

# KSTAR 전력계통 안정화를 위한 비정수 고조파 보상에 관한 연구

오정철\*, 신태성\*, 박병주\*, 유항규\*, 황안일\*, 공종대\*\*, 홍성록\*\*  
전력품질기술(주)\*, 국가핵융합연구소\*\*

## A Study of Inter-harmonic Control for the KSTAR Power System

Jeong Cheol Oh\*, Tae Sung Shin\*, Byung Ju Park\*, Hang Kyu Yoo\*, An Il Hwang\*,  
Jong dae Kong\*\*, Seong lok Hong\*\*  
PQ Tech.Inc.\*, NFRI\*\*

### ABSTRACT

능동형필터는 주로 비선형 부하로 부터 발생하는 정수배의 고조파를 보상하는데 응용되어 왔다. 본 논문에서는 국가핵융합연구소(NFRI)의 KSTAR 주장치인 전원공급장치인 PF MPS가 가동되면서 특이한 저차수 대역의 비정수 고조파가 발생하는데 이는 MG(motor generator)와 RPC (Reactive Power Compensator)간의 병렬공진 확대현상으로 나타나 고조파 전류의 증가, 전압왜형 상승 등 안정적인 전력계통 운영에 영향을 주고 있다. 따라서 이의 원인이 되는 특이성의 비정수 고조파를 저감시키기 위한 제어 알고리즘 개발과 모의시험에 관한 연구내용을 다루고자한다. 지금까지 개발된 알고리즘은 주로 정수배 고조파만을 대상으로 한 FFT의 일괄보상, 혹은 개별차수 보상방식이었으나 여기서는 DQ 변환 알고리즘을 채용하여 정수배 고조파는 물론 0.5차 단위의 비정수 고조파까지 제어하는 기술을 다루었다.

### 1. 서 론

핵융합 KSTAR 실험시 플라즈마를 발생시키기 위해 초전도 자석에 전원을 공급하는 초전도자석전원장치(PF MPS)는 교류를 직류로 변환하는 전력변환장치로서 6펄스 12펄스 운전방식을 채택하고 있다. PF MPS의 출력제어 특성에 따라 특성고조파는 물론이고 비특성, 비정수고조파를 상당량 발생시키며 초전도코일에 전원을 공급하므로 95% 이상의 대용량의 무효전력을 발생시킨다. 따라서 무효전력과 고조파를 보상하기 위해 사이리스터 제어기반의 무효전력보상장치를 시설하여 운영하고 있다. 그러나 PF MPS의 특성 때문에 발생하는 비정수고조파와 비특성 고조파 중의 저차수대역의 고조파는 무효전력보상장치의 보상용량이 증가함에 따라 KSTAR 전력계통과 무효전력 보상장치간에 저차수대역의 병렬공진이 발생되어 고조파 확대현상과 함께 전압왜형이 심하게 일어나게 된다. 이런 현상 때문에 무효전력보상장치의 투입용량이 제한되고 PF MPS의 운전이 불안정하게 되며 장치와 관련된 주요 냉동기 부하 등에 심각한 영향을 주게 된다. 따라서 본 논문에서는 KSTAR 전력계통에 발생하는 비정수, 비특성고조파를 저감시키기 위한 방법을 제안하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2.1절에서는 0.5차 단위의 고조파를 검출하는 방법을 제시하였고, 2.2절에서는 검출된 고조

파를 저감시키기 위한 능동필터의 모델을 기반으로 하는 전류 제어기 설계에 관하여 언급하였다. 2.3절에서는 모의실험을 통해 본 논문에서 제안하는 제어알고리즘의 성능을 확인하였다. 그림 1은 KSTAR 전력계통도이다.

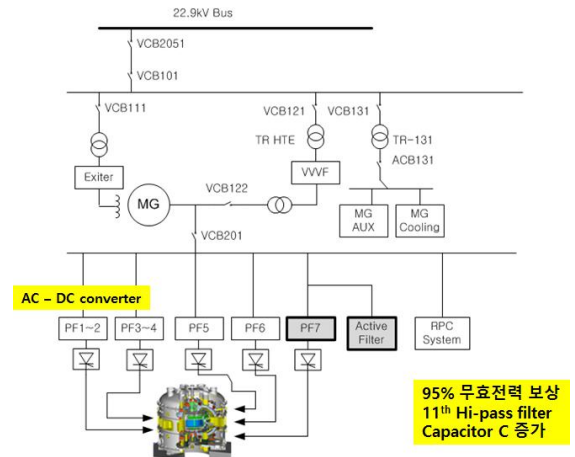


그림 1 KSTAR 전력 계통  
Fig. 1 KSTAR Power system

### 2. 본 론

#### 2.1 0.5차 단위의 고조파 검출

고조파를 보상하기 위해서 가장 우선적으로 고려해야 할 사항으로는 고조파를 어떻게 검출할 것인지 정하는 것이다. 본 논문에서는 DQ변환을 사용한 고조파 검출 기법을 적용하였다<sup>[1]</sup>.

$$\begin{aligned} i_{de} &= i_{ds}\cos(\omega t) + i_{qs}\sin(\omega t) \\ i_{qe} &= -i_{ds}\sin(\omega t) + i_{qs}\cos(\omega t) \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)의  $i_{dqs}$ 는 삼상전류를 정지변환 한 결과이다. 식 (1)에서 DQ회전변환에 필요한  $\omega$ 를 각 차수별 주파수와 동기시킨 후 LPF(low pass filter)를 거치면 각 차수별 고조파의 크기를 검출할 수 있다. 검출된 각 차수별 크기는 전류제어기의 레퍼런스로 사용된다. DQ변환을 통해 고조파를 검출하기 위해선 각 차수의 위상각이 필요하다. 계통 주파수의 정수배 고조파의 경우 PLL을 활용하여 각 차수별 위상각을 생성하며, 0.5차 단위의 위상각은 PLL로 추정되는 기본파의 위상각에 0.5배하여 0.5차수에 대한 위상각을 추정할 수 있다. 이와 같이 추정된 정

수배고조파와 0.5차 단위의 위상각을 조합하여 0.5차 단위의 위상각을 얻을 수 있다.

### 2.2 전류 PI 제어기

능동필터의 모델은 아래의 식 (2)과 같이 나타낼 수 있다 [1][2]

$$v_{dc}(t) = Ri_{dc}(t) + L \frac{d}{dt} i_{dc}(t) + e_{dc}(t) - \omega Li_{qc}(t) \quad (2)$$

$$v_{qc}(t) = Ri_{qc}(t) + L \frac{d}{dt} i_{qc}(t) + e_{qc}(t) + \omega Li_{dc}(t)$$

이 때, L은 능동필터의 리액터의 L값이고 R은 리액터의 기생저항성분이다.  $e_{dc}$   $\mp \omega Li_{dc}$ 는 역기전력으로 외란성분이다. 위 전압방정식을 라플라스 변환하면 식 (3)과 같이 쓸 수 있다.

$$i_{dq} = \frac{1}{Ls + R} v_{dq} + e_{dq} \mp \omega Li_{dq} \quad (3)$$

식 (3)을 기반으로 최적화 기법으로 전류 제어기를 설계하면 식 (4)와 같이 쓸 수 있다[3]. 단,  $K_p = \omega_c L$ ,  $K_i = \omega_c R$  이다.

$$v_{dq} = \frac{K_p s + K_i}{s} (i_{dq}^* - i_{dq}) - e_{dq} \pm \omega Li_{dq} \quad (4)$$

아래의 그림 2는 능동필터의 제어 블록선도로 능동필터를 제어하는 기본적인 알고리즘을 표현한다.

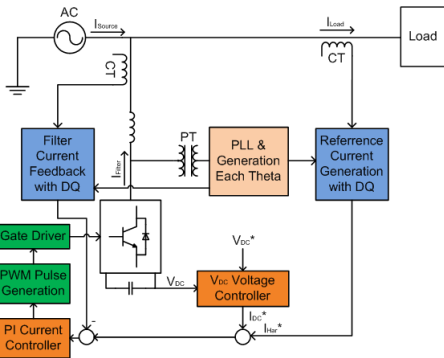


그림 2 능동필터 제어 블록선도  
Fig. 2 Active-filter control block diagram

### 2.3 모의실험

모의실험을 통해 본 논문에서 제안한 0.5차 단위의 고조파 보상 성능을 확인해 보았다. 아래의 그림 3은 KSTAR PF7 1기에 대한 모의실험 계통 구성도이다. 계통 전압은 22.9kV이며 주파수는 60Hz이다. 능동형필터와는 22.9kV/380V 승압용 변압기로 연결한다.

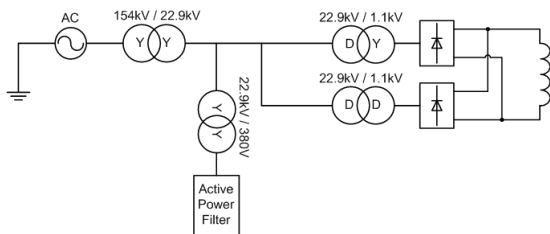


그림 3 KSTAR 전력 계통(PF7)  
Fig. 3 KSTAR Power system(PF7)

코일에 DC전압을 인가하기 위해 사용되는 정류기는 12펄스 정류기로 그림 4 (a)와 같이 11, 13차의 고조파 전류가 주로 발생하지만, 0.5차 단위(30Hz)의 FFT 결과를 보면 그림 4 (c)와 같이 0.5차 단위의 고조파를 함유하고 있다.

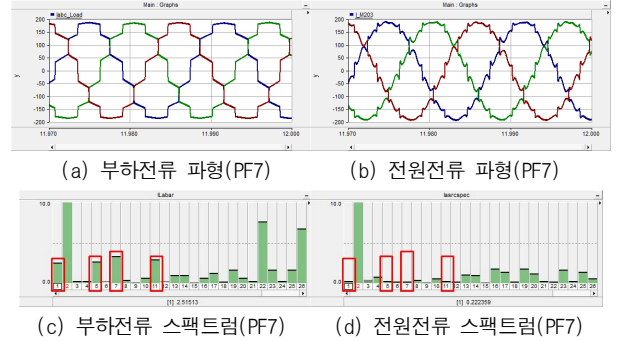


그림 4 KSTAR 부하 및 전원 전류

Fig. 4 KSTAR Load and Source current

본 논문에서 제안하는 방법으로 고조파 전류를 보상하면 그림 4 (d)와 같이 11, 13차 뿐만 아니라 0.5차 단위의 고조파도 보상이 되고 있는 것을 확인할 수 있다.

표 1 고조파 보상 전, 후 각 차수별 전류rms 비교

고조파	보상 전(kA)	보상 후(kA)	보상율(%)
0.5차(30Hz)	2.6098	0.1292	95.05
2.5차(150Hz)	2.5626	0.1120	95.63
3.5차(210Hz)	3.2446	0.0079	99.76
5.5차(330Hz)	2.9108	0.0764	97.38

표 1은 고조파의 각 차수별 전류 rms 값을 비교한다. 보상율은 95% 이상으로 준수한 성능을 나타내고 있다.

## 3. 결론

본 논문에서는 KSTAR 전력계통에서 발생하는 비정수, 비특성 고조파를 보상하는 방법을 제안하였다. 비정수, 비특성 고조파를 검출하기 위해 0.5차 단위의 DQ변환을 적용하였으며 이에 따른 전류제어기를 구성하였다. 또한 모의실험을 통해 KSTAR 전력계통에 발생하는 0.5차 단위의 비정수, 비특성 고조파 보상성능을 확인하였다. 보상율은 95%로 본 논문에서 제안하는 방법을 KSTAR 계통에 적용한다면 비정수, 비특성 고조파가 확대대는 현상을 저감시킬수 있을 것으로 기대된다.

이 논문은 2013년 정부(중소기업청) 구매조건부신제품개발사업 지원으로 수행된 연구임(S2151497)

## 참고 문헌

- [1] S. G. Jeong, M. H. Woo, "DSP Based Active Power Filter with Predictive Current Control", *IEEE IECON 21st International Conference*, vol. 1, pp. 645-650, 1995.
- [2] M. Liserre, F. Blaabjerg, S. Hansen, "Design and Control of an LCL Filter Based Three Phase Active Rectifier", *IEEE Transactions on industry applications*, vol. 41, pp. 1281-1291, 2005.
- [3] 설승기, *전기기기 제어론*, 홍릉과학출판사, 2009.
- [4] J. Jacobs, S. Schroder, R. W. de Doncker, "Shunt Hybrid Power Filter Control in Power Systems with Interharmonics", *Institute for Power Electronics and Electrical Drives*, pp. 264-269, 2002.