

국제 열핵융합실험로 펄스전원계통의 무효전력보상기 검증

조현식¹, 조종민¹, 차한주[†]

Reactive Power Compensator for Pulsed Power Electric Network of International Thermonuclear Experimental Reactor

Hyunsik Jo¹, Jongmin Jo¹, and Hanju Cha[†]

Abstract

Analysis and verification of reactive power compensator (RPC) for ITER pulsed power electric network (PPEN) are described in this paper. The RPC system is rated for a nominal power of 250 Mvar necessary to comply with the allowable reactive power limit value from the grid 200 Mvar. This system is currently under construction and is based on static var compensation technology with a thyristor-controlled reactor and a harmonic filter. The RPC minimizes reactive power from grid using prediction of reactive power consumption of AC-DC converters. The feasibility of the reactive power compensation was verified by assembling a real controller and implementing ITER PPEN in the real time digital simulator for the hardware-in-loop facility. When maximum reactive power is reached, grid voltage is stabilized and maximum reactive power decreased from 120 Mvar to 40 Mvar via the reactive power prediction method.

Key words: ITER, Reactive power compensation, RTDS

1. 서 론

화석 연료의 고갈과 환경오염, 지구온난화에 대한 경각심이 대두되면서 친환경 에너지의 연구 개발이 지속적으로 진행되고 있다. 친환경 에너지 중 깨끗하고 안전한 핵융합 발전이 차세대 에너지원으로 주목받고 있으며, 이는 원자와 원자가 만나서 새로운 핵을 만들어 내는 반응으로써 질량결손의 개념이 적용된다. 이러한 원리를 이용한 국제 핵융합 실험로(ITER : International Thermonuclear Experimental Reactor)는 물의 성분인 중수소와 삼중수소를 연료로 하며 결합을 위해 1억도 이상의 고온으로 가열하면, 수소원자는 기체 상태보다 밀도가 낮은 플라즈마 형태로 변한다. 이러한 플라즈마의 제어로 인해 발생하는 에너지를 이용한 핵융합발전

은 폐기물이 없는 무한한 에너지원이라고 말할 수 있다. ITER는 자기장 밀폐형 토카막장치로써 도넛(Torus)형 진공용기 주변에 배치된 48개의 초전도자석(코일)들에 적절한 제어전류를 흘려 초기 플라즈마를 발생시킬 뿐만 아니라, 플라즈마 전류, 온도 및 형상을 안정적으로 제어하여 효과적으로 핵융합실험을 수행할 수 있다. ITER 초전도자석으로는 도넛형 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)로 구성되어 있으며, 이와 같은 여러 종류의 초전도 코일 각각 또는 몇 개씩 묶여진 코일그룹에 적절한 직류전류를 공급해 주는 TF, CS, PF 및 CC 코일 전원공급장치, 그리고 CS와 PF 코일 전원계통에 추가되어 플라즈마의 수직 안정성을 제어해 주는 VS(Vertical Stabilization)의 초전도 코일 전원장치 등으로 구성되어 있다^{[1]~[3]}.

이를 ITER 펄스전원계통(Pulsed Power Electric Network)라 부르며 초전도 코일에 요구되는 전압과 전

Paper number: TKPE-2015-20-3-12

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

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

¹ Dept. of Electrical Eng., Chungnam National University
Manuscript received Mar. 5, 2015; revised Mar. 24, 2015;
accepted May 11, 2015

— 본 논문은 2014년 추계학술대회 외부장학금 수혜논문임

류를 공급할 때 펄스전원계통에서 무효전력이 발생하게 되는데, 과도한 무효전력은 계통을 불안정하게 하는 원인이 된다. 계통에 발생하는 무효전력을 줄이기 위해서 직렬로 연결되는 초전도 코일 전원장치들을 시퀀스 제어를 하는 방법이 있다^{[4],[5]}. 이 방법은 무효전력을 감소시키기 위하여 외부장치를 연결하지 않아도 되는 장점이 있지만, 직렬로 연결되는 단위 초전도 코일 전원장치들이 많을수록 전압의 응답성이 떨어지는 단점이 있다.

ITER 펄스전원계통은 무효전력량을 200MVar 이하로 유지하기 위하여 정지형 무효전력보상기(SVC : Static Var Compensator)의 대표적인 장치인 싸이리스터 제어 리액터(TCR : Thyristor Controlled Reactor)와 고조파 필터(HF : Harmonic Filter)로 구성된 무효전력보상기(RPC : Reactive Power Compensator)를 사용한다^[6]. 무효전력을 효율적이고 빠르게 보상을 하기 위해서는 다양한 초전도 코일 전원장치에서 발생하는 무효전력의 크기를 정확하게 예측하는 것이 중요하다. 따라서 본 논문에서는 2장에서 ITER 초전도 코일 전원공급장치 중 PF 컨버터 2대로 펄스전원계통을 구성하고 이에 발생하는 무효전력의 크기를 예측하여 보상하는 무효전력보상기법을 해석하였다.

ITER 펄스전원계통과 같은 대용량의 전력은 해석과 시뮬레이션은 이루어질 수 있으나, 실제 장치를 제작하는 비용과 고장에 따른 안전성의 위험이 있기 때문에 실험으로 검증하기 어려운 부분이 있다. 이와 같은 어려움을 극복하기 위해서 HIL (Hardware-In-the-Loop)을 사용한다. HIL이란 완성된 제어기를 실제와 같은 조건으로 시뮬레이션하여 제어기를 검증하거나, 고장이나 사고 발생과 같은 비정상적인 경우를 테스트하기 위하여 사용되는 방법이다. 본 논문에서는 HIL을 수행하는 장치로 RTDS(Real Time Digital Simulator)를 사용하였고, RTDS는 대용량의 전력 뿐 아니라 전기자동차의 에너지 관리 시스템^[7], 풍력발전^[8] 그리고 마이크로그리드^[9] 등 다양한 분야의 제어기를 검증하는데 사용하는 장치이다. 따라서 3장에서 2장에서 제안하고 해석한 무효전력보상기법을 실제 제어기와 RTDS를 연동하여 실험하여 검증하였다.

2. ITER 펄스전원 계통의 무효전력 보상

2.1 PF 컨버터의 구조 및 동작

본 논문에서 대상으로 하는 PF 컨버터는 초기 플라즈마를 발생시키고 플라즈마 전류와 형상 그리고 위치를 제어해주기 위하여 전압 지령치를 정상적으로 추종할 수 있어야 하며, 이때 양의 최대전압(1000V)에서 음의 최대전압(-1000V)의 응답성은 40ms를 만족하여야 한다. PF 컨버터의 구조를 그림 1에 나타내었으며 ITER 펄스전원계통을 구성하는 다른 AC-DC 컨버터와 같이 12펄스 위상 제어 정류기의 구성으로 이루어진다. 고조파의

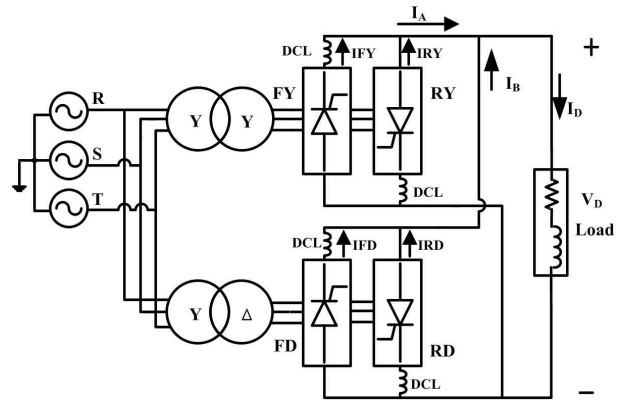


Fig. 1. Configuration of ITER PF converter.

TABLE I
PF CONVERTER PARAMETERS

Parameter	Value
Grid(V_{LL})	400kV
Frequency(f)	50Hz
Main transformer(Y-Y)	Primary:400kV, Secondary:66kV
Converter transformer(Y-Y, Y-Δ)	Primary:66kV, Secondary:1050V
Load	0.001Ω, 0.4747H
Voltage reference(V_{ref})	±1000V
Maximum current(I_{max})	55kA
Converter DC reactor(DCL)	250μH
Commutation inductance(L_S)	13.7μH

영향을 저감하기 위하여 Y-Y와 Y-Δ결선의 변압기를 사용하며, 각 싸이리스터 밸브의 직류 리액터(DCL)는 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 코일을 대신하는 더미부하에 공급되는 출력전압 V_D 는 3상 변압기의 누설 인덕턴스와 배선상의 인덕턴스로 이루어지는 L_S 에 의한 영향을 받을 수 있으며 식(1)과 같이 나타낼 수 있고, 이로부터 출력전압 V_D 가 기준전압 V_{cmd} 를 충족시키기 위한 점화각 α 를 유도하면 식(2)와 같이 표현할 수 있다. 여기서 전압 V_{LL} 은 AC전원 선간전압의 실효값을 의미하고, 전원측 인덕턴스 L_S 에 의한 출력전압강하분이 포함되어 있음을 확인할 수 있다. 부하전류 I_D 는 각각의 밸브 출력전류인 I_{FY} , I_{RY} , I_{FD} , I_{RD} 의 합과 같으며 Y-Y측에 연결되어 있는 밸브의 전류합은 I_A 로, Y-Δ측에 연결되어 있는 밸브의 전류합은 I_B 로 나타내었다.

표 1은 PF 컨버터의 파라미터들을 나타내며 주파수가 50Hz인 계통전압이 강압 변압기를 통하여 1050V로 변환되며 단일 PF 컨버터의 출력전압의 범위는 ±1000V이고, 최대전류의 값은 55kA이다. PF 컨버터도 다른

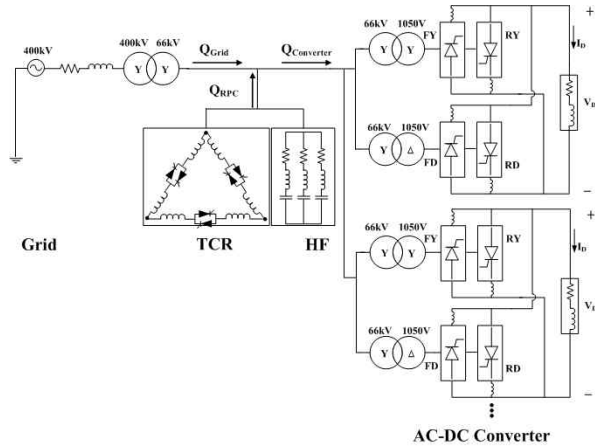


Fig. 2. Configuration of ITER PPEN.

TABLE II
PARAMETERS of HF banks

Order	3	5	7	11	13	23
Capacitance (uF)	9.71	41.92	35.78	43.63	36.74	11.05
Inductance (mH)	118.2	9.9	5.9	2	1.7	1.8
Resistance (Ω)	2.2066	0.6136	0.7703	0.536	0.6732	1.5178
Capacity (Mvar)	13.3	57.3	48.9	63.8	50.3	15.1

ITER AC-DC 컨버터와 마찬가지로 부하전류의 크기에 따라서 각 사이리스터 밸브들을 12펄스, 6펄스, 순환전류 모드로 구분하여 동작한다.

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

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

2.2 ITER 펄스전원계통 구조

그림 2은 ITER 펄스전원계통의 구성을 간략하게 나타내며, 계통전원과 AC-DC 컨버터들과 계통의 무효전력을 보상하기 위한 RPC로 구성된다. 50Hz의 계통전압은 400kV에서 강압 변압기를 거쳐 66kV가 컨버터 측으로 전달되며, 초전도 코일에 전압과 전류를 공급하는 AC-DC 컨버터는 본 논문에서는 PF(Poloidal Field) 컨버터 2대를 기준으로 하였다. RPC를 구성하는 TCR과 HF는 각각 250MVar의 용량을 가짐으로써 계통에 -250MVar부터 250MVar까지 무효전력을 보상할 수 있다. TCR은 Δ 결선으로 66kV 계통에 연결되며, 각각의

인덕터의 값은 0.056H이다. HF는 3차, 5차, 7차, 11차, 13차, 23차 고조파를 각각 필터링하며, RPC를 구성하는 HF의 각 파라미터들을 표 2에 나타내었다. ITER 펄스전원계통의 무효전력은 식 (3)로 표현할 수 있다.

$$Q_{Converter} = Q_{Grid} + Q_{RPC} \quad (3)$$

2.3 무효전력보상기 제어

ITER 펄스전원계통의 66kV에 흐르는 무효전력(Q_{Grid})을 보상하기 위해서는 식 (3)에서 알 수 있듯이 AC-DC 컨버터의 무효전력($Q_{Converter}$)을 RPC의 무효전력(Q_{RPC})이 추종해야 한다. 일반적인 무효전력보상기는 계통의 전압과 전류의 변화에 따라 무효전력의 변화를 인지하고 보상한다. 하지만 ITER 펄스전원 계통의 무효전력은 부하가 사이리스터 컨버터라는 특수성 때문에 AC-DC 컨버터의 정보를 사용하여 계산할 수 있다.

따라서 컨버터의 무효전력을 예측하기 위해서 컨버터의 유효전력 $P_{Converter}$, 컨버터의 전압 지령치 V_{cmd} 에 따른 점호각 α , 컨버터 중복각 μ 그리고 컨버터의 무효전력 $Q_{Converter}$ 를 식 (4) ~ (7)와 같이 계산한다. 여기서 L_S , I_D 그리고 V_{LL} 은 각각 변압기 누설 인덕턴스를 포함하는 계통 인덕턴스, 부하전류 그리고 계통선간전압의 실효치를 의미한다.

$$P_{Converter} = V_{cmd} \cdot I_D \quad (4)$$

$$\alpha = \cos^{-1} \left\{ \left(V_{cmd} + \frac{3}{\pi} \omega L_S I_D \right) \cdot \left(\frac{\pi}{3\sqrt{2} V_{LL}} \right) \right\} \quad (5)$$

$$\mu = \cos^{-1} \left(\cos\alpha - \frac{\sqrt{2} \omega L_S I_D}{V_{LL}} \right) - \alpha \quad (6)$$

$$Q_{Converter} = P_{Converter} \cdot \frac{(2\mu + \sin(2\alpha) - \sin(2\alpha + 2\mu))}{\cos(2\alpha) - \cos(2\alpha + 2\mu)} \quad (7)$$

TCR과 HF로 구성된 RPC는 보상하는 무효전력의 양을 조절하기 위해 TCR의 점호각을 조절하여 가변 서셉턴스의 역할을 함으로써 무효전력을 보상하게 되며, 단위법으로 표현되는 TCR의 서셉턴스(B_{TCR})는 식 (8)과 같으며 B_{TCR} 과 TCR의 점호각과의 관계를 그래프로 나타내면 그림 3과 같다. 계통의 무효전력이 증가하면 TCR의 점호각을 180도 방향으로 증가시키고 무효전력이 감소하면 TCR의 점호각을 90도 방향으로 감소시킨다.

$$B_{TCR} = \frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi} \cdot B_{max} \quad (8)$$

식 (4)~(7)으로 계산된 컨버터의 무효전력을 입력받아 RPC 제어기는 현재 무효전력에 상응하는 TCR의 서

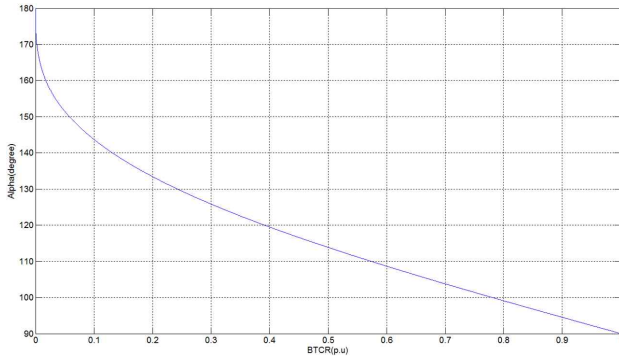


Fig. 3. The susceptance characteristic of TCR.

셍턴스(B_{TCR})를 구하고, B_{TCR} 과 TCR의 점호각의 관계를 나타낸 그림 3을 룩업 테이블을 취하여 TCR의 점호각을 선정한다.

3. 실험 결과

3장에서는 ITER 펄스전원계통의 실제 제어기와 RTDS를 이용한 HIL 시스템의 구성과 HIL 시스템을 사용하여 2장에서 제안하고 해석한 무효전력 보상방법을 검증하기 위한 실험결과에 대하여 서술한다.

3.1 RTDS를 이용한 HIL 구성

ITER 펄스전원계통의 RPC의 무효전력 보상동작의 해석을 검증하기 위한 전체 시스템의 구성은 그림 4와 같다. 상위의 시퀀스 제어기는 컨버터의 제어 명령과 통신으로 정보를 수집하며, 수집된 정보를 바탕으로 현재 PF 1, 2 컨버터에서 발생되고 있는 무효전력을 계산하여 D/A 컨버터 출력을 통하여 RTDS draft에 구현되어 있는 RPC 제어기로 전달한다.

RTDS는 GTAO(Gigabit Transceiver Analog Output)를 통하여 각각의 PF 1, 2 컨버터 제어기의 A/D 컨버터에 ITER 펄스전원계통을 모사한 전압과 전류의 아날로그 신호(V_{LL} , IFY, IFD, IRY, IRD)를 출력해주며, 실제 PF 1, 2 컨버터 제어기에서 전달되는 싸이리스터 게이트 신호를 GTDI(Gigabit Transceiver Digital Input)를 통하여 입력받아 PF 1, 2의 컨버터 모델을 실시간으로 시뮬레이션을 수행한다.

실제 PF 1, 2 컨버터 제어기는 시퀀스 제어기의 명령을 받아 PF 컨버터의 제어를 수행하게 되고 A/D 컨버터를 통하여 RTDS에서 피드백 되는 각각의 싸이리스터 밸브 전류와 계통전압 등의 정보를 통신을 통하여 시퀀스 제어기에 전송한다.

그림 5는 실제 PF 컨버터 제어기와 RTDS와의 하드웨어 결선도를 나타내며, 그림 2의 ITER 펄스전원계통을 RTDS의 RSCAD로 표현한 것을 그림 6에 나타내었다. 또한 TCR과 6개의 고조파 필터로 이루어진 HF로 구성된 RPC를 RSCAD로 나타낸 것을 그림 7에 나타내었다.

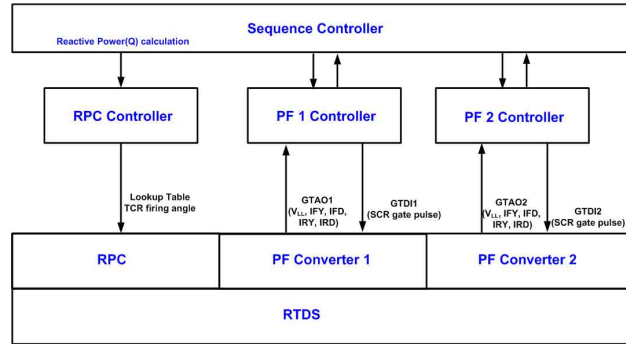


Fig. 4. Configuration of overall system.

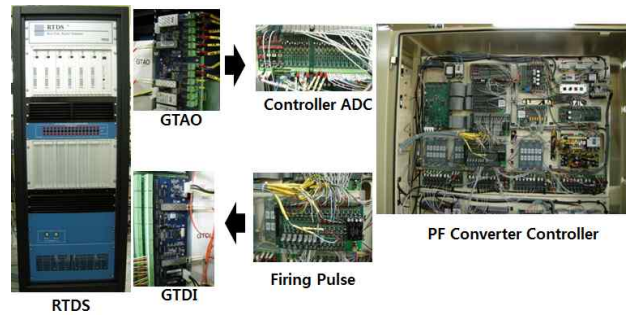


Fig. 5. Hardware connection between real PF converter controller and RTDS.

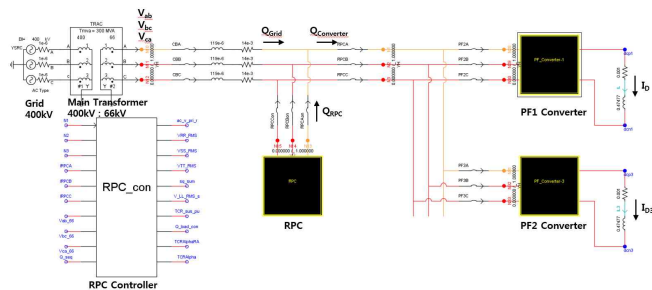


Fig. 6. RSCAD draft of ITER PPEN.

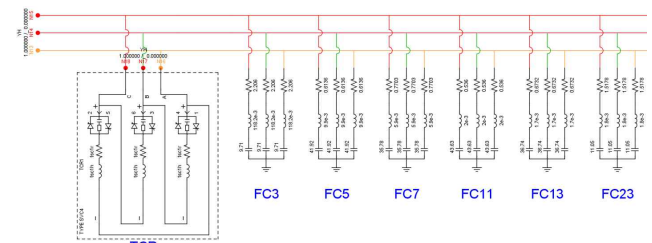


Fig. 7. RSCAD draft of RPC.

3.2 무효전력 보상 실험

무효전력 보상을 효과적으로 수행하기 위해서는 전 구간에서 컨버터에서 발생하는 무효전력을 계산하는 것이 정확해야 한다. 이를 확인하기 위해서 시퀀스 제어기에서 알파 제어기에 구형파의 전압지령치를 입력하고, 그때의 PF 컨버터 2대에서 발생하는 무효전력계산을 확인하였다. 그림 8은 전압지령치(V_{cmd}), 부하전류(I_D) 그리고 각각의 PF 컨버터의 무효전력의 파형을 나타낸다.

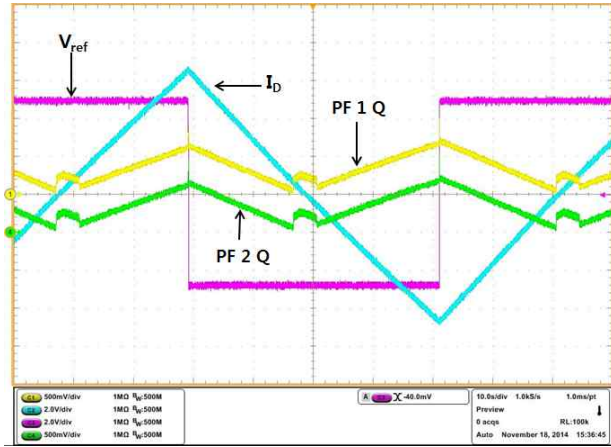


Fig. 8. PF converter reactive power calculation. I_D , V_{ref} , PF 1 Q, PF 2 Q

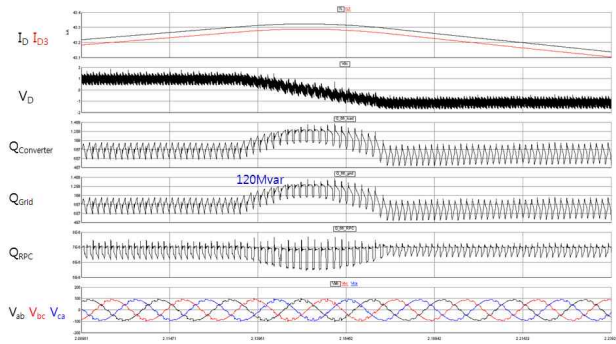


Fig. 9. Waveforms of without RPC reactive power compensation.

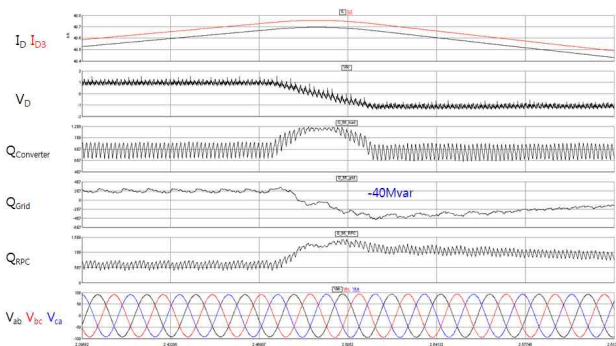


Fig. 10. Waveforms of with RPC reactive power compensation.

그림 8에서 확인할 수 있듯이 각각의 PF 컨버터는 전압지령치에 의하여 전압제어를 수행하며, PF 1 컨버터와 PF 2 컨버터의 무효전력이 전 구간에서 정상적으로 동일하게 계산되는 것을 확인할 수 있다. PF 컨버터에서 발생하는 무효전력의 값이 최대가 될 경우는 각 컨버터의 점호각이 90도가 되는 지점이 될 때이며, 즉 전압 지령치가 +1000V에서 -1000V로 혹은 -1000V에서 +1000V로 변하는 과도 구간임을 의미한다. 따라서 전압 지령치가 +1000V에서 -1000V로 변하는 구간에서 실험을 진행하였다. RPC가 계통에 무효전력을 보상하지 않

을 때의 과형을 그림 9에 나타내었으며, RPC가 무효전력을 보상을 하고 있지 않기 때문에 컨버터에서 발생하는 무효전력의 크기($Q_{Converter}$)가 그대로 계통(Q_{Grid})에 나타나며, 이 때 무효전력의 최대값은 120MVar이다. 계통의 선간전압 V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} 에 전압 notch에 의한 고조파가 발생함을 알 수 있다. RPC가 무효전력을 보상하는 실험과형을 그림 10에 나타내었으며, 컨버터에서 발생하는 무효전력의 크기($Q_{Converter}$)는 120MVar로 같지만, RPC의 무효전력(Q_{RPC})이 컨버터의 무효전력을 추종하기 때문에 계통의 무효전력의 크기는 40MVar로 감소하는 것을 확인할 수 있다. HF에 의하여 고조파가 보상되었기 때문에 계통의 선간전압 V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} 도 안정해지는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 ITER 펄스전원계통의 무효전력보상기(Reactive Power Compensator)의 해석 및 검증에 대하여 기술하였다. ITER 펄스전원계통은 66kV에 흐르는 무효전력량을 250MVar이하로 제한하기 위하여 정지형 무효전력보상기(Static Var Compensator)의 대표적인 장치인 싸이리스터 제어 리액터(TCR)와 고조파 필터(HF)로 구성된 무효전력보상기(RPC)를 사용한다. 여러 ITER 초전도 코일 전원장치에서 발생하는 무효전력의 크기를 예측하여 보상하는 무효전력 보상기법을 해석하였다. RPC의 무효전력 보상동작을 검증하기 위하여 실제 제어기와 RTDS를 연동하여 실험하였으며, 무효전력이 최대가 되는 조건에서 RPC의 유무에 따라 66kV 계통전압이 안정되고 무효전력 최대값이 120MVar에서 40MVar로 감소하는 것을 확인하였다.

이 연구는 2014 충남대학교 학술연구비에 의해 지원되었음

References

[1] J. W. Choi, "ITER superconducting magnet power supply system," *KIPE Magazine*, Vol. 17, No. 4, pp. 33-38, Aug. 2012.

[2] C. Neumeier, 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 25th 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] H. S. Jo, J. Y. Jeong, J. M. Jo, and H. J. Cha “Comparative analysis of sequence control in six series-connected ITER VS converters,” *Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 19, No. 5, pp. 399-406, Oct. 2014.
- [5] H. S. Heo, K. W. Park, I. C. Jeong, H. S. Shin, J. A. Park, Y. W. Lee, J. W. Choi, J. S. Oh, and J. H. Suh, “Sequence control of small-scaled ITER power supply for reactive power compensation,” *Industrial Technology(ICIT), 2010 International Conference*, pp. 813-817, 2010.
- [6] P. Kundur, *Power system stability and control*, McGraw-Hill, Inc., 2003.
- [7] Y. Deng, S. Y. Foo, and H. Li, “Study of bidirectional DC-DC converter interfacing energy storage for vehicle power management using real time digital simulator (RTDS),” *Journal of Power Electronics*, Vol. 11, No. 4, pp. 479-489, July 2011.
- [8] C. S. Hwang, G. H. Kim, N. W. Kim, H. G. Lee, H. R. Seo, J. D. Park, D. Y. Yi, S. J. Lee, M. W. Park, and I. K. Yu, “RTDS based transient analysis of PMSG type wind power generation system,” *Trans. KIEE*, Vol. 60, No. 3, pp. 572-576, Mar. 2011.
- [9] Y. S. Lee, B. M. Han, D. J. Won, and H. J. Lee, “Real-time operation analysis for stand-alone microgrid using RTDS,” *Trans. KIEE*, Vol. 63, No. 10, pp. 1393-1401, Oct. 2014.



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. 2015년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2015년~ 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



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.