

# DSTATCOM의 개선된 전원전류 보상 방법

박주현, 최종우  
경북대학교

## DSTATCOM improved source current compensation method

Ju-Hyun Park, Jong-Woo Choi  
Kyungpook National University

### ABSTRACT

본 논문은 3상 3선식 계통의 불평형 선형부하에서 p-q 이론을 이용한 DSTATCOM의 개선된 전류 지령 방법을 제시한다. 전역 통과 필터를 이용하여 부하측 유효전력의 교류성분을 추출하는 것이 기존의 지역 통과 필터를 응용한 것보다 개선된 전류 지령을 만들 수 있음을 보인다. 가상 실험 (Matlab/Simulink)을 통해 제안한 전원 전류 보상 방법의 타당성을 검증한다.

### 1. 서론

배전 계통에서 불평형 선형부하, 심하게 왜곡된 비선형부하는 인근의 배전선로에 전압의 순간적인 급강하 또는 급상승, 고조파를 유발시킨다. 아크로나 전기로, 대용량 전동기를 사용하는 압연공장, 전력전자 기기를 사용하는 가변속 전동기 부하등이 그 예인데, 이러한 부하들은 전압의 순간적인 급강하 또는 급상승 그리고 고조파를 유발하게 된다. 이러한 대용량의 변동 부하나 비선형 부하에 일반적으로 설치되는 DSTATCOM (Distribution STATic Compensator)은 순간적으로 발생하는 고조파 및 전압의 변동과 같은 외란에 신속하게 대처함으로써 배전 선로를 보호하는 역할을 한다.

DSTATCOM은 변압기를 통해서 배전용 급전선에 병렬로 연결되며 부하의 특성에 기인하여 발생하는 고조파를 효율적으로 경감시킬 수 있는 능동형 전력필터의 기능을 하며 선로 전압과 90도의 위상차가 나는 전류의 유입을 통해 무효전력을 제어함으로써 전압 및 역율을 조정한다.

기존 DSTATCOM의 전류 지령은 p-q 이론을<sup>[1][2]</sup> 바탕으로 하는데 이 이론은 1983년에 Akagi와 그의 동료들에 의해 3상 계통의 순시전력이론으로 처음 소개되었다. p-q 이론은 3상 3선 계통에 적용하기 위해 개발된 이론이지만 3상4선 계통에도 적용은 가능하다. 미국 및 유럽 등지의 여러 나라에서는 3상 4선 회로가 산업용의 저전압 배전계통에 널리 사용되지만 한국과 일본에서는 3상 3선 회로가 6.6kV 배전계통과 산업용의 저전압 배전계통에 채택되므로 본 논문은 3상 3선 회로를 토대로 하였다.

본 논문은 p-q 이론과 전역 통과 필터를<sup>[3]</sup> 이용하여 부하측 유효전력의 교류성분을 추출하는 것이 기존의 지역 통과 필터를 응용하여 보상 전류 지령을 만드는 것보다 개선된 보상 전류 지령을 만들 수 있음을 보이고 가상 실험 (Matlab/Simulink)을 통해 제안한 전원 전류 보상 방법의 타당성을 검증한다.

### 2. 본론

#### 2.1 p-q 이론

그림 1은 영상분 전압 및 전류를 포함하지 않는 3상 3선 계통의 회로구성을 보인다.

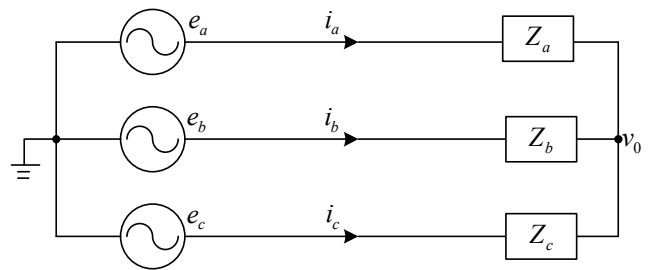


그림 1. 3상 3선 계통

영상분이 없는 경우 a-b-c 좌표의 3상 순시전압 및 전류는 다음 식과 같이  $\alpha - \beta$  좌표의 값들로 변환될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

순시유효전력과 순시무효전력은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta \\ -e_\beta & e_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

지령 전력에 대한 지령 전류는 식 (3)을 역변환하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha}^* \\ i_{c\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} \begin{bmatrix} e_\alpha & -e_\beta \\ e_\beta & e_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p^* \\ q^* \end{bmatrix} \quad (4)$$

보상 목적에 따라 지령 전력을 달리하는데 전원측 불평형, 고조파 전류와 순시무효전력을 보상하기 위해서는  $p^* = \tilde{p}$ ,  $q^* = q$ 에 해당하는 지령 전력을 인가한다.<sup>[1]</sup>

## 2.2 기존의 저역 통과 필터를 응용한 전류지령 방법

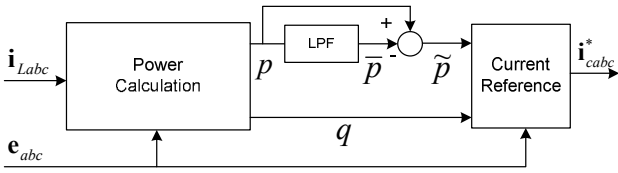


그림 2. 기존의 저역통과필터를 응용한 전류 지령 블록

그림 2는 기존의 저역 통과 필터를 응용한 전류 지령 방법이다.  $e_{abc}$  는 전원측 3상 전압,  $i_{Labc}$  는 부하측 3상 전류,  $i_{cabc}^*$  는 3상 보상 전류이다. 전원측 불평형, 고조파 전류와 순시무효전력을 보상하기 위해  $p^* = \tilde{p}$ ,  $q^* = q$  에 해당하는 지령 전력을 인가했고 p-q 이론에 따라 전력을 계산하고 해당 지령 전력에 따라 보상전류를 인가하였다. 그리고 저역 통과 필터를 응용해 부하측 유효 전력의 교류 성분을 추출하여 전원 전류의 불평형 성분, 고조파 성분을 보상하였다. 하지만 전원전류가 평형이 되지 못하고 전원측 유효전력에 리플이 존재하게 된다.

## 2.3 전역 통과 필터를 이용한 전류지령 방법

3상 3선식 계통의 불평형 선형 부하측의 유효전력은  $\bar{p}_L$  (직류 성분)과  $\tilde{p}_L$  (교류 성분)으로 구성되고, 이는 왜곡된 전원 전압의 동기좌표계 d-q축에 나타나는 리플에<sup>[3]</sup> 대해 유사성을 가진다. 이상적인 전원 전압하에서 불평형 선형부하단의 전력에 전원 주파수의 2배에 해당하는 리플이 지배적으로 발생하므로 부하단 전류는 전원 전압의 정상분에 해당하는 전류와 역상분에 해당하는 전류, 그리고 무시할 수 있을 만큼의 고조파 전류들로 구성됨을 알 수 있다. 그리고 전원전압이 이상적인 경우 전원전압과 같은 주파수를 가지는 정상분 전류만이  $\bar{p}_L$  에 영향을 주고, 전원전압과 다른 주파수를 가지는 역상분 전류와 고조파 전류들은  $\tilde{p}_L$  에 영향을 준다. 부하 전류의 역상분 성분은 그림 3과 같이 제거할 수 있다.

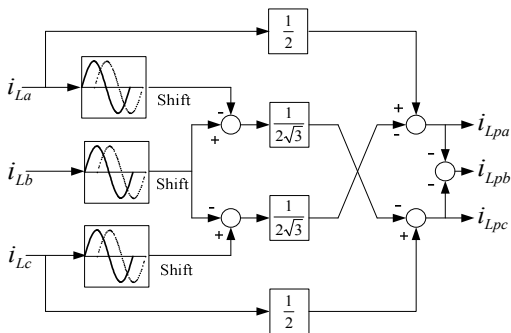


그림 3. 전역통과필터를 사용한 역상분 전류 제거 블록 선도

그림 3에 설명된 역상분 전류의 제거를 위한 식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} i_{Lpa} \\ i_{Lpb} \\ i_{Lpc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ a^2 & 1 & a \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서  $a = \exp(j\frac{2\pi}{3})$ .

3상 3선식 계통에 전원 전압이 이상적인 경우 불평형 선형 부하측에 전달되는  $\bar{p}_L$ ,  $\tilde{p}_L$  은 전역 통과 필터를 통해 얻은 정상분 전류를  $\alpha - \beta$  좌표의 값들로 변환한 후 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{p}_L &= e_\alpha i_{Lp\alpha} + e_\beta i_{Lp\beta} \\ \tilde{p}_L &= p - \bar{p}_L \end{aligned} \quad (6)$$

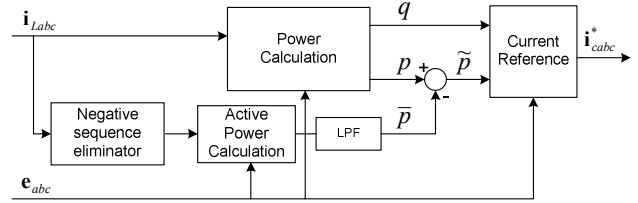


그림 4. 제안된 전류 지령기

그림 4에서 부하전류에 역상분 이외의 5,7,11...차 고조파 전류에 대한 대책으로 저역 통과 필터를 추가하여  $\bar{p}$  의 교류성분을 최소화하였다.

## 3. 가상실험 결과

본 논문의 타당성을 검증하기 위해 아래와 같은 시스템 아래에서 가상실험을 하였다.

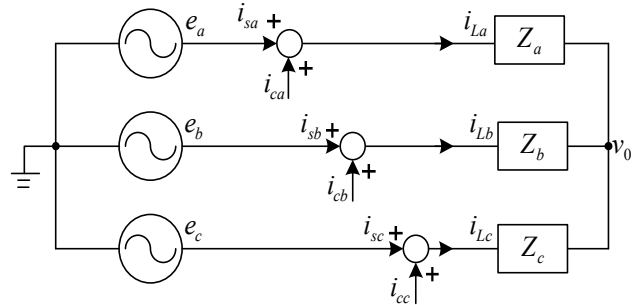


그림 5. 시스템 토폴로지

$i_{sabc}$  는 전원전류,  $i_{Labc}$  는 부하전류,  $i_{cabc}$  는 보상전류이다. 선로전압 ( $e_{abc}$ )은 3상 평형이고 220[V], 주파수는 60[Hz]이다. a상 부하단 임피던스는 저항 1.84 [ $\Omega$ ], 인덕턴스 1[mH]이며 b, c상 부하단 임피던스는 저항 4.84 [ $\Omega$ ], 인덕턴스 2[mH]의 불평형 선형부하이다. 전역 통과 필터를 통해  $\bar{p}_L$  을 추출하는데 한주기 정도의 시간만이 걸리지만 보상은 0.3초부터 이루어 지도록 하였다.

전원에서 부하에 전원 주파수의 2배의 리플성분을 가지는 전력을 공급하는 것을 그림 6를 통해 확인하였다. 그림 7을 통해 기존의 방법은 리플이 존재하는  $\bar{p}_L$  을 추출하고, 전역 통과 필터를 사용하여 역상분 전류를 제거하는 방법은 리플이 없는  $\bar{p}_L$  를 추출할 수 있음을 확인하였다. 그림 8의 정상 상태 전원 전류를 통해 기존의 방법으로 보상된 전원 전류는 불평형이지만, 제안된 전류 지령기를 통해 보상된 전원 전류는 평형이 되었음을 확인할 수 있다. 그림 9에서 기존의 방법으로도 순시무효전력보상은 할 수 있으나 부하측에 공급되는

유효전력에 리플이 존재함을 확인하였고, 그림 10의 제안된 방법으로 부하측에 리플이 없는 유효전력을 공급할 수 있음을 확인하였다.

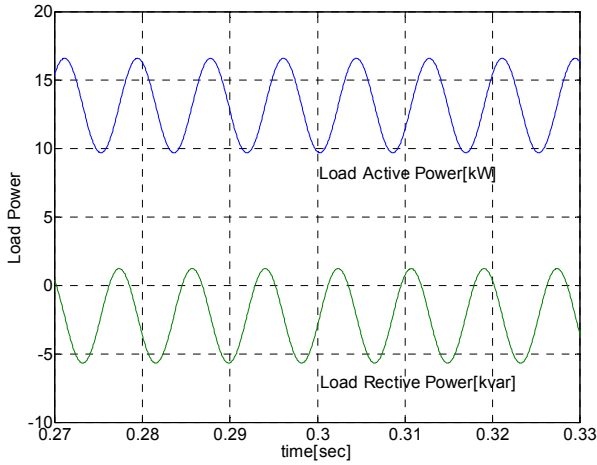


그림 6. 부하측 유효전력, 무효전력

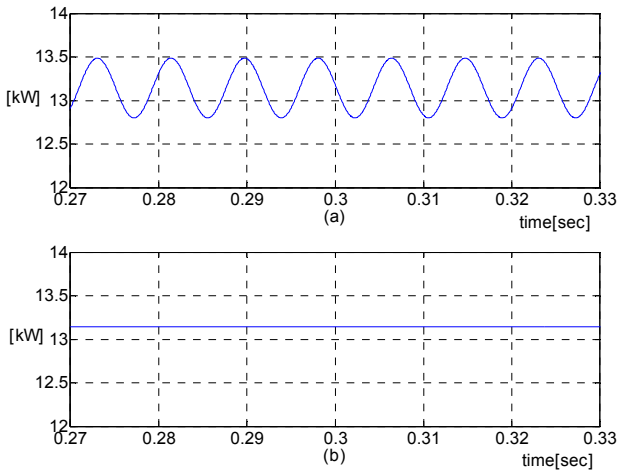


그림 7. 부하측  $\bar{p}_L$

- (a) 기존의 저역 통과 필터를 이용한  $\bar{p}_L$
- (b) 전역 통과 필터를 이용한  $\bar{p}_L$

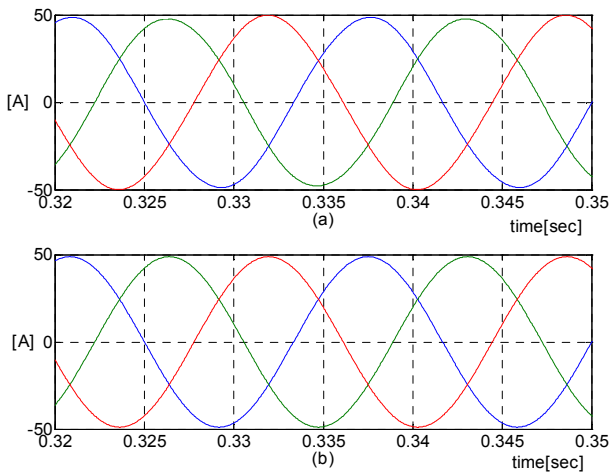


그림 8. 전원측 3상 전류

- (a) 기존의 저역 통과 필터를 이용시 전원 전류
- (b) 전역 통과 필터를 이용시 전원전류

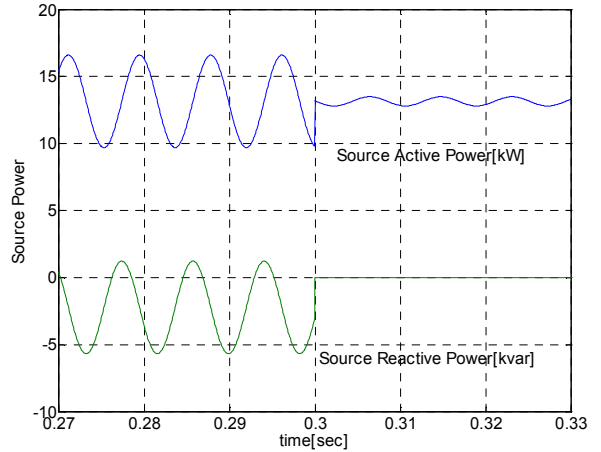


그림 9. 기존의 저역 통과 필터 이용시 전원측 유효전력, 무효전력

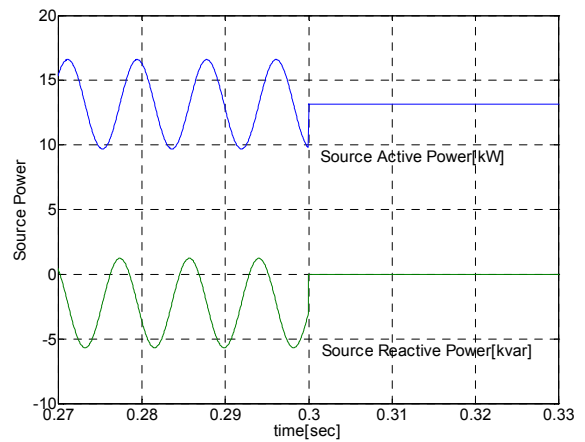


그림 10. 전역 통과 필터를 이용시 전원측 유효전력, 무효전력

#### 4. 결 론

3상 3선식 계통의 불평형 선형 부하에서 p-q 이론과 전역 통과 필터를 이용하여 전원측의 불평형 성분 및 고조파 성분, 순시무효전력을 보상하는 것이 기존의 저역 통과 필터를 응용하는 방법보다 개선됨을 제시하고 그 결과를 가상 실험을 통해 입증하였다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2005-7-067) 주관으로 수행된 과제임.

#### 참 고 문 헌

- [1] Z.P. Fang, G.W. Ott, and D.J. Adams, "Harmonic and Reactive power compensation based on the generalized instantaneous reactive power theory for three-phase four-wire systems," IEEE Trans. Power Electron, vol. 13, no. 3, pp. 1174-1181, Jul. 1998
- [2] H.Kim, H.Akagi, "The Instantaneous Power Theory Based on Mapping Matrices in Three-Phase Four-wire Systems," Conf.rec.Pcc-Nagaoka, pp.361-366, 1997
- [3] 이상준 "순간 전압 강하 보상용 직렬 보상기를 위한 새로운 PLL 및 전압 제어기에 관한 연구" 서울대 박사학위 논문, pp 50-58, 2003