

국제 핵융합실험로 TF(Toroidal Field) 컨버터 제어

조현식, 차한주
충남대학교

TF(Toroidal Field) Converter Control for International Thermonuclear Experimental Reactor

Hyunsik Jo, Hanju Cha
Chungnam National University

ABSTRACT

본 논문에서는 국제 핵융합실험로용 TF 컨버터의 전류제어에 대하여 서술하였다. TF 컨버터는 도넛형 진공용기 내부에 직류 자기장을 발생시켜 플라즈마를 진공용기 내에 가두어 주는 18개의 TF 코일에 전류를 공급한다. 68kA의 직류전류를 17H의 초전도 코일에 공급하기 위해 TF 컨버터는 666V의 계통전원으로 급속 충전·방전의 동작과 333V의 계통전원으로 완속 충전·방전의 동작을 수행한다. 이러한 전류제어 프로파일을 만족하는 TF 컨버터의 전류제어기를 설계하였고, 이를 실제 제어기와 RTDS를 연동하는 HIL 시스템을 구축하여 검증하였다.

1. 서론

국제 핵융합 실험로(ITER)는 자기장 밀폐형 토카막(Tokamak) 실험장치로써 도넛형 진공용기 주변에 배치된 48개의 초전도자석(코일)들에 적절한 제어전류를 흘려 플라즈마 전류, 온도 및 형상을 안정적으로 제어하여 핵융합실험을 수행한다. 진공용기 내부에 직류 자기장을 발생시켜 플라즈마를 진공용기 내에 가두어 주는 18개의 TF(Toroidal Field) 코일, 초기 플라즈마를 발생시키고 플라즈마 전류와 형상 그리고 위치를 제어해 주는 6개의 CS(Central Solenoid) 코일과 6개의 PF(Poloidal Field) 코일 그리고 진공용기 내에 형성된 자기장의 오차를 보정해 주기 위해 진공용기의 상, 하 및 주변에 배치되는 18개의 CC(Correction Coil) 등으로 구성되어 있으며, ITER 토카막의 단면도를 그림 1에 나타내었다. 토카막 장치에서 발생된 고온의 플라즈마를 초전도 코일들로 제어하기 위해서는 강력한 자장을 형성해주기 위한 다양한 초전도코일 전류 공급장치가 사용된다^[1].

토카막 운전 시나리오에 따라 300~3000초로 펄스 운전되고 4상한 정·역 운전을 하는 다른 컨버터들과 달리^[2] TF 컨버터는 68kA의 직류전류를 17H의 초전도 코일에 공급하기 위해 666V의 계통전원으로 급속 충전·방전의 동작과 333V의 계통전원으로 완속 충전·방전의 동작을 수행하여야 한다.

TF컨버터의 전제동작을 검증하기 위해서는 최소 약 3시간의 시간이 필요하다. 일반적인 디지털 시뮬레이션의 경우는 이러한 장시간의 동작을 검증할 수 없기 때문에 본 논문에서는 실제 제어기와 RTDS를 연동하는 HIL(Hardware In the Loop) 시스템을 구성하여 실시간 시뮬레이션을 통해 제안된 TF 컨버

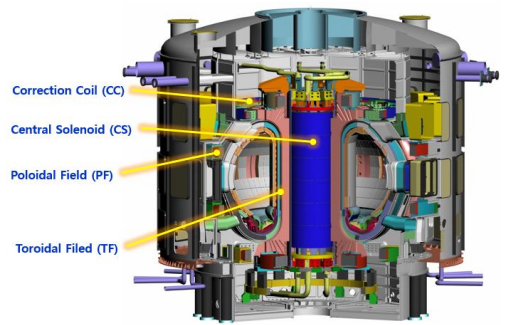


그림 1 ITER 토카막 단면도

Fig. 1 ITER tokamak cross-sectional drawing of the current control system.

2. ITER TF 컨버터

2.1 ITER TF 컨버터의 구조

그림 2는 ITER TF 컨버터의 구조를 나타내며 300MVA의 주 변압기, Y-Y, Y- Δ 변압기로 이루어지는 탭 변환기, 2개의 정방향 6 펄스 사이리스터 브릿지, 정방향 바이패스 스위치와 부하로 구성된다. 400kV의 계통전압이 주 변압기를 통해 66kV로 강압되고, 66kV의 전압이 12펄스 동작과 급속 충전·방전, 완속 충전·방전을 위한 탭 변환기를 거쳐 각각 666V와 333V로 변환된다. 6 펄스 사이리스터 브릿지는 전류제어에 따른 전압을 생성하여 부하에 공급하며, 바이패스 스위치는 탭 변환 동작을 할 때 초전도 코일의 전력이 계통으로 유입되지 않게 한다. 표 1은 TF 컨버터의 파라미터를 나타내며, 변압기의 누설 인덕턴스를 포함하는 L_s 는 8.236uH이고, 브릿지의 단락사고 발생 시 전류가 급격히 상승하지 않도록 제한하는 DCL은 115uH이다.

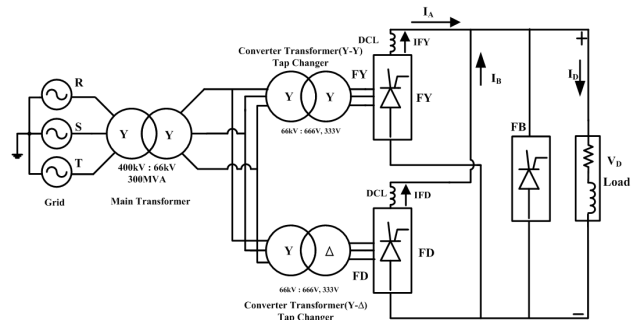


그림 2 ITER TF 컨버터의 구조

Fig. 2 Configuration of ITER TF converter

TABLE I
TF CONVERTER PARAMETERS

Parameter	Value
Grid(L L)	400kV
Frequency	50Hz
Main transformer(Y Y)	Primary:400kV Secondary:66kV
Converter transformer(Y Y)	Primary:66kV Secondary:666V, 333V
Converter transformer(Y Δ)	Primary:66kV Secondary:666V, 333V
Load	500uΩ, 17H
Maximum current(I _{max})	68kA
DC reactor of bridge	115uH
Commutation inductance(L _s)	8236uH

2.2 ITER TF 컨버터의 전류 제어

그림 3은 급속 충전·방전, 완속 충전·방전 그리고 전류 유지모드를 나타내는 TF컨버터의 전압·전류 프로파일을 나타낸다. 급속 충전·방전에서는 666V를 완속 충전·방전과 전류 유지모드에서는 333V의 계통전압을 사용한다. TF 컨버터의 전류제어기의 구조를 그림 4에 나타내었으며, 부하전류 지령치(I_{ref})와 피드백 되고 있는 부하전류(I_D)의 오차를 0으로 만드는 PI 제어기와 FY, FD 싸이리스터 브릿지의 출력전류(I_A, I_B)의 차이를 0으로 만드는 차전류 제어기로 구성된다.

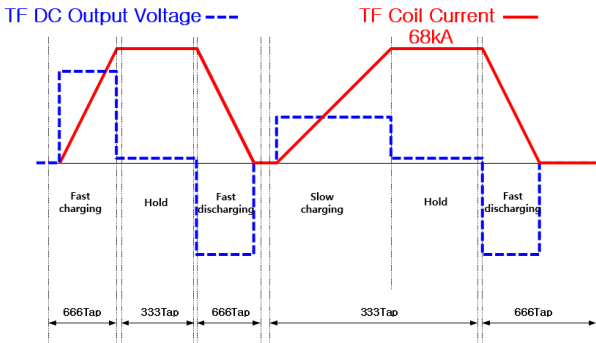


그림 3 ITER TF 컨버터의 전압 전류 프로파일
Fig. 3 Voltage current profile of ITER TF converter

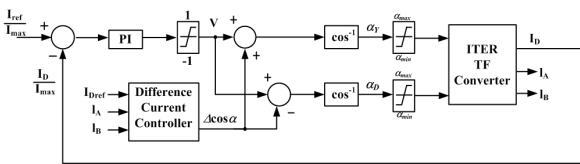


그림 4 ITER TF 컨버터의 전류제어기
Fig. 4 Current controller of ITER TF converter

2.3 실험결과

TF 컨버터의 제어기의 검증용 위하여 실제 하드웨어 제어기와 RTDS(Real Time Digital Simulator)를 연동하여 실험하였다. 그림 5는 RTDS의 RSCAD를 이용하여 Draft로 표현한 TF 컨버터를 나타내며, 그림 6과 7은 3시간에 걸쳐 그림 3의 TF 컨버터 전압·전류 프로파일을 만족하는 실험결과 파형을 나타낸다. 급속·완속 충전·방전의 전류 지령치에 따라서 부하전류 I_D가 정상적으로 제어되며, 2개의 싸이리스터 브릿지 전류 IFY, IFD가 동일한 크기를 가지고 12 펄스로 동작하기 때문에 차전류 제어기가 정상적으로 설계되었음을 확인할 수 있다.

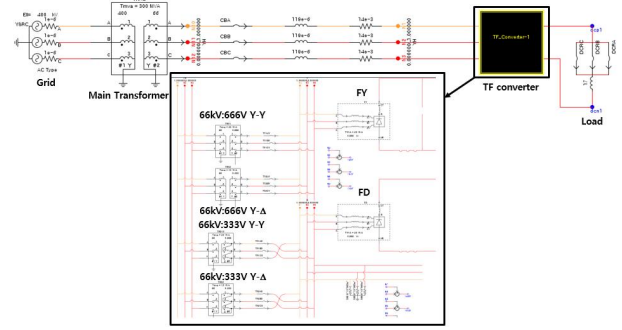


그림 5 ITER TF 컨버터의 RSCAD draft
Fig. 5 RSCAD draft of ITER TF converter

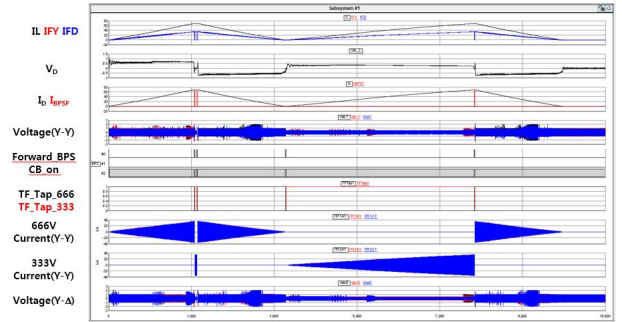


그림 6 RTDS 출력 파형
Fig. 6 Output waveforms of RTDS

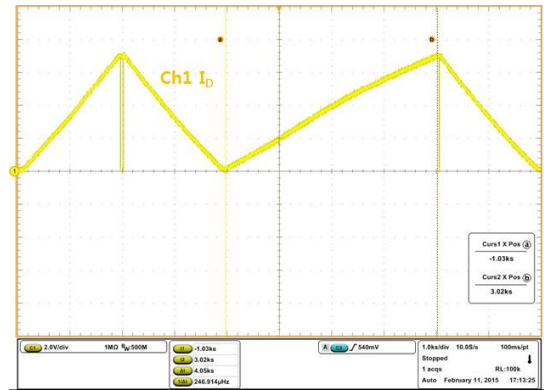


그림 7 TF 컨버터 부하전류
Fig. 7 Load current of TF converter

3. 결론

본 논문에서는 국제 핵융합실험로용 TF 컨버터의 전류제어에 대하여 서술하였다. TF 컨버터는 68kA의 직류전류를 17H의 초전도 코일에 공급하기 위해 변압기 탭 변환기를 통해 666V의 계통전원으로 급속 충전·방전의 동작과 333V의 계통전원으로 완속 충전·방전의 동작을 수행한다. 이러한 전류제어 프로파일을 만족하는 TF 컨버터의 전류제어기를 설계하였고, 이를 실제 제어기와 RTDS를 연동하는 HIL 시스템을 구축하여 검증하였다.

참고 문헌

- [1] 최정완 “ITER 초전도자석 전원계통”, 전력전자학회지, 제17권 제4호, pp.33-38, 2012.08.
- [2] 조현식, 조종민, 오중석, 서재학, 차한주 “국제 핵융합실험로용 VS(Vertical Stabilization) 컨버터의 운전모드 및 보호동작”, 전력전자학회 논문지, 제20권 제2호, pp.130-136, 2015.04.