

# 국제 핵융합실험로용 VS(Vertical Stabilization) 컨버터의 운전모드 및 보호동작

조현식<sup>1</sup>, 조종민<sup>1</sup>, 오종석<sup>2</sup>, 서재학<sup>2</sup>, 차한주<sup>†</sup>

## Operation modes and Protection of VS(Vertical Stabilization) Converter for International Thermonuclear Experimental Reactor

Hyunsik Jo<sup>1</sup>, Jongmin Jo<sup>1</sup>, Jong-Seok Oh<sup>2</sup>, Jae-Hak Suh<sup>2</sup>, and Hanju Cha<sup>†</sup>

### Abstract

This study describes the structure and operation modes of vertical stabilization (VS) converter for international thermonuclear experimental reactor (ITER) and proposes a protection method. ITER VS converter supplies voltage ( $\pm 1000$  V)/current ( $\pm 22.5$  kA) to superconducting magnets for plasma current vertical stabilization. A four-quadrant operation must be achieved without zero-current discontinuous section. The operation mode of the VS converter is separated in 12-pulse mode, 6-pulse mode and circulation current mode according to the magnitude of the load current. Protection measures, such as bypass and discharge, are proposed for abnormal conditions, such as over current, over voltage, short circuit, and voltage sag. VS converter output voltage is controlled to satisfy voltage response time within 20 msec. Bypass operation is completed within 60 msec and discharge operation is performed successfully. The feasibility of the proposed control algorithm and protection measure is verified by assembling a real controller and implementing a power system including the VS converter in RTDS for a hardware-in-loop (HIL) facility.

**Key words:** ITER VS converter, Voltage control, Protection measure, RTDS

### 1. 서 론

화학 연료의 고갈과 환경오염, 지구온난화에 대한 경각심이 대두되면서 친환경 에너지의 연구 개발이 지속적으로 진행되고 있다. 에너지 문제를 해결하기 위한 해결책으로 깨끗하고 안전한 핵융합 발전이 차세대 에너지원으로 주목받고 있다. 핵융합은 원자와 원자가 만나서 새로운 핵을 만들어 내는 반응으로 질량결손의 개념이 적용되며, 이런 원리를 이용한 국제 핵융합실험로(ITER : International Thermonuclear Experimental Reactor)는 물의 성분인 중수소와 삼중수소를 연료로 하

며 결합을 위해 1억도 이상의 고온으로 가열하면, 수소 원자는 기체 상태보다 밀도가 낮은 플라즈마 형태로 변한다. 이러한 플라즈마의 제어로 인해 발생하는 에너지를 이용한 핵융합은 폐기물이 없는 무한한 에너지원이라고 말할 수 있다. 토카막 장치에서 발생한 고온의 플라즈마를 제어하기 위해서는 강력한 자장을 형성해주기 위한 다양한 대용량 전원장치가 사용되는데<sup>[1]~[3]</sup> 그중에서 플라즈마의 수직 안정성을 제어하기 위한 VS(Vertical Stabilization)컨버터는 12펄스 위상 제어 정류기로 이루어져있다<sup>[4]</sup>. 각각의 전원장치들은 플라즈마를 제어하기 위해서 부하 전류의 급격한 정역운전을 수행할 수 있어야 한다. 하지만 스위칭 소자로 싸이리스터를 사용하기 때문에 정역 운전모드 변환과정에서 컨버터의 안전운전을 위해서 데드타임 구간을 필요로 하며, 이 과정에서 유도성 부하에 영전류 불연속 구간이 발생하는 단점이 있으며, 이를 보완하기 위하여 순환전류구간을 포함하는 4상한 운전이 수행되어야 한다. 순환전류구간을 포함한 VS 컨버터의 동작 알고리즘은 기존에 많은 연구가 이루어져 왔다. 순환전류를 이용하여 안정

Paper number: TKPE-2015-20-2-4

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

<sup>†</sup> Corresponding author: hjcha@cnu.ac.kr, Dept. of Electrical Eng., Chungnam National University  
Tel: +82-42-821-7006 Fax: +82-42-821-8895

<sup>1</sup> Dept. of Electrical Eng., Chungnam National University

<sup>2</sup> NFRI(National Fusion Research Institute)

Manuscript received Sep. 29, 2014; accepted Feb. 11, 2015

— 본 논문은 2014년 전력전자학술대회 우수추천논문임

적인 부하전류의 정·역 변환을 수행하는 부하 전류제어 알고리즘이 연구되었고<sup>[5]</sup>, 전류지령치에 따라서 전류를 추종하는 VS 컨버터의 4상한 부하 전류제어 알고리즘을 small-scaled 모델을 통하여 실험이 되었으며<sup>[6]</sup>, 부하 전류의 크기에 따라서 각 동작모드를 정의하고 4상한 운전을 수행하는 전압제어 알고리즘이 PSIM으로 시뮬레이션 되었다<sup>[7]</sup>.

ITER VS 컨버터는 플라즈마의 수직 안정성을 제어하기 위하여 정상적으로 전압과 전류를 초전도 코일에 공급을 해주어야 하지만, 컨버터 보호를 위해서 과전류, 과전압, 전류실패나 계통의 단락 세그 등 여러 가지 고장에 대하여 적절하게 보호동작을 해야 한다. 이러한 보호동작은 불필요하거나 원하지 않는 트립에 대한 안전 보장, 실제 고장에서의 신뢰성, 최소 시스템을 분리하는 선택성이라는 기존 송전 시스템의 고장조치의 목적과 같은 맥락이다<sup>[8]</sup>. ITER의 대용량 전원장치 중 PF(Poloidal Field) 컨버터에 대하여 고장조치에 관한 연구가 있었으며<sup>[9]</sup>, 이는 컨버터를 보호하기 위하여 게이트 펄스를 차단하고 계통의 차단기를 오픈하는 방법이 연구되었다. 본 논문에서는 ITER VS 컨버터의 정상동작 상태에 대한 운전모드와 비정상 동작 상태의 보호동작에 대한 알고리즘을 제안하였고, 2장에서 VS 컨버터의 구조 및 동작 원리 그리고 부하전류의 크기에 따라서 순환전류제어를 포함하는 VS 컨버터의 동작모드를 구분한 4상한 운전을 설명한다. 아울러, 보호동작의 목적을 만족하면서 ITER VS 컨버터를 보호하기 위한 각각의 운전모드에 대한 바이패스 동작과 VS 컨버터를 운전정지 시킬 때의 방전동작을 3장에서 제안하였으며 2장과 3장에서 설명하고 제안한 알고리즘들을 실제 제어기와 RTDS를 연동하는 HIL(Hardware-In-Loop) 시스템을 구축하고 실험하여 검증하였다.

## 2. VS 컨버터의 구조 및 동작모드

그림 1은 12펄스 위상제어 정류기의 구성으로 이루어진 ITER VS 컨버터의 구조를 나타낸다. 주파수가 50Hz 인 400kV 계통전압이 주 변압기를 통하여 66kV로 변환되고, 이를 컨버터 변압기가 1037V로 강압한다. 고조파의 영향을 저감하기 위하여 Y-Y와 Y- $\Delta$ 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. 초전도 코일에 공급되는 출력전압  $V_D$ 는 3상 AC 전원 측 내부와 배선상의 인덕턴스로 이루어지는  $L_S$ 에 의한 영향을 받을 수 있으며 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 전압  $V_{LL}$ 은 AC 전원 선간전압

의 실효값을 의미하고, 전원측 인덕턴스  $L_S$ 에 의한 출력 전압강하분이 포함되어 있음을 확인할 수 있다. 부하전류  $I_D$ 는 각각의 밸브 출력전류인 IFY, IRY, IFD, IRD의 합과 같으며 변압기 Y측에 연결되어 있는 밸브의 전류합은  $I_A$ 로, 변압기  $\Delta$ 측에 연결되어 있는 밸브의 전류합은  $I_B$ 로 나타낸다. 3장에서 자세한 내용이 기술되는 보호동작을 위하여 순방향 바이패스 스위치와 역방향 바이패스로 이루어진 BPS와 PMS가 부하단에 위치하며,  $I_{BPS}$ 와  $I_{PMS}$ 는 각각 BPS 전류 PMS 전류를 나타낸다. 표 1은 VS 컨버터의 파라미터들을 나타내며 단일 VS 컨버터의 출력전압의 범위는  $\pm 1000V$ 이고, 최대전류의 값은 22.5kA이다. VS 컨버터는 토카막 장치에서 발생하는 플라즈마의 수직 안정성을 제어하기 위하여 전압 지령치를 정상적으로 추종할 수 있어야 하며, 이때 양의 최대 전압 1000V에서 음의 최대전압 -1000V의 응답성은 20ms를 만족하여야 하고, 부하전류의 크기에 따라서 각 6펄스 싸이리스터 밸브들의 동작을 구분하여 동작한다. VS 컨버터는 부하 전류의 크기에 따라서 12펄스모드, 6펄스모드, 순환전류모드로 구분되어지는데 이러한 모드를 확인하기 위하여 전압 지령치를 일정주기를 가지는 구형파로 입력을 해주게 되면 앞서 구분되어진 모드에 대한 정상적인 VS 컨버터의 동작을 확인할 수 있다. 이러한 VS 컨버터의 운전모드를 그림 2에 나타내었으며, 모드 5에서는 순방향 밸브 FY와 FD가 12펄스로 양의 전류를 부하에 공급하는 동작을 하며, 모드 -5에서는 역방향 밸브 RY와 RD가 12펄스로 음의 전류를 부하에 공급하는 동작을 한다. 모드 3에서는 순방향 밸브 FY가 6펄스로 양의 전류를 부하에 공급하는 동작을 하며, 모드 -3에서는 역방향 밸브 RD가 6펄스로 음의 전류를 부하에 공급하는 동작을 한다. 모드 1과 -1은 순환전류 모드를 나타내며 순방향 밸브 FY와 역방향 밸브 RD가 12펄스로 순환전류모드를 수행하며 부하전류의 안정적인 정역 전환 동작을 수행한다. VS 컨버터가 12펄스로 동작하는 +5, -5 모드에서는 변압기 Y측과  $\Delta$ 측의 임피던스 차이에 의하여 전류  $I_A$ 와  $I_B$ 의 차이가 발생할 수 있기 때문에 차전류 제어가 동작하여 변압기 Y측과 변압기  $\Delta$ 측의 전류의 값이 같아지도록 한다. 순환전류 모드인 +1, -1 모드에서는 순환전류 제어가 동작하여 초전도 코일의 전류가 극성이 바뀔 때에도 플라즈마는 연속적이고 빠르게 제어가 될 수 있도록 한다.

식(1)로부터 출력전압  $V_D$ 가 기준전압  $V_{cmd}$ 를 충족시키기 위한 순방향 점호각  $\alpha_1$ 를 유도하면 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$V_D = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} \cos\alpha - \frac{3}{\pi} \omega L_S I_D \quad (1)$$

$$\alpha_1 = \cos^{-1} \left\{ \left( V_{cmd} + \frac{3}{\pi} \omega L_S I_D \right) \cdot \left( \frac{\pi}{3\sqrt{2} V_{LL}} \right) \right\} \quad (2)$$

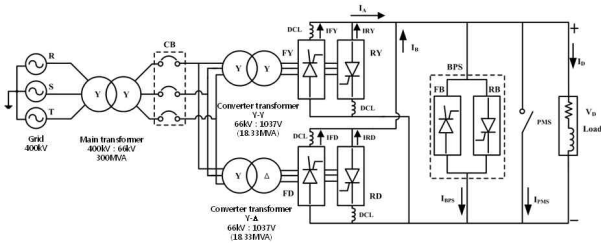


Fig. 1. Configuration of ITER VS converter.

TABLE I  
VS CONVERTER PARAMETERS

| Parameter                               | Value  |
|---|--|
| Grid(L-L)                               | 400kV  |
| Main transformer(Y-Y)                   | Capacity : 300MVA<br>Primary : 400kV<br>Secondary : 66kV   |
| Converter transformer (Y-Y, Y-Δ)        | Capacity : 18.33MVA<br>Primary : 66kV<br>Secondary : 1037V |
| Converter DC reactor(DCL)               | 150μH  |
| Maximum current(I <sub>max</sub> )      | 22.5kA   |
| Commutation inductance(L <sub>s</sub> ) | 32.7μH   |
| Control Period                          | 200μsec  |
| Voltage reference(V <sub>cmd</sub> )    | ±1000V   |
| Load                                    | 0.001Ω, 200mH  |
| Frequency(f)                            | 50Hz   |

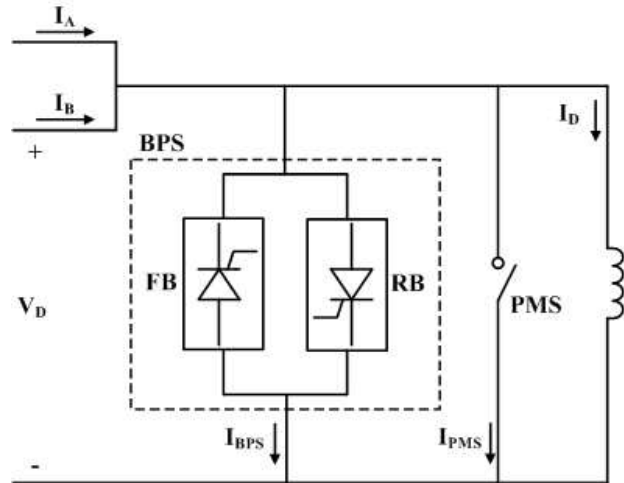


Fig. 3. Configuration of VS converter BPS(Bypass Switch) and PMS(Protection Make Switch).

### 3. ITER VS 컨버터의 보호동작

ITER VS 컨버터는 플라즈마의 수직 안정성을 제어 하기 위하여 정상적으로 전압과 전류를 초전도 코일에 공급을 해주어야 하지만 과전류, 과전압, 단락사고 등 여러 가지 고장에 대하여 적절하게 보호동작을 해야 한다. 본 논문에서는 VS 컨버터의 보호동작에 관하여 바이패스 동작과 방전동작을 제안하였으며, 그림 3은 VS 컨버터의 부하단의 바이패스 스위치 BPS(Bypass Switch)와 PMS(Protection Make Switch) 스위치를 나타낸다.

#### 3.1 ITER VS 컨버터의 바이패스 동작

그림 4는 ITER VS 컨버터의 바이패스 동작의 플로우차트를 나타낸다. 바이패스 동작은 과전압이나 과전류 등 이상 현상이 생겼을 때 컨버터 외부의 스위치로 전류가 흐를 수 있는 경로를 생성하여 컨버터를 보호하는데 목적이 있다. 이러한 동작은 바이패스 명령이 입력되면 순방향과 역방향 바이패스 스위치인 FB, RB는 2초간 턴 온 되며 PMS 스위치를 40ms 후에 턴 온 하고 계통의 CB를 60ms 후에 차단하는 방식으로 이루어진다. 바이패스 명령이 입력되면 부하전류의 극성이 양인지 음인지를 검사를 하고 VS 컨버터가 어떠한 모드로 동작하고 있는지를 판단한다. 이 때, 양의 12펄스인 +5 모드로 동작을 하고 있다면 부하전류의 크기를 줄이기 위하여 FY, FD 밸브의 점호각을 110도로 바꾸어 인버팅 동작을 하게 한 뒤에 게이트 시그널을 오픈한다. 바이패스 스위치 또한 싸이리스터이기 때문에 부하전류가 양의 극성을 가지고 있다면 순방향 바이패스 스위치인 FB가 동작하여 부하전류가 흐를 수 있도록 해야 한다. 따라서 순방향 바이패스 스위치를 턴 온하기 위하여 출력전압 V<sub>D</sub>의 극성이 음인지를 판단하게 되며, 이때 출

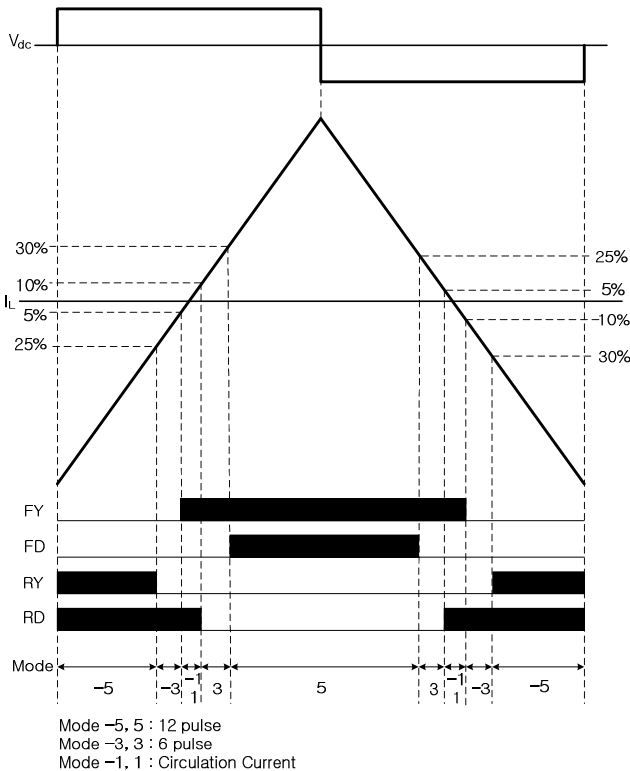


Fig. 2. Mode change according to load current.

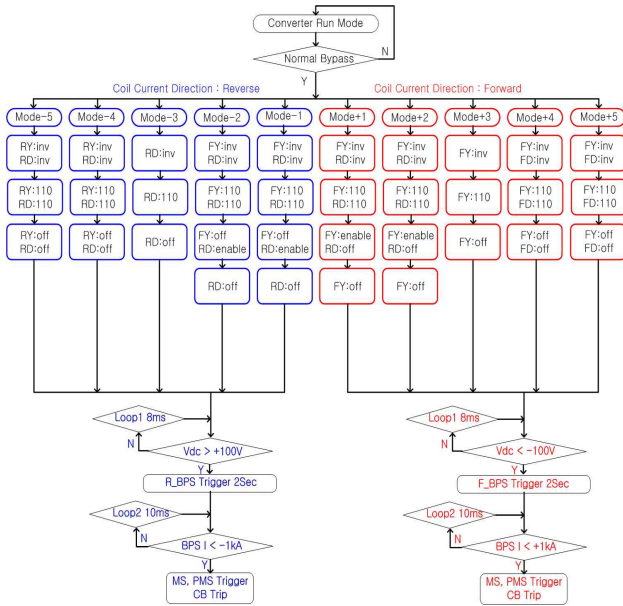


Fig. 4. Bypass operation flow chart.

력전압의 크기가  $V_{cmd}$ 의 10%가 될 때 순방향 바이패스 스위치를 2초간 턴 온한 뒤에 바이패스 전류인  $I_{BPS}$ 가 1kA 이하가 되면 PMS스위치를 턴 온하며, 66kV단의 스위치인 CB를 턴 오프한다. 양의 6펄스인 +3 모드에서는 FY밸브만 동작을 하고 있기 때문에 FY밸브의 점호각만 110도로 바꾸어 인버팅 동작을 하게 한 뒤에 양의 +5 모드와 같은 바이패스 동작을 수행한다. 음의 12펄스인 -5 모드로 동작을 하고 있다면 +5 모드와 마찬가지로 RY, RD 밸브의 점호각을 110도로 바꾸어 인버팅 동작을 하게 한 뒤에 게이트 시그널을 오프하고, 역방향 바이패스 스위치인 RB가 동작하여 부하전류가 흐를 수 있도록 해야 하기 때문에 역방향 바이패스 스위치를 턴 온하기 위하여 출력전압  $V_D$ 의 극성이 양인지를 판단하게 되며, 마찬가지로 출력전압의 크기가  $V_{cmd}$ 의 10%가 될 때 역방향 바이패스 스위치를 2초간 턴 온한 뒤에 바이패스 전류인  $I_{BPS}$ 가 1kA 이하가 되면 MS 스위치를 턴 온하며, 66kV단의 스위치인 CB를 턴 오프한다. 음의 6펄스인 -3 모드에서는 RD밸브만 동작을 하고 있기 때문에 RD밸브의 점호각만 110도로 바꾸어 인버팅 동작을 하게 한 뒤에 음의 12펄스 모드와 같은 바이패스 동작을 수행한다.

순환전류로 동작하는 +1, -1 모드에서는 같은 12펄스 동작이지만 순방향 밸브 FY와 역방향 밸브 RD가 동시에 동작을 하고 있기 때문에 부하전류의 극성이 양인 +1 모드에서는 역방향 밸브 RD를 먼저 턴 오프하고, 그 이후에 순방향 바이패스 과정을 진행하고, 부하전류의 극성이 음인 -1 모드에서는 순방향 밸브 FY를 먼저 턴 오프하고, 역방향 바이패스 과정을 진행한다. 이는 FY밸브나 RD밸브가 턴 오프되지 않고 바이패스 스위치가 턴 온 되었을 때 부하전류가 바이패스가 되지 않고 밸브로 흘러들어가 VS 컨버터의 소손을 일으키는 것을

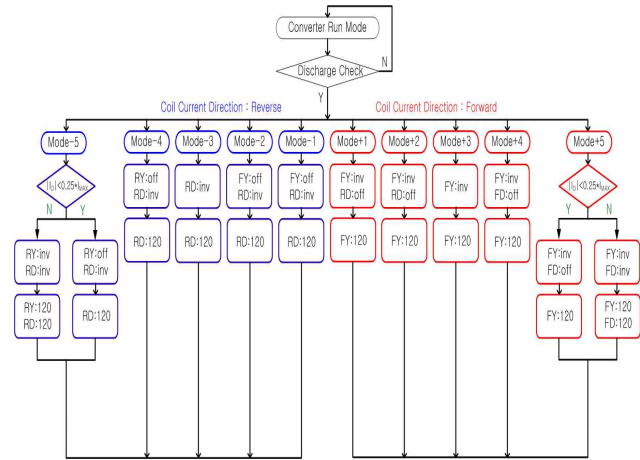


Fig. 5. Discharge operation flow chart.

방지하기 위한 동작이다.

### 3.2 ITER VS 컨버터의 방전동작

그림 5는 ITER VS 컨버터의 방전동작에 대한 플로 우차트를 나타낸다. VS 컨버터의 방전동작은 플라즈마의 운전을 정지할 경우에 부하코일에 충전되어 있는 에너지를 계통으로 방전시키기 위한 동작이다. 이는 VS 컨버터가 정상으로 운전하고 있을 때 이루어지며, 다른 고장조치에 비해 우선순위가 떨어진다. 바이패스 동작과 마찬가지로 방전동작 명령이 내려오게 되면 부하전류의 극성과 어떠한 모드에서 동작하고 있는지를 먼저 판단하여 그에 맞는 방전동작을 수행한다. VS 컨버터가 양의 12펄스인 +5 모드에서 동작하고 있을 때에는 순방향 밸브인 FY, FD의 점호각을 120도로 바꾸어 인버팅 동작을 시작하고 부하전류의 크기가 양의 6펄스인 +3이 되기 위한 조건 즉, 최대전류  $I_{max}$ 의 25% 미만이 되면 FD 밸브를 턴 오프하고 FY밸브만 동작을 하여 방전동작을 계속 수행한다. VS 컨버터가 양의 6펄스인 +3 모드에서 동작하고 있을 때에는 순방향 밸브인 FY밸브의 점호각을 120도로 바꾸어 인버팅 동작으로써 방전동작을 수행한다. VS 컨버터가 음의 12펄스인 -5 모드에서 동작하고 있을 때에는 역방향 밸브인 RY, RD의 점호각을 120도로 바꾸어 인버팅 동작을 시작하고 부하전류의 크기가 음의 6펄스인 -3이 되기 위한 조건인 최대전류  $I_{max}$ 의 25% 미만이 되면 RY 밸브를 턴 오프하고 RD 밸브만 동작을 하여 방전동작을 계속 수행하게 되며 음의 6펄스인 -3 모드에서 동작하고 있을 때에는 역방향 밸브 RD의 점호각을 120도로 바꾸어 방전동작을 수행한다. 양의 순환전류 구간에서는 역방향 밸브인 RD를 먼저 턴 오프한 뒤에 순방향 밸브 FY의 점호각을 120도로 바꾸어 방전동작을 수행하며, 반대로 음의 순환전류 구간에서는 순방향 밸브인 FY를 턴 오프한 뒤에 역방향 밸브 RD의 점호각을 120도로 바꾸어 방전동작을 수행하게 된다. 부하전류가 양일 때와 음일 때 그에 해당하는 순방향 밸브와 역방향 밸브를 모드 턴 온 하여

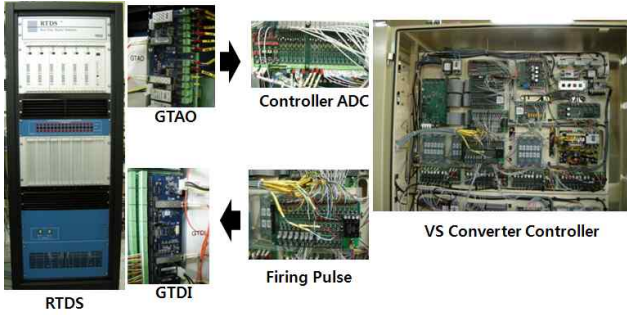


Fig. 6. Hardware connection between real VS converter controller and RTDS.

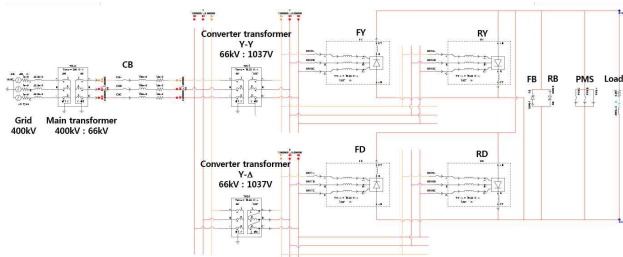


Fig. 7. VS converter draft.

방전동작을 수행하게 되면 계통으로 에너지를 방전하는 시간을 짧아지게 되지만, 방전동작을 하던 중에 다시 운전 명령이 내려오게 되면 그때의 부하전류의 조건에 따라서 각각의 모드로 바로 동작할 수 있도록 정상운전시의 동작 모드에 따라서 방전동작도 수행하도록 설계하였다.

#### 4. 실험 결과

2장과 3장에서 제안된 VS 컨버터의 동작모드와 보호 동작에 대한 타당성을 검증하기 위하여 실제 제어기와 RTDS(Real Time Digital Simulator)를 연동하여 실험하였다. 그림 6은 실제 VS 컨버터의 제어기와 RTDS와의 하드웨어 결선도를 나타내며, 그림 7은 RTDS의 RSCAD로 나타낸 VS 컨버터를 나타낸다. 일정한 주기를 가지고 크기가  $\pm 1000V$ 인 전압 지령치인  $V_{cmd}$ 를 VS 컨버터의 출력전압인  $V_D$ 가 정상적으로 추종하고 있는 상태에서 부하전류 크기에 따라 동작 모드가 구별되는 것을 그림 8에서 확인할 수 있고, 이때 RTDS에서 측정된 부하전류와 각 밸브의 전류 그리고 출력전압  $V_D$ 를 출력한 파형을 그림 9(a)에서 확인할 수 있으며, 전압지령치가 양의 최대값인  $+1000V$ 에서 음의 최대값인  $-1000V$ 로 바뀌었을 때의  $20ms$ 의 응답성을 만족하는 파형을 그림 9(b)에 나타내었다.

그림 10에 바이패스 동작에 관한 RTDS 실험파형을 나타내었고, 이때의 동작조건은 양의 12펄스인 +5모드이며 3.1절에서 제안한 바와 같이 바이패스 명령이 입력되면 순방향 밸브 FY와 FD의 점호각을 110도 바꾸고 계

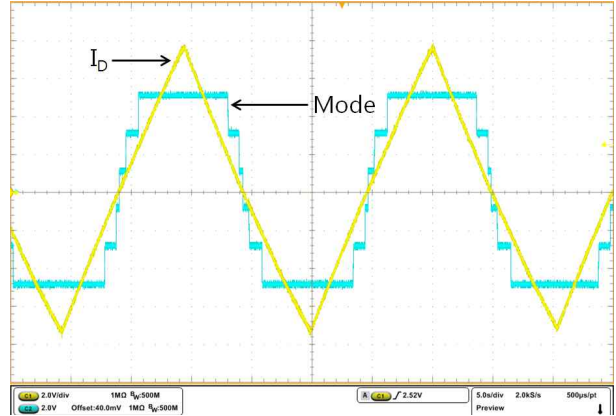
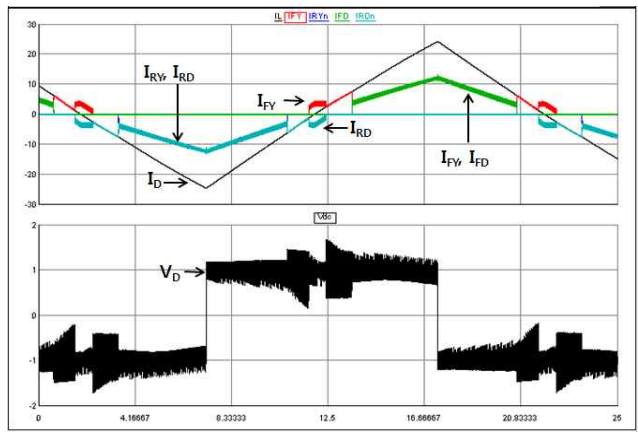
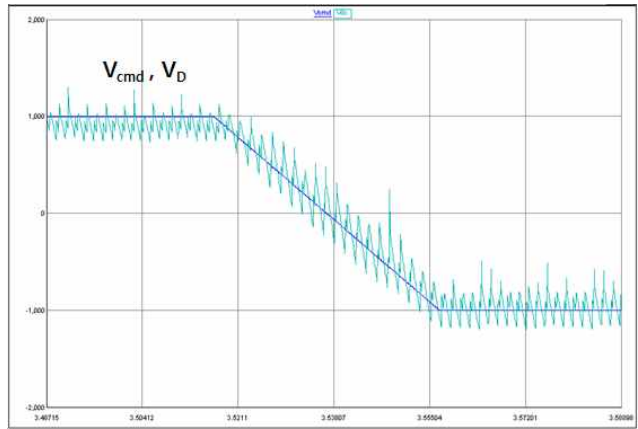


Fig. 8. Operation mode according to load current.



(a)  $I_D$ ,  $I_{FY}$ ,  $I_{FD}$ ,  $I_{RY}$ ,  $I_{RD}$  and  $V_D$



(b)  $V_{cmd}$  and  $V_D$

Fig. 9. VS converter voltage control(RTDS).

이트 펄스를 차단한다. 순방향 바이패스 스위치인 FB는 출력전압  $V_D$ 의 전압의 크기가  $V_{cmd}$ 의 10% 되었을 때 턴 온 되는 것을 FB 게이트 펄스를 통해 확인하였으며, 그와 동시에 부하전류가 순방향 바이패스 스위치인 FB에 흐르는 것을  $I_{FB}$ 를 통하여 확인할 수 있다. FB가 턴 온된 후 40ms가 지나면 PMS 스위치의 게이트 펄스가 인가되어 PMS 스위치가 턴 온 되고 이는 부하전류  $I_D$ 와  $I_{PMS}$ 를 통하여 확인할 수 있다. 바이패스 입력이 들



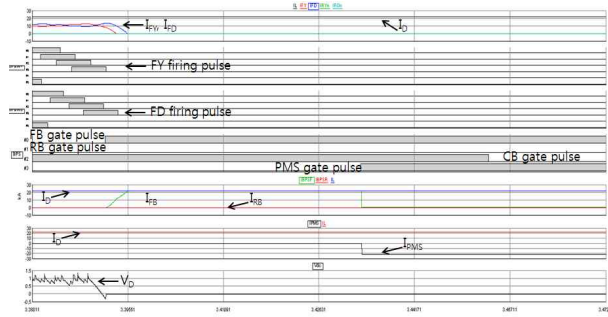


Fig. 10. VS converter bypass operation(RTDS).

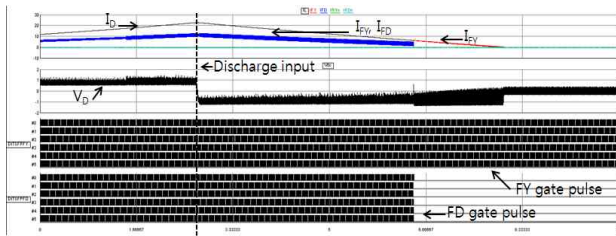


Fig. 11. VS converter discharge operation(RTDS).

어오고 60ms 후에 즉 PMS 스위치가 턴 온된 후로부터 20ms 후에 계통 CB의 게이트 펄스가 오프 되는 것을 확인할 수 있다.

바이패스 동작과 마찬가지로 양의 12펄스인 +5모드에서 방전명령이 입력되었을 때의 RTDS 파형을 그림 11에 나타내었다. 부하코일의 에너지를 방전시키기 위해서 순방향 밸브인 FY와 FD의 점호각을 120도로 바꾸고 부하전류를 감소시키다가 양의 6펄스인 +3모드의 조건이 되면 FD 밸브를 오프하여 방전동작을 지속하며, 부하전류의 방전을 전류파형과 출력전압  $V_D$ 의 파형을 통하여 확인할 수 있다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 ITER VS 컨버터의 구조, 동작모드, 바이패스와 방전의 보호동작에 대하여 제안하였다. VS 컨버터는 플라즈마의 수직 안정성을 제어하기 위하여 전압과 전류를 초전도 코일에 공급해야 하며 4상한 운전을 통하여 영전류 구간이 발생하지 않도록 해야 한다. 이를 위하여 부하전류의 크기에 따라서 순환전류 구간을 포함하는 동작모드를 구분한 알고리즘을 제안하였다. 이러한 정상동작 외에 발생할 수 있는 과전류, 과전압, 단락사고 등 여러 가지 고장에 대하여 적절한 보호동작을 위하여 바이패스와 방전동작을 제안하였다. 일정한 주기를 가지고 크기가  $\pm 1000V$ 를 갖는 구형파로 출력전압의 지령치를 입력하였을 때 부하전류의 크기에 따라서 각각 순환전류, 6펄스, 12펄스모드로 정상적으로 동작하며, 본 논문에서 제안한 바이패스동작이 60msec안에 이루어지고, 각각의 모드를 유지하면서 VS 컨버터의

방전이 이루어지는 것을 실제 제어기와 RTDS를 연동하여 실험하여 검증하였다.

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 국책연구사업 임(No. 2007 -2006995)

### References

- [1] J. W. Choi, "ITER superconducting magnet power supply system," *KIPE Magazine*, Vol. 17, No. 4, pp. 33-38, Aug. 2012.
- [2] C. Neumeyer, I. Benfatto, J. Hourtoule, J. Tao, A. Mankani, F. Milani, S. Nair, I. Suh, H. Tan, M. Wang, J. S. Oh, and A. Roshal, "ITER power supply innovations and advances," *Fusion Engineering(SOFE)*, 2013 IEEE 25<sup>th</sup> Symposium, pp. 1-8, 2013.
- [3] J. Goff, I. Benfatto, J. Tao, I. Yonekawa, K. C. Hwang, J. B. Kang, H. G. Kim, J. S. Oh, E. Seo, and J. H. Suh, "Control and instrumentation of the ITER coil power supply system," *Control and Automation 2013, Uniting Problems and Solutions, IET Conference*, pp. 1-6, 2013.
- [4] E. Gaio, R. Piovan, V. Toigo, and I. Benfatto, "The control system of the ITER vertical stabilization converter," *22<sup>nd</sup> Symposium on Fusion Technology*, pp. 719-725, Sep. 2003.
- [5] J. H. Suh, J. S. Oh, J. Choi, E. H. Song, G. S. Lee, K. S. Eom, J. Goff, J. Tao, and P. Fu, "Korean R&D on the converter controller for ITER AC/DC converters," *Fusion Engineering(SOFE)*, 2011 IEEE/NPSS 24<sup>th</sup>Symposium, pp. 1-5, 2011.
- [6] C. Lee, H. Liu, K. Hwang, S. Lee, H. Park, C. Kim, J. S. Oh, J. H. Suh, and J. Choi, "A novel control for four-quadrant operation of ITER VS converter," *Electrical Machines and Systems(ICEMS)*, 2013 International Confrence, pp. 1657-1661, 2013.
- [7] G. B. Chung, J. K. Ji, and H. S. Mok, "Output control of ITER vertical stabilization converter with circulating current technique," *Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 14, No. 5, pp. 379-386, Oct. 2009.
- [8] S. D. Lee and C. K. Kim, "The assessment and development of protection models in HVDC DC side," *Trans. KIEE*, Vol. 59, No. 10, pp. 1754-1760, Oct. 2010.
- [9] B. H. Oh, C. K. Hwang, K. W. Lee, J. T. Jin, D. S. Chang, J. S. Oh, J. W. Choi, J. H. Suh, J. Tao, and I. H. Song, "Protection sequence of AC/DC converters for ITER PF magnet coils," *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 42, No. 3, pp. 305-312, Jun. 2010.



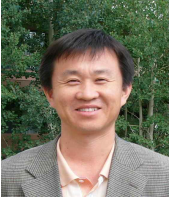
### 조현식(曹賢植)

1987년 2월 18일생. 2011년 충남대 전기공학과 졸업. 2013년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2013년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



### 조종민(趙鐘珉)

1987년 4월 1일생. 2013년 충남대 전기공학과 졸업. 2013년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.



### 오종석(吳宗錫)

1965년 3월 23일생. 1987년 서울대 원자핵공학과 졸업. 1989년 서울대 원자핵공학과 졸업(석사). 1999년 서울대 원자핵공학과(공박). 1991년~2008년 포항가속기연구소 책임연구원. 2008년~현재 국가핵융합연구소 책임연구원.



### 서재학(徐在學)

1961년 12월 16일생. 1989년 창원기능대 전기과 졸업. 1989년~2009년 포항가속기연구소 선임기술원. 2009년~현재 국가핵융합연구소 책임기술원.



### 차한주(車翰周)

1988년 서울대 전기공학과 졸업. 1990년 포항공대 졸업(석사). 2004년 미국 Texas A&M University, College station(공박). 1990년~2001년 LG산전 연구소 책임연구원. 2005년~현재 충남대 전기공학과 교수.