

ITER CS 초전도 코일 전원장치 시험 결과에 대한 고찰

송인호, 최정완, 서재학, 오중석
국가핵융합연구소

Study on the test results of ITER CS superconducting magnet power supply

Inho Song, Jungwan Choi, Jae Hak Seo, Hyun Kook Shin, Jong-Seok Oh
National Fusion Research Institute

ABSTRACT

국제 핵융합실험로(ITER)를 위해 한국이 제작, 시험, 설치 및 시운전을 하기로 되어 있는 CS(Central Solenoid) 초전도 자석용 전원장치의 시험 및 그 결과에 관하여 논의하고자 한다. 토카막 운전에서 플라즈마 발생 및 제어를 위한 대전류, 고전압, 270 kA 단락 용량 및 4상한 운전 특성을 갖는 45 kA/1050 V의 12펄스 싸이리스터 AC/DC 컨버터 및 제어기를 제작완료 하였으며, ITER 부지로 운송하기 전에 공장의 전원 및 부하 용량을 고려하여 시험절차서를 개발하였으며, 공장시험(FAT, Factory Acceptance Test)를 진행하였다.

1. ITER Central Solenoid AC/DC 컨버터

ITER CS AC/DC 컨버터 전원 장치는 토카막에서 플라즈마의 발생과 위치 제어를 담당하는 Central Solenoid 초전도 자석에 45 kA/1050 V의 전력을 공급한다. 그림 1에 ITER CS 초전도 자석을 위한 4상한 12펄스 싸이리스터 전원장치의 공장시험 회로도를 제시하였다. CS AC/DC 컨버터의 특징은 다음과 같다.

- 1) Fault Suppression Capability (FSC): 단락 상황에 따라 고장없이 운전이 가능하거나 컨버터 구조물에 손상이 가지 않는 요건
- 2) 싸이리스터의 병렬운전: 정격운전 시 또는 단락상황에서 각 병렬소자에 흐르는 전류가 균등 하여야 함
- 3) 순환전류운전: 싸이리스터의 4상한 운전에 있어 컨버터 전류가 영이 되는 구간이 존재하지 않도록 운전 함

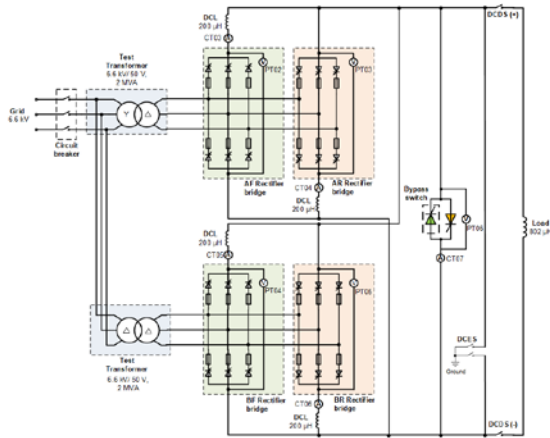


그림 1 ITER CS AC/DC 컨버터 공장시험 회로도
Fig. 1 Circuit diagram of ITER CS AC/DC converter system for FAT

2. Factory Acceptance Test

ITER CS AC/DC 컨버터의 정격은 45 kA/1050 V로 12펄스 운전을 위해 두 대의 32 MVA 컨버터 변압기를 갖는다. 컨버터의 성능 검증을 위하여, 정격 전압 및 전류 시험을 동시에 하기 위해서는 공장에서 상당한 수전 용량을 필요로 한다. 또한 프랑스 현지와 전원의 주파수가 다른 것도 시험을 제약하는 조건중의 하나이다. 공장의 전원과 시험용 부하의 용량을 고려하며, 컨버터의 성능을 검증할 수 있는 시험절차서를 개발하였다. FST 시험은 전기연구소의 단락 시험 설비를 이용하였고, 정격전류 시험과 정격전압 시험을 각각 수행할 수 있는 전원 설비를 준비하여 공장시험을 진행하였다. 시험의 주된 목적은 앞에서 제시한 컨버터의 특징을 만족하며, 정격 전압 및 전류에서 고장없이 안정적인 운전이 가능함을 검증하는 것이다.

CS AC/DC 컨버터의 시험절차서에 적용된 IEC 규격은 IEC60146-1-1, IEC60076-1, IEC60076-6이며 주된 시험 항목으로는 1) Fault Suppression Capability 시험, 2) Current balance 시험, 3) 4상한 운전 시험이다.

2.1.1 Fault Suppression Capability 시험 및 결과

FSC 시험은 여러가지 단락 상황에서 12병렬 싸이리스터 소자와 컨버터 구조물의 건전성을 시험하여 시스템의 안정성을 평가한다.

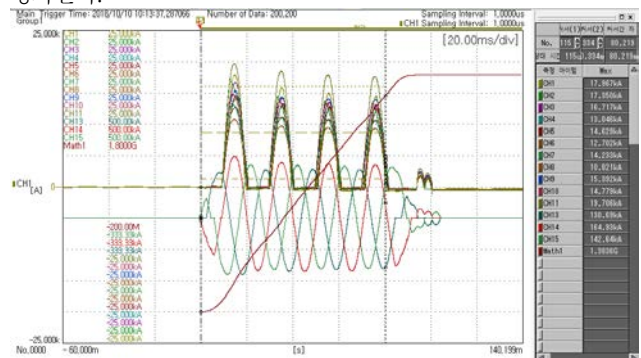


그림 2 컨버터 출력 단락 발생시 12병렬 싸이리스터 전류 파형 (5 kA/div)

Fig. 2 12-parallel thyristor current during the short circuit at the converter output (5 kA/div)

컨버터 출력 측에서 단락 발생시에 보호회로 동작을 확인하며 4주기 동안의 단락 전류 (156^{+/-}10% kA)에 싸이리스터 소자가 건전함을 시험하였다. 그림 2에 결과를 제시하였다. 또한 12병렬 싸이리스터 소자의 전류 분배를 확인하며 불균형률이

140%를 넘지 않음을 확인하였다.

컨버터 내부에서 단락 발생시에 보호회로 동작을 확인하며 4주기 동안의 단락 전류(271 \pm 10% kA)에 컨버터 구조물이 견전함을 시험한다. 그림 3에 그 결과를 제시하였다.

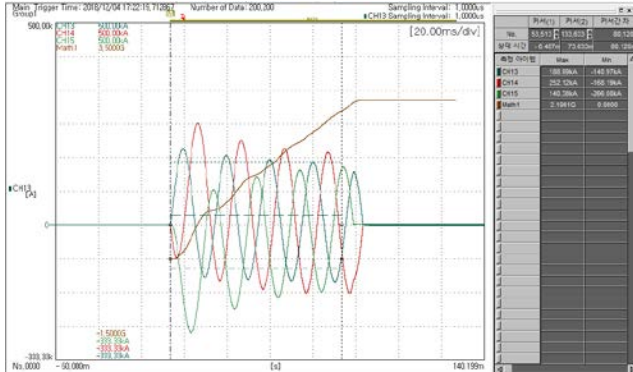


그림 3 컨버터 단락 발생시 R, S, T상 전류 파형(83.3 kA/div.)

Fig. 3 Input current waveforms during the short circuit at the converter (83.3 kA/div.)

2.1.2 Current Balance 시험

이차측 출력전압 50 V인 2 MVA 변압기를 이용하여, 저전압 정격전류(45 kA) 상황에서 12병렬 싸이리스터 소자의 전류 균형을 시험하였다. 각 병렬 소자의 전류 불균형률이 140%를 넘지 않도록 설계되었으며, 시험을 통하여 이를 확인하였다. 그림 4에 컨버터 arm의 12병렬 싸이리스터 소자의 전류 파형과 불균형률을 제시하였다.

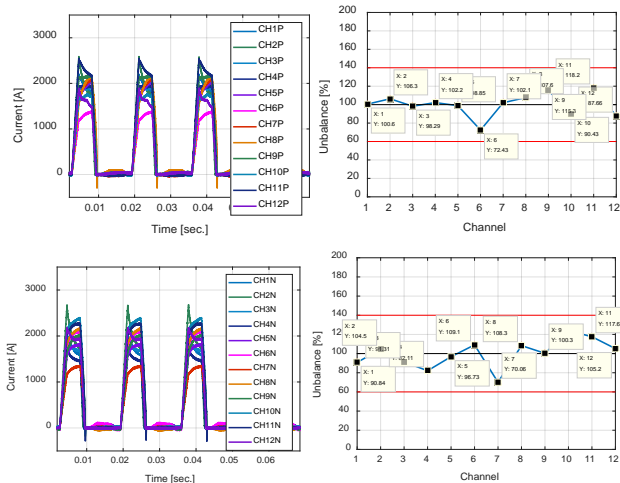


그림 4 정격전류 운전 시 12병렬 싸이리스터 소자 (RP, RN)의 전류 파형 (1 kA/div.)

Fig. 4 Current waveforms of 12-parallel thyristors (RP, RN) during the rated current test (1 kA/div.)

2.1.3 4상한 운전 시험

ITER CS 초전도 자석에 전류를 공급하는 AC/DC 컨버터 시스템은 4상한 운전이 요구된다. 초전도 자석 상호간의 유도 결합 및 토카막 플라즈마 전류와 CS 초전도 자석과의 유도 결합으로 인해 자석 전류의 급격한 변화 및 플라즈마 전류의 급속한 붕괴로 전압 및 전류가 유기되는 상황에서 AC/DC 컨버터의 전류가 제로로 떨어져 회로가 open되어 고전압이 발생되지 않도록 하기 위해 순환전류제어를 적용하여 초전도 자석 및 컨버터의 안전을 확보해야 한다.

초전도 자석 전류 값이 일정 이하인 경우 각 브리지 전류는

일정 값 이상이 항상 유지 되도록 제어를 한다. 부하 전류는 제로 영역에서 정역 동작을 할 때 끊어짐이 없이 부드럽게 극성을 바꿀 수 있도록 각 브리지는 12펄스, 6펄스, 순환전류제어 모드를 갖는다. 또한 초전도 자석 전류 값 및 컨버터의 운전 모드에 관계없이 상위 플라즈마 제어 시스템 (Plasma Control System, PCS)의 전압 명령 신호에 따라 운전 되어야 한다. 출력전압 범위는 +1050 V에서 -1050 V이며, 응답속도는 40 ms 이내여야 한다. 그림 5에 ITER CS 12펄스 AC/DC 컨버터의 4상한 운전 파형을 제시하였다.

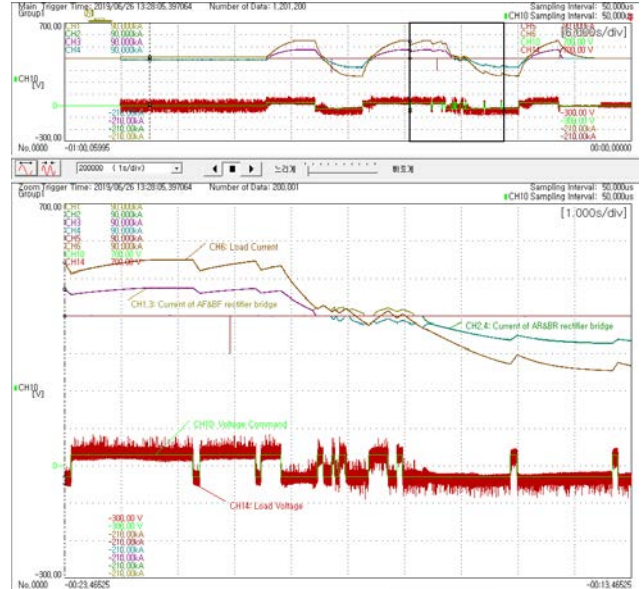


그림 5 컨버터 출력 전류 및 브리지 전류 파형 (30 kA/div.). 전압 명령 및 출력 전압 파형 (100 V/div.)

Fig. 5 Converter output current and bridge current waveforms (30 kA/div.). Voltage reference from PCS and converter output voltage waveforms (100 V/div.)

3. 결론

본 논문은 ITER CS AC/DC 컨버터의 성능 검증을 위하여 수행된 공장시험 결과를 보여주고 있다. 단락 시험 및 전류 균형 시험, 4상한 운전 시험 등 컨버터에서 요구되는 핵심 사항을 시험을 통하여 검증하였다. 공장시험 결과는 ITER에 제출 및 승인을 얻었으며, 포장 검사 후 프랑스로 운송될 예정이다.

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 국책 연구사업임(No. 2007-2006995, ITER 초전도 자석 전원공급장치 개발·제작)

참고 문헌

- [1] 서재학, "4Q Local Controller for the ITER CS, VS1, CC AC/DC Converter", 2018 추계전력전자학회
- [2] 신현국, "ITER AC/DC Converter의 보호제어기 F-LIC에 대한 FMEDA 분석", 2017 추계전력전자학회
- [3] 김봉철, "ITER CS AC/DC 컨버터 단락시험", 2018 추계전력전자학회