

전압 및 전류고조파 동시 저감을 위한 APF 시스템

손진근 · 김병진 · 나채동 · 이성범
 *경원전문대학 전기제어시스템과 · *(주)현대중공업 기전연구소 · **동서울대학 전기정보제어과

The APF System to reduce both Voltage and Current Harmonics

JinGeun Shon · ByungJin Kim · ChaeDong Na · SungBum Lee
 *Kyungwon College · **HYUNDAI Heavy Industries Co., LTD. · **DONG SEOUL College

Abstract - A single phase voltage-controlled active power filter(APF) is introduced to improve power quality and to reduce harmonic generated from nonlinear loads. Real and reactive power control scheme was addressed using a new power circuit model. By analyzing the reactive power, a unit power factor control scheme was proposed. Simulation and experiment results using a nonlinear diode rectifier showed that the voltage-controlled APF, unlike the current-controlled APF, can reduce the voltage harmonics as well as current harmonics. Also the results showed that the input power factor was greatly improved.

1. 서 론

산업사회 및 정보화시대의 진전에 따라 각종 전력전자기기의 사용이 증가되고 대용량화되면서, 이들 설비의 악영향이라 할 수 있는 고조파의 영향이 단순히 내재하는 수준을 넘어 계통에 상당한 영향을 미치는 수준까지 증대되고 있어 이에 대한 관심이 증대되고 있다. 이들 기기에서 발생하는 고조파는 수용가내의 인근 기기에 장애를 유발할 뿐만 아니라, 전력공급설비에도 유출되어 동일계통에 접속된 다른 수용가에도 장애를 유발하고 있는 등 전기기기 및 설비시스템에 막대한 악영향을 끼치고 있다.

또한 전력전자기기 사용의 증대는 전원전압의 변동 및 무효전력을 증대시키고 역률저하 문제를 일으키게 되는데 이에 대한 종합적인 대책의 일환으로써 능동전력필터(이하, APF로 표기)시스템이 대두되고 있다. 이러한 APF에는 배전계통에 대한 접속의 형태에 따라 직렬형과 병렬형으로, 에너지의 저장방식에 따라 전압형과 전류형으로, 제어의 형태에 따라 전류제어형과 전압제어형으로 각각 나눌 수 있다.

본 논문에서는 APF의 에너지 저장부분에 캐패시터를 부착한 전압형 APF를 구성하고, 전원과 비선형 부하사이에 병렬로 APF를 연결하여 APF의 출력전압을 제어하는 방식의 전압제어형 APF를 제안하고자 한다. 이 제어방식은 APF의 출력전압을 정현적인 형태로 유지함으로써 전압 고조파와 전류 고조파를 동시에 저감하고, 무·유효전력의 제어에 의한 역률개선의 효과를 얻는 방식이기도 하며, 이는 입력전압의 변동에 민감한 부하의 보호시스템으로도 활용 가능하다는 장점이 있다[1-3].

제안된 전압형(소스)-전압제어형 APF는 추가적인 전압 소스의 제어에 의하여 전압 및 전류고조파를 동시에 보상할 수 있는 장점을 지니며, 전원전류의 관계식 도출에 의한 무효전력과 유효전력의 관계에 의해서 유·무효전

력을 제어할 수 있으며, 이의 관계에 따라 입력 역률을 개선하는 방식으로써, 시뮬레이션과 실험을 통하여 제안된 제어기법의 타당성을 입증하였다.

2. 전압 및 전류고조파의 동시 저감 APF

2.1 전압 및 전류고조파의 발생원

전력전자 응용기기의 사용이 날로 증가함에 따라서 전력계통내의 고조파전류가 증가되고, 또한 전력품질이 현저히 저하되고 있다. 이러한 고조파 전류는 전원으로부터 부하단까지의 임피던스에 의하여 전압강하를 일으키고 이 전압강하에 따라 비록 전원 전압파형이 순수 정현파라 할지라도 부하단의 전압 파형은 왜곡파가 된다. 이러한 전압 파형의 왜곡은 각종 계전기의 오작동, 정밀전자기기의 동작 불량, 기기 손상 및 과열의 원인이 되는 등 기기자체의 악영향 및 주변계통의 수변전설비에도 많은 영향을 끼치게 된다

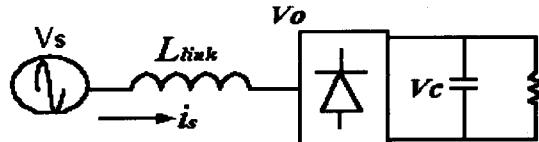


그림 1. 전압 및 전류고조파의 발생원

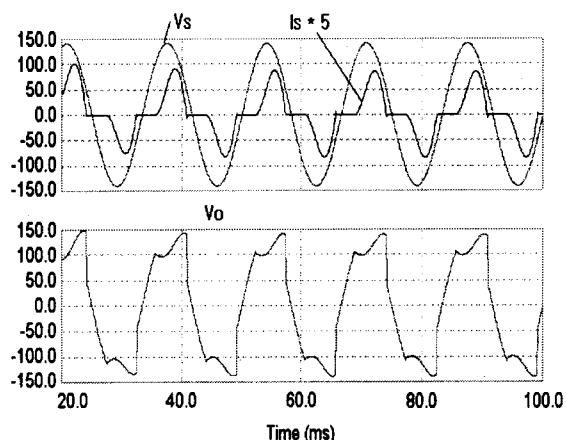


그림 2. 입력전압(V_s)에 대한 입력전류(I_s) 및
부하전압(V_o)의 파형왜곡(Distortion)

그림 1은 전압 및 전류고조파의 발생원인 일반적인 다이오드 정류기의 구성을 나타낸다. 입력 역률을 개선시

키기 위하여 링크인더터(L_{link})를, 직류전압(V_c)의 평활화를 위하여 직류 링크단에 캐패시터를 삽입한 회로이며, 그림 2는 그림1의 입력전압(V_s)에 대한 입력전류(I_s)와 부하전압(V_c)의 파형왜곡을 나타낸 그림이다. 이때의 입력전류는 전원전압이 캐패시터 양단에 부가된 전압에 비해 클 경우에 입력전류가 흐르므로 왜곡된 파형을 가질 뿐만 아니라 부하의 전압도 왜곡된 파형을 출력하게 된다. 이러한 왜곡파형은 순수 정현파형이 아니므로 고조파성분을 함유하게 되며, 전류고조파는 인근의 또 다른 계통에 연결되며, 전압고조파는 인근의 계통과 공진현상을 일으키는 근본적인 원인이 되므로 가능한 이들의 고조파를 동시에 저감할 수 있는 APF 시스템이 필요하게 된다.

2.2 전압형(소스)-전압제어형 APF의 구성

본 논문에서 설계된 전압제어형 단상 APF의 회로 구성은 그림 3과 같다. 전원과 APF의 출력사이에의 전압조절 및 인터페이스를 위한 링크인더터 L_{link} 를 추가시켰으며, 평활한 직류전압을 얻기 위한 직류링크 캐패시터 C_{dc} , 직류출력단의 전류변동을 막아주고 역률을 개선하기 위한 직류 링크인더터 L_{dc} 로 구성하였다. 이와 더불어 APF의 PWM 전압출력을 정현적인 파형으로 변환시키기 위하여 2차 수동필터(Output Filter)로 구성된 출력필터 L_c 과 C_c 를 추가하였다.

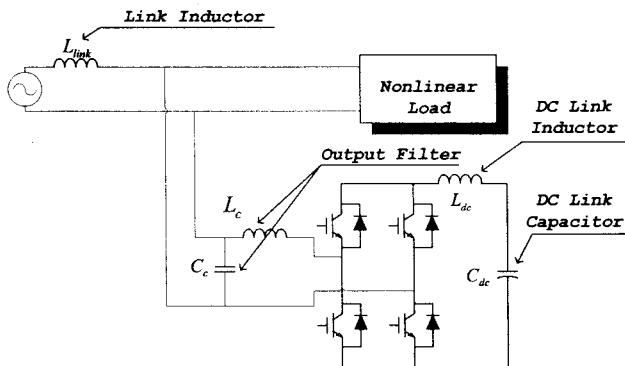


그림 3. 전압소스-전압제어형 APF의 회로구성

그림 3과 같은 회로구조에서의 가장 큰 특징은 입력전원과 APF사이에 링크인더터가 추가된 것이다. 이는 종래에 많이 사용되었던 전류제어형 APF와는 달리, 전원과 APF는 병렬로 연결된 형태이므로 만일 링크인더터가 없다면 전압제어가 불가능하므로 이는 두 전원사이에 인터페이스의 역할을 한다. 이러한 링크인더터의 설정은 APF의 출력에 대하여 제어범위와 응답속도를 결정하게 된다. 만약 링크인더터의 값이 작으면 APF 출력전압의 크기를 제어하는 범위가 줄어드는 문제점을 갖고, 반대로 링크인더터가 큰 경우에는 전압제어의 응답특성이 저하되는 단점을 갖는다.

이때의 전원전압 $v_s(t)$ 을 식 (1)과 같이 정현파로 가정하면, APF의 출력전압($v_c(t)$)을 식 (2)와 같이 정의하면 전원과 APF사이에 흐르는 전원전류($I_s(t)$)는 식(3)과 같이 표현할 수 있다. 따라서, 입력전류의 크기와 위상의 제어는 APF의 출력전압의 위상과 크기를 조절함으로써 입력전류를 제어할 수 있다. 또한 전원전압 및 입력전류의

관계식을 통하여 피상전력을 구하여 무효전력과 유효전력을 구할 수 있으며, 이의 관계를 이용하여 무효전력 및 유효전력을 수행 할 수 있다.

$$v_s(t) = V_s \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$v_c(t) = V_c \sin(\omega t - \alpha) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} i_s(t) &= \frac{1}{L_{link}} \int_0^t (v_s(t) - v_c(t)) dt \\ &= \frac{1}{\omega L_{link}} (V_c \cos(\omega t - \alpha) - V_s \cos(\omega t)) \\ &= I_s \sin(\omega t - \delta) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,

$$I_s = \frac{1}{\omega L_{link}} \sqrt{(V_c \sin(\alpha))^2 + (V_c \cos(\alpha) - V_s)^2}$$

$$\delta = \sin^{-1} \frac{V_c \cos(\alpha) - V_s}{\sqrt{(V_c \sin(\alpha))^2 + (V_c \cos(\alpha) - V_s)^2}}$$

그림 4는 제안된 전압제어형 APF의 제어기 전체 구성도이다. 이는 유효전력 제어기, 무효전력 제어기 그리고 파형개선 제어기로 구성되어 있다. 식 (3)의 관계에 의하여 구해진 무효전력과 유효전력의 제어는 다음의 과정을 거친다. 우선 무효전력제어기는 입력전압과 전류의 위상차이를 검출하여 공급해야할 무효전력의 크기를 결정한다. 결정된 무효전력의 크기에 따라서 APF의 출력전압의 크기를 조절함으로 무효전력제어를 수행한다.

또한 APF에 설치된 캐패시터(C_{dc})의 전압값을 이용하여 유효전력의 상태를 판측한다. 판측된 유효전력의 상태에 따라서 유효전력제어기는 능동전력필터의 위상제어(α)를 통하여 유효전력제어를 수행한다. 유효전력제어기와 무효전력제어기는 병렬로 위치하여 출력되어야 할 전압의 위상지령 α^* 과 크기지령 $|v_c^*|$ 을 각각 결정하여 지령전압파형을 발생한다.

APF의 출력전압은 임피던스의 불일치로 인하여 왜곡이 발생할 수 있다. 이런한 왜곡을 막기위해서 능동전력필터의 출력전압의 파형을 개선할 파형개선제어기를 설계하였다. 파형개선 제어기는 능동전력필터의 출력전압($v_c(t)$)과 능동전력필터 출력전압 지령값($v_c^*(t)$)의 오차를 비례 제어기가 보상하게 된다.

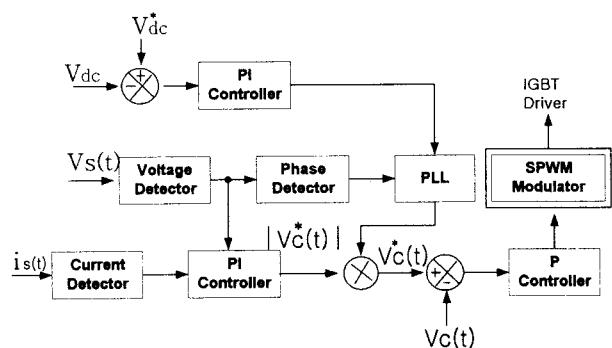


그림 4. APF의 전체 제어기 구성

3. 시뮬레이션 및 실험결과

그림 5는 그림1과 같이 비선형 부하인 다이오드 정류기와 병렬로 연결된 전류제어형 APF의 시뮬레이션 결과파형이다. 정현파 입력전압이 인가되는 조건에서, 그림 (b)의 입력전류가 그림(c)의 부하전류에 비하여 완전히 개선된 것에 비하여 그림(a)의 부하전압은 매우 왜곡되어 있어서 전압의 고조파 저감효과는 얻지 못하고 있음을 알 수 있다.

그림 6은 전압제어형 APF의 시뮬레이션 결과파형이다. 정현파 입력전압이 인가되는 조건에서, 그림 (a)의 부하전압 왜곡은 거의 저감됨을 확인 할 수 있고, 그림(b)의 입력전류는 그림(c)의 부하전류에 비하여 정현적인 모양을 갖는다. 즉 전압제어형은 전류제어형과 같이 입력전류 고조파 저감의 효과와 더불어 전압고조파 저감의 특성을 갖는다.

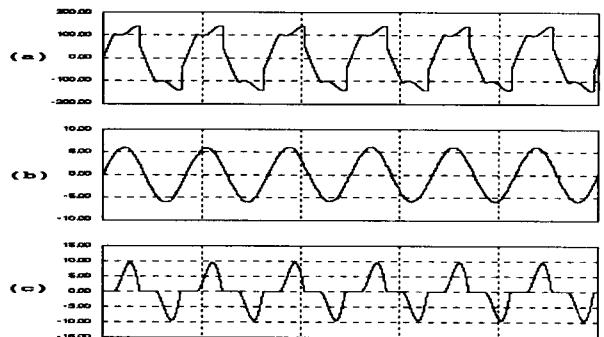


그림 5. 전류제어형 APF의 출력 파형
(a)부하전압 (b)입력전류 (c)부하전류

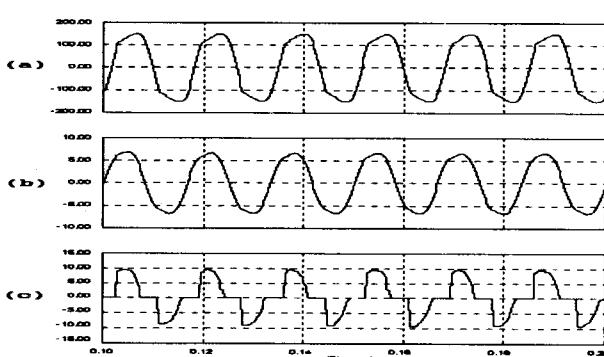


그림 6 전압제어형 APF의 출력 파형
(a)부하전압 (b)입력전류 (c)부하전류

그림 7은 전압제어형 APF의 입력전류와 입력전류의 주파수 분석을 보여주고 있다. (a)와 같이 입력전류는 고조파가 저감된 정현적인 형태를 취한다. 입력전류의 고조파 분석은 (b)와 같다. 제 3차과 5차 고조파가 많이 저감됨을 확인할 수 있고 따라서 THD도 5.8[%]로 개선됨을 확인할 수 있었다. 그림 8은 전압제어형 APF의 부하전압과 주파수분석을 나타낸다. 전압제어형 APF에서는 부하전압의 왜곡이 그림 (a)처럼 크게 개선됨을 확인할 수 있다. 이 파형의 주파수 분석결과에서, 제 3차 고조파는 기본파의 3[%] 미만으로 저감됨을 확인하였고 THD 역시 4[%] 미만으로 크게 개선됨을 확인할 수 있다.

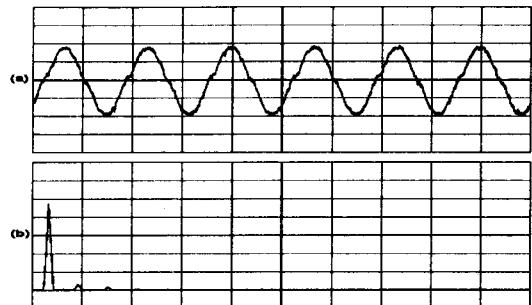


그림 7. 전압제어형 능동전력필터의 (a)입력전 (4A/div, 10ms/div) (b)입력전류의 주파수 분석(1.2A/div, 0.2kHz/div)

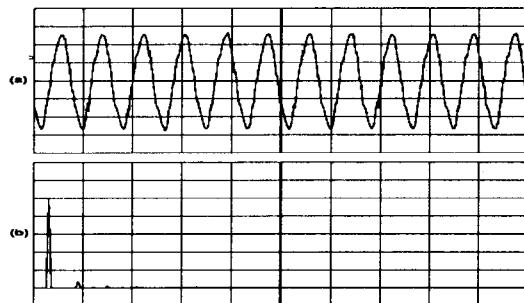


그림 8. 전압제어형 능동전력필터의 (a)부하전압 (20v/div, 20ms/div) (b)부하전압의 주파수 분석(10v/div, 0.2kHz/div)

5. 결 론

본 연구에서는 배전계통에서의 고조파 및 무효전력의 저감, 역률의 개선 등 전력의 품질을 항상시키기 위한 종합적인 대책의 일환이 전압제어형 APF에 관하여 논하였다. 기존의 전류제어형 APF는 전원측 입력 전류가 정현파의 전류파형을 추종하도록 제어하는 방식으로써, 속응 고조파 전류보상의 장점이 있지만, 정확한 전류기준 신호의 발생 및 파라미터의 설정이 어렵다는 단점이 있다. 이러한 단점에 비하여 전압제어형 APF는 입력전압을 정현적인 형태로 유지함으로써 고조파 저감과 역률개선의 효과를 얻는 방식으로써, 이는 고조파의 전류뿐만 아니라 고조파 전압의 저감과 역률개선의 효과까지도 기대할 수 있는 장점이 있음을 실험과 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Jin-Geun Shon, K. Shinohara, and K. Yamamoto, 'The Improvement of Power Quality for Nonlinear Loads by Voltage Controlled Active Power Filter', in Conf. Rec. JIAS2002 Annu.Meeting, No.73, pp.361-364. August 2002.
- [2] 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.
- [3] 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.