된 용어의 정의는 다음과 같다. Ripple and Noise : 한 주기 동안의 출력전류의 최대 변화 값, precision : 전류 설정치 부근에서의 차, stability : 전류 설정치를 고정시킨 상태에서의 12시간 동안 출력전류 최대치와 최소치 사이의 차, regulation : 24시간동안  $\pm 10\%$ 의 입력 선간 전압의 변동, 30%의 부하변동, 30°C의 주위 온도 변화가 있을 때 출력전류의 최대값 변화, accuracy : 출력전류와 상위 제어명령 사이의 차로 정의한다.

Ripple and Noise	20ppm
Precision	20ppm
Stability, including ripple	100ppm
Regulation	100ppm
Accuracy	1000ppm
Ramp tracking error at 0-100A/s	TBD
Efficiency	> 90%

표 1. 전원장치 사양.

## 3. 전원장치 설계

KCCH 싸이클로트론 전자석용 고정밀, 고안정 전원장치는 사용자가 요구하는 높은 신뢰성을 만족시킬 수 있도록 가능한 산업적으로 검증된 이론과 회로를 가지고 설계되었으며, 설계 단계에서부터 FAT 및

SAT에 대한 준비가 병행되었다. 그림 1에 고정도, 고안정 전원장치 구성도를 제시하였다. KCCH 싸이클로트론 응용 연구실의 3상 380V 전원을 사용하며, 이 전원은 12펄스 운전과 출력전압 레벨을 맞추기 위해서 삼권선 변압기에 의해 30도의 위상차를 갖는 두 개의 100V 전원으로 분리되어 각 싸이리스터 컨버터에 공급된다. 변압기의 1차측과 2차측 사이에 정전차폐를 삽입하여 capacitive coupling을 줄였으며, 변압기 제작상의 한계로 나타나는 2차측 델타와 와이 출력의 전압 차, 약 1%는 12펄스 컨버터의 제어와 상간리액터의 설계에 반영되었다. 두 대의 6펄스 컨버터는 상간리액터에 의해서 병렬로 연결되며 수동필터와 능동필터를 거쳐 부하에 연결된다. 정격 부하에서 0.9 이상의 역률을 나타내고 있으며, 전 부하영역에서 0.95 이상의 역률을 갖기 위해서는 Switched Capacitor Bank와 고조파 필터가 요구된다.

### A. 12펄스 싸이리스터 컨버터

싸이리스터 정류기의 제어에 있어서 일반적인 cosine wave crossing 점호방식을 사용할 때 선로 주파수의 변화는 점호각의 변동을 일으키며 이로 인해 제어범위를 좁히게 된다. 그리고, 선로나 변압기의 불평형에 의해 또는 기타 외란에 의해 12펄스 싸이리스터 정류기의 출력단에 720Hz의 저차고조파를 발생시킨다. 따라서 시스템을 안정화시키고 출력단에 저차고조파를 제거하기 위해서 빠른 동적루프 속에 VCO를 사용한 PLL제어기법을 사용한다.[1] 상간리액터의 설계에 있어서는 각 입력 전원의 불평형을 고려하여 누설인덕턴스를 일반 변압기보다 크게 하였다.

### B. 수동필터 설계

싸이리스터의 스위칭으로 인해 발생하는 고조파 리플을 제거하고 12펄스 컨버터 출력전압의 peak to peak 리플을 0.1% 이하로 줄이기 위해 critical damped L-C-R 저역통과 필터를 사용하였다. 저역통과 필터에 있어서 L과 C의 값이 크면 클수록 좋으나, 실제 설계에 있어서는 최적의 값을 얻기 위해서 다음과 같은 기준으로부터 설계하였다. 720Hz의 고조파에 대해서 0.001의 이득 ( $G(720\text{Hz}) < 0.001$ )을, 공진 주파수에서 2보다 낮은 이득 ( $G(\sim f_0) < 2$ )을 가져야 한다. 필터의 공진 주파수는 30Hz로 설계되었으며 필터 출력전압 리플은 1V 이내로 한다. 그림 2에 커패시턴스의 비  $m = C1/C2$ 에 의한 이득을 나타내었다. m의 값이 클수록 고조파에 대하여 급격한 감쇄를 나타내고 있으나 공진 주파수 근처에서 크게 hump함을 알 수 있다. 위의 조건으로부터  $m=0.5$ 로 설계하였다.

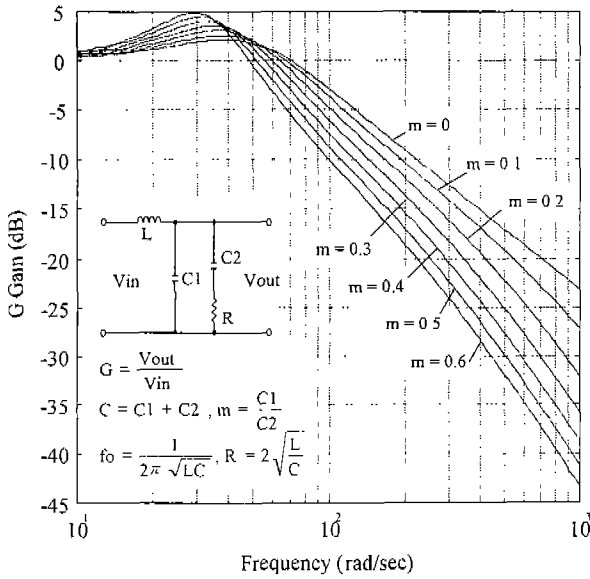


그림 2. 필터 회로도, 변수 및 critical damped 저역통과 필터의 응답곡선.

### C. 능동필터

능동필터의 설계 초기단계에서는 DC 전원장치의 AC 리플을 제거하는 변압기를 이용한 레귤레이터가 효율 및 크기에 있어서 장점을 갖기 때문에 고려 대상이었으나, 이러한 회로구성은 slow drift를 제어할 수 없으며, 요구되는 정확도를 만족시키지 못하기 때문에 좀더 확실하고 검증된 pass bank MOSFET 레귤레이터 구조로 설계하게 되었다. MOSFET의 정격은 200V, 450A이며, 6병렬로 구성되어 있다. 그림 3에 MOSFET 능동필터의 회로도를 제시하였다. 각 스위치마다 전류 검출을 하며, 보호회로를 추가하였

다.

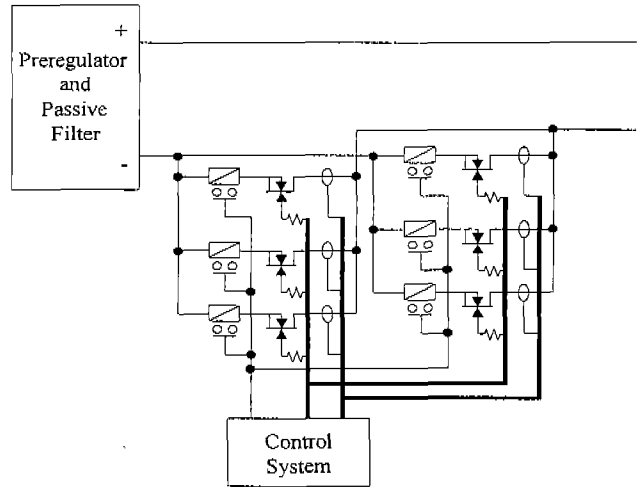


그림 3. MOSFET 필터의 구성도.

MOSFET 레귤레이터는 5V와 12V사이의 제어 영역을 가지고 있으므로 12펄스 컨버터는 수동필터의 출력전압이 제어범위 안에 오도록 출력전압을 제어한다. 그림 4에서 싸이리스터 컨버터부 및 능동필터, DCCT의 배치를 보여주고 있다.

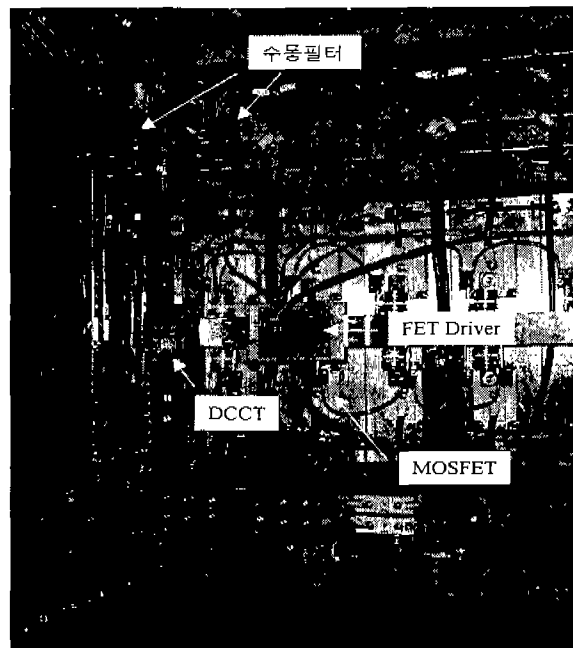


그림 4. 싸이리스터 컨버터, 능동필터, DCCT 배치도

전체 제어기 구조는 그림 5에 제시하였다. 각 부분의 전압, 전류 기준 신호와 검출 신호는 80C196에 의해서 16bit A/D, D/A로 주고받으며, RS-232 통신 및 상위와의 아날로그 통신이 가능하도록 설계되었다. 아날로그 컨트롤러에 의해서 싸이리스터의 전압과 MOSFET 레귤레이터의 전류가 제어된다. MOSFET 양단의 전압은 약 4 ~ 6V 내에서 제어되도록 하며,

각 소자마다 3kW 정도의 발열이 예상된다. 전류 제어기에 노이즈가 실리지 않도록 선형제어 방식의 전원을 사용하였고, 차폐를 하였으며 OP amp 및 여러 가지 부품들의 drift를 줄이기 위해 노력하였다. 또한 MOSFET 병렬연결에서 driver에 공진 현상이 일어나지 않도록 적은 값의 저항을 각각 연결하였으며, 최단 거리를 유지하도록 하였다.

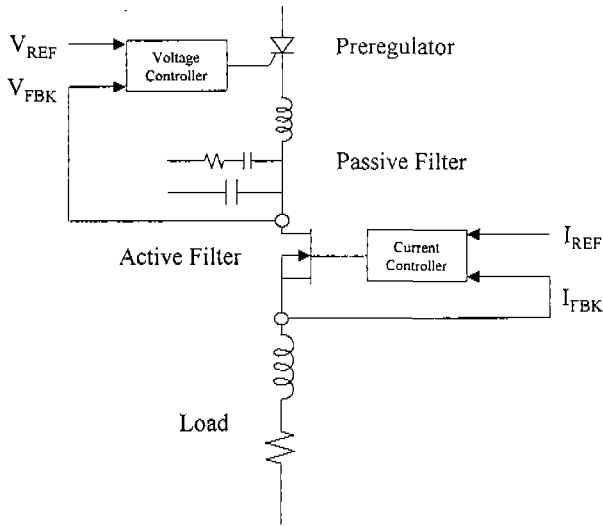


그림 5. 전원장치 전체 제어 개념도

#### 4. FAT 결과

FAT 테스트는 2mH, 0.5Ω의 부하를 사용하였으며 그림 6에 결과를 제시하였다.

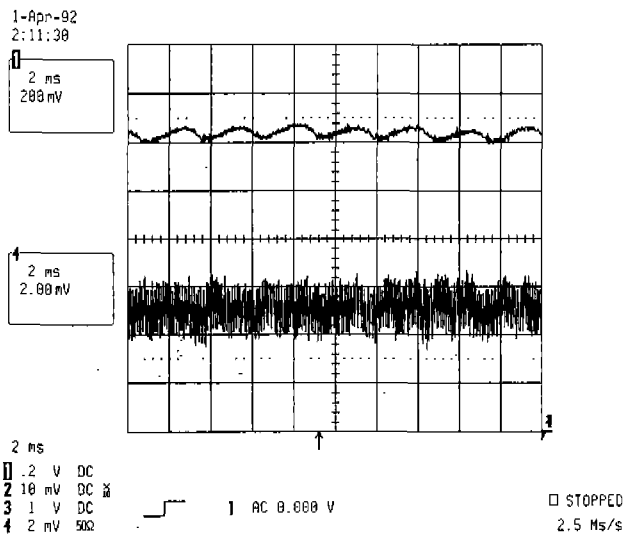


그림 6. 능동필터 입력전압 파형 및 출력전류 파형

상단의 파형은 능동필터의 입력전압 파형이며, 하단의 파형은 출력전류 파형이다. 능동필터의 입력전압 파형은 설계한 값대로 나타나고 있으며, 출력전류

파형은 DANFYSIK사의 ULTRASTAB 860R DCCT를 가지고 측정을 하였다. 약 0.12A의 리플로 200ppm의 안정도를 나타내고 있다. 현재 목표로 하고 있는 20ppm을 맞추기 위해 계속 실험을 하고 있는 중이다. 실험을 하면서 안정도를 높이기 위해서 나타난 문제점들은 소자의 온도 drift와 노이즈 문제들이며 이를 해결하기 위해서 여러 가지 방안을 시도하고 있다. 또한 모든 부하 영역에서 0.95 이상의 역률을 만족할 수 있도록 무효전력 보상장치의 설계를 수행하고 있다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 KCCH 싸이클로트론 전자석용 정밀 전원장치의 설계 및 실험 결과에 대하여 제시하였다. 현재 전원장치는 성능 향상을 위한 FAT 테스트를 계속하고 있으며, 모의 부하에서 200ppm 이하의 안정도 및 전류, 노이즈 레벨을 나타내고 있다. 12시간 이상의 안정도 테스트 및 허용범위내의 과부하 테스트, 입력 전원 변동 및 온도 테스트 등이 계속 이루어지고 있으며, 이에 대한 결과는 추후에 계속 발표할 예정이다.

#### 참고문헌

- [1] Heinrich J. Boenig, James A. Ferenc Bogdan, Ron S. Rumrill, Gary C. Morris, "Design and Operation of a 40MW, Highly-Stabilized Power Supply", IAS, pp.2309-2320, 1995.
- [2] R. J. Yarema, "Subharmonic Ripple Reduction in SCR-Type Magnet Power Supplies", IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. NS-26, No.3 June 1979, pp.3986-3988.
- [3] S. Kitagawa, "Current and Voltage Ripple Study in Power Supplies for LHD Coils", ANNUAL REPORT OF NATIONAL INSTITUTE FOR FUSION SCIENCE, pp.16, 1989-1990.