

국제 핵융합실험로 4상한 컨버터의 고장시 바이패스 운전전략

조현식, 신규범, 오종석*, 차한주
 충남대학교, 국가핵융합연구소*

Bypass Operation Strategy of ITER 4-quadrant Converter under Fault Condition

Hyunsik Jo, Gyubeom Shin, Jong Seok Oh*, Hanju Cha
 Chungnam National University, National Fusion Research Institute*

ABSTRACT

본 논문에서는 국제 핵융합실험로 4상한 컨버터의 고장시 바이패스 운전전략에 대하여 서술하였다. ITER 4상한 컨버터들은 토카막 장치에서 발생하는 고온의 플라즈마를 제어하기 위해 강력한 자장을 형성한다. 그 외에도 컨버터 보호를 위하여 과전류, 과전압등의 여러 가지 고장에 대하여 보호동작을 해야 한다. 보호동작 중 컨버터를 보호하기 위한 바이패스 동작에 대한 4가지 전략을 제안하였으며, 순환전류 구간에서 4가지 전략으로 바이패스 동작을 수행할 때의 결과를 실제 제어기와 RTDS를 연동하여 실험하여 각각의 장·단점을 비교하였다.

1. 서론

국제 핵융합 실험로(ITER)는 자기장 밀폐형 토카막(Tokamak) 실험장치로서 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 전원 공급장치가 사용된다^[1]. 각각의 전원공급장치들은 플라즈마를 제어하기 위해서 부하전류의 급격한 정역운전을 수행할 수 있어야 하며 이를 위해 순환전류구간을 포함하는 4상한 운전을 수행하게 된다.

전원공급장치들은 초전도 코일에 전압과 전류를 공급할 뿐 아니라 컨버터를 보호하기 위해서 과전류, 과전압, 전류실패나 계통의 단락 등의 다양한 고장에 대하여 적절하게 보호동작을 수행해야한다^[2]. 본 논문에서는 VS 컨버터에 대하여 순환전류 구간에서의 4가지 바이패스 전략에 대하여 서술하고 각각의 특징을 실제 제어기와 RTDS를 연동하는 HILS(Hardware In the Loop Simulation)를 통하여 확인하였다.

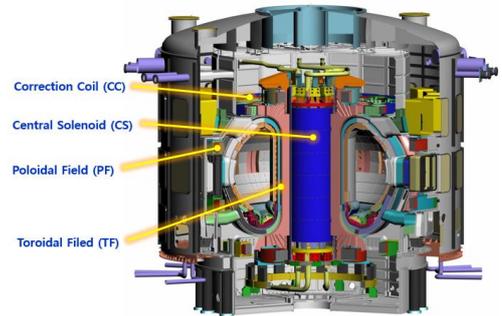


그림 1 ITER 토카막 단면도
 Fig. 1 ITER tokamak cross-sectional drawing

2. ITER 4상한 컨버터 바이패스 전략

2.1 ITER 4상한 컨버터 구조

그림 1은 12펄스 위상제어 정류기의 구성으로 이루어진 ITER VS 컨버터의 구조를 나타낸다. 주파수가 50Hz인 400kV 계통 전압이 주 변압기를 통하여 66kV로 변환되고, 이를 컨버터 변압기가 1037V로 강압한다. 고조파의 영향을 저감하기 위하여 Y-Y와 Y- Δ 결선의 변압기를 사용하며 순방향 6펄스 싸이리스터 밸브 FY, FD와 역방향 6펄스 싸이리스터 밸브 RY, RD가 각각 12펄스로 위상을 제어한다. 각 싸이리스터 밸브의 직류 리액터 DCL은 순환전류를 이용한 모드에 따른 컨버터의 안정적인 정역 전환 동작을 수행할 수 있게 하고 컨버터 출력에서 단락사고 발생 시 전류가 급격히 상승하지 않도록 제한해 준다.

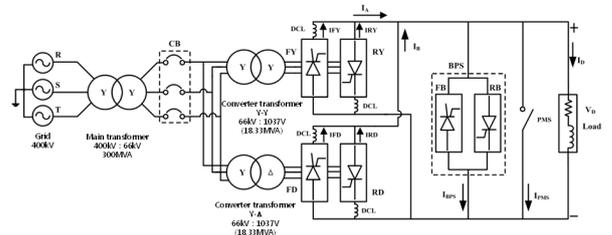


그림 2 ITER 4상한 컨버터의 구조
 Fig. 2 Configuration of ITER 4-quadrant converter

2.2 바이패스 운전전략

바이패스 동작은 과전압이나 과전류 등의 이상 현상이 생겼을 때 컨버터 외부의 스위치로 전류가 흐를 수 있는 경로를 생성하여 컨버터를 보호하는데 목적이 있다. 바이패스 스위치 또한 싸이리스터이기 때문에 부하전류의 극성에 따라서 순방향과 역방향 바이패스를 작동시켜야 하는지가 결정된다. 전류센서의 오차를 고려하면 정격의 약 5% 이상의 전류는 극성 편비가 가

능하기 때문에 바이패스 방향을 결정하는 것이 용이하다. 하지만 전류센서의 오차범위 이하의 부하전류 즉 순환전류모드에서의 부하전류 극성 판별이 어렵기 때문에 바이패스의 방향 선택 또한 어렵다. 따라서 본 논문에서는 바이패스 운전전략 4가지를 제안하고 순환전류 모드에서 장-단점을 비교한다. 4가지 방식 모두 바이패스 지령이 내려오면 정상적으로 바이패스 동작을 수행하고, 40ms 이후에 PMS(Protection Make Switch)를 턴온 한 뒤 60ms 후에 계통의 CB(Circuit Breaker)를 차단하는 방식이다.

- 1) 양방향 바이패스 스위치를 모두 트리거 하고 FY, RD 밸브에 130도를 100ms 인가
- 2) 순환전류 지령치로 바이패스 방향을 정하고 FY, RD 130도 인가한 뒤, 바이패스 스위치 트리거
- 3) 순환전류 소거(FY, RD 130도) 후 FY, RT 전류가 1% 미만인지 체크하고 양방향 바이패스 트리거
- 4) 순환전류 소거(FY, RD 130도) 후 터미널 전압을 확인 하여 극성에 맞는 바이패스 스위치 트리거

순환전류모드는 세부적으로 부하전압·전류의 극성에 따라서 그림 3과 같이 다시 4가지 모드로 구분할 수 있고, 이를 표현하면 표 1과 같다.

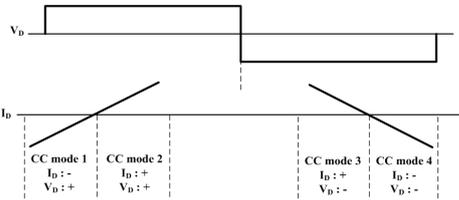


그림 3 순환전류모드 구분

Fig. 3 Separation of circulation current mode

표 1 순환전류모드에서 전압 전류극성

Table 1 Polarity of voltage and current in circulation current mode

	CC mode 1	CC mode 2	CC mode 3	CC mode 4
I_D	-	+	+	-
V_D	+	+	-	-

2.3 실험결과

제안된 순환전류 구간의 바이패스 전략들을 확인하기 위해 실제 제어기와 RTDS를 연동하여 HILS를 구축하여 실험하였다. 지면관계상 CC mode 1에 대해서만 4가지 바이패스 전략들에 대한 실험파형을 수록하였으며, 부하전류가 정격의 4%(900A)의 크기를 가질 때 바이패스 명령을 인가하였다. 표 1을 참고하면 CC mode 1에서는 부하전류의 극성이 음이기 때문에 역방향 바이패스 스위치가 턴 온 되어야 하며 FY 밸브가 턴 오프 되어야 바이패스 스위치가 트리거 되었을 때 단락전류가 발생하지 않는다. 전략 1은 바이패스 지령과 동시에 양방향 바이패스 스위치를 트리거하기 때문에 약 30kA의 단락전류가 발생할 수 있다. 전략 2는 순환전류 지령치에 따라서 바이패스의 방향을 결정하지만 제어가 비정상적으로 될 경우 바이패스

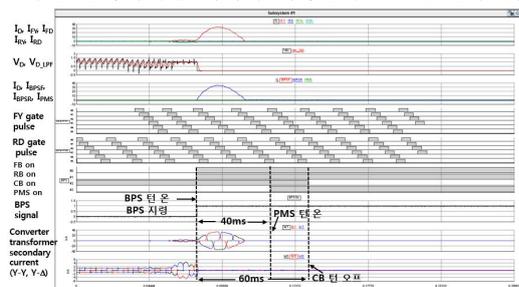


그림 4 CC mode 1에서의 바이패스 전략 1

Fig. 4 Bypass strategy 1 in CC mode 1

스 방향의 오류가 생길 수 있기 때문에 부하전류가 CT 오차를 보다 큰 경우에 적합함을 알 수 있다. 전략 3과 4는 전략 1에서의 단락전류를 방지하기 위해서 FY, RD 밸브에 130도를 인가해 준 뒤 양방향 바이패스 스위치를 트리거 하거나, 부하전압을 확인한 뒤 바이패스 방향을 결정하므로 CT 오차를 미반인 순환전류 구간에서도 정상적으로 바이패스를 수행하기 적합하다.

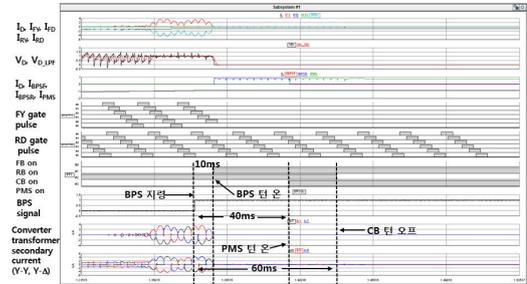


그림 5 CC mode 1에서의 바이패스 전략 2

Fig. 5 Bypass strategy 2 in CC mode 1

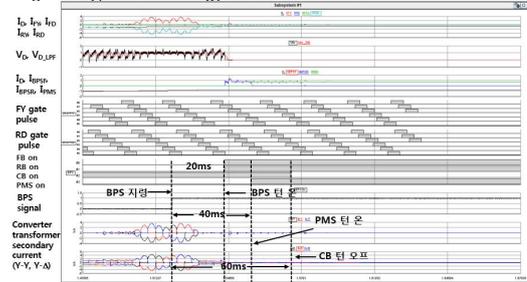


그림 6 CC mode 1에서의 바이패스 전략 3

Fig. 6 Bypass strategy 3 in CC mode 1

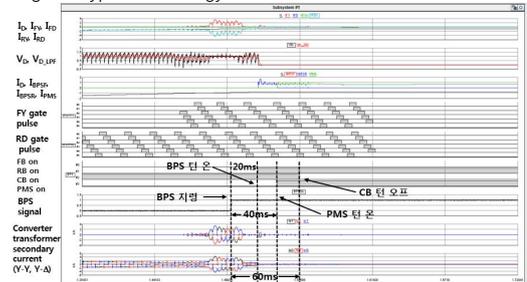


그림 7 CC mode 1에서의 바이패스 전략 4

Fig. 7 Bypass strategy 4 in CC mode 1

3. 결론

본 논문에서는 국제 핵융합실험로 4상한 컨버터의 고장시 바이패스 운전전략에 대하여 서술하였다. ITER 4상한 컨버터들은 토카막 장치에서 발생하는 고온의 플라즈마를 제어하기 위해 강력한 자장을 형성하는 것 외에도 컨버터 보호를 위하여 과전류, 과전압등의 고장에 대하여 보호동작을 해야 한다. 보호동작 중 컨버터를 보호하기 위한 바이패스 동작에 대한 4가지 전략을 제안하였으며, 순환전류 구간에서 4가지 전략으로 바이패스 동작을 수행할 때의 결과를 실제 제어기와 RTDS를 연동하여 실험하여 각각의 장-단점을 비교하였다.

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

참고 문헌

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