

불평형 부하의 평형화를 위한 STATCOM

임수생\*, 이은웅\*, 임용빈\*, 김홍권\*\*  
 충남대\*, 한국전력공사\*\*

STATCOM for Balancing Unbalanced Loads

Lim, Su-Saeng\*, Lee, Eun-Woong\*, Lim, Yong-Bin\*, Kim, Hong-Kweon\*\*  
 Chungnam Nat'l Univ.\* , KEPCO\*\*

Abstract

In this paper, STATCOM(static synchronous compensator : one of the custom power equipment) is proposed for balancing unbalanced loads.

Compensation current references are given by the analysis of the unbalanced 3-phase currents. And for detecting negative-sequence components, digital Butterworth LPF(low pass filter) is used. The predicted current controller in the synchronous rotating coordinates is also proposed.

Finally, the effectiveness of STATCOM is verified by the simulations for unbalanced loads.

그림 1처럼 abc축의 임의의 3상 변수를 qd0축으로 변환하면 식 (1)과 같다 [5].

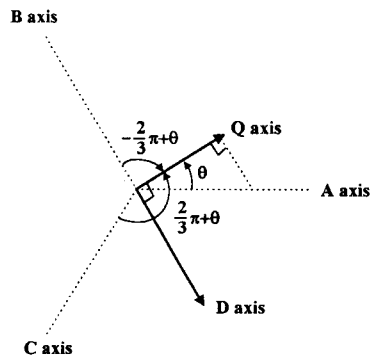


그림 1. abc-qd0축 변환

1. 서 론

만일 배전계통에 부하 불균형이 발생하면, 수전전압이 불평형하게 되어 역상분 전류가 흐르는 등 전력 품질을 떨어뜨리게 된다. 3상3선식 배전시스템에서의 역상분 전류는 교류 회전기를 과열시키고, 변압기를 포화시키며 정류기의 맥동을 일으킨다. 상전압을 불균일하게 만드는 전압 불평형은 가변속도 구동장치나 프로세스 제어기 등과 같은 민감성 부하를 오동작하게 만들고, 교류 회전기에 코킹토크를 유발하며, 3상 전력전자 설비에 비특성 고조파를 야기하고 제어시스템을 불안정하게 만든다 [1].

STATCOM은 기존의 조상설비보다 시스템의 동특성을 실시간으로 빠르게 보상함으로써 낮은 역률을 개선하거나 부하 불평형을 완화시킬 수 있도록 하여 전력품질의 저하로부터 수용가를 보호할 수 있다 [2,3,4].

본 연구에서는 불평형 3상 전류 해석을 통해 보상기준전류를 도출하고 역상분 전류를 검출하기 위한 3차 디지털 버터워스 저역통과필터를 제안한다. 또한 동기좌표축 예측전류제어기와 공간벡터 PWM 방식을 채용하여 보상응답이 빠른 동특성을 갖도록 한다. 마지막으로, STATCOM을 사용한 불평형부하의 평형화에 대한 시뮬레이션 결과를 제시한다.

2. 불평형 3상 전류 해석

$$\begin{bmatrix} f_q \\ f_d \\ f_0 \end{bmatrix} = [T_{qd0}] \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서,

$$[T_{qd0}] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) & \sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

qd0축이 전원의 각주파수  $\omega_e$ (rad/sec)로 회전할 때를 동기좌표축이라 하며, 이때 q축과 a축 사이의 각은  $\theta_e (= \omega_e t)$ 가 된다. 전원 각주파수  $\omega_e$ 로 회전하는 성분에 대해 동기좌표축 qd0변수는 직류값을 갖게 된다. q축 성분은 유효성분으로 나타나고 d축 성분은 무효성분으로 나타난다.

3상3선식 시스템에서 부하전류 기본파성분의 일반적인 표현은 식 (3)~(5)와 같이 정상분 기본파 성분  $i_{ap1}$ , 역상분 기본파 성분  $i_{an1}$ 의 합으로 표현할 수 있다.

$$i_{La} = i_{ap1} + i_{an1} \quad (3)$$

$$= I_{mp1} \cos(\omega t + \phi_{p1}) + I_{mn1} \cos(\omega t + \phi_{n1})$$

$$i_{Lb} = i_{bp1} + i_{bn1} \quad (4)$$

$$= I_{mp1} \cos(\omega t - \frac{2}{3} \pi + \phi_{p1}) + I_{mn1} \cos(\omega t + \frac{2}{3} \pi + \phi_{n1})$$

$$i_{Lc} = i_{cp1} + i_{cn1} \quad (5)$$

$$= I_{mp1} \cos(\omega t + \frac{2}{3} \pi + \phi_{p1}) + I_{mn1} \cos(\omega t - \frac{2}{3} \pi + \phi_{n1})$$

식 (3)~(5)의 3상 abc축 전류를 동기좌표축으로 변환하면, 식 (6)~(7)과 같이 abc축 부하전류의 기본파는 직류성분(정상분)과 2차 고조파 성분(역상분)이 된다.

$$i_{Lq}^e = i_{qp1}^e + i_{qn1}^e \quad (6)$$

$$= I_{mp1} \cos \phi_{p1} + I_{mn1} \cos(2\omega t + \phi_{p1})$$

$$i_{Ld}^e = i_{dp1}^e + i_{dn1}^e \quad (7)$$

$$= -I_{mp1} \sin \phi_{p1} + I_{mn1} \sin(2\omega t + \phi_{p1})$$

STATCOM이 불평형 부하를 평형화하기 위해서는 부하전류 중에서 정상분 유효전류  $i_{Lq1}^e$ 를 제외하고, 역상분전류 ( $i_{Lq1}^e + i_{Ld1}^e$ )를 제거해야 하기 때문에 식(8)~(9)과 같은 보상전류  $i_{Cq}^e$ ,  $i_{Cd}^e$ 를 발생해야 한다.

$$i_{Cq}^e = -(i_{Lq1}^e) \quad (8)$$

$$i_{Cd}^e = -(i_{Ld1}^e) \quad (9)$$

### 3. STATCOM 제어

STATCOM의 제어구성도는 그림 2와 같다. STATCOM의 제어시스템은 직류커패시터 전압을 일정하게 유지하는 직류링크전압 안정기, 부하전류로부터 보상전류명령을 계산하는 전류명령 계산회로, 빠른 동특성을 갖는 예측전류제어기로 된 컨버터전압 지령 연산회로, 그리고 전압선형이용률이 높은 공간벡터 PWM 회로로 구성된다.

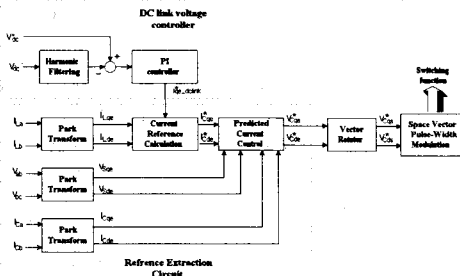


그림 2. STATCOM의 제어구성도

### 3.1 버티워쓰 저역통과 필터

불평형 부하의 역상분 전력을 보상하기 위해서는 부하의 역상분전류를 검출하여야 하는데, 샘플링한 q축 부하전류로부터 역상분전류를 검출하기 위해 사용되는 저역통과필터는 차단주파수가 60[Hz]이어야 하므로 본 연구에서는 40[Hz] 버티워쓰 저역통과필터를 사용하였다.

3차 버티워쓰 저역통과필터의 전달함수는 식 (10)과 같다.

$$H(z) = \frac{nz_0z^3 + nz_1z^2 + nz_2z + nz_3}{dz_0z^3 + dz_1z^2 + dz_2z + dz_3} \quad (10)$$

여기서,

$$[nz_0 \quad nz_1 \quad nz_2 \quad nz_3] \quad (11)$$

$$= 1E - 6 \times [1.125 \quad 3.374 \quad 3.374 \quad 1.125]$$

$$[dz_0 \quad dz_1 \quad dz_2 \quad dz_3]$$

$$= [1 \quad -2.958 \quad 2.917 \quad -0.959] \quad (12)$$

본 연구에서 사용한 3차 디지털 버티워쓰 저역통과 필터의 주파수 응답은 그림 3과 같다.

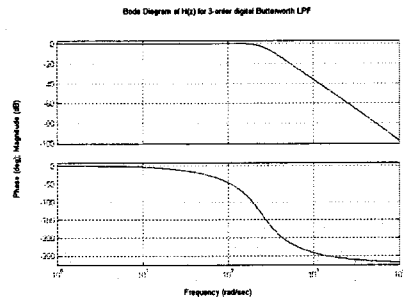


그림 3. 3차 버티워쓰 저역통과필터의 주파수 응답

### 3.3 동기좌표축 예측전류제어

STATCOM 제어의 핵심은 계통에 주입해야 하는 보상기준전류의 정확한 검출과 이를 근사적으로 구현하는 것이다. STATCOM의 전류추종능력은 매우 중요한 의미를 갖는데, 이점에서 근래 마이크로프로세서 제어의 일반화와 함께 부각되고 있는 예측전류 제어방식은 정상상태 특성과 잔류고조파 특성이 매우 우수하기 때문에 전류추종능력이 요구되는 STATCOM에 가장 적합한 방식이라 할 수 있다.

예측전류 제어방식이란 현재 n번째 샘플링구간의 전류오차를 (n+1)번째 샘플링 구간에서 0으로 만들 컨버터 출력전압의 공간벡터를 구하여 컨버터 출력전압 공간벡터를 구현하는 방식으로 필요한 전압벡터를 해석적으로 계산하여 인가하므로 전류오차를 실시간에 최소화시킨다. 그림 4는 예측전류제어에 의한 컨버터 기준전압의 연산알고리즘이다.

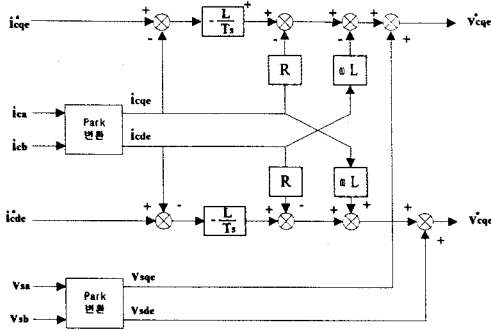


그림 4. 예측전류제어 연산부

#### 4. 시뮬레이션 결과

STATCOM의 사양은 표 1과 같다.

표 1. STATCOM의 기준치와 회로 파라미터

구분	명칭	기호	값
회로 파라미터	정격 보상용량	$S_C$	10[kVA]
	전원선간전압	$V_S$	220 [V]
	리액터	$L$	5 [mH]
제어 파라미터	직류전압 PI 제어기	$K_{pe}$ $K_{ie}$	$K_{pe} = 0.114$ $K_{ie} = 5.076$
	샘플링 시간	$T_s$	83.333 [ $\mu s$ ]

불평형부하보상로는 표 2와 같이 부하불평형이 가장 심한 단상불평형 부하로 정하였는데, 단상 부하는 a상과 b상에 연결되었다. 단상부하의 a상 및 b상 선전류의 크기는 같고 위상이 반대가 되고 c상 선전류는 0이 되며 정상분 전류와 역상분 전류의 크기는 a상선전류 크기의  $1/\sqrt{3}$ 배로 서로 같다. 불평형을 U는 식 (13)에 의해 150%가 된다.

$$U = \frac{\text{평균전류로부터 최대 편차 전류의 평균값}}{\text{평균전류}} \quad (13)$$

표 2. 불평형 부하의 사양

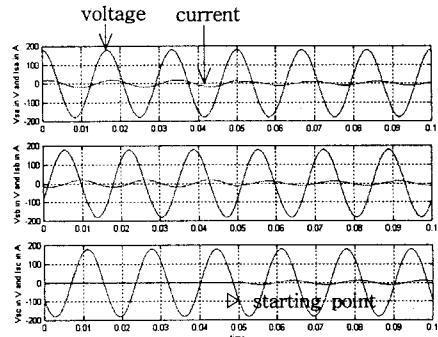
구분	항목	구성	용량 [kVA]	역률 [%]	불평형률 [%]
불평형부하		단상 부하	4	지상 86.6	150

그림 5에서 STATCOM이 0.05초이후에 보상을 시작하며, (a)는 abc상 전원전압과 전류전류, (b)는 abc상 STATCOM 보상전류를, (c)는 qd축 부하전류와 그 직류성분, (d)는 qd축 보상전류 명령과 보상전류를, (e)는 직류커패시터 전압과 커패시터충전 전류명령을 나타낸다.

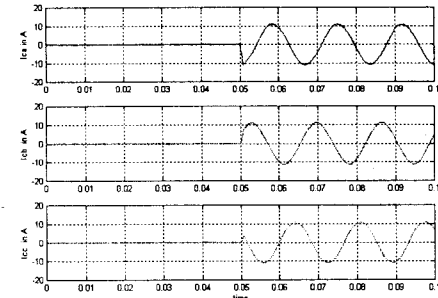
그림 5(a)에서 보상전(0.05초 이전)에는 a상과

b상의 위상차가 180°이고 c상 전류전류가 0이 되어 불평형이 극심하였는데 보상후(0.05초 이후)에는 전류전류가 3상평형전류로 평형화되었음을 알 수 있다. (b)는 STATCOM의 출력 보상전류 파형을 나타내는데, 단상 부하의 역상분 전류와 크기는 같고 위상이 반대인 전류를 출력함으로써 부하의 역상분 전류를 제거할 수 있게 된다.

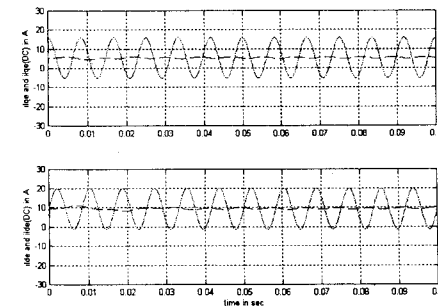
그림 5(c)에서 q축 및 d축 부하전류와 버터워스 저역통과필터를 사용하여 필터링된 부하전류의 직류분을 표시하는데, 제거해야 할 역상분전류는 동기좌표축에서 샘플링된 부하전류와 부하전류의 직류분의 차로 계산된다. (d)에서, q축 보상전류는 역상분 유효전류에 해당하는 q축 2고조파 전류가 되고, d축 보상전류는 역상분 무효전류인 d축 2고조파 전류가 됨을 알 수 있다.



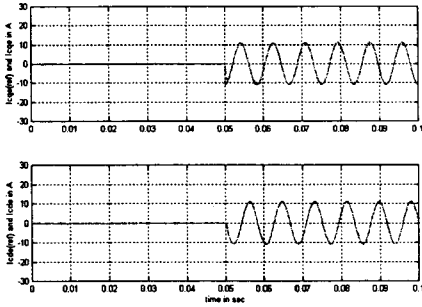
(a) abc상 전원전압과 전류전류



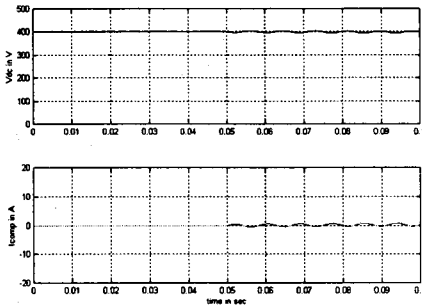
(b) abc상 STATCOM 보상전류



(c) qd축 부하전류와 그 직류성분



(d) qd축 보상전류 명령과 보상전류



(e) 직류커패시터 전압과 커패시터충전 전류명령

그림 5. 3상 불평형부하의 부하 평형화

3상 불평형 부하를 보상할 때의 순시유효전력, 순시무효전력의 변화를 그림 6에 표시하였다.

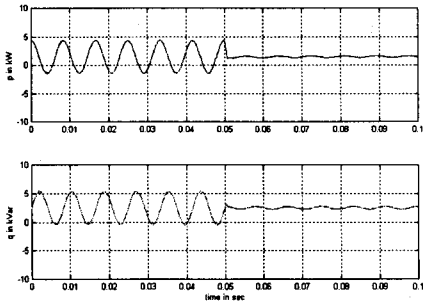


그림 6. 부하 평형화시의 순시전력 변화

그림 6에서, 2배차 고조파인 역상분 순시유효전력과 순시무효전력이 STATCOM보상직후 거의 0이 되었고, 단지 전원은 직류분인 정상분 순시유효전력과 정상분 순시무효전력만을 공급하므로 부하 불평형이 대부분 제거되었음을 알 수 있다.

STATCOM의 평형화 결과를 표 3에 요약하였다.

표 3. 불평형 부하의 Balacing 보상결과

항 목		구 분	보 상 전	보 상 후
		유효 전력 [kW]	정상분	1.47
	역상분	2.90	0.13	
무효 전력 [kVar]	정상분	2.49	2.47	
	역상분	2.90	0.32	
불평형률 (%)			150.0	12.4

## 5. 결 론

본 보고서에서는 자가변전설비용 STATCOM을 사용한 불평형 무효전력 보상에 대해 연구하였다.

먼저, 불평형 3상전류 해석을 통해서 역상분이 존재하는 3상3선식 시스템에서 기본파 부하전류에 대해 보상기준전류를 유도하였다. 버터워스 저역통과 필터를 사용하여 불평형부하의 부하전류로부터 역상분 전류를 검출하는 방법을 설명하고, 전류제어기로서 과도응답시간이나 정확도측면에서 최적의 성능을 나타내는 예측전류제어방식을 선정하였다.

수용가의 불평형부하 보상의 유효성을 입증하기 위하여, 불평형 부하로 단상 부하를 선정하여 각각 보상결과를 제시하였다.

STATCOM을 사용한 3상 불평형 부하의 부하 평형화결과, 부하의 역상분전류를 제거함으로써 불평형율이 대폭 개선되고 부하불평형을 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초 전력공학공동연구소 주관으로 수행되었음.

## 참고문헌

1. C. G. Hochgraf, R. H. Lasseter, "Static Compensator for Unbalanced System Using a Voltage source Inverter"
2. L Gyugyi, "Reactive Power generation and control by thyristor circuits", IEEE Trans on IA., Vol. 15, No. 5, pp. 521-532, Mar./Apr. 1989
3. Eun-Woong Lee, Su-Saeng Lim, et al, "Private-substation STATCOM for Improving the Power-factor and Filtering the Harmonics", ICEE '98, Vol. 1, pp. 938-941, July 21-25, 1998
4. 이은용, 임수생, 오영용, "자가변전설비용 STATCOM을 적용한 3상 유도전동기의 무효 전력 보상", 대한전기학회 전기기기연구회, 추계학술발표, pp. 52-56, 1998. 10
5. Chee-Mun Ong, Dynamic Simulation of Electric Machinery, Prentice hall PTR, 1998