

ITER 초전도자석 전원공급장치의 보호해석

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

Protection Analysis of AC/DC Converter for ITER Superconducting Magnet

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

Abstract

ITER 초전도자석 전원공급장치에 심각한 고장이 발생할 경우 전원장치뿐만 아니라 그 부하인 초전도코일에도 영향을 줄 수 있다. 초전도코일이 파괴될 경우 수리가 어려워 프로젝트 자체에 중대한 영향을 미칠 수 있어 전원공급장치의 보호는 매우 중요하다. 본 논문에서는 ITER 초전도자석 전원공급장치에서 발생할 수 있는 주요 고장 항목을 소개하고, 전원장치 보호시퀀스에 따른 보호능력의 적합성을 검증한다.

1. 서론

ITER 초전도자석 ac/dc 컨버터의 성능 검토를 위한 다양한 연구를 진행해 왔다[1-3]. 특히 컨버터에서 발생할 수 있는 고장 성능 평가는 컨버터의 설계 신뢰성을 향상시킨다. 따라서 컨버터에서 발생할 수 있는 고장 항목을 식별하고, 고장에 대한 컨버터의 자기보호를 분석하여 보호동작에 대한 현상을 이해하고, 나아가 실제 보호를 위한 방안을 모색한다. 컨버터는 모든 고장에 대해 코일전류를 바이패스시키고 입력 ac 차단기의 개방을 요청해야 한다. 퓨즈의 용량과 같은 경미한 고장의 경우에는 고장이 해소(clear)되면 컨버터는 계속 운전될 수 있다. 본 연구는 고장 항목을 정의하고 다양한 사고상황을 고려하여 모의시험을 통해 보호능력을 검증하여 요구조건 충족 여부를 확인한다[4].

2. 본론

2.1 고장항목 및 보호동작

ITER 컨버터의 전력 회로와 고장 유형을 그림 1에 나타냈다. Type B, C, D, E는 12펄스 컨버터에서 동시에 일어나지 않고 한 개의 6펄스 브리지에서만 일어나는 것으로 가정하였다. Type A는 MS(Make Switch)의 비정상 닫힘 또는 동작에 해당하고 바이패스스위치(Bypass Switch)의 역병렬 싸이리스터가 오동작된 경우이다. 이러한 고장은 5가지 유형 중 가장 빈번히 발생할 수 있다.

ITER 컨버터는 부하 특성상 고장 발생 시 게이트 차단을 사용할 경우 고장 유형에 따라 컨버터 브리지의 싸이리스터가 초전도 코일 부하 전류에 의하여 계속 도통될 수 있다. 이 코일 전류는 컨버터변압기를 거쳐 직류 성분의 전류가 ac 차단기에 걸릴 수 있으며, ac 차단기 보호를 위하여 게이트 차단은 제어기의 고장이나, 게이트드라이버의 고장과 같은 사고로 취급한다.

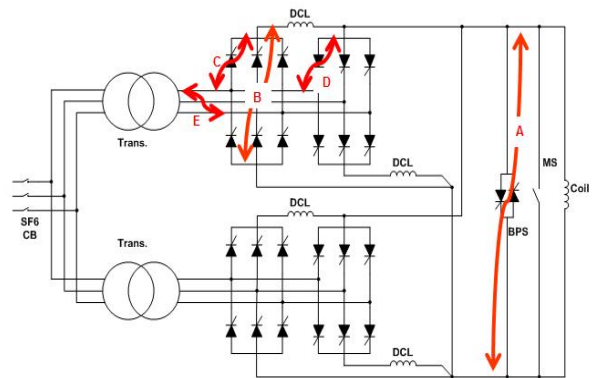


Fig. 1 Short circuit conditions for protection analysis

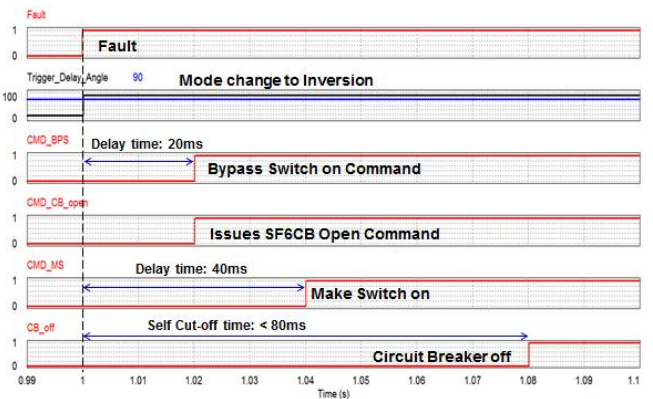


Fig. 2 Time chart of protection

또한 전체 냉각수의 정지와 같은 외부 고장 시에는 컨버터에 흐르는 부하전류를 바이패스 시킨다. 개별 컨버터 내의 냉각수 고장이 발생하면 컨버터는 고장을 보고하고 회생 모드로 운전된다. 컨버터 브리지나 직류 인덕터의 냉각수 고장이라면 2차 임계값에 도달하면 MS를 동작시키고 컨버터는 정지된다. 위와 같은 고장들의 인식으로부터 보호동작의 종료까지의 보호동작시퀀스는 그림 2와 같다.

2.2 보호해석 조건

모의시험에서 사용된 컨버터의 사양을 표 1에 정리하였다. ac 차단기는 사고 발생 후 80 ms 후에 강제적으로 차단된다. 고장해석에서는 제어기가 오동작하는 상태이므로 별도의 보호 기능 없이 ac 차단기가 고장전류를 감지하여 차단한다.

Table. 1 Specification of overall systems for converter[4]

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	V ₂	V	1,012
	Secondary current	I ₂	kA	18
DC inductor	Inductance	Ld	μH	150
Coil(Load)	Inductance	L _{coil}	H	1.0

본 연구에서는 보호해석 조건(제어기 오동작 포함)별로 다음 상황에 대해 분석하고, 보호가 제대로 이루어지는 확인하였다.

- 1) 제어기 오동작(트리거 지연각(α) = 0°일 때)
- 2) 컨버터 출력단자 단락
- 3) 바이패스스위치 고장

2.3 보호해석 결과

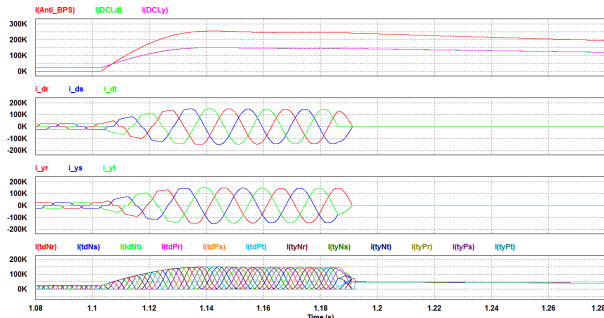


Fig. 3 Waveform of Terminal short (controller fail, $\alpha = 0$)

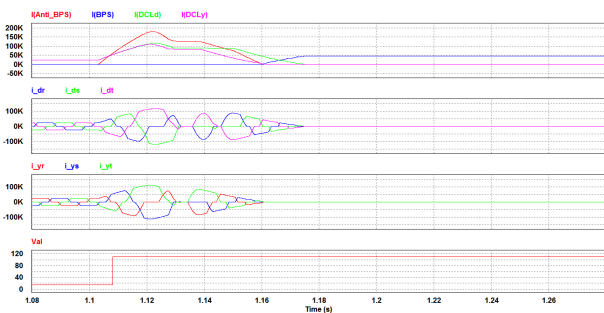


Fig. 4 Inversion mode for Converter Unit Terminal Short

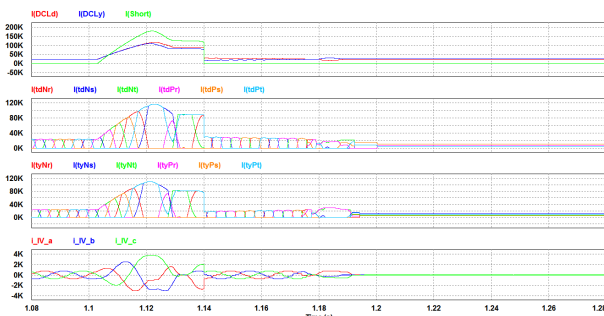


Fig. 5 Coil current bypass at bypass switch failure

보호해석 결과는 가장 빈번하게 발생하는 컨버터 출력단자 단락상황을 모의시험하였으며, 그림 3에서 그림

5는 바이패스스위치의 역병렬 싸이리스터 오동작에 의한 고장상황에서 보호동작을 볼 수 있는 모의시험 파형의 결과를 보여준다. 그림 3은 컨버터 제어기가 오동작하여 단락을 인식하지 못하고 트리거 지연각을 최고값으로 출력하고 있을 때 입력 ac 차단기가 80 ms 이후 동작한 경우이다. 이는 최악의 조건으로 제어기 정상동작 시에는 발생하지 않는다. 그림 4는 컨버터제어기가 단락을 인식하여 컨버터를 인버전모드로 전환하여 전자보호 동작으로 운전한 경우이다. 바이패스스위치 오동작에는 인버전모드의 동작에 의해 차단기가 “턴-오프” 된다. 코일전류는 바이패스스위치의 정상동작에 따라 바이패스된다. MS가 동작되었다면 코일의 전류경로가 이미 확보되었으므로 컨버터가 정지하더라도 문제가 없다. 그림 5는 1.1 sec에서 단락이 발생하였고, 1.14 sec에서 고장이 해소된 경우이다. 바이패스스witch는 고장이 발생하였고, 코일전류는 컨버터브리지로 흐르고 있으며, ac 차단기가 차단된 후에 컨버터브리지로 코일전류가 바이패스되고 있다.

3. 결론

ITER 초전도자석 전원공급장치는 모든 고장에 대해 전원장치 보호시퀀스에 따라 코일전류를 바이패스 시키고 입력 ac 차단기의 개방을 요청하여야 한다. 컨버터 내의 퓨즈 용단과 같은 경미한 고장의 경우, 고장이 해소되면 컨버터는 계속 운전되어야 하며, 입력 전원의 순간적인 전압강하나 썬지의 인입과 같은 고장 발생시에는 전자보호가 동작한다. 고장이 해소되면 컨버터는 운전 시나리오에 따라 정상 운전된다.

본 논문에서는 고장항목을 정의하였으며, 보호해석 조건 별로 다양한 사고상황을 고려하여 모의시험을 통해 보호능력을 검증하고 요구조건의 충족 여부를 확인하였다.

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] 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
- [3] 박형진, 유효열, 이승윤, 정우식, 조성만, 오종석, 최정완, 서재학, "ITER 초전도자석 전원장치의 FSC 요건에 관한 연구", 전력전자학회 추계학술대회, 서울, 2011년 11월
- [4] 조성만, "Protection Analysis for AC/DC Converters", The preliminary design document of ITER AC/DC converter, 2012년 2월