ITER AC/DC Converter Control 검증을 위한 Hardware-in-the-Loop Simulation(HILS) System 구축 및 실험

서재학, 오종석, 최정완, 신현국, 차한주*, 박인권**
국가핵융합연구소, 충남대학교*, RTDS Technologies**

Implementation and Experiment Result of Hardware-in-the-Loop Simulation(HILS) System for The Verification of ITER AC/DC Converter Control

Jae Hak Suh, Jong Seok Oh, Jungwan CHOI, Hyun Kook SHIN,
Hanju Cha*, In Kwon Park **,
National Fusion Research Institute, Chungnam National University*, RTDS Technologies**

ABSTRACT

ITER AC/DC Converter의 부하는 초전도 코일이며 이에 필요한 컨버터는 총 6종류(2상한:TF, 4상한:PF, CS, VS, CCU/L, CCS)가 있다[1]. 이중 VS 컨버터(±1050 V, ±22.5 kA)는 6대가 직렬로 접속되어 운전되고 CS 컨버터(±1050 V, ±4.5 kA)는 4대가 직렬로 접속되어 운전한다[2]. 이들 컨버터용 제어기의 개발 단계에서 실 부하 상태를 준비하는 것은 어렵기 때문에 RTDS™(Real Time Digital Simulator)를 이용하여 제어 대상인 High Power 부분과 초전도 코일의 동적 시스템 모델을 HILS(Hardware in the Loop Simulation)로 구축하였다. 본 논문에서는 HILS 구축에 대한 상세한 내용과 이를 활용하여 Control 시스템을 검증한 결과를 서술하였다.

1. 서 론

ITER AC/DC Converter Control은 토카막 내부의 플라즈마의 실시간 제어가 되어야 하며 컨버터 자체 보호 기능이 보장되어야 한다. 토카막 기계적인 구조물에 설치된 여러 코일은 자기적으로 결합하고 있으며 코일의 전류 제어는 이들 결합요소가 포함된다. SCR Full Bridge로 구성된 AC/DC Converter와 초전도 코일의 특성상 운전 중 막대한 무효전력이 발생하게 되고 또한 급격한 무효 전력의 변화에 따른 계통 전압의 안정을 위하여 빠른 응답성을 가진 무효전력 제어 알고리즘이 요구된다. 이러한 제어 알고리즘의 검증은 실시간 시뮬레이션 시스템이 필요하게 된다. RTDS는 계통 보호 장비 시험 및 시뮬레이션, RPC, HVDC, Smart Grid, Control System Test 등 여러 분야에서 활용되고 있으며 Real 제어기와 Real Scale Analog/Digital 입출력 신호로 제어기 검증과 C builder를 이용한 Control 알고리즘 검증이 가능하다. 컨버터 제어 검증을 위하여 RTDS PB5, DAC, ADC, I/O, RSCAD로 구성된 RTDS와 Xilinx ZYNQ를 사용하여 제작된 4Q 컨버터 제어기 4 Set를 사용하여 컨버터 제어 알고리듬을 실험하였다.

2. HILS System 구성

2.1 ITER AC/DC Converter 구조

그림 1은 4Q AC/DC 컨버터의 구조를 나타내며 6 pulse Bridge 4 Set가 정역으로 접속된 구조이다. Closing 신뢰도 향상과 코일 보호를 위해 코일 전류 Bypass는 기계적 S/W인 PMS(Protective Make Switch)가 담당하며 SCR Bypass는 PMS가 Closing하는 동안 동작하는 것으로 Pulse 정격으로 제작 된다. 부하전류 양의 20%이상 구간에서 FY, FD, 음의 20% 이상 구간에서 RY, RD가 동작하며 ±10% 구간에서 FY, RD가 순환전류 모드로 동작하며 그 이외의 구간에서 FY, RD가 6 pulse 모드로 동작한다. TF 컨버터는 RY, RD가 없으며 ±650/±325 V 2가지 출력 전압이 요구되며 68 kA 정격이다.

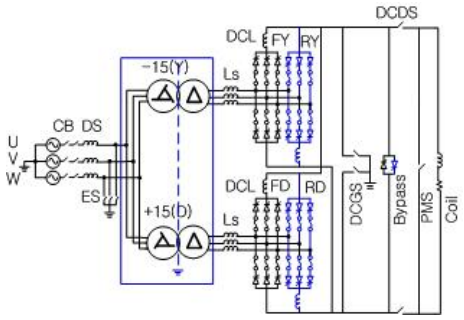

그림 1 4Q AC/DC 컨버터의 구조
Fig. 1 Configuration of 4Q AC/DC converter

2.2 구축된 HILS System 구조

그림2는 구축된 Test Bed 사진으로 오른쪽 2개의 큐비클은 RTDS System, 가운데 4개 큐비클은 알파 제어기, 왼쪽은 Sequential 제어기 큐비클이다. RTDS System은 PB5(6 Set), GTWIF(1 Set), GTAO(2 Set), GTAI(13 Set), GTDI(4 Set), GTDO(1 Set), RSCAD Software로 구성되어 있다.

그림 2 실시간 제어 Hardware 검증장비 사진
Fig. 2 Photograph of Test bed for Real Time Control Hardware

그림3은 구축된 HILS System의 블록도를 나타내는 것으로 Xilinx ZYNQ로 설계된 Embedded Sequential, Alpha, ADC가 있으며 ADC에서 PLL 출력이 알파에 제공되고 SCR Gate Timing과 싱글 컨버터 제어는 알파가 수행하고 Seq는 직렬 컨버터의 전압분배 및 Supervising을 한다. RTDS에는 RSCAD에 의해 Power Section, Load가 모델링되고 실시간으로 Analog Signal이 출력되어 제어 알고리즘을 검증하게 된다.

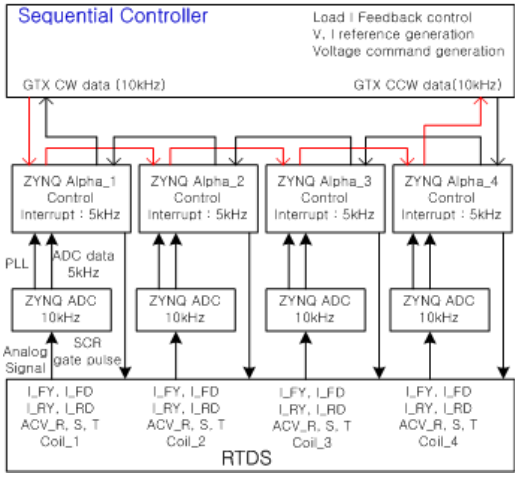

그림 3 구축된 HILS System 구조도
Fig. 3 Control block diagram of VS converter

2.3 실험결과

2.3.1 Coupled Coil Current Control

그림 4는 자기적으로 결합된 Coil 1, 2, 3, 4에 대하여 자기결합계수를 고려하여 전류 제어 결과를 나타낸다. Sequential 제어기에서 각 전류 Reference를 발생하고 각 일파제어기에서 GTX 통신을 통하여 전송된 각 코일 전류 값에 대하여 수행한 전류 제어기 출력 값은 각 알파 제어기에서 출력해야 할 DC Output 출력 전압으로 GTX 통신을 통하여 각 알파에 명령된다. 실제 토카막 전체 코일 전류 제어 시에는 모든 코일간의 자기 결합계수가 적용하여 제어된다.

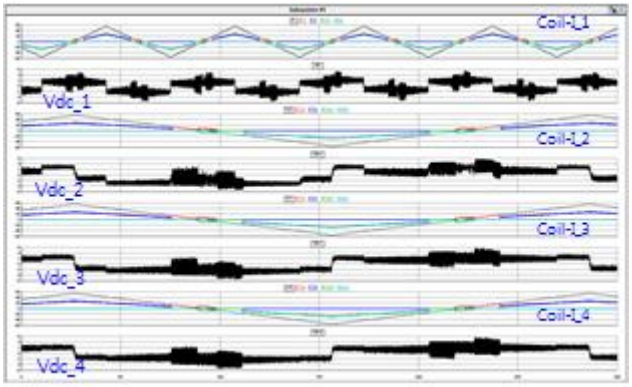

그림 4 Coil 1, 2, 4 Coupled Current Control 실험 결과
Fig. 4 Experment Result of Coil 1, 2, 3, 4 Coupled Control

2.3.2 Sequential Control

그림 5는 4Q 컨버터 4 Unit가 직렬 접속된 CS 컨버터 Symmetrical, Sequential 제어를 한 것으로 두 가지 제어의 결과를 비교한 것으로 무효전력이 84%로 감소한 것을 알 수 있다. 정격 출력 ±1050 V 컨버터 4대가 직렬 접속되었으므로 전체 출력 전압은 ±4200 V가 된다.

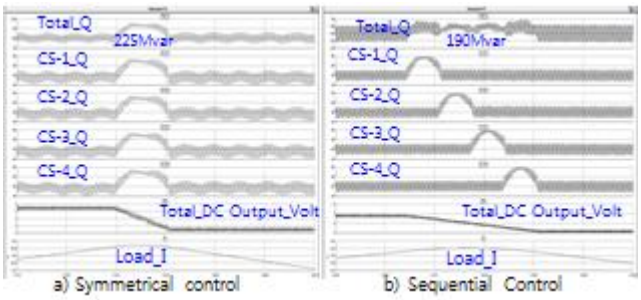

그림 5 4 Unit Serial Connection Sequential Control 실험 결과
Fig. 5 4 Unit Serial Connection Sequential Control

2.3.3 4Q converter and RPC Combination Control

그림6은 4Q Converter 운전 시 발생하는 무효전력을 무효전력보상장치 RPC(Reactive Power Compensation : TCR+FC)가 동작하여 Grid에 무효전력 성분이 최소가 되도록 제어 한 결과로서 컨버터는 교류 2주기의 시간에 알파 값이 min에서 max로 변화시켜 최대의 무효전력 변화가 발생하게 한 경우의 빠른 응답을 가진 무효전력 보상 결과를 보여 준다.

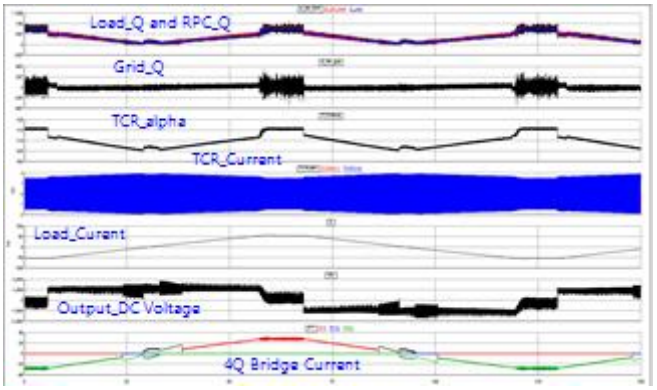

그림 6 4Q Converter and RPC combination Control 실험 결과
Fig. 6 Result of onverter and RPC combination Control

3. 결 론

본 논문은 AC/DC Converter조달에 필요한 제어기의 검증을 위하여 Embedded 제어기와 RTDS System을 구축하고 제어 알고리즘을 검증한 실험 결과의 일부를 소개하였다. 이 System은 조달품의 컨버터 System의 설계 내용, 제어 알고리듬, 보호 동작의 검증에 이용된다.

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

참 고 문 헌

[1] 최정완, "ITER 초전도자석 전원계통", 전력전자학회지, 제17권 제4호, pp.33 38, 2012.08.

[2] J.H.Suh, J.S.Oh, J.Choi, J.Goff, J.Tao, E.H.Song, P.Fu, G.S.Lee, K.S.Eom "KOREAN R&D ON THE CONVERTER CONTROLLER FOR ITER AC/DC CONVERTERA ", SOFE 2011