

고조파 저감과 입력역률 개선을 위한 전력용 능동필터의 설계

박해원, 최성관, 김 호, *김병진, 전희중
 송실대학교 전기공학과, *현대중공업 기전연구소

The Design of Active Power Filter with the Performance of Harmonic Suppression and Input Power Factor Correction

Hae-Won Park, Seong-Kwan Choi, Ho Kim, *Beung-Jin Kim, Hee-Jong Jeon
 Dept. of Electrical Eng. Soong-Sil Univ. and *HHI Mech. Research Inst.

Abstract - In this paper, voltage controlled APF(Active Power Filter) is introduced to improve power factor and reduce harmonic generated from nonlinear load. The voltage controlled APF which is consisted of inverter and passive filter operates with nonlinear load simultaneously. According to the results of simulation, it is proved that the proposed system has the performance of improving power factor and reducing harmonics.

1. 서 론

최근 전력용 반도체 소자에 관한 기술혁신과 더불어 반도체 소자가 소형화, 고성능화 되면서 전력전자산업의 발달을 이룩할 수 있었던 반면에 전원품질의 질을 저하시키는 문제점을 야기하고 있다.[1][2]

능동전력필터는 제어기가 전류기준신호를 발생하는가 전압기준신호를 발생하는가에 따라서 전류제어형과 전압제어형으로 나눌 수 있다. 전류제어형은 보상전류를 전류제어기로부터 직접 제어 하므로 전압제어형에 비하여 속응성이 좋다는 장점을 가지나 제어기 구현이 어렵고 전압변동에 민감한 단점을 갖는다. 전압제어형 능동전력필터는 전류제어형에 비해 지령에 대한 느린 응답특성을 가지나 전압변동에 강한 특징을 갖는다.[3][4]

전압제어방식은 부하전압 모양을 강제로 정현적으로 유지하는 방식으로 고조파 전류 왜곡 및 고조파 전압 왜곡의 저감과 역률 개선의 효과를 기대할 수 있다. 또한 제어기 구성이 간단하기 때문에 전류제어형 능동전력필터에 비해 구현이 용이하고 안전성 면에서 장점을 갖는다. 이러한 전압제어방식은 고조파 저감용 필터 이외에 전압변동에 민감한 부하의 보호 시스템으로 활용 가능하다.[5]

본 논문에서는 제안된 전압제어형 능동전력필터의 여러 가지 성능을 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통하여 전압제어형 능동전력필터의 우수성을 입증하였다.

2. 본 론

2.1 전압제어형 능동전력필터 원리

전압제어형 능동전력필터는 그림 1과 같이 상용전원과 능동전력필터 사이에 링크 인덕터를 삽입한 형태이다. 능동전력필터는 상용전원과 병렬로 부하에 연결된 또 다른 전압원으로 간주되어진다. 만약 상용전압과 능동전력필터의 전압이 정현적이면 두 전압원 사이의 전류 역시 정현적인 형태를 취한다. 즉, 부하의 조건에 무관하게 두 전압원 사이에 흐르는 입력전류(i_{in})는 고조파가 없는 파형이 된다. 즉, 능동전력필터는 부하에 필요한 무효전력을 공급하며 상용전원 측에서는 부하에 필요한 유효전력을 공급하게 된다. 따라서 입력전류는 전압과 동상이며 고조파가 포함되지 않게 된다.

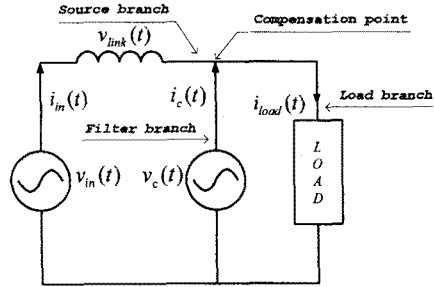


그림 1 전압제어형 능동전력필터의 등가회로

2.1.1 고조파 저감

상용전원의 입력전류의 크기와 위상의 제어는 상용전원의 전압이나 능동전력필터의 전압을 제어함으로 가능하다. 그러나 상용전원 전압의 제어는 불가능하므로 능동전력필터의 출력전압의 위상과 크기를 조절함으로 입력전류를 제어할 수 있다. 전원전압을 극좌표형식(polar form)으로 다음과 같이 표현하고

$$V_{in} = V_{in} \angle 0 \quad (2.1)$$

또한 능동전력필터의 출력전압이 다음과 같다고 가정한다면

$$V_c = V_c \angle -\alpha \quad (2.2)$$

그림 1의 입력전류를 다음과 같이 정의하고

$$i_{in}(t) = I_{in} \sin(\omega t - \delta) \quad (2.3)$$

입력전류는 전압방정식(KVL)을 이용하여 쉽게 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} I_{in} &= \frac{V_{in} \angle 0 - V_c \angle -\alpha}{j\omega L_{link}} \\ &= \frac{V_{in} - V_c(\cos \alpha - j \sin \alpha)}{j\omega L_{link}} \\ &= \frac{-V_c \sin \alpha + j(V_c \cos \alpha - V_{in})}{\omega L_{link}} \end{aligned} \quad (2.4)$$

여기서

$$\begin{aligned} I_{in} &= \frac{1}{\omega L_{link}} \sqrt{(V_c \sin(\alpha))^2 + (V_c \cos(\alpha) - V_{in})^2} \\ \delta &= \sin^{-1} \frac{V_c \cos(\alpha) - V_{in}}{\sqrt{(V_c \sin(\alpha))^2 + (V_c \cos(\alpha) - V_{in})^2}} \end{aligned}$$

앞서 구해진 입력전압과 입력전류를 통해서 무효전력 및 유효전력은 다음과 같이 구해진다.

$$P_{in} = \frac{V_{in} V_c}{2X_{link}} \sin(\alpha) \quad (2.5)$$

$$Q_{in} = \frac{V_{in}}{2X_{link}} (V_{in} - V_c \cos(\alpha)) \quad (2.6)$$

이와 같이 제어를 한다면 식(2.4)와 같이 고조파가 없는 입력전류를 얻을 수 있다.

2.1.2 역률제어

단위 역률을 얻기 위해 무효전력은 영값을 가져야 한다. 즉, 식(2.6)으로 표현되는 무효전력을 없애기 위해 다음과 같은 단위역률 조건을 만족해야 한다.

$$V_{in} = V_c \cos(\alpha) \quad (2.7)$$

단위역률을 유지하는 경우에 입력전류는 식(2.4)와 식(2.7)을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$I_{in} = \frac{1}{\omega L_{link}} V_{in} = \frac{1}{X_{link}} V_c \sin(\alpha) \quad (2.8)$$

능동전력필터의 스위칭 손실이 없다고 가정하고 캐패시터의 전압이 충분히 높은 상태를 가정하면 전원은 부하에 필요한 유효전력만을 공급한다. 따라서 입력전류는 전압과 동상인 기본파 성분만을 갖게 된다.

$$I_{in} = I_{in1} \cos(\theta_1) \quad (2.9)$$

앞서 언급한 단위역률 조건식에 대입하면

$$\sin(\alpha) = \frac{I_{in1} \cos(\theta_1) X_{link}}{V_c} \quad (2.10)$$

이 식을 이용하여 전원전압과 능동전력필터의 출력전압과의 위상차는 다음과 같이 표현 가능하다.

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{I_{in1} \cos(\theta_1) X_{link}}{V_c} \right) \quad (2.11)$$

능동전력필터 출력전압의 크기는 다음과 같이 표현 가능하다.

$$V_c = \sqrt{V_{in}^2 + (I_{in1} X_{link})^2} \quad (2.12)$$

그러므로 능동전력필터의 출력전압의 크기와 위상을 조절하여 단위 역률제어가 가능하다.

2.2 전압제어형 능동전력필터 구성

본 절에서는 무효전력을 보상하는 기준전압을 발생시키는 전압제어형 능동전력필터를 제시하였다.

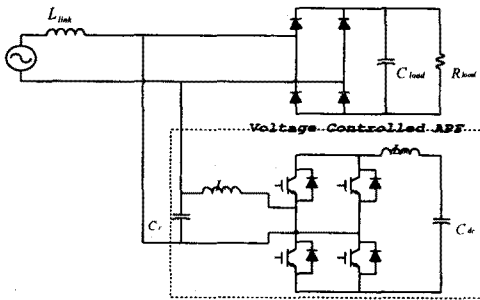


그림 2 전압형 능동전력필터의 구조

제안된 능동전력필터는 그림 2와 같이 인버터, 전력저장용 콘덴서 그리고 출력 파형 개선용 수동필터로 구성

되었다. 본 연구에서는 고조파를 유발시키는 원인으로 단상 다이오드 정류기를 비 선형 부하로 사용하였다. 전압제어방식을 사용하므로 상용전원과 능동전력필터 사이에 링크 인덕터를 삽입하였다.

인버터는 단상으로 구성하였고 환류 다이오드를 스위칭 소자와 병렬로 부착하였다. 이상적으로는 능동전력필터의 전력손실은 없으나 스위칭 주파수가 높아짐에 따라 스위칭 손실로 기인한 전력손실이 발생된다. 이러한 손실은 전력저장용 콘덴서의 전압강하를 유발시킨다. 이러한 경우 위상각을 조절하여 콘덴서의 전압을 재충전할 수 있다. 즉 상용 전원측으로부터 환류 다이오드를 통하여 전력저장용 콘덴서로 전력을 축전 할 수 있다. 따라서 제안된 인버터는 전력저장용 콘덴서의 충전기 역할도 한다.

능동전력필터의 출력단에 부가된 수동 필터는 능동전력필터의 출력파형 개선을 위한 것이다. 능동전력필터의 출력에는 고주파의 PWM 스위칭을 포함하므로 오히려 더 많은 고조파를 유발시킬 수 있다. 따라서 수동필터를 이용하여 스위칭 고조파를 저감시키고 능동전력필터의 출력 전압 파형을 정현적으로 개선시켰다.

2.3 전압제어형 능동필터의 전력제어

본 절에서는 전압제어형 능동전력필터 제어기에 관하여 논한다. 제어기는 크게 유효전력 제어기, 무효전력 제어기 그리고 파형 개선 제어기로 구성하였다.

무효전력제어기는 입력전압과 전류의 위상차이를 검출하여 공급해야할 무효전력의 크기를 결정한다. 결정된 무효전력의 크기에 따라서 무효전력제어기는 능동전력필터의 출력전압의 크기를 조절함으로써 무효전력제어를 수행한다. 또한 능동전력필터에 설치된 콘덴서의 전압크기를 이용하여 유효전력의 상태를 관측한다. 관측된 유효전력의 상태에 따라서 유효전력제어기는 능동전력필터의 위상제어를 통하여 유효제어를 수행한다. 유효전력제어기와 무효전력제어기는 병렬로 위치하여 출력되어야할 전압의 위상지령, α^* 와 크기지령, $|v_m^*|$ 을 각각 결정하여 지령 전압 파형을 발생한다.

능동전력필터의 출력전압은 임피던스의 불일치로 인하여 왜곡이 발생할 수 있다. 이러한 왜곡을 막기 위해서 능동전력필터의 출력전압의 파형을 개선할 파형 개선 제어기를 설계하였다. 파형 개선 제어기는 능동전력필터의 출력전압, $v_c(t)$ 과 능동전력필터 출력전압 지령값, $v_c^*(t)$ 의 오차를 비례 제어기가 보상한다. 이러한 과정을 통해서 발생된 능동전력필터의 출력전압은 고속 PWM 스위칭에 의해 다수의 스위칭 노이즈를 포함한다. 이런 경우 능동전력필터가 오히려 노이즈 발생기의 역할을 하게된다. 따라서 능동전력필터의 출력단에 스위칭 노이즈를 저감하기 위한 파형 개선용 수동필터를 설치한다.

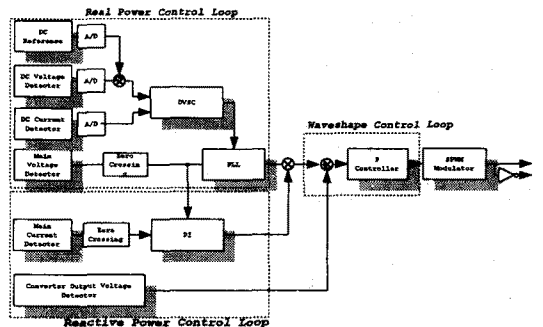


그림 3 전체 제어기 블럭도

3. 실험 및 결과 고찰

그림 4는 부하인가시 전압제어형 능동전력필터의 입력 전압과 부하전압의 관계를 나타낸다. 부하가 유효전력을 소비함에 상용전원에서부터 부하에 유효전력을 공급해야 하므로 부하전압과 입력전압의 위상차(α)를 발생시킨다. 또한 부하전압의 크기를 입력전압의 크기에 비해 크게 운전하므로 부하에 필요한 무효전력 성분을 공급한다. 즉, 전압제어형은 부하전압의 위상과 크기를 제어하여 유효전력과 무효전력을 제어할 수 있다.

그림 5는 전압제어형 능동전력필터의 입력전류와 직류 링크 단 전압이다. 능동전력필터가 동작함에 따라서 직류 링크 단 전압이 증가되고 입력전류의 파형이 개선됨을 확인할 수 있다. 과도기를 지난 후 유효전력제어기는 능동전력필터의 직류 단 전압을 일정하게 유지한다.

그림 6은 전압제어형 능동전력필터의 입력전압과 전류를 함께 나타내고 있다. (a)는 입력전압으로 (b)의 입력전류와 동상을 유지하고 있다. 본 연구에서 설계된 무효전력제어기는 입력 전압과 전류를 입력받아 능동전력필터의 크기를 조정하여 역률을 제어하였다. 앞서 언급한 전류제어형 능동전력필터의 역할 개선이 이루어짐과 같이 전압제어형 능동전력필터 역시 부하에 필요한 무효전력을 보상함으로써 상용전원은 유효전력성분만을 공급하여 역할 개선이 이루어짐을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 전압제어형 능동전력필터를 다루었다. 전력전자 소자의 사용이 급증함에 전력전자 소자의 스위칭이나 강제 전류로 인한 고조파 발생과 역률 저하의 유발시킨다. 역률 보상과 고조파저감에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔고 그 중에 능동전력필터가 가장 가능성이 있는 대안으로 제시하고 있다. 또한 능동전력필터 출력 전압의 개선을 위해 수동필터를 구성하였고 링크 인덕터를 상용전원과 능동전력필터 사이에 설치하여 입력전압의 전압변동을 막을 수 있었다. 본 논문에서 소개된 전압제어방식은 전류제어에 비해 입력전압변동에 강인한 장점을 갖는다. 또한 간단한 위상제어 방식을 통하여 제어기 구성을 간략화 시킬 수 있다.

다양한 시뮬레이션과 실험을 통하여 고조파 저감, 역률 개선 그리고 파형개선의 효과를 얻을 수 있었다. 제안된 기술은 무정전 전원장치나 배전계통의 역률 조정기 등에도 적용되리라 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Hirofumi Akagi, "New trends in active filters for power conditioning," IEEE Transactions on Industry application, vol. 32, no. 6, pp. 1312-1322, Nov./Dec. 1996.
- [2] B. Singh, K. Al-Haddad, and A. Chandra, "A review of active filters for power quality improvement," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 46, no. 5, pp. 960-971, Oct. 1999.
- [3] S. J. Huang et al, "New Phase shift control circuit for a voltage-control active power filter," Int. J. Electronics, vol. 86, no. 4, pp. 475-485, 1999.
- [4] H. L. Jou, K. D. Wu, and J. C. Wu, "A new parallel processing UPS with the performance of harmonic suppression and reactive power compensation," Int. J. Electronics, vol. 83, no. 5, pp. 667-684, 1997.
- [5] J. C. Wu and H. L. Jou, "A new UPS scheme provides harmonic suppression and input power factor correction," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 42, no. 6, pp. 629-635, Dec. 1995.

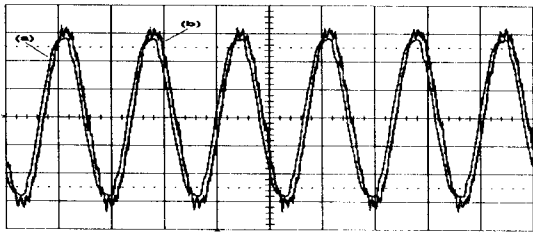


그림 4 부하인가시 전압제어형 능동전력필터(a)입력 전압(50V/div) (b)부하전압(50V/div, 10ms/div)

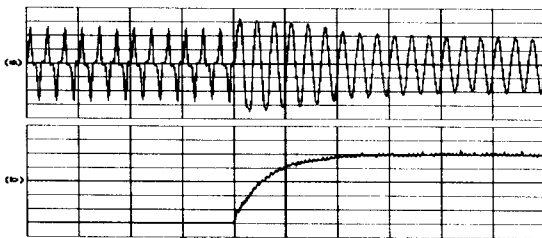


그림 5 전압제어형 능동전력필터의(a)입력전류(3A/div, 50ms/div), (b)직류링크단 전압(30V/div)

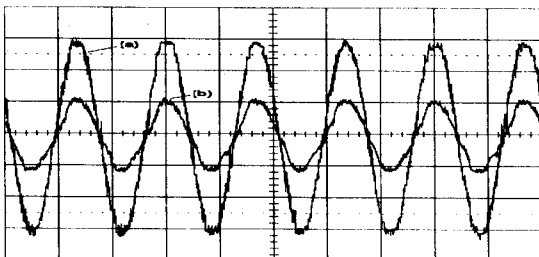


그림 6 전압제어형 능동전력필터의 (a)입력전압 (50V/div) (b)전류(5A/div, 10ms/div)