

국제 열핵융합실험로 펄스전원계통의 무효전력보상기 검증

조현식, 배상훈, 오종석*, 차한주
충남대학교, 국가핵융합연구소*

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

Hyunsik Jo, Sanghoon Bae, Jong Seok Oh*, Hanju Cha
Chungnam National University, National Fusion Research Institute*

ABSTRACT

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. RPC에 적용되어 여러 ITER 초전도 코일 전원장치에서 발생하는 무효전력의 크기를 예측하여 보상하는 무효전력 보상기법을 해석한다. 본 논문에서는 RPC의 무효전력 보상동작을 실제 제어기와 RTDS를 연동하여 실험하여 검증하였고, RPC의 유무에 따라서 66kV 계통의 무효전력 최대값이 120MVar에서 40MVar로 감소하는 것을 확인하였다.

1. 서론

국제 핵융합 실험로(ITER)는 자기장 밀폐형 토카막장치로써 플라즈마 전류, 온도 및 형상을 안정적으로 제어하여 핵융합실험을 수행하기 위해 다양한 초전도 코일 전원장치들이 사용되며, 이를 펄스전원계통(Pulsed Power Electric Network)라 부른다. 초전도 코일에 요구되는 전압과 전류를 공급할 때 펄스전원계통에서 무효전력이 발생하게 되는데, 과도한 무효전력은 계통을 불안정하게 하는 원인이 된다. 계통에 발생하는 무효전력을 줄이기 위해서 초전도 코일 전원장치들을 시퀀스 제어를 하는 방법도 있었지만^[1], ITER 전원계통은 무효전력량을 250MVar 이하로 유지하기 위하여 정지형 무효전력보상기(SVC)의 대표적인 장치인 싸이리스터 제어 리액터(TCR)와 고조파 필터(HF)로 구성된 무효전력보상기(RPC)를 사용한다^[2]. 무효전력을 효율적이고 빠르게 보상을 하기 위해서는 다양한 초전도 코일 전원장치에서 발생하는 무효전력의 크기를 정확하게 예측하는 것이 중요하다. 따라서 본 논문에서는 ITER 펄스전원계통에서 발생하는 무효전력의 크기를 예측하여 보상하는 무효전력보상기법을 해석하고 이를 실제 제어기와 RTDS(Real Time Digital Simulator)를 연동하여 실험하여 검증하였다.

2. ITER 펄스전원 계통의 무효전력 보상

2.1 ITER 펄스전원계통 구조

그림 1은 ITER 펄스전원계통의 구성을 간략하게 나타내며, 계통전원과 AC DC 컨버터 그리고 계통의 무효전력을 보상하기 위한 RPC로 구성된다. RPC를 구성하는 TCR과 HF는 각각 250MVar의 용량을 가짐으로써 계통에 0MVar부터 250MVar까지 무효전력을 보상할 수 있다. 계통전압은 400kV에서 강압 변압기를 거쳐 66kV가 컨버터 측으로 전달된다. 초전도 코일에 전압과 전류를 공급하는 AC DC 컨버터는 본 논문에서는 PF(Poloidal Field) 컨버터 2대를 기준으로 하였다. ITER 펄스전원계통의 무효전력은 식 (1)로 표현된다.

$$Q_{_Converter} = Q_{_Grid} + Q_{_RPC} \quad (1)$$

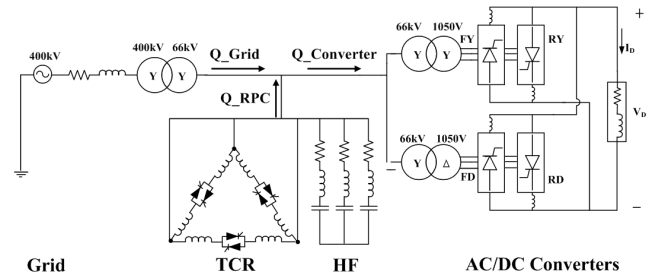


그림 1 ITER 펄스전원계통의 구조
Fig. 1 Configuration of ITER PPEN

2.2 무효전력보상기 제어

ITER 펄스전원계통의 66kV에 흐르는 무효전력(Q_{Grid})을 보상하기 위해서는 식 (1)에서 알 수 있듯이 AC DC 컨버터의 무효전력($Q_{Converter}$)을 RPC의 무효전력(Q_{RPC})이 추종해야 한다. 따라서 컨버터의 무효전력을 예측하기 위해서 컨버터의 유효전력 $P_{Converter}$, 컨버터의 전압 지령치 V_{cmd} 에 따른 점호각 α , 컨버터 증폭각 μ 그리고 컨버터의 무효전력 $Q_{Converter}$ 을 식 (2) ~ (5)와 같이 계산한다. 여기서 R_s , L_s , I_D , V_{rms} 그리고 Q_0 는 각각 변압기의 저항성분, 변압기 누설 인덕턴스를 포함하는 계통 인덕턴스, 부하전류, 계통선간전압의 실효치 그리고 변압기의 자화 인덕턴스에 의한 무효전력을 의미한다. 본 논문에서는 R_s , Q_0 에 의한 영향은 없다고 가정한다.

$$P_{_Converter} = V_{cmd} \cdot I_D + 2 \cdot R_s \cdot I_D^2 \quad (2)$$

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

$$\mu = \cos^{-1} \left(\cos \alpha - \frac{\sqrt{2} \omega L_s I_D}{V_{rms}} \right) - \alpha \quad (4)$$

$$Q_{Converter} = P_{Converter} \cdot \frac{(2\mu + \sin(2\alpha) - \sin(2\alpha + 2\mu))}{\cos(2\alpha) - \cos(2\alpha + 2\mu)} + Q_0 \quad (5)$$

TCR과 HF로 구성된 RPC는 보상하는 무효전력의 양을 조절하기 위해 TCR의 점호각을 조절하여 가변 서셉턴스의 역할을 함으로써 무효전력을 보상하게 되며, 일반적으로 TCR의 서셉턴스는 식 (6)과 같다.

$$B_{TCR} = \frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi X_L} \quad (6)$$

계산된 컨버터의 무효전력을 입력받아 RPC 제어기는 TCR의 서셉턴스 특성을 구하고 비선형의 수식을 선형화하기 위해 참조표(Look up Table)를 이용하여 TCR의 싸이리스터의 점호각으로 사용한다. TCR의 서셉턴스 특성은 그림 2에 나타내었다.

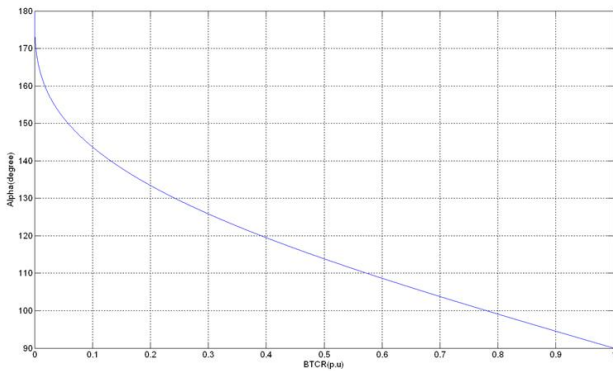


그림 2 TCR의 서셉턴스 특성
Fig. 2 The susceptance Characteristic of TCR

2.3 실험결과

ITER 펄스전원계통의 RPC의 무효전력 보상동작을 확인하기 위하여 실제 제어기와 RTDS를 연결하여 실험하였다. 그림 1의 ITER 펄스전원계통을 RTDS의 RSCAD로 표현한 것을 그림 3에 나타내었다. 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 않을 때의 파형을 그림 4에 나타내었으며, RPC가 무효전력을 보상을 하고 있지 않기 때문에 컨버터에서 발생하는 무효전력의 크기가 계통에 나타나며, 이 때 무효전력의 최대값은 120MVar이다. 무효전력의 영향으로 계통의 선간전압 V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} 도 고조파가 발생함을 알 수 있다. RPC가 무효전력을 보상하는 실험파형을 그림 5에 나타내었으며, 컨버터에서 발생하는 무효전력의 크기는 120MVar로 같지만, RPC의 무효전력이 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.

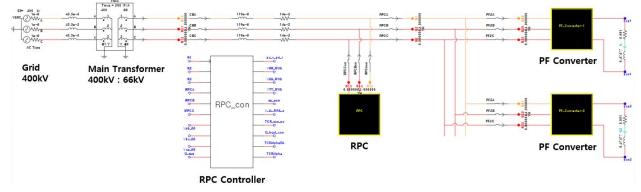


그림 3 ITER 펄스전원계통의 RSCAD draft
Fig. 3 RSCAD draft of ITER PPEN

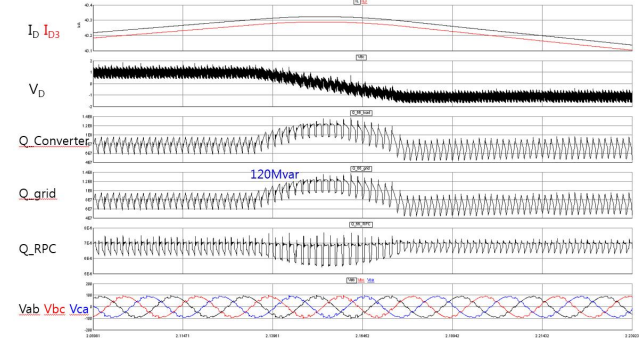


그림 4 RPC 무효전력 보상 전
Fig. 4 Waveforms of Without RPC reactive power compensation

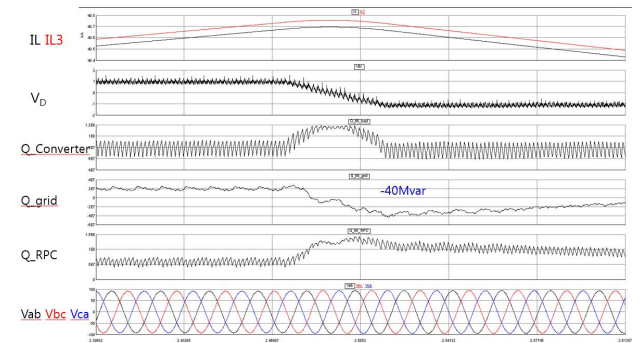


그림 5 RPC 무효전력 보상 후
Fig. 5 Waveforms of with RPC reactive power compensation

3. 결론

본 논문에서는 ITER 펄스전원계통의 무효전력보상기(Reactive Power Compensation)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 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 국책연구사업임(No. 2007 -2006995)”

참고 문헌

- [1] 조현식, 정진용, 조종민, 차한주 “6 직렬 연결된 ITER VS 컨버터의 시퀀스제어 비교 해석”, 전력전자학회 논문지, 제 19권 제 5호, pp. 399 406, 2014. 10.
- [2] 최정완, “ITER 초전도자석 전원계통”, 전력전자학회지, 제 17권 제4호, pp.33 38, 2012.08.