

ITER 초전도자석 전원장치용 변압기의 제작 및 시험 현황

최정완, 서재학, 오종석, 신현국, 이장수*, 손명공*, 김승모*, 김명기*
국가핵융합연구소, ㈜효성*

The Status of Manufacturing and Test for ITER AC/DC Converter Transformers

J. Choi, J. H. Suh, J. S. Oh, H. K. Shin, J. S. Lee*, M. K. Son*, S. M. Kim*, M. K. Kim*
National Fusion Research Institute (NFRI), Hyosung Co., Ltd.*

ABSTRACT

우리나라가 조달하는 ITER(국제핵융합시험로) 초전도자석 전원장치용 변압기는 CCU/L(Correction Coil Upper/Lower) 컨버터 형식용 6대, CCS(Correction Coil Side) 컨버터 형식용 3대, VS1(Vertical Stabilization 1) 컨버터 형식용 2대, CS(Central Solenoid) 컨버터 형식용 6대 그리고 TF(Toroidal Field) 컨버터 형식용 1대로 구성되어 있다. ITER한국사업단은 ㈜효성과 컨버터 변압기의 공급계약을 2011년에 체결하고 예비설계를 시작하여 2014년에 최종설계를 마친 후 동년 후반부터 CCU/L, CCS 및 VS1 컨버터 형식용 각 1대씩의 초도품 변압기 제작에 착수하였다. 각 변압기는 제작이 완료되어 CCU/L 및 CCS 형식은 FAT(Factory Acceptance Test)를 완료하였고 VS1 형식은 공장 자체시험을 완료하고 현재 전기연구원서 실시할 단락시험을 준비하고 있다. 이어 CS 형식의 초도품과 1대만 조달하는 TF 형식의 제작을 착수할 예정이고, 각 형식별 초도품 1대씩은 단락시험을 포함하는 형식시험(Type Test)을 실시하여 형식별 적합성을 검증하고, 나머지 물량은 정기시험(Routine Test)을 실시한 후 2017년까지 두 번으로 나누어 프랑스 남부에 위치한 ITER 현장에 운송 및 설치할 예정이다. 설치를 마친 변압기들은 각각의 컨버터 짝과 통합시험을 포함하는 SAT(Site Acceptance Test)를 거친 후 ITER 기구에 인계될 예정이다.

1. 서론^{[1][2]}

우리나라가 조달하는 ITER(국제핵융합시험로) 초전도자석 전원장치(이하 컨버터라 함)용 변압기는 CCU/L(Correction Coil Upper/Lower) 컨버터 형식용 6대, CCS(Correction Coil Side) 컨버터 형식용 3대, VS1(Vertical Stabilization 1) 컨버터 형식용 2대, CS(Central Solenoid) 컨버터 형식용 6대 그리고 TF(Toroidal Field) 컨버터 형식용 1대로 구성되어 있다. 본 논문에서는 최근 제작 및 시험이 완료 또는 진행되고 있으며 조달 1차분으로 분류해 진행하고 있는 CCU/L, CCS 및 VS1 컨버터 변압기의 제작 및 시험 현황에 대하여 기술한다. 컨버터 변압기 공급계약업무를 수행하고 있는 ㈜효성은 예비설계, 상세설계에 이어 제작설계를 마치고 2014년 후반부터 VS1, CCS, CCU/L 컨버터 변압기 각각의 초도품 1대씩의 생산을 시작하여 CCS 및 CCU/L 변압기 초도품은 FAT를 완료하였고, VS1 변압기 초도품은 제작을 완료하고 FAT 진행하고 있다.

CCU/L 변압기와 CCS 변압기는 공히 두 대의 변압기가 하나의 탱크 내에 나란히 배치되어 각각의 2차 전압이 서로 30도의 위상차를 갖는 extended delta 권선구조로 제작되어 부하 컨버터가 12펄스로 운전되도록 해 준다. 탱크 내 두 변압기는 1조의 삼상 1차측 부싱을 공유하며 탱크 내 절연은 폭발사고 방지를 위해 식물성 절연유를 사용한다. 냉각은 KNAN(오일자연순환 자연공냉식) 방식이다. 여기서, K는 식물성 절연유를 사용하여 절연유 발화점이 300°C 이상인 경우에 해당한다. VS1 변압기 역시 두 대의 변압기가 하나의 탱크 내에 수용되는 구조이나, 두 변압기의 2차측 전압은 동위상이다. ITER VS1 컨버터는 총 6대가 직렬로 연결되어 운전되며, 각각의 컨버터 변압기 2차측이 서로 동위상이어서 부하 컨버터가 두 조가 6펄스로 운전되지만, 직렬로 연결되는 이웃 컨버터와는 서로 30도의 위상차를 갖도록 제작되어 두 대 직렬구조의 부하 컨버터가 12펄스로 운전된다. VS1 컨버터 변압기 역시 1조의 1차측 삼상 부싱을 공유하며 탱크 내 절연 역시 식물성 절연유를 사용한다. 냉각은 KNAF(오일자연순환 강제공냉식) 방식이다. CCU/L, CCS 및 VS1 컨버터변압기의 주요 사양은 표1과 같다.

표 1 ITER CCU/L, CCS 및 VS1 컨버터 변압기의 주요 사양
Table 1 Principal specifications of ITER CCU/L, CCS and VS1 ac/dc converter transformers

| Item | CCU/L | CCS | VS1 |
|--------------------------|----------------------|-------------|-------------|
| 1차 전압, kVac | 66 | 66 | 66 |
| 2차 전압, Vac | 96 | 327 | 1,037 |
| 용량, MVA | 0.4485 | 2.209 | 15.76 |
| %임피던스, % | 8.7 | 14.2 | 16.8 |
| 냉각방식 | KNAN | KNAN | KNAF |
| 1, 2차 너입펄스 시험전압, kV BIL | 125, 20 | 125, 20 | 325, 75 |
| 1, 2차 ac 단시간 내전압시험전압, kV | 50, 10 | 50, 10 | 140, 28 |
| 단락시험 시간, s | 0.5 | 0.5 | 0.25 |
| 건조, 유입중량, ton | 12.7, 19.5 | 21.5, 30.7 | 61.6, 83.2 |
| 외형(l/w/h), m | 4.8/3.2/2.7 | 5.0/4.4/4.0 | 7.9/5.0/4.9 |
| 주요 적용표준 | IEC60076, IEC61378 1 | | |

모든 ITER 컨버터 변압기들은 컨버터 건물의 외부에 설치되며 ㈜효성에서 공급하는 ac busbar를 통하여 건물 내부의 컨버터 입력에 연결된다. 참고로, 표1의 %임피던스는 변압기

자체의 값이며, 컨버터에서 바라본 변압기와 ac busbar의 합성 %임피던스는 CCU/L 및 CCS 컨버터 변압기에서는 16% 그리고 VS1 컨버터 변압기에서는 17.5%이다.

2. 본론

2.1 ITER CCU/L 컨버터 변압기의 제작

본론에서는 최초로 제작 및 시험을 완료한 CCU/L 1 컨버터 변압기의 제작 및 시험 현황만을 기술한다. 그림 1은 CCU/L 1 컨버터 변압기의 제작과정의 사진들을 보여 준다. 변압기의 제작은 자재 입수를 시작으로 하여 MIP(Manufacturing and Inspection Plan)에 따라 제작 과정 중 필요 시점에 품질검사를 실시하며 진행한다. 주요 품질검사 항목으로는 자재 수입검사, 용접 및 페인팅(또는/그리고 코팅)검사, 육안검사 그리고 절연 시험, 상순서 및 위상확인, 1차/2차 권선비, 1차/2차 권선저항 값 확인 등을 포함하는 전기시험 등이 있다. 제작이 완료되면 FAT(Factory Acceptance Test)를 실시하여 제작품의 공장 최종 품질시험을 실시한다. FAT는 단락시험을 제외한 시험항목의 시험을 (주)효성 공장 내에서 실시하고, 단락시험은 전기연구원 단락시험동으로 컨버터 변압기를 운반하여 실시한 후 시험 성적서를 발급 받는다.

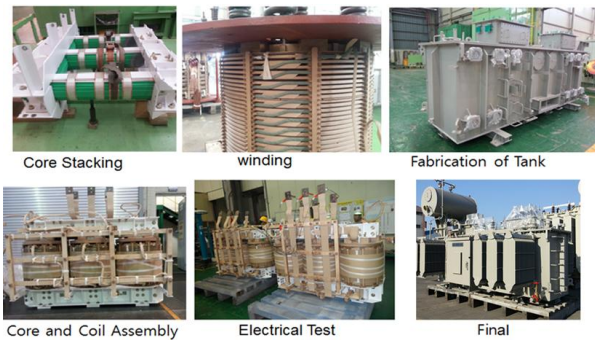


그림 1 CCU/L-1 컨버터 변압기의 제작
Fig. 1 Manufacturing of the CCU/L-1 converter transformer

2.2 ITER CCU/L 컨버터 변압기의 시험

그림 2는 ITER CCU/L 1 컨버터 변압기의 단락전류시험을 실시하고 있는 한국전기연구원 창원 시험동의 전경을 보여 준다.



그림 2 CCU/L-1 컨버터 변압기의 42 kApeak 단락전류시험
Fig. 2 Short-circuit withstand test at 42 kApeak for ITER CCU/L-1 ac/dc converter transformer

그림 3은 ITER CCU/L 1 컨버터 변압기의 단락전류시험을 위한 시험회로도이며, 단락전류시험은 각 상별로 3회씩 실시하여 3상에 대하여 총 9회의 시험을 실시한다.

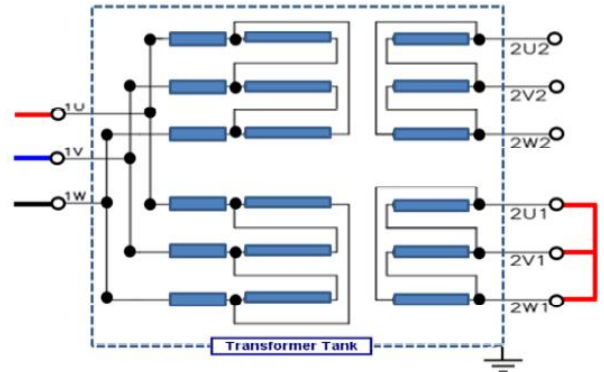


그림 3 CCU/L-1 컨버터 변압기의 단락전류시험 회로도
Fig. 3 CCU/L-1 converter transformer test circuit for Short-circuit withstand test

변압기에 대한 단락전류시험을 실시한 후에는 시험 전/후의 기구적 변형을 확인하기 위해 변압기 본체를 들어내어 육안 및 치수검사를 실시한다. 또한, 뇌임펄스시험, 단시간 교류 내전압 시험, Sweep Frequency Response Test 등을 포함하는 14개 항목의 단락전류시험 후 FAT를 실시한다. ITER CCU/L 1 컨버터 변압기 및 CCS 1 변압기에 대한 단락전류시험 전/후 FAT 시험항목들의 시험을 실시한 결과 모두 양호한 시험결과를 유지함을 확인하였다. VS1 1 컨버터 변압기에 대해서는 현재까지 단락전류시험 전 FAT만을 실시한 상태이며 금년(2015년) 후반기에 ac busbar의 제작을 완료한 후 변압기와 ac busbar을 결합한 단락전류시험을 실시하고, 단락전류시험 후 FAT를 진행할 예정이다.

3. 결론

ITER 초전도자석 전원장치용 변압기 중 CCU/L 1, CCS 1, VS1 1 등 1차 조달분의 컨버터 변압기 각 1대씩의 제작을 완료하였으며, 이들 중 CCU/L 1 및 CCS 1 컨버터 변압기는 단락전류시험을 포함하는 FAT를 마친 결과 모든 시험항목에서 양호한 시험결과를 확인하였다. 2015년도 후반기에는 VS1 1 컨버터 변압기의 FAT를 완료할 예정이며, 이어서 나머지 1차 조달분 컨버터 변압기와 2차 조달분에 해당하는 CS 및 TF 컨버터 변압기의 제작 및 시험을 진행할 예정이다. 모든 ITER 컨버터 변압기들은 2017년 말까지 2회에 걸쳐 프랑스 남부에 위치한 ITER 현장으로 운송되며, 현장설치 및 SAT(Site Acceptance Test)를 거쳐 ITER 운영진에 인계될 예정이다.

이 논문은 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 국책연구사업(No.2007 2006995)의 연구결과임

참고 문헌

- [1] ITER CC 변압기의 기술사양 문서 및 FAT 절차서
- [2] ITER VS1 변압기의 기술사양 문서 및 FAT 절차서