불평형보상용 STATCOM의 역상분 전류 검출를 위한 디지털 버터워쓰 필터

임수생*, 이은웅*, 손홍관**, 김석곤***, 김준호*
충남대*, 전기연구소**, 전력연구원***

The Digital Butterworth Filter of STATCOM for detecting negative sequence components of Unbalanced Load currents

Lim Su-Saeng*, Lee Eun-Woong*, Son Hong-Kwan**, Kim Seok-Kon***, Kim Jun-Ho*
Chungnam Nat'l Univ*, KERI**, KEPRI***

Abstract - STATCOM(static synchronous compensator : one of the custom power equipment) can be used for balancing unbalanced loads.

Compensation current references are given by the analysis of the unbalanced 3-phase currents. And for detecting negative- sequence components, a digital Butterworth Filter is designed. Finally, a negative sequence component of an unbalanced load current is acquired using the digital Butterworth Filter.

1. 서 론

STATCOM은 기존의 조상설비보다 시스템의 동특성을 실시간으로 빠르게 보상함으로써 낮은 역률을 개선하거나 부하 불평형을 완화시킬 수 있어 전력품질의 저하로부터 수용가를 보호할 수 있다 [1,2].

기본파 불평형 부하전류은 동기좌표축에서 직류성분인 정상분과 2고조파성분인 역상분의 합인데, 역상분전류를 검출하기 위해서는 부하전류로부터 정상분전류를 필터링해야 한다.

본 연구에서는 불평형 3상 전류 해석을 통해 보상기 준전류를 도출하고, 역상분전류를 검출하기 위한 버터워쓰 저역통과필터를 최적화한다. 끝으로 버터워쓰 저역통과필터의 응답특성과 필터링 특성을 검토한다.

2. 불평형 3상 전류 해석

그림 1처럼 abc축의 임의의 3상 변수를 qd0변수로 변환하면 식 (1)과 같다.

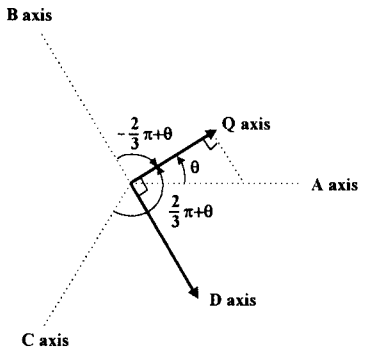


그림 1. abc-qd0축 변환

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

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 ω_e[rad/sec]로 회전할 때를 동기좌표축이라 하며, 이때 q축과 a축 사이의 각은 $\theta_e(=\omega_e t)$가 된다. 전원 각주파수 ω_e로 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 기본파성분 i_{apl}, 역상분 기본파성분 i_{anl}의 합으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} i_{La} &= i_{apl} + i_{anl} \\ &= I_{mpl}\cos(\omega t+\phi_{pl}) + I_{mnl}\cos(\omega t+\phi_{nl}) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} i_{Lb} &= i_{bpl} + i_{bnl} \\ &= I_{mpl}\cos(\omega t-\frac{2}{3}\pi+\phi_{pl}) + I_{mnl}\cos(\omega t+\frac{2}{3}\pi+\phi_{nl}) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} i_{Lc} &= i_{cpl} + i_{cnl} \\ &= I_{mpl}\cos(\omega t+\frac{2}{3}\pi+\phi_{pl}) + I_{mnl}\cos(\omega t-\frac{2}{3}\pi+\phi_{nl}) \end{aligned} \quad (5)$$

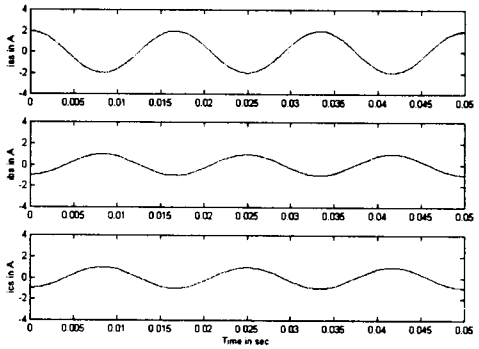
식 (3)~(5)의 3상 abc축 전류를 동기좌표축으로 변환하면, 식 (6)~(7)과 같이 abc축 부하전류의 기본파는 직류성분(정상분)과 2차 고조파 성분(역상분)이 된다.

$$\begin{aligned} i^{e}_{Lq} &= i^{e}_{qpl} + i^{e}_{qnl} \\ &= I_{mpl}\cos\phi_{pl} + I_{mnl}\cos(2\omega t+\phi_{pl}) \end{aligned} \quad (6)$$

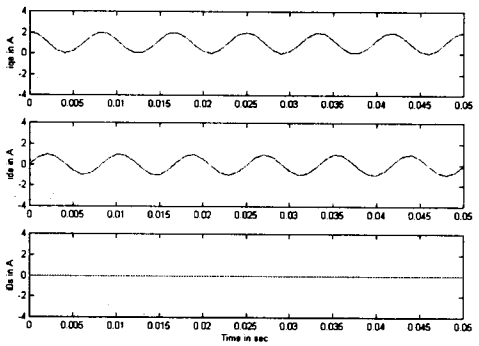
$$\begin{aligned} i^{e}_{Ld} &= i^{e}_{dpl} + i^{e}_{dnl} \\ &= -I_{mpl}\sin\phi_{pl} + I_{mnl}\sin(2\omega t+\phi_{pl}) \end{aligned} \quad (7)$$

즉, 동기좌표축상에서 기본파의 q축전류는 전류유효성분의 크기를, 기본파의 d축 전류는 전류무효성분의 크기를 나타낸다. 식 (6)~(7)에서 기본파 성분을 동기좌표계로 변환하면 일정한 크기를 갖는 DC성분(정상분의

qd성분)과 2고조파(역상분의 qd성분)의 합으로 표현된다. 그림 2는 불평형율이 100%이고 역률이 1인 3상 기본파 전류의 동기좌표축 변환을 보여준다. 그림 2(b)에서 q축 전류 i_q^e는 직류성분인 정상분 유효전류와 2고조파인 역상분 유효전류의 합이고, d축 전류 i_d^e는 직류성분인 정상분 무효전류와 2고조파인 역상분 무효전류로 되어 있는데 이 경우 역률이 1이므로 q축 전류의 직류성분은 0이다.



(a) 역상분을 함유한 3상 abc축 전류



(b) 그림 (a)전류의 qd축 변환

그림 2. 역상분을 함유한 기본파 전류의 qd축 변환

STATCOM이 불평형 부하를 평형화하기 위해서는 부하전류 중에서 정상분 유효전류 i_{Lqp1}^e를 제외하고, 역상분전류 $(i_{Lqn1}^e + i_{Ldn1}^e)$를 제거해야 하기 때문에 식 (8)~(9)과 같은 보상전류 i_{Cq}^e, i_{Cd}^e를 발생해야 한다.

$$i_{Cq}^e = -(i_{Lqn1}^e) \quad (8)$$

$$i_{Cd}^e = -(i_{Ldn1}^e) \quad (9)$$

3. qd축 역상분 전류 검출을 위한 디지털 필터

불평형 부하의 역상분 전력을 보상하기 위해서는 부하의 역상분전류를 검출하여야 하는데, 샘플링한 qd축 부하전류로부터 역상분전류를 검출하기 위해 사용되는 저역통과필터는 버터워쓰 저역통과필터를 사용하였다[3,4]. 버터워쓰 저역통과필터는 저파수영역에서 진폭이 평탄한고 주파수의 증가에 따라 단조롭게 감소하는 특성을 가지므로 불평형 보상에 적절한 역상분전류 필터링특성을 가지고 있다.

n차 버터워쓰 저역통과필터는 전달함수의 일반형은 식 (10)과 같다.

$$H(s) = \frac{1}{\Pi_{i=1}^{n}(s-s_i)} = \frac{1}{(s-s_1)(s-s_1)\cdots(s-s_n)} \quad (10)$$

여기서,

$$s_i = e^{j\pi\frac{2i+n-1}{2n}} = \cos\left(\pi\frac{2i+n-1}{2n}\right) + j\sin\left(\pi\frac{2i+n-1}{2n}\right) \quad (11)$$

ω_1이상의 주파수에서 A_1보다 낮은 진폭을 갖는 버터워쓰 저역통과필터의 차수는 식 (12)에 의해 구해진다.

$$n = \frac{\log(10^{-A_1/10}-1)}{2\log\left(\frac{\omega_1}{\omega_c}\right)} \quad (12)$$

여기서, ω_c : 3-dB 주파수

ω_1 : 진폭이 A_1이하로 처음 떨어지는 주파수

s영역의 식 (1)를 쌍선형변환(bilinear transform)을 사용하여 z영역으로 변화하면 3차 버터워쓰 저역통과필터의 전달함수는 식 (13)과 같다.

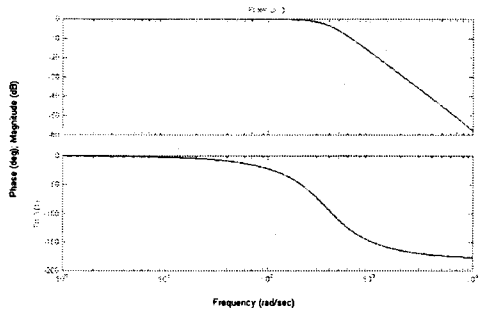
$$H(z) = \frac{b_0+b_1z^{-1}+b_2z^{-2}+b_3z^{-3}}{a_0+a_1z^{-1}+a_2z^{-2}+a_3z^{-3}} \quad (13)$$

여기서,

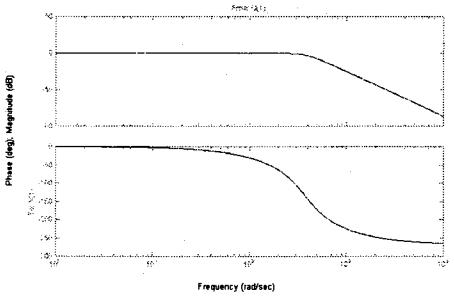
$[b_0\ b_1\ b_2\ b_3] = [3.757\quad 1.127\quad 1.127\quad 3.757]\times 10^{-6}$

$[a_0\ a_1\ a_2\ a_3] = [1.000\quad -2.937\quad 2.876\quad -0.939]$

디지털 버터워쓰 저역통과필터의 주파수 응답은 그림 3과 같다.



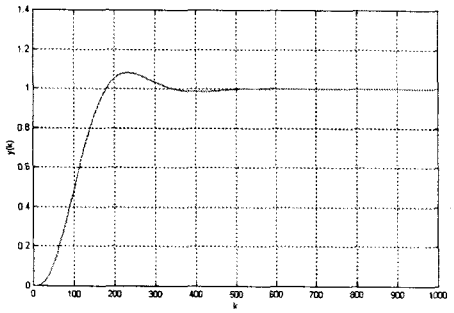
(a) 차수 n = 2



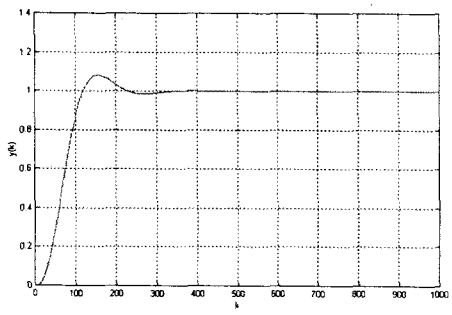
(b) 차수 n = 3

그림 3. 버터워쓰 저역통과필터의 주파수 응답

그리고, 버터워쓰 저역통과필터의 스텝응답은 그림 4와 같다. 예측전류제어기를 사용할 때, 저역통과필터의 과도시간이 STATCOM의 보상전류명령 과도시간의 대부분을 소모한다. 따라서, 그림 4(b)에서 차단주파수가 60[Hz]인 경우 스텝응답이 1싸이클이내(k=200)에 정상상태에 도달하므로 STATCOM이 1싸이클 이내의 빠른 전류보상능력을 가짐을 알 수 있다.



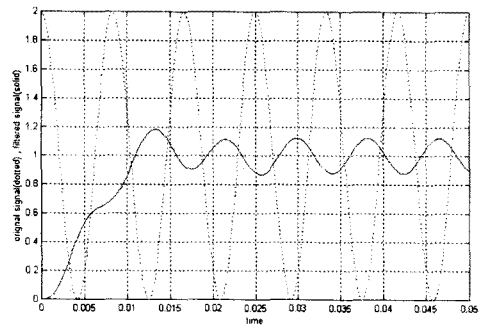
(a) 차단주파수 f_c = 40[Hz]



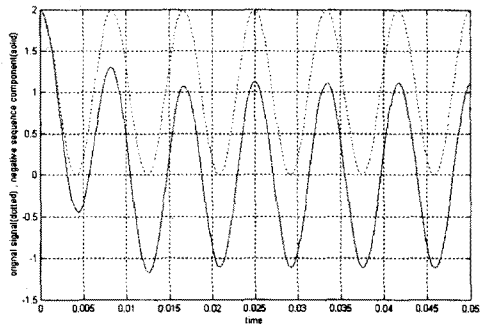
(b) 차단주파수 f_c = 60[Hz]

그림 4. 3차 버터워쓰 저역통과필터의 스텝 응답

그림 5에서 버터워스 저역통과필터를 사용하여 부하전류로부터 정상분전류를 필터링하고 역상분전류를 검출하였다. 그림 5(b)에서 부하전류로부터 1싸이클이내에 역상분전류를 검출할 수 있음을 알 수 있다. 식 (8)-(9)와 같이 그림 5(b)의 역상분전류를 보상기준전류로 설정하면 불평형부하의 역상분 전력을 제거하여 부하불평형을 해소할 수 있다.



(a) 정상분 전류



(b) 역상분 전류

그림 5. 버터워스저역통과필터를 이용한 역상분전류 검출

3. 결 론

동기좌표축에서 불평형 3상 전류 해석을 통해 qd축 보상기준전류를 도출하였고, 2고조파인 역상분전류를 검출하기 위한 버터워쓰 저역통과필터를 최적화하였다.

버터워스 저역통과필터를 사용하여 부하전류로부터 1싸이클이내에 역상분전류를 검출할 수 있었다. 검출된 역상분전류를 보상기준전류로 놓으면 불평형부하의 역상분 전력을 제거할 수 있다.

[참 고 문 헌]

[1] 임수생, 이은웅, 김홍권, "불평형 부하의 평형화를 위한 STATCOM 제어", 대한전기학회 논문지, Vol. 49 B, No. 8, pp. 522-528, , 2000. 8

[2] 임수생, 이은웅, 최재영, 김홍권, "수용가용 STATCOM을 이용한 3상 유도전동기의 이론적인 역률보상", 대한전기학회논문지, Vol.49.B, No.7, pp.475-482, 2000.7

[3] C. Britton Rorabaugh, "Digital Filter Designer's Handbook", McGraw-Hill, Inc., pp. 65-72, 1993

[4] Vinay K. Ingle, "Digital Signal Processing Using MATLAB V.4", PWS Publisng Company, pp. 182-219, 1997