

## 초전도자석의 전원제어 및 켄치보호 기술

최재훈, 추용

국가핵융합연구소 KSTAR 운영사업단

### 1. 서론

KSTAR(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research) 장치는 토카막형 핵융합 연구장치로서 플라즈마 형성과 구속을 위해 서로 직렬로 연결된 16개의 TF(Toroidal Field) 초전도 전자석에 최대 40 kA 급의 직류를 인가하고, 상-하 7 쌍으로 구성된 14개의 PF(Poloidal Field) 초전도 전자석에 약 1 MA/sec의 고속 전류를 인가하여 핵융합 연구를 위한 플라즈마를 생성하고 유지한다. 이러한 초전도자석의 운전을 위해 전원장치는 TF 초전도자석용으로 1 set, PF 초전도자석 운전을 위해 7 set로 구성되며, PCS(Plasma Control System)에 의한 초전도자석 전원장치의 원격운전 및 데이터 획득을 위한 통합제어시스템을 구축하고, 시운전 및 장치 성능검증단계를 거친 후 본격적인 초전도자석 부하에 대한 운전을 수행하여 2008년 최초플라즈마를 성공적으로 발생하였다.

KSTAR 초전도 자석 계통은 운전 시 초전도상태를 반드시 유지하여야 한다. 초전도 자석 계통에 국부 혹은 전역에 켄치가 발생할 경우 상전도영역의 저항과 전류에 의한 주열은 도체의 온도를 급격히 상승시키게 된다. 이러한 급격한 온도의 변화는 도체 및 그 구조물에 열적 스트레스를 유발시켜 도체의 성능 저하로 이어질 수 있으며, 심하면 도체의 파손까지도 발생할 수 있다. 따라서 KSTAR 초전도 자석 계통에 대한 켄치 발생여부를 실시간으로 모니터링 하여야 하며, 켄치 검출이 확인되면 초전도 자석 보호를 위한 조치, 즉 전류의 고속 방전이 수행되어야 한다.

본 논문에서는 최초 플라즈마 발생을 위해 제작된 초전도자석 전원장치에 대한 주요특성 및 운전결과와 제어시스템, 그리고 KSTAR 초전도 자석의 켄치를 검출하기 위한 시스템 등에 대하여 기술하였다.

### 2. 초전도자석 전원장치

#### 가. TF 초전도자석 전원장치

TF 초전도자석은 16개의 "D"형 자석이 서로 직렬로 연결되어 있으며 약 790 mH의 인덕턴스를 갖는다. TF 초전도자석의 연속운전을 위해 전원장치는 저전압 대전류 특성을 가지며, 전류의 1상한 운전을 필요로 하는 TF 초전도자석의 운전 특성을 고려하여 전력회로는 16개의 full bridge 인버터를 병렬화하여, 결과적으로 정격 36 kA 출력의 컨버터로 구성되어 있다.

TF 전원장치의 주요 구성은 직류 전류공급을 위한 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor) 소자를 사용한 단방향성 인버터(inverter), 켄치 발생시 quench detection system(QDS)으로부터 신호를 전송받은 후 7 초 동안 초전도자석에 충전된 에너지 방출을 위한 목적으로 제작 설치된 quench protector(QP) 및 QP 저항, 정상운전 종료 시 약 20분 동안 초전도자석에 충전된 에너지 방출을 위한 slow discharge circuit(SDC), 전원장치와 초전도자석 연결을 위한 direct current disconnection switch(DCDS) 그리고 전원장치로부터 초전도자석에 전류공급을 위한 구리판으로 제작된 DC busbar 등으로 구성되어 있으며 전체적인 구성도를 그림 1에 나타내었다.

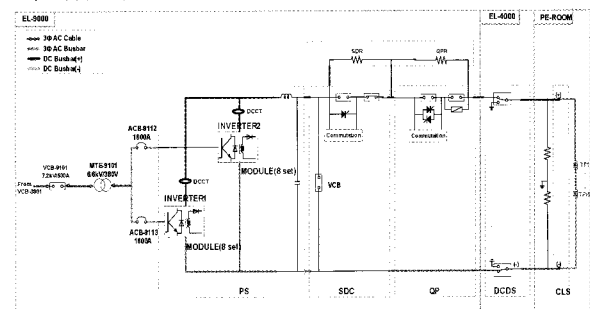


그림 1. TF 초전도자석 전원장치 구성도.

국내 최초로 순수국내 개발된 대형 초전도 자석의 대전력 전원장치의 성능 검증을 위해 TF 초저도자석 전원장치는 상온에서 출력단의 단락 조건하에서 절연저항 및 누설전류 측정 등 단독 성능시험을 진행하며 모든 주변 시스템에 대한 인터락 및 QDS, SDC 등 동작시험 및 제어시험을 통해 장치의 안정성을 확인하였다.

그림 2와 같이 초전도자석 부하 조건에서의 출력시험은 초기 1 kA씩의 단계별 전류를 인가하며 자석의 안정성을 확보하는 한편, 출력전류 리플에 대한 최소조건을 찾기 위해 전원장치에 대한 gain 조절을 하였다. 또한 낮은 전류출력 조건에서 QP, SDC, 인터락 등에 대한 부분별 동작시험을 진행하고 최종 단계인 15 kA (8 시간) 전류시험을 한번의 켄치 발생 없이 성공적으로 완료였다.

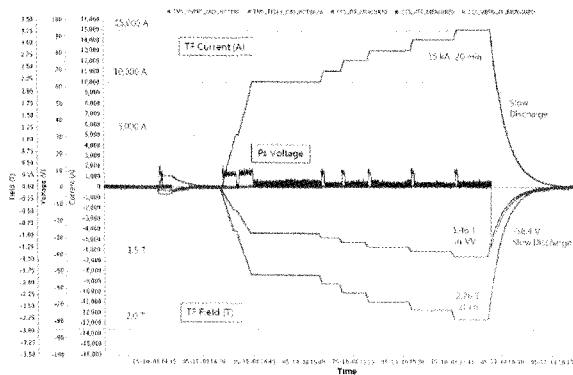


그림 2. 초전도자석 부하 조건에서의 TF 전원장치 출력전류 측정 data.

나. PF 초전도자석 전원장치

PF 초전도자석 전원장치는 PF 자석에 플라즈마 발생 및 유지를 위하여 필요한 전류를 공급하기 위한 장치로 대전류를 제어할 수 있는 시스템이다. KSTAR의 PF 초전도자석은 총 7 쌍의 자석으로 구성되어 있으며, 전원장치는 초전도 자석의 전류 흐름을 제어하여 플라즈마 발생과 유지를 하며, 제어에서 요구되는 매우 급격한 di/dt 운전이 가능하고 전류의 극성뿐만 아니라 정방향과 역방향으로 전류의 기울기 조절이 가능해야 하기 때문에 4상한 운전이 가능한 양방향 컨버터(Bipolar 방식)가 사용되었다. 또한, 빠른 전류 di/dt 구간(Blip, 전류감소구간 등)에서는 상당한 량의 회생전류가 발생하므로 이를 전원측으로 돌려

보내기 위한 시스템이 필요하며 이에 가장 적합한 구조인 thyristor를 이용하여 위상각도 제어가 가능한 AC/DC 컨버터 구조로 만들어져 있다.

최대출력 25 kA급 PF 전원장치의 구성은 직류 전류 공급을 위해 thyristor 소자를 이용한 12 상 운전방식의 양방향성 convertor, PF 초전도자석의 급격한 자기장 변화를 위한 blip resistor insertion system(BRIS), 켄치 발생시 QDS로 부터 켄치 신호를 전송 받은 후 4초 만에 초전도 자석에 충전된 에너지 방출을 위한 QP 및 QPR, 초전도자석과 전원장치 연결을 위한 DCDS 그리고 전류전송을 위한 DC busbar 등으로 그림 3과 같이 구성되었다.

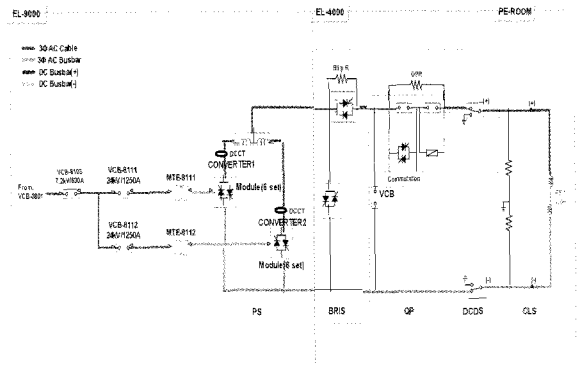


그림 3. PF 초전도자석 전원장치 구성도.

PF 전원장치에 대한 성능 검증을 위해 dummy load(2mH, 30mH)를 사용하여 상온에서의 정방향, 역방향 전류출력시험, QP, BRIS 동작시험 및 제어시험 등 모든 주변 시스템에 대한 성능시험을 완료하여 장치의 안정성을 확인하였다.

그림 4와 같이 초전도자석 부하 조건에서의 시험은 TF 전원장치와 같은 방법으로 단계별 전류출력에 의한 각각의 전원장치별 gain 조절을 완료하였으며, 낮은 전류에서의 QP, BRIS, 인터락 등의 동작시험을 완료하고 TF 전원장치와 함께 최초 플라즈마 발생 시험을 위한 장치의 안정적인 운영으로 플라즈마 발생실험 기간 중에 전원장치에 대한 제어 및 운전을 성공적으로 수행하였다.

다. 통합제어 시스템

KSTAR 초전도자석 전원장치에 대한 제어

시스템 구성은 통합제어를 위해 주제어실에 설치되어 모든 장치들에 대한 제어를 수행하는 central control system(CCS) 및 PF 전원장치 제어를 위한 plasma control system(PCS)과 전원장치실에 구성된 local control system(LCS)으로 이루어져 있다..

전원장치실에 구성된 LCS 시스템의 하드웨어는 VME 기반으로 구축되었으며, 또한 이를 구동하기 위한 소프트웨어는 EPICS 기반으로 개발되어 각각의 전원장치에 설치된 제어보드와 연결되어 운전을 수행하도록 구성하였다. 그림 5는 KSTAR 주제어 시스템과 연결된 전원장치 기본 구성도이다.

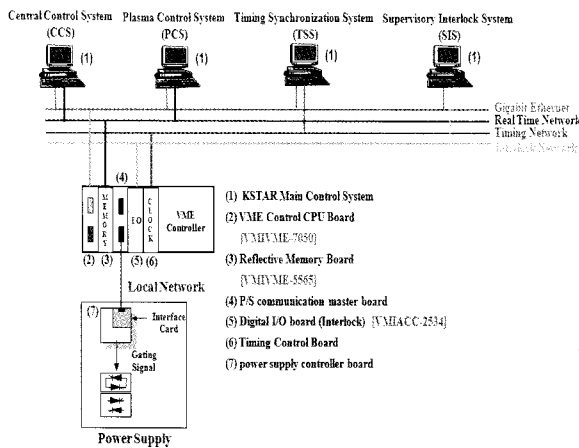


그림 5. 통합제어 시스템 기본 구성도.

### 3. 켄치검출 시스템

#### 가. KSTAR 켄치 검출 시스템 개요

켄치에 대한 초전도 자석의 보호의 기본은 켄치가 발생한 부분으로 흐르는 전류를 억제하는 것이다. 전류 억제의 방식으로는 켄치 검출을 수행하지 않고 수동 소자로 구성된 보호회로를 초전도코일과 연결한 후, 켄치 발생 시 코일 전류가 보호회로로 bypass 될 수 있도록 하는 수동적 보호 방식과 센서를 통해 켄치를 검출한 후, 자석 전류를 외부의 저항을 통해 빠르게 방전시키는 능동적 보호 방식을 사용한다. KSTAR 초전도 자석과 같이 대전류로 통전되는 자석의 경우는 수동적 켄치 검출 방식이 불가하며, 능동적 보호 방식을 통해 켄치에 대한 보호를 수행하여야 한다. 즉 자석에 설치된 전압센서, 온도센서, 압력센서, 그리고 유량센서를 통해 켄치 발생에

따른 각 센서의 출력값 변화를 모니터링하여 켄치를 검출한다. 이 후 켄치 검출부는 켄치 보호 회로에 인터록 신호를 보냄으로써 초전도 자석의 전류는 정해진 시정수에 의해 감쇄하게 된다. KSTAR 켄치 검출을 위한 주 센서 (Primary Sensor)는 전압센서이다. 전압센서는 켄치에 의해 발생하는 저항성 전압 강하를 측정하여 켄치를 검출하는 센서로서 켄치를 실시간으로 측정할 수 있기 때문에 기타의 다른 초전도자석 켄치 검출에 대부분 사용된다. 켄치 검출 신뢰도를 높이기 위한 부 센서 (Secondary Sensor)는 온도, 압력, 유량 센서 등이 있다. 각 센서는 강제순환냉각 방식에 의해 냉각되는 KSTAR 초전도자석의 헬륨 인입부와 회수부에서 측정된다. 이들 센서들은 켄치에 대한 응답에 지연시간을 가지고 있으며, 따라서 주 센서에 대한 백업센서로서 사용된다.

#### 나. KSTAR 켄치 검출 시스템 구조

켄치 검출을 위한 주센서인 전압센서의 신뢰도는 자석의 안정적인 운전을 달성하기 위해 매우 중요하다. KSTAR PF 초전도 자석의 펄스전류 운전은 전압센서에 많은 유도전압성 잡음(노이즈)을 발생시킨다. 이러한 노이즈로 인한 켄치 검출기의 오동작을 막기 위해 노이즈를 상쇄시키기 위한 방법들이 적용되었다. DC 운전을 하는 총 16개의 직렬연결된 TF 코일들의 경우는 일반적인 방식인 브릿지 전압 검출회로가 적용되었다. 유도성 전압을 효과적으로 제거하기 위해 브리지 회로를 두 개의 TF 코일에 적용하였다. 각 TF 코일은 동일한 형상임과 동시에 주변의 다른 코일과 동일한 자기 상호 효과(mutual magnetic effect)을 갖기 때문에 브릿지 전압에는 운전 도중에 발생하는 유도성 전압이 거의 대부분 제거되어 측정된다. 펄스 전류 형태로 동작하는 PF 코일의 경우는 브릿지 회로를 통한 일반적인 방식으로는 켄치의 검출이 불가능하다. 따라서 PF1-5 코일의 경우, 그림 7과 같이 자석의 제작 단계 중의 하나인 절연 테이핑 공정 과정에서 권선방향으로 도전성 섬유 테이프의 형태인 Co-wound Voltage Sensor (CVS) 가 설치되어 이를 통해 코일의 양단 전압을 측정하게 되면 측정 전압은 유도 전압 성분이 상당히 제거된 전압

을 측정할 수 있게 된다. PF1-7 코일은 각 코일에 브리지 전압회로를 두었다. 각 브리지 회로는 앞서 언급하였듯이 그 자체로 유도전압을 상쇄시키는 것은 불가능하다. 그러나 PF 코일은 구조적으로 상/하 대칭의 구조를 가지고 있기 때문에 그림 8과 같이 상/하 코일의 브리지 회로 출력 전압 비교/연산하여 유도전압 제거 효과를 달성할 수 있었다. 모든 KSTAR 초전도 버스라인에는 CVS 가 장착되어 유도전압의 측정을 최대한으로 억제하여 버스라인의 양단 전압을 측정할 수 있도록 하였다.

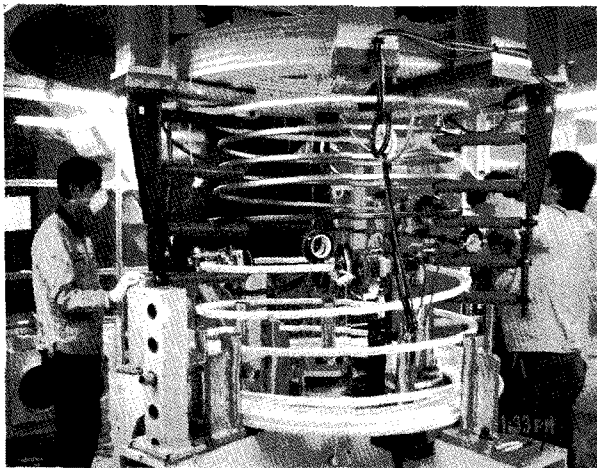


그림 7. 코일 제작 단계(절연 테이핑)과정에서 CVS 설치의 모습.

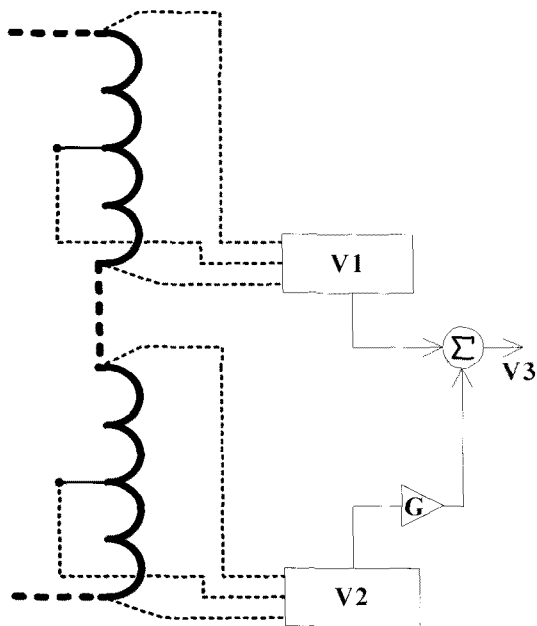


그림 8. PF 코일의 브릿지 회로의 추가 유도 전압 보상 회로 개념.

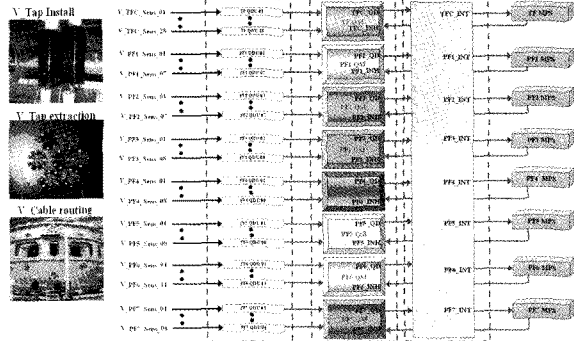


그림 9. KSTAR 켄치 전압 측정시스템 구조.

그림 9에서는 전체적인 QDS의 구조를 보여주고 있다. 전압 탭과 연결되어 총 83대의 켄치 전압 측정부가 설치되어 있다. 이들이 측정하는 전압 값, 그리고 켄치 여부는 광으로 Quench Signal Integrator (QSI)에 전달된다. QSI는 사용자와의 인터페이스를 담당하는 동시에 인터록 신호를 중앙인터록 및 켄치 보호 시스템에 전송한다. TF 자석 계통에 켄치가 발생하면 모든 전원장치의 QP 작동을 요구하는 인터록 신호를 보내게 되는 반면 PF 켄치 발생 시에는 모든 PF 전원장치의 QP를 작동시키게 된다. QSI의 역할 중에 하나는 전원장치 제어부로부터 금지신호(Inhibit Signal)를 받는 순간은 인터록을 전달하지 못하도록 설정되어있다. 이러한 금지신호는 아래와 같은 경우에 이용되어질 수 있다.

- 켄치 발생 가능성이 없는 저전류(< 1 kA)에서 CICC 자켓인 Incoloy의 자기효과로 인한 높은 유도성 노이즈 발생 → 각 코일의 전류가 1 kA이하의 전류에서 금지 신호 발생
- 매우 짧은 시간 동안 고속 전류 변화 구간에서 발생하는 높은 유도성 전압에 대해 QDS가 보상이 불가능할 경우

다. 초기 운전 결과

TF 코일, PF 코일, 그리고 버스라인의 켄치 문턱값은 각각 100 mV, 200 mV, 그리고 20 mV로 설정되어 운전되었다. 운전 중에 QDS에 발생한 유도전압은 TF 코일의 경우 최대 25 mV, PF 코일의 경우 플라즈마

발생을 위한 Blip 운전 및 1 kA 이하의 저전류 영역을 제외한 모든 영역에서 대략 150 mV, 그리고 버스라인의 경우는 10 mV 이내로 제한되었다. 초기 운전에서도 퀘치가 발생하지 않았으며, 플라즈마 발생 실험기간 동안 QDS는 퀘치 여부를 모니터링하며 오동작 없이 안정적으로 동작함을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결 론

초전도자석 부하에 대한 TF 및 PF 전원장치를 비롯한 모든 계통에 대한 자체 성능시험 및 시운전 단계를 통해 전원장치에 대한 성능을 확인하고, 최초 플라즈마 발생을 위한 전원장치 및 제어시스템에 대한 안정적인 운전을 성공적으로 완료하였다. 또한 QDS는 운전 과정에서 오동작 없이 운전되었으며, 초전도 자석 계통에서의 퀘치 발생은 없었다. 전원장치 및 퀘치 검출 장치에 대한 운전결과는 국내 최초로 개발된 대전력 전원장치에 대한 기술력 확보 및 장치검증 측면에서 매우 중요한 요인으로 작용된다.

이러한 결과로 인해 플라즈마 연구를 위한 첫 번째 목표인 플라즈마 전류 100 kA 이상, 플라즈마 유지시간 100 ms 이상의 목표를 위해 시험을 수행한 결과 플라즈마 전류 133 kA, 플라즈마 유지시간 249 ms라는 목표를 달성하였다. 그러나 향후 계획된 고온 플라즈마 발생 등 다양한 플라즈마 제어실험을 위해 현재 20 kA 급 사양으로 설치된 TF QP 시스템에 대하여 정격사양(40 kA)으로의 제작 설치가 진행될 예정이며, PF 전원장치 구성품목 중 3 kA 사양으로 설치된 BRIS에 대해서도 정격사양(25 kA)으로 단계별 계획에 따라 장치성능향상이 계속적으로 진행될 예정이다.

또한 초전도 자석 계통의 퀘치 검출 시스템도 추후 정상 운전을 대비하여 노이즈의 발생을 예측하고 비정상 동작을 사전에 방지할 수 있도록 시스템을 업그레이드 하는 것이 필요하다. 즉 퀘치 검출의 신뢰성 향상을 위한 항목으로는 PF 전류 파형, PF 전류 변화율 그리고 PF 코일의 양단 전압을 측정하여 그 신호를 QDS에 이용하여 추가적인 유도전압의 제거 효과를 달성하는 것과 측정 전압 신호를 분석/연산하여 안정적인 퀘치 판정을 할 수 있도록 퀘치 검출 알고리즘의 개발 및 적용이 필요하다.

#### 참고문헌

- [1] 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.
- [2] I. H. Song et al., "The 40kA dc power supply for a KSTAR toroidal field superconductor coil," *IEEE Trans. Industry Appl.*, submitted for publication.
- [3] I. H. Song et al., "Quench Protection system for the Superconducting coil of the KSTAR Tokamak," *IEEE. Trans. Appl. Superconductivity*. Vol. 17, no. 1, March. 2007.
- [4] Jae Hoon Choi et al., "Overview of superconducting Magnet power supply system for the KSTAR 1st plasma experiment," *Nuclear engineering and technology*, Vol.40 No.6 October 2008.
- [5] Sang-hee Hahn, M.L. Walker, Kukhee Kim, H.S. Ahn, B.G. Penafior, D.A. Piglowski et. al., Plasma Control System for "Day-one" Operation of KSTAR Tokamak, *Fusion Engineering and Design*, doi: 10.1016/j.fusengdes.2008.12.082.
- [6] Y. Chu, et al., "Quench detection based on voltage measurement for the KSTAR superconducting coils", *Proceeding of ASC 2008* (2008).
- [7] Y. Chu, et al., "Quench detection based on voltage measurement for the KSTAR superconducting coils", *Proceeding of ASC 2008* (2008).

#### 저자이력



최재훈(崔在勳)

1966년 11월 1일생, 2005년 충남대 전파공학 졸업(공학석사), 현재 국가핵융합연구소 선임기술원/설비기술개발부 팀장.



추 용 (秋 龍)

1970년 10월 24일생, 2000년 연세대 공대 대학원 전기·컴퓨터공학과 졸업(공학박사), 2000년-2002년 삼성종합기술원 전문연구원, 2003년-현재 국가핵융합연구소 선임연구원.