

KSTAR 초전도 코일을 위한 전원 시스템의 개발

송인호, 안현식, 박기원, 장계용, 신현석, 이용운, 최창호, *조무현
포스콘 기술연구소, *포항공과대학교

The Development of Power Supply System for KSTAR Superconducting Coils

I.H. Song, H.S. Ahn, K.W. Park, G.Y. Jang, H.S. Shin, Y.W. Lee, C.H. Choi, *M.H. Cho
R&D Center POSCON, *POSTECH

ABSTRACT

KSTAR (Korea Superconducting Tokamak Advanced Research) 장치는 Tokamak 개념의 핵융합 연구 장치로서 플라즈마를 가두기 위한 자장을 발생하는 토로이달 자장 (Toroidal Field, TF) 코일과 플라즈마 발생 및 형상 조절을 위한 폴로이달 자장 (Poloidal Field, PF) 코일로 구성되며, 초전도 코일을 이용한다. TF 코일의 전원장치로는 40 kA급의 안정된 직류 전원장치가 필요하며, PF 코일의 전원장치로는 빠른 전류상승 및 피드백 기능을 갖춘 정밀 대전류 전원을 필요로 한다. 또한 초전도 코일의 퀘치현상 발생 시 코일과 전원장치 보호를 위한 대전류 직류 차단시스템을 필요로 한다. KSTAR 장치의 설계에 의하면 상하 7쌍의 초전도 PF 코일에 약 1 MA/sec급의 고속 전류구동을 운전 시나리오에 따라 인가하여 핵융합 연구를 위한 플라즈마를 생성한다. 본 논문은 TF 및 PF 코일에 대전류를 인가하기 위해서 개발된 전원장치 (Power Supply, PS)에 관한 연구이다.

1. 서론

국가의 주요한 핵융합 프로그램 중의 하나인 KSTAR 프로젝트는 발전 핵융합 리액터 건설을 위한 과학적, 기술적 바탕을 수립하기 위한 정상상태 동작이 가능한 초전도 토카막을 개발하는 것이다^[1]. KSTAR 프로젝트는 토카막의 능동적인 제어를 통하여 현재 운전 중인 핵융합 장치들의 성능과 안정성을 확장하며, 안전한 운전 달성을 위한 제어법을 개발하며, 발전 개념의 핵융합 리액터로 가기 위한 최적화된 플라즈마 성능과 상시 운전을 이룩하기 위하여 다음과 같은 설계개념을 가지고 제작되었다.

- 1) 초전도를 이용한 코일 제작
- 2) 장시간 운전 (300s)이 가능한 토카막
- 3) 압력 및 전류파형 제어
- 4) 플라즈마 모양 및 위치 제어
- 5) 발전된 진단장치

KSTAR 토카막과 부대 장치는 300 s 운전이 가능하도록 설계 되었으며, 초기 운전에서는 토카막과 핵융합의 물리적인 현상 연구에 초점이 맞추어져 있다. KSTAR 토카막과 부대장치의 초기 파라메타를 표 1에 제시하였다. KSTAR 토카막은 다른 토카막 장치에 비교하여 모든 코일 시스템이 극저온 시스템을 가진 초전도체로 구성되어 있다. 초전도 코일을 사용함으로써

써 전류 드라이브에 필요한 파워를 낮출 수 있게 된다.

표 1 KSTAR 장치의 주요 파라메타
Table 1 Major parameters of the KSTAR device

Major radius	1.8 m	Pulse length	300 s
Minor radius	0.5 m	Elongation	12.0
Plasma current	2 MA	Triangularity	0.8
Toroidal field	3.5 T	# of pulses	50,000

토카막 운전을 위한 코일 시스템은 직렬 연결된 16개의 TF 코일 시스템과 7종류의 PF 코일 시스템 (PF1 ~ 7)으로 이루어진다. PF 코일 시스템은 상하 대칭구조로 14개의 초전도 코일로 구성된다. PF1에서 PF4까지의 코일은 Central solenoid 코일로 토카막을 자화시키는 역할을 한다. PF5 코일은 Diverter에서의 자장형성을, PF6과 PF7 코일은 플라즈마 전류, 모양, 위치 등을 제어한다. 그림 1에 TF 및 PF 코일의 구성도와 KSTAR 토카막의 개략도를 제시하였다.

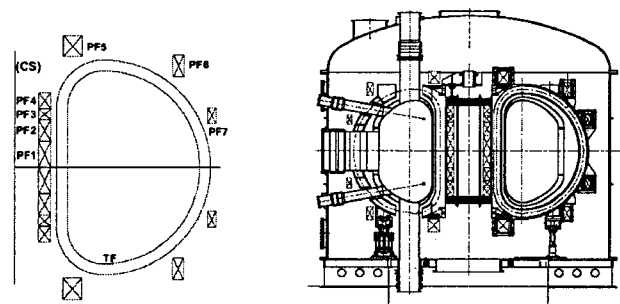


그림 1 TF, PF 코일 구성도 및 KSTAR 시스템
Fig. 1 Configuration of TF and PF coils and overall KSTAR machine

TF 코일 시스템은 40 kA, 30 V, PF 코일 시스템은 ± 25 kA, ± 1 kV의 전원장치를 필요로 한다. 또한 초전도 코일을 부하로 사용하기 때문에 온도상승 등의 요인에 의해서 초전도체가 상전도체로 변하는 퀘치현상 발생 시 이에 대비할 수 있는 퀘치 보호시스템을 갖추어야 한다. TF 코일과 PF 코일에 저장되는 최대 에너지는 18.6 MJ에서 635.2 MJ로 퀘치 발생 시에 이 에너지를 저항을 통하여 소비하여야 한다. 퀘치 보호

시스템은 저항과 직류대전류 스위치로 구성되어 있으며 이중구조로 구성되어 있다. 켄치 보호시스템의 요구사항으로는 시정수 7초(TF 코일)와 4초(PF 코일), 최대 6 kV의 켄치 전압, 정전 시에도 동작 가능하며, 주 스위치가 동작하지 않는 경우를 대비하여 보조 스위치가 준비되어 있어야 한다. 본 논문에서는 현재 대전 NFRC (National Fusion Research Center)에서 건설 중인 KSTAR 장치에 적용된 초전도 코일 전원공급 시스템에 대하여 설명하고자 한다.

2. 초전도 코일 전원공급 시스템

2.1 TF 코일 전원공급 시스템

TF 코일은 플라즈마를 가두기 위한 토로이달 자장을 발생시키는 역할을 담당하며 794 mH의 인덕턴스값을 갖는다. 최대 3.5 T의 자장을 발생하며, 40 kA, 30 V의 직류전원을 필요로 한다. 그림 2에 TF 코일 전원공급 시스템의 회로도를 제시하였다. 파워서플라이, 필터 시스템, Slow discharge 시스템, 켄치 시스템, 보호 시스템으로 구성되어 있다. 파워서플라이 시스템은 2800 A, 30 V의 풀브리지 인버터 방식의 직류 전원장치 모듈이 16세트 병렬 사용되어 40 kA, 30 V의 전원시스템을 구성한다. 주 제어기에서 총 전류를 검출하고 각 하위 모듈에 동일한 PWM 값을 제공하며, 각 모듈의 전류 균형은 하드웨어적으로 일정하게 구성하였다. 필터 시스템은 인버터 방식의 직류전원장치에서 발생하는 전압리플을 줄여 켄치의 검출이 용이하도록 설계되었으며, 켄치 보호회로는 40 kA 직류 전류를 차단하여 저항으로 에너지가 소비되도록 한다. VCB와 싸이리스터로 구성되어 직류대전류를 아크발생 없이 저항으로 전류가 전이되도록 한다. 40 kA급 켄치 보호회로는 주 통전 역할을 하는 병렬로 연결된 4대의 VCB와 아크발생 없이 스위칭을 가능하게 하는 병렬로 연결된 4개의 33L2800 ABB thyristor와 이 싸이리스터를 턴오프 하기위한 전류회로로 구성되어 있다. 이 외에도 에너지를 소비하기 위한 저항과 주 스위치가 동작하지 않을 경우 이를 대비한 Backup 스위치, 전원장치와 부하를 분리하기 위한 Protective make 스위치로 구성되어 있다. 기본적으로 4대의 병렬 VCB는 40 kA의 직류전류를 통전하고 있다. 켄치 발생 시에 VCB와 병렬로 연결된 싸이리스터에 턴온 신호가 전해지고 VCB는 턴오프 동작을 수행한다. 전류는 싸이리스터를 통하여 흐르게 되고, VCB는 안전하게 턴오프 된다. 약 40 ms 후에 싸이리스터를 턴오프 하기위해 전류회로가 동작한다. 최종적으로 코일의 전류는 저항을 통하여 감소하기 시작한다. Backup 스위치는 VCB와 퓨즈로 구성되어 있다. 주 스위치가 동작하지 않는 경우 사용되며, 전류의 차단과 함께 퓨즈로 전류가 흐르게 되고 정해진 시간 안에 퓨즈가 용단되며 부하전류는 덤프저항을 흐르게 된다. Backup 스위치를 포함한 전체 켄치 보호회로 시스템의 동작시간은 약 200 ms 이내이다.

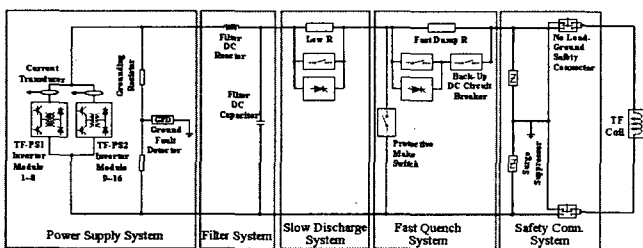


그림 2 TF 코일 전원공급 시스템 구성도

Fig. 2 Configuration of TF coil power supply system

그림 3에 TF 코일 운전 전류파형을 제시하였다. 2500초에서 임의로 켄치를 동작시켜 켄치 보호회로의 성능을 확인하였다. TF 코일 전원공급 시스템은 EPICS에 의해서 제어되는 상위 제어시스템을 가지고 있으며, 플라즈마 제어기와 통신을 한다. 통신방식으로는 느린 제어를 위한 Ethernet 통신과 빠른 제어를 위한 Reflect Memory가 준비되어 있으며, 안전과 Interlock을 위한 Safety H/W 통신, 그림 3은 상위제어 시스템의 HMI 출력 결과이며 샘플링 시간은 10 ms이다.

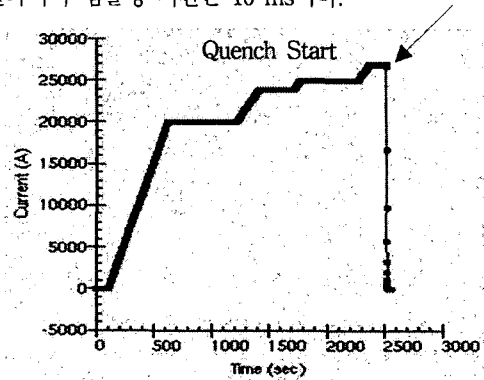


그림 3 27 kA TF 코일 전원시스템 운전

Fig. 3 27 kA operation of TF coil power supply system

2.2 PF 코일 전원공급 시스템

PF 코일들은 플라즈마 발생 및 형상조정을 담당하며 59.6 mH에서 672.4 mH의 인덕턴스값을 갖는다. PF에서 7번까지 7 종류의 코일은 급격한 전류 드라이브를 통하여 토카막을 자화시키며, 플라즈마의 위치제어를 수행한다. ± 25 kA, ± 1 kV의 정격을 가지는 12펄스 싸이리스터 컨버터와 블립시스템, 켄치 시스템, 보호 시스템으로 구성되어 있다. 디지털 전류제어기에 의해 싸이리스터 컨버터는 동작되며, 4상한 운전을 한다. IGCT 직병렬 스위치와 저항으로 구성된 블립시스템은 회로에 저항을 순간적으로 삽입하여 전류의 급격한 드라이브를 도운다. 켄치 시스템은 양방향 운전이 가능하도록 설계되었으며, 바이패스를 위한 별도의 싸이리스터 스택을 적용하였다. 그림 4에 PF 코일 전원공급시스템의 구성도를 제시하였다.

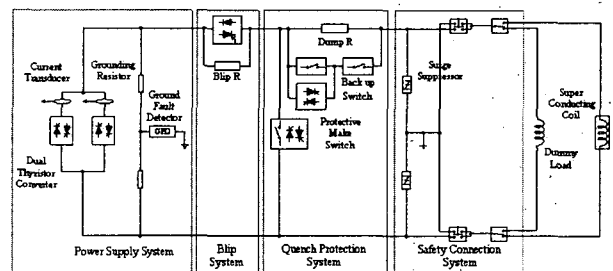


그림 4 PF 코일 전원공급 시스템 구성도

Fig. 4 Configuration of PF coil power supply system

PF 코일의 운전시나리오에 맞추어 PF 코일 전원공급 시스템의 운전을 수행하였다. PF 코일의 운전은 PF 코일에 전류의 충전, 상태유지 및 코일 점검, 플라즈마 생성, 플라즈마 유지 및 제어, 운전 종료로 나뉘어 진다. 초기에 PF 코일 전원공급 시스템은 토카막의 운전목표 전류까지 PF 코일을 충전한다. 충전이 완료된 후에 전류를 유지하면 플라즈마 생성을 위한 준비

및 코일의 상태를 체크한다. 운전 시작과 동시에 플라스마 생성을 위하여 전류를 급격하게 드라이브 하며 플라스마 발생과 유지를 수행한다. 정상 운전이 종료된 후에는 플라스마 Disruption이 일어나지 않도록 하며 전류를 감소시킨다. 그림 5에는 시나리오에 따른 PF 코일 전원공급 시스템의 모의 운전을 초전도 코일 부하를 사용하여 실험한 결과를 제시하였다. 현재 대전의 ICU (정보통신대학)에 초전도 코일 제작 공장이 있으며 이곳에서 초전도 코일을 제작한 후 전류 인가 시험을 수행하고 있다.

참고 문헌

- [1] C. Neumeyer, "Fast Discharge Options for Tokamak Physics Experiment Toroidal Field & Poloidal Field Superconducting Magnets," TPX Document Number: 40 9308270 PPPL..
- [2] G.S. Lee *et al.*, "The KSTAR project: An Advanced steady state superconducting tokamak experiment," Nuclear Fusion, vol. 40, No.3, pp. 575-582, 2000.
- [3] S. Tanahashi, "Power Supply for Superconducting Coils of the Large Helical Device," NIFS-99030212.
- [4] R. Heller, W. Maurer, and the W7-X team, "The results for an advanced conductor for the Wendelstein 7-X magnet system," IEEE Trans. Appl. Superconduct., vol. 10, no. 1, pp. 614-617, 2000.
- [5] Mohan, Underland, Robbins, *POWER ELECTRONICS*, WIE WILEY 2nd.

DAQ System Historical Trend

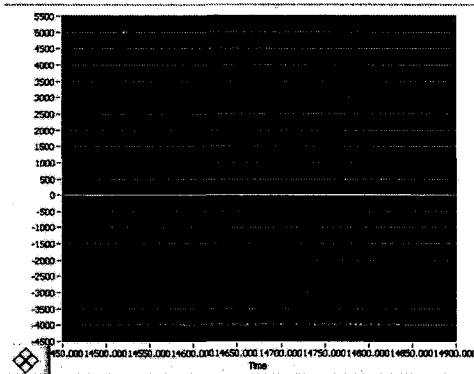


그림 5 5 kA PF 코일 전원시스템 시나리오 운전
Fig. 5 5 kA scenario operation of TF coil power supply system

블립시스템은 IGCT 반도체 스위치와 병렬로 연결된 저항으로 구성되어 있다. PF 코일 전원공급시스템이 동작하면서 턴온되며, 플라스마 운전 시작과 동시에 턴오프 된다. 약 100 ms 정도의 동작시간을 가지며 턴오프 후에 재 턴온 된다. 현재 IGCT를 사용하여 2병렬 2직렬 블립스위치를 제작하고 있으며 8월말 실험예정이다.

3. 결론

현재 대전에 있는 NFRC에 핵융합 연구를 위한 초전도 토카막 장치가 건설되고 있다. 92.2%의 공정률을 보이고 있으며, 2007년 8월 장치완료 및 2008년 8월 First 플라스마를 위하여 제작 및 시험이 진행되고 있다. 포항공과대학과 포스콘은 KSTAR 장치의 초전도 TF 및 PF 코일용 전원공급 시스템을 설계 및 제작하였으며, 초전도 코일에 적용 시험을 완료하였다. 고주파 스위칭의 인버터 방식의 직류 전원장치를 TF 코일에 안정된 대전류를, 적은 시스템 크기로 공급하기 위하여 적용하였으며, 최대 25 MVA의 양방향 싸이리스터 컨버터를 제작하여 PF 코일에 플라스마 생성 및 제어를 위하여 적용하였다. 또한 PF 코일 전원용 파워서플라이는 전류가 정역 교차시에 전류가 죽는 구간을 없애는 순환전류 제어방식을 적용하여 토카막 운전을 용이하게 하였다. 입력 전력을 줄이기 위하여 사용한 초전도 코일은 초전도 상태에서 제로에 가까운 저항값을 지나 초전도 상태의 임계온도를 초과하면 저항이 갑자기 상승하여 초전도 코일이 위험해진다. 이를 방지하기 위하여 40 kA의 직류대전류 차단이 가능한 차단 시스템과 수백 MJ 이상의 에너지를 소비할 수 있는 저항 시스템을 설계 제작하였다.