

ITER 초전도자석 전원공급장치의 예비설계

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

Preliminary Design of AC/DC Converters for ITER Superconducting Magnet

J. Choi, J. S. Oh, J. H. Suh, S. Lee*, S. Jo*, W. Jung*, H. Park*, I. Chung*, K. Hwang*, H. Liu*

National Fusion Research Institute (NFRI), Dawonsys Co., Ltd.*

ABSTRACT

ITER 초전도자석 전원공급장치의 예비설계가 실제 크기 6 펄스 R&D 컨버터의 제작 및 시험결과를 기반으로 수행되었다. ITER 컨버터는 자체적으로 지지되는 알루미늄 버스바 구조로 제작되며, 이 버스바에 양면 클램핑 방식으로 조립되는 Thyristor 스위치는 4인치 규격으로써 컨버터의 종류에 따라 한 개의 암 당 8 ~ 16 개의 소자가 병렬로 구성된다. ITER 컨버터 예비설계는 알루미늄 버스바 구조설계, 컨버터 냉각설계, 컨버터 전기회로 설계, 컨버터 고장해석 및 보호설계, 시험 절차 및 요건 등을 포함하며, 본 논문에서 그 설계결과를 기술한다. ITER 컨버터는 예비설계 결과를 기반으로 상세설계 및 제작설계를 거친 후 제작된다.

1. 서론

우리나라 조달분 ITER 초전도자석 전원공급장치의 예비설계가 그 동안 지속적으로 수행해 온 VS(Vertical Stabilization) 컨버터 및 CS(Central Solenoid) 컨버터 등의 R&D^{1,3)} 결과를 기반으로 하여 수행되었다. 본 논문에서는 ITER 초전도자석 전원공급장치의 예비설계 결과 중 컨버터 전력회로 부분에 대한 내용을 종합하여 소개한다⁴⁾.

ITER 컨버터는 부하전압 및 전류가 최대 1.05 kV 및 68 kA에 달하는 대용량 교류 직류 전력변환장치이다. 그 종류로는 각각의 ITER 초전도코일을 구동하는 TF(Toroidal Field), CS, PF(Poloidal Field), CC(Correction Coil) 컨버터, 그리고 PF 또는 CS 코일 그룹에 속하여 토카막(Tokamak) 플라즈마의 수직 안정성을 제어하는 VS 컨버터 등이 있다. 표 1은 ITER 컨버터 종류별 전기사양을 보여준다.

TF 컨버터는 12펄스, 2상한 구조를 가지며 최대 68 kA의 출력전류 사양을 갖는다. TF 컨버터는 토카막 운전 중 일정한 직류전류를 공급하며 TF 초전도코일에 30분의 짧은 시간 내에 전류를 충전 또는 방전하기 위한 650 V와 정상전류 유지 중 무효전력 저감을 위한 160 V 등 두 종류의 출력전압을 갖는다. 이 두 종류의 전압은 컨버터변압기의 1차측 탭을 OCTC(Off Circuit Tap Changer)로 전환하여 얻는다. 이를 위한 코일전류의 바이패스를 위하여 TF 컨버터는 연속전류정격의 반도체스위치소자를 이용한 바이패스스위치를 갖는다.

표 1 ITER AC/DC 컨버터 전기사양

Table 1 Electrical specifications of ITER AC/DC converters

Converter Type	Input Voltage (kVrms)	Output On-load Voltage (V)	Output Current (kA)
TF	66	+/- 160/650	+68
CS	66	+/- 1,050	+/- 45
PF	66	+/- 1,050	+/- 55
VS	66	+/- 1,050	+/- 22.5
CCU/L*	22	+/- 65	+/- 10
CCS**	22	+/- 325	+/- 10

* CCU/L: Correction Coil Upper or Lower

** CCS: Correction Coil Side

나머지 컨버터들은 12펄스, 4상한 구조를 갖는다. 이들 중 보다 더 높은 출력전압을 얻기 위하여 두 대 이상의 컨버터를 직렬로 연결하는 CS, PF(중국 조달분), VS 컨버터 등은 입력전원계통의 무효전력 저감을 위하여 시퀀셜제어를 수행하도록 되어 있다. CC 컨버터를 포함하여, 이 컨버터들은 각종 이상상황에 대처하기 위한 펄스정격의 반도체 바이패스스위치를 갖는다. 이 바이패스스위치는 러시아의 조달품인 PMS(Protective Make Switch)가 단히 바이패스해 줄 때까지만 초전도코일의 전류를 감당해 주면 된다.

ITER 컨버터는 FSC(Fault Suppression Capability) 요건을 만족하도록 설계 및 제작되어야 한다. FSC 요건은 컨버터가 직류 출력단자의 단락사고 시 80 ms 동안 견뎌 주어야 하며, 다병렬 스위치 중 하나의 소자가 단락되었을 경우 해당 스위치의 퓨즈만 용단되고 나머지 스위치에 의한 운전이 계속될 수 있어야 하는 능력을 갖추는 것이다.

2. 본론

2.1 ITER AC/DC 컨버터 구조

ITER 컨버터는 그 출력전류 사양에 따라 한 개의 암 당 4인치 규격의 대용량 Thyristor 스위치를 8 ~ 16개씩 병렬로 연결한다. 컨버터브리는 자체 지지구조를 갖는 알루미늄 버스바 구조물로 제작되며, 단락사고 시의 전자기력과 지진 등의

외력으로부터 안정적으로 구조를 유지할 수 있음과 동시에 정상운전 시 전기 및 열적 특성을 고려하여 알루미늄 6101 T6 재질을 그 재료로 선정하고 해석 및 설계하였다^[6]. 그림 1은 CS, VS 컨버터에 사용되는 버스바 구조물을 보여준다. 이 구조는 두 개의 6펄스 브리지가 3상 ac 버스바를 공유하며 일렬로 정렬하고 있는데, 앞, 뒤의 브리지는 서로 역방향 브리지를 형성하도록 스위치를 조립하여 전체적으로 6펄스 백투백 브리지를 형성한다. 각각의 브리지 출력은 dc 인덕터를 통하여 다른 브리지들과 병렬로 연결되며 그림 1과 같은 한 조의 6펄스 백투백 브리지와 30도 위상차를 갖는 다른 한 조의 브리지가 결합되어 전체적으로 12펄스 백투백 브리지를 형성한다. TF 컨버터의 경우에는 역방향 브리지가 필요 없으므로 이 그림의 절반 모양으로 제작된다. Thyristor 스위치는 양호한 클램핑 특성 확보 및 효과적인 배치를 위하여 양면조립 구조를 사용한다.

CC 컨버터는 전류사양이 상대적으로 작기 때문에 이와는 다른 보다 간단한 형태의 구조를 갖는다.

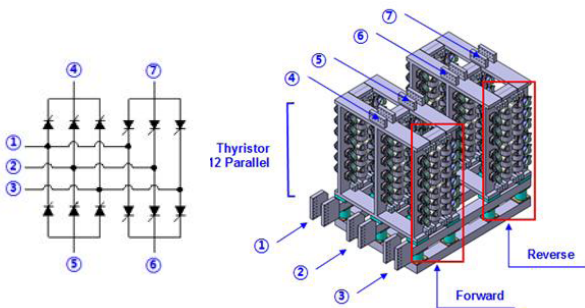


그림 1 CS, VS 컨버터브리지의 구조
Fig. 1 Structure of CS and VS converter bridge

2.2 ITER AC/DC 컨버터 냉각

ITER 컨버터브리지의 버스바구조물 내에 형성되는 냉각수 통로는 버스바 자체를 냉각함과 동시에 버스바에 부착된 Thyristor 및 퓨즈의 냉각기에 냉각수를 공급 및 회수하는 배관 역할을 겸한다. Thyristor와 퓨즈의 냉각수관은 서로 직렬로 연결된다. 컨버터의 부속품인 dc 인덕터 역시 알루미늄 버스바로 제작되며 그내부에 냉각수 통로를 형성하여 수냉각되도록 제작된다. 바이패스스위치의 경우 TF용만 수냉각 방식이며, 컨버터브리지와 dc 인덕터 및 바이패스스위치 사이의 연결버스바도 수냉식으로 제작된다.

2.3 ITER AC/DC 컨버터 고장해석 및 보호설계

ITER 컨버터의 운영 시 발생 가능한 제반 고장항목을 식별하여 해석을 실시하고^[6] 여러 가지 고장상황으로부터 컨버터를 보호할 수 있도록 컨버터 보호해석 및 설계를 수행하였다^[7]. 고장해석에서는 발생 가능한 고장으로 역병렬 브리지의 오점호, 역방향 바이패스스위치의 오점호 그리고 컨버터 출력단자에 금속물체의 접촉 등을 식별하였다. 컨버터 보호설계에서는 컨버터에 발생하는 고장에 대비하여 적절한 보호능력을 갖추게 설계하거나(FSC 요건 만족 등) 컨버터 및 주변의 구성품으로 하여금 적절한 보호절차를 수행하는 절차를 설계한다.

2.4 ITER AC/DC 컨버터 배치

ITER 컨버터는 TF 1대, CS 12대, VS 6대, CC 9대, 그리고

컨버터 각각의 dc 인덕터, 바이패스스위치, 연결 버스바 등을 포함하는 여러 가지 구성품을 길이방향이 긴 두 동의 건물에 수용한다. 컨버터변압기는 두 건물의 양 옆의 외부에 배치된다. 그림 2는 단위 컨버터 구성품의 배치를 CS 컨버터를 예로 들어 보여준다. 가운데의 공간은 컨버터 구성품을 이동하는 통로로 활용된다.

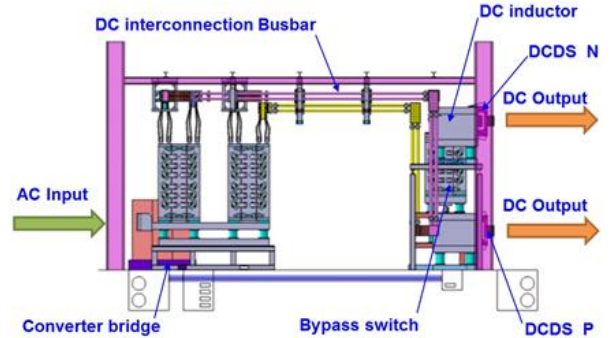


그림 2 CS 컨버터의 각 구성품 배치 단면도
Fig. 2 Cross-sectional view of a CS converter unit

3. 결론

ITER 초전도자석 전원공급장치는 사전 R&D의 결과를 기반으로 예비설계를 실시하고 그 결과에 대하여 ITER 기구 및 외부의 전문가로 구성된 예비설계검토위원회의 검토를 거쳤으며 현재 상세설계가 수행되고 있다. 상세설계는 두 부분으로 나누어 수행하며 2012년 말까지 1차분인 VS, CC 컨버터에 대한 상세설계를 완료하고 2013년 전반기에 이 1차분에 대한 상세설계 검토를 거친 후 제작설계 및 제작에 착수할 예정이다.

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

참고 문헌

- [1] 최정완 외, "ITER 초전도자석 전원공급장치 개발에 관한 연구", 전력전자학회 추계학술대회, 서울, 2011년 11월
- [2] 박형진 외, "ITER 초전도자석 전원장치의 FSC 요건에 관한 연구", 전력전자학회 추계학술대회, 서울, 2011년 11월
- [3] 최정완 외, "대전력 Thyristor 다병렬 구조의 전류배분", 전력전자학회 추계학술대회, 서울, 2010년 11월
- [4] J. S. Oh, et. al., "Preliminary design on the Korean procurement package of AC/DC converters for ITER coil power supply system," 27th Symposium on Fusion Technology, Liege Belgium, Sep. 2012
- [5] 정우식 외, "ITER 초전도자석 전원공급장치의 구조설계를 위한 유한요소 해석", 전력전자학회 추계학술대회, 대구, 2012년 11월
- [6] 박형진 외, "ITER 초전도자석 전원공급장치의 고장해석", 전력전자학회 추계학술대회, 대구, 2012년 11월
- [7] 조성만 외, "ITER 초전도자석 전원공급장치의 보호해석", 전력전자학회 추계학술대회, 대구, 2012년 11월