

# ITER 초전도자석 전원공급장치의 고장해석

박형진, 이승윤, 조성만, 정인승, 황광철, 유효열, 오종석\*, 최정원\*, 서재학\*  
 (주)다원시스, 국가핵융합연구소\*

## Fault Analysis of AC/DC Converter for ITER Superconducting Magnet

H. Park, S. Lee, S. Jo, I. Chung, K. Hwang, H. Liu, J. S. Oh\*, J. Choi\*, J. H. Suh\*  
 Dawonys Co., Ltd., National Fusion Research Institute (NFRI)\*

### Abstract

ITER 초전도자석 전원공급장치에서 고장의 종류는 단락, 단락 외 컨버터 내부고장 그리고 여러 외부요인에 의한 고장 크게 세 가지로 구분된다. 여기서 단락 외 컨버터 내부고장과 외부요인에 의한 고장은 보호시스템 및 장치의 동작으로 인해 피해가 축소된다. 하지만 단락 시에는 보호시스템이 동작하더라도 단락전류가 매우 커 큰 피해를 줄 수 있다. 또한 ITER 초전도자석 전원공급장치는 운전 중 발생 가능한 부하의 단락으로부터 초전도자석 및 다른 장치 등을 보호하기 위하여 ITER에서 요구하고 있는 FSC(Fault Suppression Capability: 고장 억제 능력) 조건을 만족해야 한다. FSC 조건에서 전원공급장치는 출력에서 300 kA의 단락전류가 흐를 경우에도 80 ms(50 Hz, 4주기)동안 전기적 고장 없이 견뎌야 한다. 본 논문에서는 전원공급장치에서 발생할 수 있는 주요 단락 항목을 소개하고, 최악의 조건에서 단락전류에 의한 전원공급장치의 고장해석을 통해 FSC 요건을 만족하는 소자 선정 및 구조설계의 적합성을 검증한다.

### 1. 서론

ITER 초전도자석 전원공급장치의 설계를 위한 다양한 연구가 진행되고 있다[1-4]. 전원공급장치의 설계 중 단락 사고에 대한 고장 해석은 반드시 고려되어야 한다. 전원공급장치에서 발생할 수 있는 단락 종류를 소개하고, 단락 회로 조건에서 각 상황을 구분하여 최악의 상황에서 모의 시험을 통해, 고장 발생 확률이 높은 싸이리스터 및 퓨즈의 상태를 기준으로 고장 여부를 판단하여 컨버터의 건전성(Soundness)을 확인한다. 싸이리스터는 접합부 온도, 퓨즈는 용단 파형을 확인하여 상태를 판단한다. 본 연구는 주요 단락 항목에서 컨버터의 상태를 확인하였고, 이를 통해 설계에 적용된 싸이리스터 및 퓨즈의 사양 및 병렬 수에 대한 적절성을 검토한다[5].

### 2. 본론

#### 2.1 고장 종류

ITER 초전도자석 전원공급장치의 단락 고장 종류는 크게 5가지로 구분된다. 컨버터 출력 단자 단락은 그림 1에서 short 1으로 나타냈다. DC 인덕터 쪽에 있는 Bypass Switch (BPS) 나 Protective Make Switch(PMS)가 오동작하거나 DC 인덕터 출력 단자에 Beam과 같은 도체가 낙하하여 발생된다. 코일의 보호를 위해 컨버터는 단락 후 최대 80 ms 동안 단락전류(또는 전자기력)로 인한

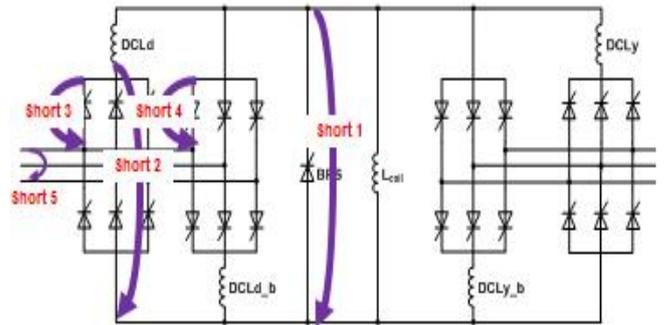


Fig. 1 Fault conditions of ITER AC/DC Converter

장치 오동작 및 기구적 파괴를 견뎌야 한다.

Short 2에 나타난 컨버터 내부단락은 dc 인덕터 입력 쪽에서 컨버터의 두 arm(Positive, Negative)이 동시에 단락 되거나 dc 인덕터 내부단락에 도체가 접촉하여 발생된다. 싸이리스터 단락은 short 3에 나타났으며 전류 불균형이나 외부 충격에 의한 싸이리스터 고장 등에 의해 발생된다. Short 4의 역병렬 싸이리스터 단락은 컨버터 게이트 드라이버의 오동작으로 역방향 싸이리스터가 “Turn-on”되었을 때 발생된다. 단락전류에 의해 컨버터가 어떠한 영향을 받는지 검토하고, 피해 상황에 대한 예측이 필요하다.

마지막으로 short 5에 나타난 변압기 출력단자 단락은 변압기의 내부단락이나 외부단락에 도체가 접촉하여 발생할 수 있다. 변압기 출력단자 단락은 컨버터의 전원이 차단되는 상황이므로 컨버터에 직접적인 영향은 미치지 않음으로 병렬 연결된 컨버터의 이상 유무만을 확인한다. 단상 단락과 3상 단락 두 조건에 대해 검토한다.

#### 2.2 고장해석 조건

Table. 1 Specification of overall systems for CS converter

Item	Parameter	Sym.	Unit	Nominal value
Grid	Nominal primary voltage	Vg	kV	400
	Apparent power	Sg	GVA	12
Main transformer	Secondary voltage	Vm	kV	66
	Apparent power	Pm	MVA	300
Converter transformer	Secondary voltage	V2	V	1,012
	Secondary current	I2	kA	18
DC inductor	Inductance	Ld	uH	150
Coil(Load)	Inductance	Lcoil	H	1.0
Number of parallel thyristor		N	EA	11

컨버터의 사양은 표 1과 같다. 계통 전압은 400 kV이고, 해석을 위한 최악의 조건을 고려하여 최대 허용치인 10%의 전압상승을 고려한 440 kV를 적용한다. 계통 단락용량은 최대 11.7 GVA이나, 여러 기생성분의 최대 변동폭(변압기의 %임피던스  $\pm 7.5\%$ 의 오차 허용)을 고려하여 12 GVA를 적용한다. 변압기의 출력전압 값은 실제 설계 값을 적용하였으며, 임피던스 값은 고장 시 최악의 조건을 고려하여 기본 임피던스에  $-7.5\%$ 를 적용하였다. 사이리스터의 접합부 온도는 한 arm당 한 개의 접합부 온도이며, 각 컨버터 별 해석에 적용된 사이리스터는 여유율을 고려하여 10 병렬로 한다.

### 2.3 고장해석 결과

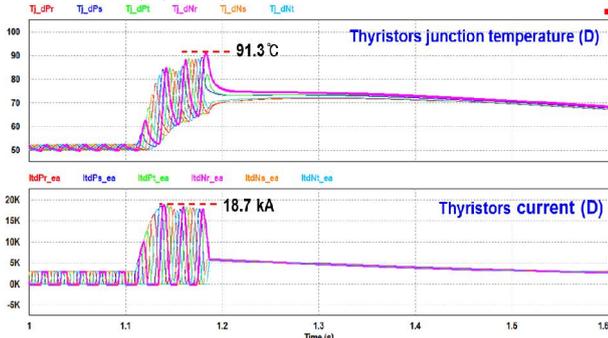


Fig. 2 Thyristor junction temperature of CS converter

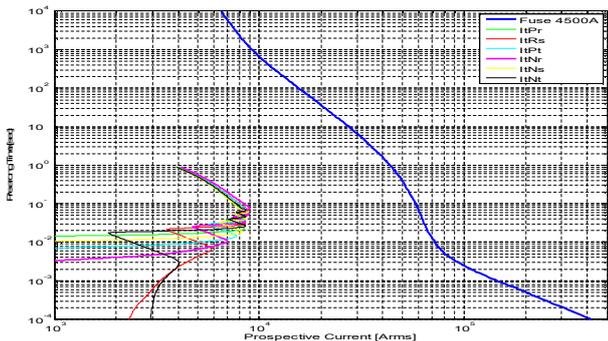


Fig. 3 Fuse melting wave of CS converter

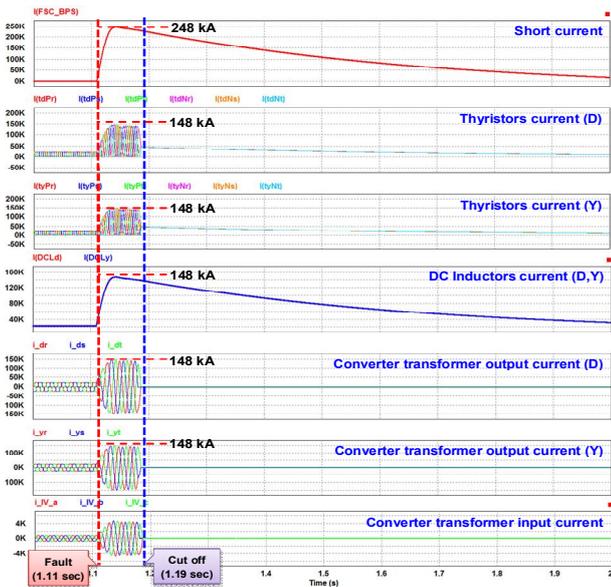


Fig. 4 Current waveform of CS converter

고장해석 결과로 컨버터 출력단자 단락 상황에서 CS 컨버터에 대한 모의시험 결과와 퓨즈 용단곡선을 그림 2, 3, 4에 예시하였다. 그림 2는 단락 상황에서 발생하는 사이리스터 최대 접합부 온도로서 91.3°C까지 상승하였으므로 제조사의 설계기준을 넘지 않았다. 그림 3은 사이리스터에 직렬로 연결된 퓨즈에 흐르는 전류에 대한 용단시간을 나타내었고, 퓨즈에 흐르는 전류가 기준 용단곡선보다 낮게 나왔으므로 FSC 조건에서 소손되지 않음을 알 수 있다. 결과적으로 컨버터에서 사이리스터 고장이 발생되지 않았고, 이를 통해 사이리스터의 사양 및 병렬 수가 적절함을 확인하였다. 또한 퓨즈 용단이 발생하지 않음을 확인하였다. 그림 4는 출력단자 단락전류 크기가 248 kA로 최대일 때의 전류파형으로 단락 발생 후 단락전류와 코일에 흐르고 있던 전류가 합쳐져 병렬 연결된 두 컨버터로 동일하게 분배되어 흐르는 결과를 얻을 수 있었다.

### 3. 결론

컨버터 출력단자 단락은 dc 인덕터 출력단 쪽에 있는 Bypass Switch(BPS)나 Protective Make Switch(PMS)가 오동작하거나 dc 인덕터 단자에 도체가 접촉하여 발생할 수 있는데, 코일의 보호를 위해 컨버터는 단락 후 최대 80 ms 동안 단락전류(또는 전자기력)로 인한 전기적 고장이나, 구조적 이상 없이 견뎌내야 한다. 이 외 컨버터 내부단락, 사이리스터 단락, 역병렬 사이리스터 단락 그리고 변압기 출력단자 단락은 dc 인덕터로 인해 단락전류가 차단되고, 코일 전단의 보호 장치(BPS, PMS)들이 정상상태에서 코일 보호에는 문제가 없기 때문에 컨버터 출력단자 단락과는 달리 FSC 요구 조건에 충족할 필요는 없다.

본 연구에서는 ITER 초전도자석 전원공급장치의 FSC 요구조건 및 각 단락회로 조건들에 대한 컨버터의 상태를 확인하였고, 이를 통해 설계에 적용된 사이리스터 및 퓨즈의 사양 및 병렬 수에 대한 적절성을 검토하였다.

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부, 지식경제부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 국책연구사업(No. 2012-0000255)의 연구결과임

### Reference

- [1] J. S. Oh, J. Choi, J. Suh, O. Kwon, J. S. Ahn, I. Benfatto, J. Tao, P. Fu, "Status of the Korean R&D Program on the ITER Coil Power Converters," IAEA FEC, Daejeon Korea, Oct. 2010
- [2] 최정완, 오종석, 서재학, 안종수, 권오정, "대전력 Thyristor 다병렬 구조의 전류배분", 전력전자학회 추계학술대회, 서울, 2010년 11월
- [3] J. S. Oh, J. Choi, J. H. Suh, H. Liu, S. Lee, H. Park, W. Jung, S. Jo, H. Tan, J. Tao, P. Fu, "Korean R&D on the 6-Pulse Converter Unit for ITER ACDC Converters", 2011 Symposium on Fusion Engineering (SOFE), Aug. 2011
- [4] 박형진, 유효열, 이승윤, 정우식, 조성만, 오종석, 최정완, 서재학, "ITER 초전도자석 전원장치의 FSC 요건에 관한 연구", 전력전자학회 추계학술대회, 서울, 2011년 11월
- [5] 조성만, "Fault Analysis for AC/DC Converters", The Way to Fusion Energy, ITER, 2012년 2월