

DVSC를 이용한 개선된 APF의 설계

박해원, 김상우, *한운동, 김병진, 전희중
 송실대학교 전기공학과, *충주대학교 전기공학과

Design of Improved Active Power Filter using Discrete Variable Structure Control

Hae-Won Park, Sang-Woo Kim, *Wun-Dong Han, Beung-Jin Kim, Hee-Jong Jeon
 Dept. of Electrical Eng. Soong-Sil Univ. and *Choong-Ju Nat'l Univ.

Abstract - In this paper, voltage control 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 산업계에서 전력전자 장치의 사용이 확대됨에 따라서 전력계통내의 비정현전류와 전압의 발생이 증가되고 있다. LC로 구성된 수동필터는 구조가 간단하고 저가이므로 전력계통의 고조파 전류의 저감과 역률개선을 위해 사용되어왔다. 그러나 수동필터의 특성은 부하와 전원의 임피던스에 매우 민감하게 영향을 받는다. 따라서 수동필터는 필터와 부하의 수동 요소와 전원측의 파라미터 변화에 따라서 성능이 저하될 수 있다. 또한 많은 고조파전류에 대해서 L이나 C가 포화를 일으킬 수 있다는 문제점을 갖는다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 능동필터를 이용한 방법이 제시되고 있다.[1][2]

전압형 능동전력필터의 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.

본 논문에서는 전압형 인버터를 부하와 병렬로 설치한 전압형 병렬 능동전력필터를 사용하였다. 제어기는 무효전력을 보상하는 기준전압을 발생시키는 전압제어형 능동전력필터를 이용하였다.[4] 제안된 시스템의 빠른 응답특성을 갖기 위해 이산가변구조 전압제어기를 제시하였다. 본 논문에서는 능동전력필터의 무효 전력 제어기, 유효전력 제어기 그리고 파형 개선용 수동필터에 관하여 논하였다. 유효전력제어기의 설계는 근사 슬라이딩 모드(Quasi-sliding mode)를 만족시키는 전압제어기를 설계하였다. 제안하는 이산 가변구조 전압제어기는 과도상태에서 빠른 동적응답을 갖으며 허용하는 범위내의 외란에 대해서 강인성을 지니게 된다. 또한 근사 슬라이딩 모드와 정상상태에서 오차의 범위를 제한할 수 있으므로 정확성이 보장되며 간단하게 설계할 수 있다.

전압제어형 능동전력필터의 여러 가지 성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 전류제어형 능동전력필터와 비교하여 전압제어형 능동전력필터의 우수성을 입증하였다.

2. 본 론

2.1 전압제어형 능동전력필터

본 절에서는 무효전력을 보상하는 기준전압을 발생시키는 전압제어형 능동전력필터를 제시하였다.

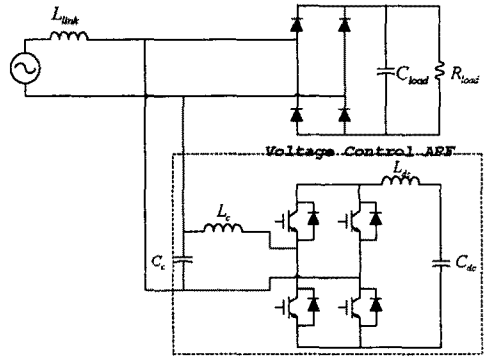


그림 1 전압형 능동전력필터의 구조

제안된 능동전력필터는 그림 1과 같이 인버터, 전력저장용 콘덴서 그리고 출력 파형 개선용 수동필터로 구성되었다. 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 상용전원측으로 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.

2.2 전압제어형 능동필터의 전력제어

본 절에서는 전압제어형 능동전력필터 제어기에 관하여 논한다. 제어기는 크게 유효전력 제어기, 무효전력 제어기 그리고 파형 개선 제어기로 구성하였다. 그림 2는 제안된 전체 제어기의 구성도이다.

입력전압과 전류의 위상차이를 검출하여 공급해야 할 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 출력되어야 할 전압의 위상지령 α^* 과 크기지령 $|v_m^*|$ 을 각각 결정하여 지령전압 파형을 발생한다.

능동전력필터의 출력전압은 임피던스의 불일치로 인하여 왜곡이 발생할 수 있다. 이러한 왜곡을 막기 위해서 능동전력필터의 출력전압의 파형을 개선할 파형 개선제어기를 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 파형개선용 수동필터를 설치한다.

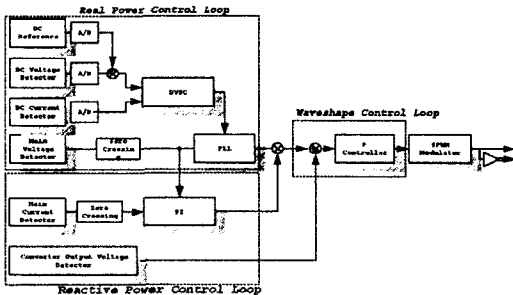


그림 2 전체 제어기 블록도

2.3 이산가변구조 제어기의 설계

시스템의 구조는 인가된 입력에 의해 결정되는 시스템의 동적 특성을 말한다. 가변구조제어(VSC: Variable Structure Control)는 제한된 상태벡터의 특정한 상태에 대하여 서로 다른 불연속적인 제어입력을 가함으로써 구조를 전환 하는 제어를 말하며 하나의 시스템에서 서로 다른 구조가 갖는 장점을 이용하여 원하는 제어 목적을 달성하고자 하는 것이다.

가변구조제어기는 빠른 응답 특성을 가지며 외란에 강인하고 안정적인 동작특성을 가지고 있으므로 능동전력필터에 적용하는데 적합한 성질을 갖추었다.

현재는 디지털 프로세서에 의해 제어 시스템이 구현되는 추세이며 상대적으로 긴 샘플링 주기와 스위칭 소자의 주파수 한계를 고려할 때 기존에 연구 되어오던 가변구조제어는 이산시간영역에서 설계되어지는 것이 바람직하다.

능동전력필터의 전력부를 모델링하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_1 &= v_{dc}^* - v_{dc} \\ x_2 &= i_{dc} \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$\dot{x}_1 = -\frac{1}{C_{dc}} x_2$$

이와 같은 상태변수를 이용하면 레갈레이팅 문제로 변

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_c \mathbf{x} + \Delta \mathbf{A}_c \mathbf{x} + \mathbf{b}_c \frac{1}{\cos \alpha} + \mathbf{f}_c \quad (2.2)$$

$$\text{단, } \mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, \mathbf{A}_c = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{C_d} \\ -\frac{1}{L_d} & -\frac{R}{L_d} \end{bmatrix}, \mathbf{b}_c = \begin{bmatrix} 0 \\ V_i/L_d \end{bmatrix}$$

여기서 $\Delta \mathbf{A}_c \mathbf{x}$ 는 모델링 오차에서 기인하는 파라미터 변분이고 \mathbf{f}_c 는 노이즈 등의 외부외란을 의미하며 다음과 같이 정합조건(Matching condition)이 만족된다고 가정한다.

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{A}_c &= \mathbf{b} \tilde{\mathbf{A}} & \tilde{\mathbf{A}}: \text{a row vector} \\ \mathbf{f}_c &= \mathbf{b} \tilde{f} & \tilde{f}: \text{a scalar} \end{aligned} \quad (2.3)$$

식(2.2)의 연속시간 시스템은 디지털 제어를 위해 다음 식과 같이 이산 시스템으로 변환할 수 있다. 식(4.24)의 정합조건이 만족되므로 다음과 같이 파라미터 변분과 외부외란을 입력항으로 환원할 수 있다.

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A} \mathbf{x}(k) + \mathbf{b} \left[\frac{1}{\cos \alpha} + \tilde{d}(k) \right] \quad (2.4)$$

여기서 $\tilde{d}(k) = \tilde{\mathbf{A}} \mathbf{x}(k) + \tilde{f}(k)$ 를 나타내는 포괄적인 외란이며 수식의 간소화를 위해 $\tilde{d}(k) = \mathbf{c} \mathbf{b} \tilde{d}(k)$ 라 하고 상위범위가 다음과 같이 제한되어 있다고 가정한다.

$$-D \leq \tilde{d}(k) \leq D, \quad k=0, 1, 2, \dots \quad (2.5)$$

무부하를 가정했으므로 위 식의 D는 외란의 범위를 나타낸다. 다음과 같이 스위칭 함수를 정의한다.

$$\mathbf{s}(k) = \mathbf{c} \mathbf{x}(k) = c_1 x_1(k) + x_2(k) \quad (2.6)$$

도달법칙방법(Reaching law method)을 등가적으로 이산화 하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\mathbf{s}(k+1) - \mathbf{s}(k) = -q T_s \mathbf{s}(k) - \epsilon T_s \text{sgn}[\mathbf{s}(k)] \quad (2.7)$$

단,

$$\epsilon > 0, \quad q > 0, \quad 1 - q T_s > 0$$

식(2.7)에 식(2.6)을 대입하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{s}(k+1) - \mathbf{s}(k) &= \mathbf{c} \mathbf{x}(k+1) - \mathbf{c} \mathbf{x}(k) \\ &= \mathbf{c} \mathbf{A} \mathbf{x}(k) + \mathbf{c} \mathbf{b} \left[\frac{1}{\cos \alpha(k)} + \tilde{d}(k) \right] + \mathbf{c} \mathbf{x}(k) \\ &= -q T_s \mathbf{s}(k) - \epsilon T_s \text{sgn}[\mathbf{s}(k)] \end{aligned} \quad (2.8)$$

위 식에서 외란 $\tilde{d}(k)$ 는 알지 못하는 값이므로 제어입력을 구하기 위해 일단 무시하고 풀면 다음과 같이 $\frac{1}{\cos \alpha(k)}$ 을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{\cos \alpha(k)} &= -(\mathbf{c} \mathbf{b})^{-1} (\mathbf{c} \mathbf{A} \mathbf{x}(k) \\ &\quad - (1 - q T_s) \mathbf{s}(k) + \epsilon T_s \text{sgn}[\mathbf{s}(k)]) \end{aligned} \quad (2.9)$$

2.4 시뮬레이션 및 고찰

본 절에서는 2.2절에서 기술한 전압제어형 능동전력필터의 여러 가지 성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 전류제어형 능동전력필터와 비교하여 설명한다. 또한 2.3절에서 제안된 이산 슬라이딩 모드제어기를 이용한 유효전력제어기의 성능을 검증한다. 컴퓨터 시뮬레이션은 전력전자분야에 많이 사용되는 시뮬레이션 프로그램인 PSIM을 사용하였다.

비 선형부하로 사용된 다이오드 정류기의 직류전압 출력단에는 저항부하 및 전동기를 이용한 유도성 부하를 부가하여 실험하였다.

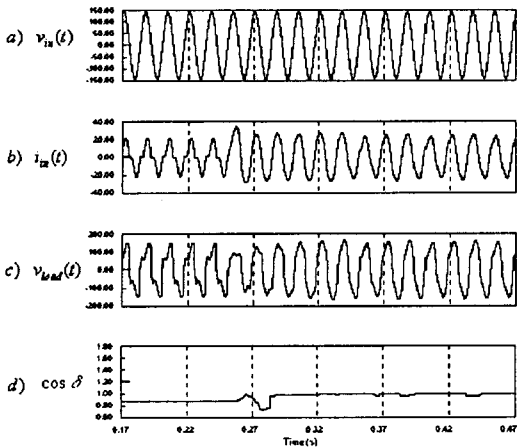


그림 3 전압제어형 능동전력필터의 출력파형

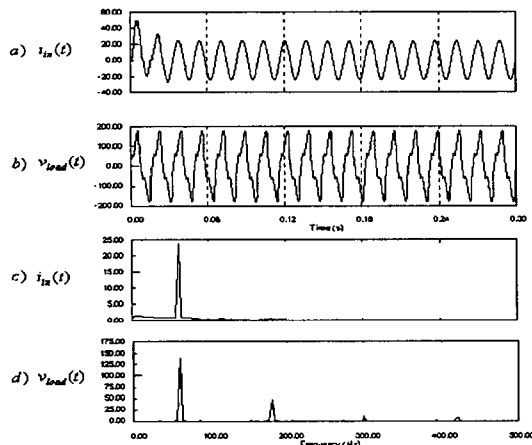


그림 4 전류제어형 능동전력필터의 출력파형과 주파수분석

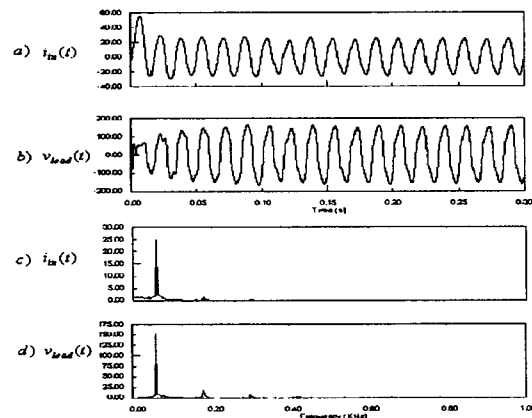


그림 5 전류제어형 능동전력필터의 출력파형과 주파수분석

그림 3은 제안된 전압제어형 능동전력필터가 동작함으로써 역률이 개선됨을 나타내고 있다. 능동전력필터는 0.25[msec]에서 동작을 개시한다. 전반적으로 능동전력필터의 동작과 더불어 전반적인 역률의 개선이 이루어진 것을 확인하였다.

그림 4는 전류제어형 능동전력필터의 출력파형과 주파수 분석이다. 위와 같이 그림 4 (c)에서 나타난 고조파 성분이 제거됨을 통해서 능동전력필터가 입력전류의 고조파 성분을 제거함을 알 수 있다. 그러나 (d)의 파형에서 나타내듯이 부하전압의 고조파는 저감되지 않았다. 이것은 전류제어형 능동전력필터가 전압에 포함된 고조파를 억제하지 못한다는 것을 알 수 있다.

그림 5는 전압제어형 능동전력필터의 출력파형과 주파수 분석이다. (a)에서 전압제어형 능동전력필터의 동작에 따라서 입력전류의 고조파가 크게 저감됨을 확인하였다. 그림 5(d)와 그림 4(d)를 비교한다면 전압고조파 저감의 입장에서는 전압제어형이 현저하게 성능우위를 점하고 있음을 확인할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 전압제어형 능동전력필터를 다루었다. 전력전자 소자의 사용이 급증함에 전력전자 소자의 스위칭이나 강제 전류로 인한 고조파 발생과 역률 저하의 유발 시킨다. 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 강한 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 배전시스템의 역률 조정기 등에도 적용되리라 사료된다.

(참 고 문 헌)

- [1] G.H. Choe and M.H. Park, "A new injection method for AC harmonic elimination by active power filter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol.35, No.1 pp.141-147, Feb.1988
- [2] S. Martinez, M. Castro, R. Antoranz and F. Aldana, "Off-line uninterruptible power supply with zero transfer time using integrated magnetics," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol.36, No.3, pp.441-445, Aug.1989.
- [3] Jinn-Chang Wu and Hurng-Liahng Jou, "A new UPS scheme provides harmonic suppression and input power factor correction," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 42, No.6, pp 629-635, Dec.1995.
- [4] Hurng-Liahng Jon, Kuen DerWu and Jinn-Chang Wu, "A new parallel processing UPS with the performance of harmonic suppression and reactive power compensation," *IEEE Proceedings*, pp.127-132. 1997.