

# ITER 초전도자석 전원장치의 FSC 요건에 관한 연구

박형진, 유효열, 이승윤, 정우식, 조성만, 오종석\*, 최정완\*, 서재학\*  
 (주)다원시스, 국가핵융합연구소\*

## Study on FSC Requirement of AC/DC Converter for ITER Superconducting Magnet

H. Park, H. Liu, S. Lee, W. Jung, S. Jo\*, J. S. Oh\*, J. Choi\*, J. H. Suh\*  
 Dawonsys Co., Ltd, National Fusion Research Institute (NFRI)\*

### ABSTRACT

ITER 기구는 초전도자석 전원장치가 운전 중 발생 가능한 부하의 단락으로부터 장치를 보호하기 위하여 FSC(Fault Suppression Capability) 조건에 만족할 것을 요구하고 있다. 본 연구에서는 모의시험을 통해 FSC 조건에서 발생하는 단락 전류에 의한 소자 이상 유무 및 전자기력의 크기와 방향을 확인하였고, 해석을 통해 전자기력이 전원장치 구조물에 미치는 영향을 검토하였으며, 실제 시험을 통해 모의시험 및 해석 결과가 타당함을 검증하였다.

### 1. 서론

부하 단락 시 가능한 빠른 시간 내에 출력을 차단하는 일반적인 전원장치와 달리 ITER 핵융합실험로의 초전도자석 전원장치는 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 전원장치는 출력에서 300 kA의 단락전류가 흐를 경우에도 80 ms(50 Hz, 4주기)동안 전기적 고장 없이 견뎌야 하며, 이 때 발생하는 전자기력에 의한 구조적 변형이 없어야 한다. 본 연구는 FSC 조건에서 소자의  $I^2t$ , 온도 및 전자기력을 모의시험을 통하여 산출하고, 이렇게 산출된 소자의  $I^2t$ 와 온도를 제조사가 제시하는 사양과 소자의 전류 불평형을 고려하여 검토한다. 구조물 간 발생하는 전자기력은 ANSYS 해석을 통하여 검토하고, 실제 단락시험을 통하여 모의시험과 해석의 결과를 검증한다.

### 2. 본문

#### 2.1 전원장치 개발 사양

초전도자석 전원장치 개발 사양은 표 1과 같다. 전원장치 버스바의 재질은 알루미늄이며, 냉각방식은 수냉식이다.



그림 1 ITER 초전도자석 전원장치

Fig. 1 Power supply for ITER Superconducting Magnet

표 1 전원장치 사양  
 Table 1 Specification of Power supply

Parameter	Rating	Test	Note
Output Voltage (Vdc)	1,350	1,500	
Output Current (kA)	22.5	30	
FSC Condition (kA)	300	250	during 80 ms
Frequency (Hz)	50	60/50	
Cooling	Water		
Busbar material	Aluminum alloy (A6101-T6)		
Size (mm)	2,650 × 4,395 × 2,962		
Weight (ton)	12		

#### 2.2 FSC 모의시험

그림 2와 같이 모의시험 회로를 구성하여, 단락전류에 대한 소자의 내량을 검토하고, 전자기력의 크기와 방향을 산출하였다. 전자기력 계산식은 다음과 같다.

$$F = \frac{2 \times 10^{-7} \times I_1 \times I_2 \times l}{d} \quad (\text{N}) \quad (1)$$

여기서,  $F(\text{N})$ 는 전자기력,  $I_1(\text{A})$ 과  $I_2(\text{A})$ 는 두 버스바에 흐르는 각각의 전류이며,  $l(\text{m})$ 은 버스바의 길이,  $d(\text{m})$ 는 버스바 간 간격이다.

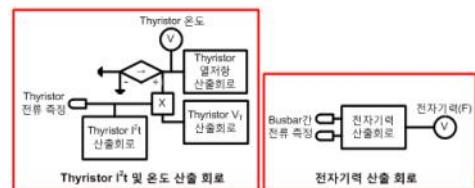
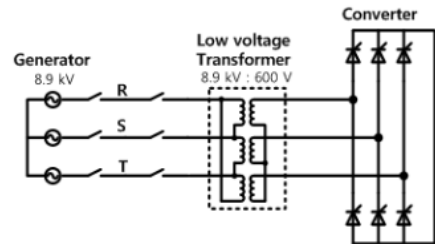


그림 2 FSC 모의시험 회로

Fig. 2 FSC Simulation Circuit

단락전류 300 kA가 흐를 경우 Thyristor 개당 30 kA의 전류가 흐르게 된다. 이 조건을 모의시험에 적용하여 Thyristor의  $I_t$ 와 온도를 확인하면 그림 3과 같다. 개별  $I_t$ 가 최대 30.8 MA<sup>2</sup>s로 Thyristor 사양인 54.08 MA<sup>2</sup>s보다 작고, 온도도 91.4°C로 Thyristor 사양인 125°C보다 작아 소자는 이상이 없다.

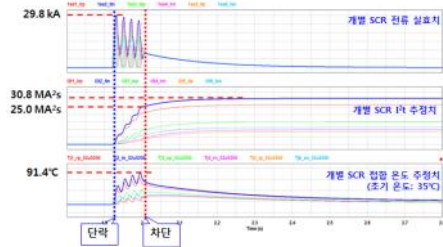


그림 3 FSC 모의시험 결과(1)  
Fig. 3 FSC Simulation result(1)

### 2.2.2 전자기력 크기 및 방향 산출

단락전류 300 kA가 흐를 때 발생하는 전자기력의 크기 및 방향을 확인하면 그림 5와 같다. 최대 전자기력 32 kN이며, 여기서 (+) 방향은 버스바간 당기는 힘이며, (-) 방향은 미는 힘을 의미한다.

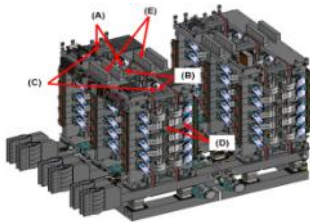


그림 4 전자기력 산출 부위  
Fig. 4 Parts of Electromagnetic force calculation

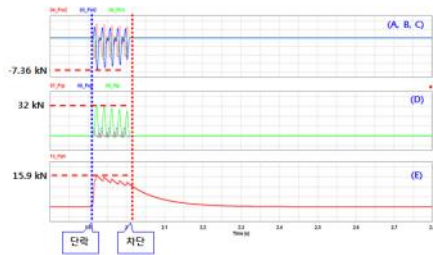


그림 5 FSC 모의시험 결과(2)  
Fig. 5 FSC Simulation result(2)

### 2.3 전자기력 해석

2.2.2절의 모의시험 결과를 ANSYS 툴을 이용하여 해석한 결과 전자기력에 가장 큰 영향을 미치는 부위는 구조물 보다는 구조물을 바치고 있는 애자 부분이었으며, 보강을 통해 이를 해결하였다. 해석 결과는 표 2와 같다.

표 2 전자기력 해석  
Table 2 Analysis of Electromagnetic force

해석부위	취약부위	해석결과	기준	판정
a.c. busbar	-	20.44	< 111	적합
Base Frame	애자	8.84	< 1.8	초과

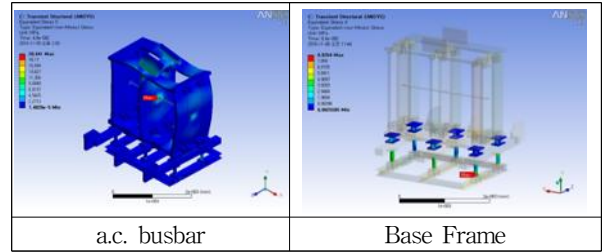


그림 6 전자기력 해석  
Fig. 6 Analysis of Electromagnetic force

### 2.4 단락시험

단락시험은 한국전기연구원(KERI)에서 시행하였으며, 단락전류가 FSC 조건인 300 kA에 못미치는 250 kA정도여서 Thyristor의 수량을 10개중 6개만 Turn-on하여 시험하였다. 시험 결과 Thyristor의 전류 불균형율은 120%로 ITER 허용기준인 140% 이내보다 양호하였으며, 단락전류에 의한 소자 파괴나 전자기력에 의한 구조물의 외형 변화는 없었다. 단락시험 결과는 그림 7과 같다.

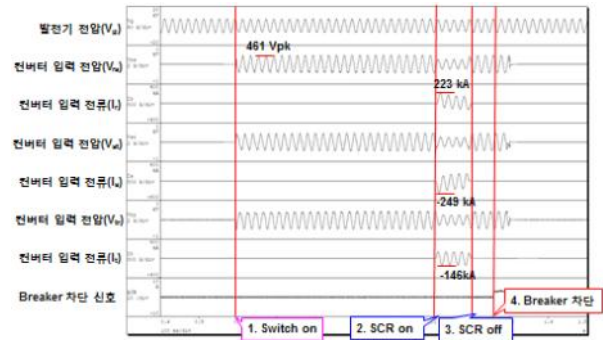


그림 7 단락시험 결과  
Fig. 7 Result of Short circuit test

### 3. 결론

본 연구에서는 모의시험을 통하여 FSC 조건에서 소자의  $I_t$  및 온도를 산출하였고, 이렇게 산출된 값을 제조사가 제시하는 사양과 비교 검토하였다. 그리고 모의시험을 통하여 산출된 전자기력을 해석 프로그램인 ANSYS에 적용하여, 전자기력이 전원장치 구조물에 미치는 영향을 검토하였다. 그리고 실제 단락시험을 통하여 모의시험 및 해석 결과가 타당함을 검증하였다.

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부, 지식경제부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 국책연구사업(No. 2009-0064120)의 연구결과임

### 참고 문헌

[1] J. S. Oh and et al., "Korean R&D on the 6-Pulse Converter Unit for ITER AC/DC Converters", 2011 Symposium on Fusion Engineering(SOFE), Aug. 2011  
[2] 최정완, 오종석, 서재학, 유효열, 이승운, 박형진, 정우식, 조성만, "ITER 초전도자석 전원공급장치 개발에 관한 연구", 전력전자학회 추계학술대회, 서울, 2011년 11월