전원 불평형과 역률을 보상하는 직렬형 능동전력필터

장정익, 이동춘, 석줄기
영남대학교 전기공학과

Series Active Power Filters for Source Voltage Unbalance Compensation and Power Factor Correction

Jeong-Ik Jang, Dong-Choon Lee, Jul-Ki Seok
Department of Electrical Engineering, Yeungnam University

ABSTRACT

This paper presents a unified control scheme for series-type active power filters combined with shunt passive filters for the source voltage unbalance compensation and the power factor correction simultaneously. The power factor correction is achieved by controlling the amplitude of reactive power current in a series filter as zero in a synchronously rotating reference frame. The proposed algorithm successfully compensates the source voltage unbalance and the power factor. The validity of the proposed scheme has been verified by simulation for a 3-kVA hybrid active power filter system.

1. 서 론

최근 전력전자 기술의 발달로 다이오드 정류기나 전력용 컨버터와 같은 비선형부하의 사용이 증가함에 따라 전력품질에 대한 관심이 고조되고 있다. 비선형부하의 사용은 전원 시스템에 무효전력 및 고조파전류를 발생시키는 등 많은 문제점을 발생시키는데, 최근에 이러한 문제점을 해결하기 위해서 직렬형 능동필터에 대한 연구가 활발히 진행되었다[1]-[3]. 그러나 직렬능동필터만의 사용은 보상기의 용량이 커지는 단점과 병렬수동필터에 비해 고조파전류의 보상성능이 떨어진다는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 성능 대 가격의 비가 다른 방법에 비해 우수한 복합형 능동필터에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다[3],[4]. 그러나, 복합형 능동필터의 경우 전력단에 무효전력을 발생시켜 역률을 악화시킨다는 문제점을 가지고 있다. 이에 복합형 능동필터를 이용하여 역률까지 보상하려는 연구가 수행되었지만 여기서는 역률 보상시에 직류링크로 유입되는 유효전력을 간과하였다[4].

본 논문에서는 역률 보상시에 직류링크로 유입되는 유효전력을 고려한 전원전압의 불평형과 고조파 전류 및 역률을 동시에 보상하는 통합형 능동필터를 제안한다. 3[kVA] 통합형 능동필터에 제안한 알고리즘을 적용하여 전원전압의 불평형과 전원전류의 고조파 및 역률 보상이 동시에 이루어짐을 확인한다.

2. 전원전압 불평형 및 고조파 전류 보상

그림 1은 전원전압 불평형, 고조파 전류 및 역률 보상을 위해 제안된 통합형 능동전력필터를 나타낸다. PWM 인버터를 이용하여 전력단에 전원전압 불평형과 비선형 부하에 의해 생기는 고조파 전류를 보상한다. 또한 인버터의 용량을 줄이기 위해 사용되는 병렬수동필터에 의해서 발생하는 무효전력을 보상한다.

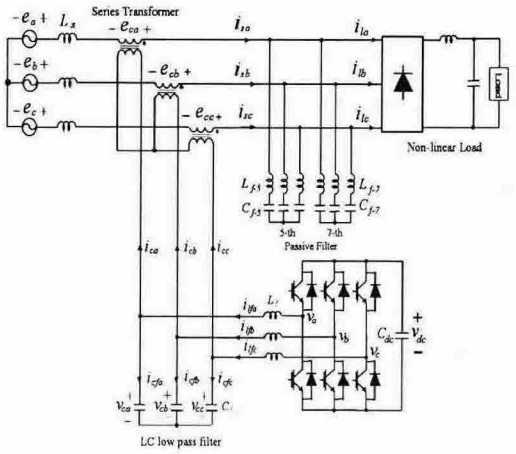

그림 1 병렬 수동필터를 갖는 통합형 능동 전력 필터의 전력회로도

Fig 1. Power circuit of series active power filter with passive filters

그러나 이 능동필터의 경우 무효전력 보상시에 인버터로 유입되는 유효전력을 고려하지 않았다. 이전의 연구처럼 다이오드 정류기를 사용할 경우 그 유효전력을 제어할 수 없게 된다.[4]

3. 역률보상 및 보상시의 전력흐름

3.1 역률보상

전원전압 불평형/고조파 전류 및 역률을 보상하기 위해서 전력단에 주입하는 보상전압의 벡터도를 그림 2에 나타내었다. v_L은 전력단 전압이며, v_{c-hu}는 불평형/고조파 전류 보상전압이다.

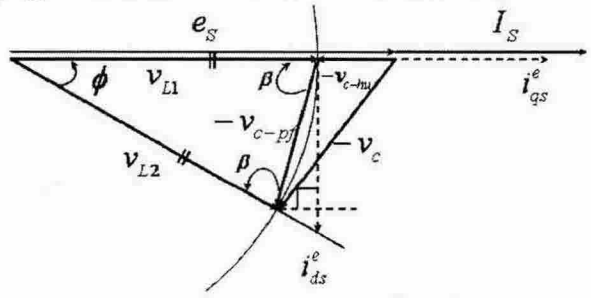

그림 2 역률 보상시의 전력단 전압 및 전류 페이저도
Fig. 2. Phase diagram of line voltage and current at power factor control

역률 1제어는 전원전압과 부하단 전압사이에 d축 전류를 0으로 제어하기 위한 보상전압을 주입하여 전원전류의 위상을 전원전압의 위상에 일치시키는 것이다. 그림 2의 벡터도에서 역률보상 전압 v_{c-pf}는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v^e_{c-pf}=2v_L\sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \tag{1}$$

여기서, v^e_{c-pf}를 d-q축으로 나누면 아래와 같다.

$$v^e_{c-pf-d}=2v_L\sin\left(\frac{\phi}{2}\right)\sin\beta \tag{2}$$

$$v^e_{c-pf-q}=2v_L\sin\left(\frac{\phi}{2}\right)\cos\beta \tag{3}$$

그림 2와 위 식으로부터 불평형, 고조파 및 역률을 보상하는 최종 주입전압 v_c는 아래와 같다.

$$v_c=\sqrt{(v^e_{c-pf-d})^2+(v_{c-hu}+v^e_{c-pf-q})^2} \tag{4}$$

식 (4)에서 볼 수 있듯이 역률보상을 포함하게 될 경우에는 전체 보상전압이 증가한다. 동일한 정격의 능동필터에서 보상 가능한 역률각은 식 (5)로 결정된다.

$$\alpha=\cos^{-1}\left(1-\frac{\frac{V^2_{dc}}{3}-v^2_{c-hu}}{2v_L(v_L+v_{c-hu})}\right) \tag{5}$$

위 식에서 볼 수 있듯이 능동필터가 불평형과 고조파 전류를 보상하기 위해서 직류링크전압을 모두 사용하게 될 경우에는 역률을 보상할 여유전압이 없어 역률보상이 불가하다. 이는 제어시에 주의하여할 점이다.

2.3 역률보상 제어시 능동필터의 전력흐름

직렬형 능동필터의 경우 병렬형 능동필터와 달리 무효전력을 보상할 때 유효전력이 능동필터로 유입하게 된다. 그 유효전력 p의 크기는 아래와 같다.[5]

$$p=v_{c-pf}I_S\sin(\frac{\phi}{2}) \tag{6}$$

이 유효전력에 의해서 능동필터의 직류링크전압이 상승하게 된다. 따라서 본 논문에서는 일정한 직류링크전압 확보를 위해 그림 3과 같이 PWM 컨버터를 연결하여 직류링크전압을 일정하게 제어한다.

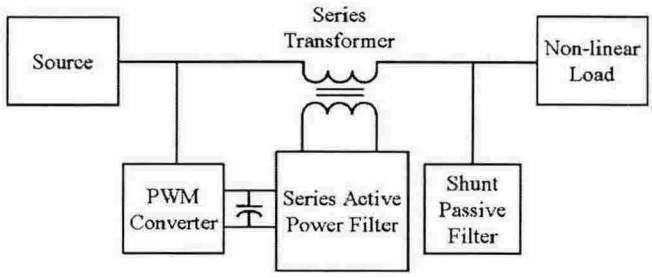

그림 3 통합형 능동 전력필터의 전력회로도
Fig. 3. Power circuit of unified active power filter

4. 시뮬레이션 및 검토

제시된 통합형 능동전력필터의 제어 알고리즘의 타당성을 입증하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 병렬수동필터는 5차, 7차 고조파 필터로 필터 인덕터와 커패시터는 각각 3[mH]-100[uF], 1.4[mH]-100[uF]이며, 직류링크 커패시터는 1000[uF]이다. 인버터 출력 필터는 5[mH]-5[uF], 1[kVA] 직렬 변압기는 1:1의 변압비를 가진다. 1초 후에 a상에 5[%]의 불평형 전압을 인가한다.

그림 4는 전압 불평형/고조파 전류를 보상한 결과를 나타낸다. (a)는 a상 5[%] 불평형시 3상 전원전압을 보여주고 있으며, (b)는 불평형이 보상된 부하 전압을 나타내고 있다. (c)는 비선형 부하 전류를 나타낸다. (d)는 전원전류로 비선형 부하에 의한 고조파 영향이 없음을 보여주고 있다.

그림 5는 역률 보상시 유입 유효전력을 고려에 따른 직류링크전압의 변화를 나타낸다. (a)는 a상의 전원 및 부하 전압을 나타낸다. (b)는 전원전압과 전원전류를 나타내며, 역률 1제어가 잘 됨을 볼 수 있다. (c)는 동기좌표계 상의 전원전류로 역률보상 기간 동안 d축 전류가 0으로 제어됨을 볼 수 있다. (d)는 다이오드 정류기를 이용하여 직류링크전압을 제어할 수 없는 경우의 v_{dc}이고, (e)는 PWM 컨버터를 이용하여 직류링크로 유입되는 유효전력을 전원으로 궤환시키면서 전압을 제어하는 경우이다.

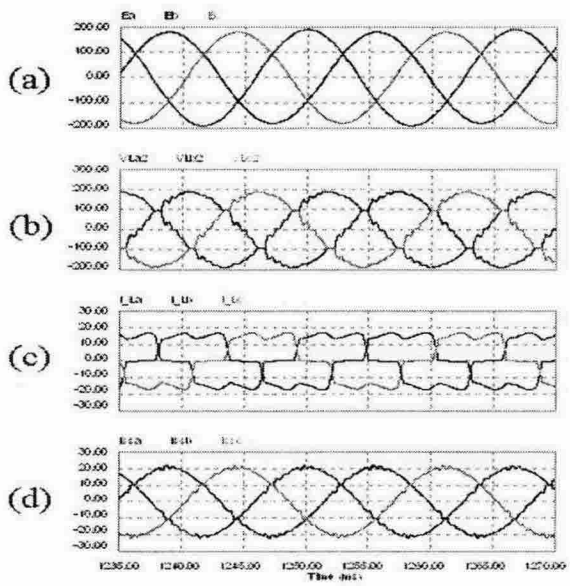

그림 4 전원 전압 불평형/고조파 전류 보상 (a) 전원전압 (b) 부하전압 (c) 부하전류 (d) 전원전류

Fig. 4. Unbalance voltage/current harmonics compensation (a) source voltage (b) load voltage (c) load current (d) source current

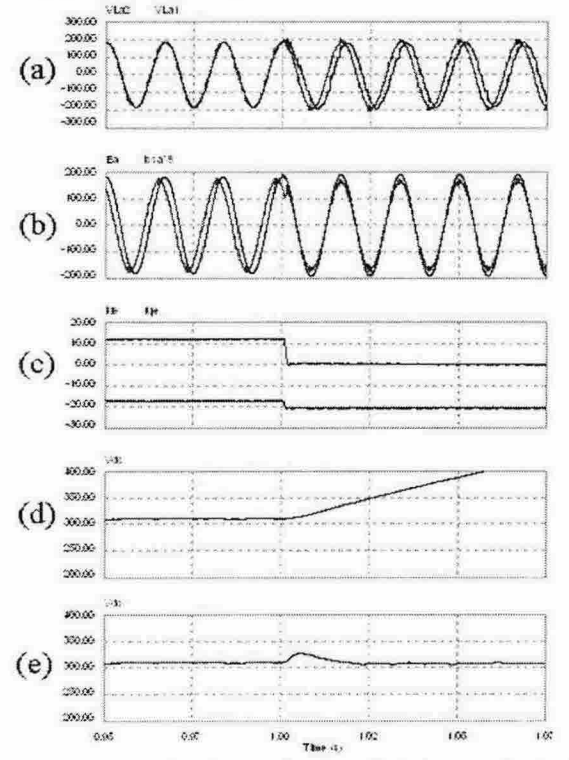

그림 5 유입 유효전력을 고려에 따른 불평형/고조파 및 역률 보상 결과 (a) 전원 및 부하전압 (b) 전원 전압 및 전류 (c) d-q축 전류 (d) dc-link 전압 비제어시 (d) dc-link전압 제어시

Fig. 5. Unbalance voltage/current harmonics compensation with power factor control according to return power (a) source and load current (b) source voltage and current (c) d-q axis current (d) without dc-link voltage control (e) with dc-link voltage control

이 시뮬레이션 결과를 통해 본 연구에서 제안한 제어기법이 효과적인 역률 보상과 함께 전원 전압의 불평형 및 고조파 전류에 대해서도 양호한 보상이 이루어짐을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 불평형 보상 및 고조파 전류 보상 뿐만아니라 역률까지 동시에 보상하는 통합형 능동 전력필터를 구성하였다. 불평형 전원전압으로부터 정상분을 추출하기 위해 크기 감쇠 및 위상지연이 없는 전차통과필터(all-pass filter)가 사용되었고, 병렬수동필터로 인해 발생되는 진상 역률 현상을 보상하기 위하여 별도의 제어루프를 구성하였는데, 전류제어기에서 무효전력의 크기를 영으로 제어함으로써 역률을 보상하였다. 또한 역률 보상시 발생하는 직류링크전압 상승 부분을 PWM 컨버터를 이용하여 전원으로 궤환시켰다. 제시된 통합형 능동필터 제어 알고리즘에 대한 시뮬레이션을 통하여 전원전압의 불평형과 전원전류의 고조파 및 역률 보상이 적절히 이루어짐을 확인할 수 있었다.

이 논문은 산업자원부의 (R-2003-B-061)지원에 의하여 기초전력연구원 주관으로 수행된 과제임.

참 고 문 헌

[1] F. Z. Peng, H. Akagi, and A. Nabae, "A new approach to harmonic compensation in power systems a combined system of shunt passive and series active filters," IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. 26, no. 6, 1990, pp. 983-990.

[2] A. Campos, G. Joos, P. D. Ziogas, and J. F. Lindsay, "Analysis and design of a series voltage unbalance compensator based on a three-phase VSI operating with unbalanced switching functions," IEEE Trans. on Power Elec., vol. 9, no. 3, 1994, pp. 269-274.

[3] G. M. Lee, D. C. Lee and J. K. Seok, "Control of series active power filters compensating for source voltage unbalance and current harmonics", IEEE Trans. Ind. Electron, vol. 51, no. 1, pp.132-139, 2004.

[4] 이 종건, ,석 줄기, 이 동춘, "전원 전압의 불평형과 고조파 전류 보상 및 역률 개선 기능을 가지는 능동전력필터," 전력전자학술대회 논문집, vol. 2, 2004, pp. 787-790.

[5] J. W. Dixon, G. Venegas, and L.A. Moran, "A series active power filter based on a sinusoidal current -controlled voltage source inverter," IEEE Trans. on Ind. Electron. vol. 44, no. 5, 1997, pp. 612-620.